

Schirmung niederfrequenter magnetischer Felder an Raumöffnungen

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

vorgelegt von
Christoph Leitner

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmautzer

Co-Betreuer
Dipl.-Ing. Wolfgang Emmer

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 - 7551
Telefax: (+43 316) 873 - 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Februar - 2017



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 14.02.2017

Christoph Leitner

Kurzfassung

Liegen Räumlichkeiten, in denen besonders empfindliche elektronische Geräte betrieben werden müssen, in der Nähe von Hochspannungsleitungen, so wird immer häufiger eine wirksame Abschirmung gegen die auftretenden elektrischen und magnetischen Felder gefordert. Aus Gründen des Arbeitnehmerschutzes müssen bei Dauerarbeitsplätzen Fenster vorhanden sein, durch die die elektromagnetischen Felder aber nahezu ungehindert eindringen können. Somit wird die Wirkung der Abschirmung stark beeinträchtigt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen effektive Maßnahmen zur Reduktion des Durchgriffs elektromagnetischer Felder durch Fenster und somit zur Verbesserung der Raumschirmung untersucht werden, wobei durch die angewendeten Maßnahmen die Transparenz der Fenster nur wenig beeinträchtigt werden soll. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, bietet sich für passive Abschirmungsmaßnahmen speziell geformtes dünnes Blech aus Aluminium besonders gut an. Kombiniert mit einer aktiven Schirmung des Fensters, bestehend aus einer 3-Leiter-Kompensation, ist es so möglich eine sehr gute Raumschirmung zu erlangen.

Schlüsselwörter: *Schirmung, niederfrequentes Magnetfeld, FEM, EMV, Fenster, Nanobeschichtung*

Abstract

If rooms with sensitive electronic devices are located near high-voltage lines, effective shielding against the occurring electric and magnetic fields is increasingly required. For reasons of worker protection, permanent workstations must have windows through which the electromagnetic fields can enter almost unimpeded. Thus the effect of the shielding is severely impaired. In this work, effective measures to reduce the ingress of electromagnetic fields through windows and thus to improve the magnetic shielding are to be investigated. The visibility shouldn't suffer, by the measures taken. As the investigations have shown, specially formed thin aluminum sheet is particularly suitable for passive shielding. Combined with an active shielding of the window, consisting of a 3-wire compensation, it is possible to obtain a very good magnetic shielding for the room.

Keywords: *shielding, low-frequency magnetic field, FEM, EMC, EMF, window, nanocoated glass*

Inhalt

<i>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</i>	<i>I</i>
<i>Kurzfassung</i>	<i>II</i>
<i>Abstract</i>	<i>II</i>
<i>Inhalt</i>	<i>III</i>
<i>Abkürzungen und Begriffserklärung</i>	<i>V</i>
<i>Verwendete Formelzeichen</i>	<i>VI</i>
<i>1 Einleitung</i>	<i>1</i>
<i>2 Grundlagen</i>	<i>3</i>
<i>2.1 Entstehung niederfrequenter magnetischer Felder und ihre Wirkung auf Mensch und Technik</i>	<i>3</i>
<i>2.2 Berechnung des magnetischen Feldes von Leitern</i>	<i>5</i>
<i>2.3 Passive Schirmwirkung</i>	<i>6</i>
3.2.1 Hochpermeabler Schirm (magnetostatischer Schirm)	6
3.2.2 Elektrodynamischer Schirm	9
<i>2.4 Schirmdämpfung - Schirmfaktor</i>	<i>14</i>
<i>2.5 Aktive Schirmwirkung</i>	<i>16</i>
<i>2.6 ANSYS Maxwell - Finite Elemente Methode (FEM)</i>	<i>17</i>
<i>3 Modellbildung zur Schirmung von Räumen</i>	<i>21</i>
<i>3.1 Modellentwicklung</i>	<i>21</i>
<i>3.2 Modellbildung in ANSYS Maxwell 3D</i>	<i>22</i>
3.2.1 Variation der Region	23
3.2.2 Vergleich mit Biot-Savart	25
3.2.3 Variation der Leiterlänge l	26
<i>4 Analyse der Schirmmechanismen mittels FEM</i>	<i>28</i>
<i>4.1 Passive Schirmung</i>	<i>28</i>
4.1.1 Geschlossener Raum	28
4.1.2 Raum mit Fensteröffnung	34

4.2	Problematik Fensteröffnung - Feldanalyse	40
4.3	Aktive Schirmung der Fensteröffnung	41
4.3.1	Ein Leiter	41
4.3.2	Zwei Leiter	47
4.3.3	Drei Leiter	49
4.3.4	Schirmung mittels vieler Kompensationsleiter	52
4.3.5	Schirmung durch dünne leitfähige Silberschichten	55
4.3.6	Vergleich der aktiven Schirmvarianten	58
5	<i>Auslegung des aktiven Schirms mit drei Kompensationsleitern</i>	61
5.1	Verbesserung der Schirmwirkung	61
5.2	Wirksamkeit der Raumschirmung	67
5.3	Berechnungsaufwand einer Simulation	69
6	<i>Zusammenfassung & Ausblick</i>	71
7	<i>Literatur</i>	73

Abkürzungen und Begriffserklärung

- **EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit):** Beschäftigt sich mit der gegenseitigen Beeinflussung von technischen Geräten durch elektrische und elektromagnetische Effekte.
- **FEM (Finite Elemente Methode):** Ist eine numerische Lösungsmethode, mit deren Hilfe, durch Zerlegung von Körpern in einzelne Elemente, Differentialgleichungssysteme gelöst werden können. (siehe 2.6)
- **ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing-Radiation Protection):** Ist eine unabhängige und internationale Kommission, welche sich mit dem Schutz vor nichtionisierender Strahlung beschäftigt. Sie ist von der WHO und der EU offiziell anerkannt.
- **Magnetische Flussdichte \mathbf{B} :** Ist eine vektorielle Größe, welche die Flächendichte des magnetischen Flusses angibt. Sie wird in Tesla [T] angegeben. Im Zuge dieser Arbeit werden dafür noch folgende Synonyme verwendet: Magnetfeld, B-Feld, Feld.
- **Permeabilität μ :** Gibt die Durchlässigkeit von Materie für das Magnetfeld an und wird in [Vs/Am] angegeben.
- **Schirmdämpfung a_s :** Ist ein Maß für die Qualität eines Schirmes und beschreibt seine Wirksamkeit. a_s ist dimensionslos, wird aber gerne in dem Pegelmaß dB angegeben. (siehe 2.4)
- **Schirmfaktor Q :** Gibt die Wirksamkeit des Schirmes mit dem Verhältnis mit/ohne Schirm an.
- **WHO (World Health Organisation):** Ist eine Organisation der Vereinten Nationen und setzt sich für das weltweite Gesundheitswesen ein.

Verwendete Formelzeichen

Nachfolgende Formelzeichen werden im Zuge dieser Arbeit verwendet. Vektorielle Größen werden mit einem Pfeil dargestellt. Einheiten im SI-System.

$a_0 \dots a_9$	Knotenpunkte
a_s	Schirmdämpfung
B	magnetische Flussdichte
H	magnetische Feldstärke
I	Strom
J	Stromdichte
dl	infinitesimales Stromfadenelement
Q	Schirmfaktor
r	Abstand, bzw. Ortsvektor an dem H ermittelt wird
μ_0	magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl

1 Einleitung

Die anhaltende Urbanisierung der Gesellschaft zieht immer mehr Menschen in die Ballungszentren. Mehr Menschen bedeutet auch ein höherer Energieverbrauch. Die Politik und Industrie ist versucht, durch sparsamere und effizientere Verbraucher, dem entgegen zu steuern. Trotz den vielen Bemühungen, den Energieverbrauch zu senken, nimmt der Stromverbrauch aber kontinuierlich zu. Dieser Strombedarf muss gedeckt werden, wodurch in den Versorgungsleitungen der Stromfluss folglich steigt. Alle vom Strom durchflossenen Leitungen erzeugen ein, von der Stromstärke abhängiges Magnetfeld. Einhergehend mit dem Anstieg des Stromes in den Versorgungsleitungen, kommt es dadurch auch zur Steigerung des Magnetfeldes in deren Umgebung.

Durch das fortschreitende Wachstum der Bevölkerung in den Städten wird die Baudichte in den Ballungszentren zunehmend erhöht. Dies führt dazu, dass elektrische Versorgungsleitungen und nutzbarer Raum immer dichter aneinander geraten. Magnetfelder können nur sehr schwer und aufwändig abgeschirmt werden, weshalb sie sich auch in Gebäuden ausbreiten können. Ohne es zu merken, sind wir dadurch ständig von magnetischen Feldern umgeben.

Diese sind in den Lebensbereichen des Menschen (Arbeitsplatz, Wohnbereich, Krankenhäuser) aber häufig unerwünscht, auch wenn sie bei Einhaltung der Grenzwerte als ungefährlich gelten. Neben dem Menschen sind aber auch die technischen, vor allem elektronische Geräte, den Magnetfeldern ausgesetzt. Die immer modernere Technik, wird zusehends sensibler. Werden hochempfindliche Geräte einem Magnetfeld ausgesetzt, so kann es zur Beeinträchtigung oder gar zum Ausfall der Funktion kommen. Durch diese zunehmende Bedeutung rückt die Thematik rund um die magnetischen Felder, immer mehr in den Fokus der Elektrotechnik.

Um Räumlichkeiten für spezielle Anforderungen (z.B. OP-Saal, empfindliche medizinische Geräte, ...) nutzen zu können, darf die Belastung durch magnetische Felder nicht zu groß sein. Oft können die Störquellen nicht eliminiert werden, wodurch eine Abhilfe lediglich durch Schirmungsmaßnahmen erfolgen kann.



Abbildung 1: Bsp. für die Elektrische Energieversorgung - Vom Kraftwerk zum Verbraucher[1]

Effektive Raumschirmung lässt sich nur umsetzen, wenn der ganze Raum konsequent lückenlos abgeschirmt wird. Architektur, Gesetzgeber und Auftraggeber fordern aber immer öfter den Wunsch nach Tageslicht in Räumlichkeiten, wo eine magnetische Schirmung für die Einhaltung gewisser Grenzwerte notwendig ist. Dafür sind die herkömmlichen Schirmungsmethoden (passiv, klassische aktive Kompensation) aber in vielen Fällen nicht mehr ausreichend. Durch Raumöffnungen, wie zum Beispiel Fenster und Türen, kann das Magnetfeld nahezu ungehindert eindringen.

Es wird daher nach einer alternativen Lösung gesucht, mit welcher das Magnetfeld trotz Raumöffnungen in einem unproblematischen Bereich gehalten werden kann. Als Ziel wird eine ganzheitliche Lösung angestrebt, welche das magnetische Feld am Eindringen in den Raum hindert. Das Ergebnis sollte daher ein Schirmungsmodell sein, das in der Praxis relativ einfach umsetzbar und dabei wirtschaftlich tragbar ist.

2 Grundlagen

2.1 Entstehung niederfrequenter magnetischer Felder und ihre Wirkung auf Mensch und Technik

Elektrische und magnetische Felder umgeben uns in allen Lebenslagen. Ob durch natürliche Erscheinungen (Erdmagnetfeld, atmosphärische Entladungen, kosmische Strahlung, ...) oder durch Menschenhand hervorgerufen (Mobilfunk, Satellit, Energieversorgung, ...), treten sie in unterschiedlicher Frequenz, Form und Intensität auf.

Wird ein elektrischer Leiter von einem Strom durchflossen, verursacht dieser gemäß den Maxwell'schen Gleichungen ein um den Leiter rotierendes Magnetfeld. Ein Gleichstrom verursacht ein magnetisches Gleichfeld. Ist die Ursache ein Wechselstrom, so stellt sich ein magnetisches Wechselfeld ein. Von 0,1 Hz bis zu einer Frequenz von etwa 30 kHz (ist in der Literatur nicht eindeutig festgelegt) spricht man von niederfrequenten bzw. quasistationären Feldern, darüber von elektromagnetischen Feldern und Wellen. Im niederfrequenten Bereich und vor allem bei der elektrischen Energieversorgung, welche mit 50 Hz arbeitet, können das magnetische sowie das elektrische Feld voneinander unabhängig betrachtet werden.

Einhergehend mit der elektrischen Versorgung der Infrastruktur, welche zum Teil mit erheblichen Spannungen und Strömen arbeitet, kann es im Bereich der elektrischen Anlagen zur Beeinflussung, Störungen und Zerstörungen von elektrotechnischen Geräten durch elektrische und magnetische Felder kommen. Immer modernere und empfindlichere Technikstellen Errichter und Betreiber von Anlagen, sowie Hersteller und Anwender von Betriebsmitteln, vor neue Herausforderungen, um einen störungsfreien Betrieb der Geräte zu gewährleisten.

Neben der recht gut erforschten Beeinflussung der Technik ist die Wirkung auf Mensch und Tier, selbst nach jahrelanger Forschung und tausenden Studien, immer noch sehr umstritten. Manche Studien zeigen eine krebsfördernde Wirkung von

magnetischen Feldern oder eine Elektrosensibilität, andere widerlegen diese jedoch klar. Auf Basis von Empfehlungen der ICNIRP existieren jedoch Grenzen für elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz bei deren Einhaltung Menschen gegen akute Wirkungen elektromagnetischer Felder geschützt sind. In Österreich werden für die Allgemeinbevölkerung diese Empfehlungen in der Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850 bzw. in Zukunft in der Richtlinie R 23 des ÖVE umgesetzt. Schutzmaßnahmen für die berufliche Exposition finden sich in der Verordnung elektromagnetischer Felder VEMF aus dem Jahr 2016. So liegt zum Beispiel für 50 Hz die Grenze (der Referenzwert) für die magnetische Flussdichte von 50-Hertz-Anlagen bei 200 μT , für 16,7-Hertz-Bahnanlagen liegt der Referenzwert bei 300 μT . Wie man in der Abbildung 2 gut erkennen kann, liegt man bei Freileitungen unter dem erlaubten Referenzwert.

Generell sind Anlagenbetreiber hinsichtlich einer positiven Darstellung in der Öffentlichkeit bestrebt, solange es wirtschaftlich vertretbar ist, die Emissionen der Anlagen möglichst gering zu halten. [1] [2]

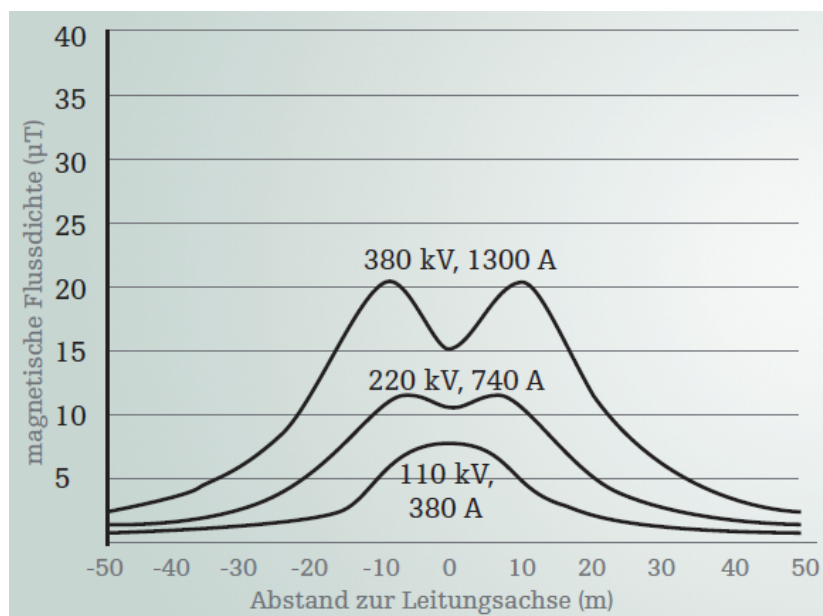


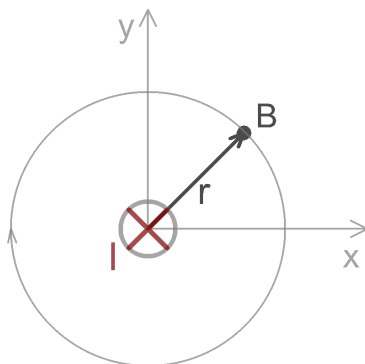
Abbildung 2: Verteilung der magnetischen Flussdichte unter Hochspannungsfreileitungen [1]

2.2 Berechnung des magnetischen Feldes von Leitern

Um die magnetische Flussdichte in der Umgebung eines einfachen stromdurchflossenen Leiters abschätzen zu können, wird das Gesetz von Biot-Savart für einen Linienleiter angewendet:

$$\vec{dH} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

Dieses approximiert den Leiter durch einen Linienleiter und setzt eine Homogenität des Raumes voraus. Wird der Leiter zusätzlich als unendlich lang angenommen und Luft als Medium gewählt, so kann das Gesetz von Biot-Savart auf nachfolgende Formel(2) vereinfacht werden. Mit dem Zusammenhang $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$ gelangt man von der magnetischen Feldstärke unter Berücksichtigung des Mediums, in dem sich das Feld ausbreitet, auf die magnetische Flussdichte \mathbf{B} . Somit ist das \mathbf{B} -Feld nur mehr vom Abstand r und von der Stromstärke I abhängig. Die magnetische Flussdichte verhält sich somit reziprok zum Abstand r . [3]



$$B(r) = \mu_0 \frac{I}{2\pi * r} \quad (2)$$

Abbildung 3: Stromdurchflossener Leiter

Vereinfachte Formel nach Biot-Savart

2.3 Passive Schirmwirkung

Mit zunehmender Verbreitung von magnetischen Feldern stellt sich mehr und mehr die Frage, wie man die Intensität dieser Felder in einem bestimmten Bereich des Raumes reduzieren kann. Die Schirmung von magnetischen Feldern ist kein neues Thema. Die Abschirmung des Magnetfelds ist oft zwingend notwendig, um ein einwandfreies Funktionieren von Anlagen, Geräten und Systemen gewährleisten zu können. Grundsätzlich wird die Schirmung verwendet, um ein Feld von einer Störquelle beim Austritt aus dem Raum zu schwächen bzw. umzulenken (z.B. Trafostation) oder um ein Feld von außen im Inneren eines Raumes/Gehäuses zu dämpfen (z.B. Leittechnik, empfindliche Messgeräte). Die Störquelle kann also innerhalb oder außerhalb des abgeschirmten Raumes liegen. Manchmal ist der Effekt auch in beide Richtungen erwünscht (z.B. Rechenzentren).

Passive Schirmung bedeutet, dass unter Ausnützung eines physikalischen Effekts, nur durch Vorhandensein eines Schirmmaterials, das Magnetfeld in einem bestimmten Bereich eines Raumes verringert werden kann.

Bekanntlicherweise können Magnetfelder in unterschiedlicher Intensität, Form und Frequenz auftreten. Je nach Feldtyp muss, bedingt durch deren spezifische Eigenschaften, der richtige Schirmungsmechanismus ausgewählt werden. [4]

2.3.1 Hochpermeabler Schirm (magnetostatischer Schirm)

Mechanismus

Die Schirmung des Magnetfelds funktioniert nicht so einfach wie beim elektrischen Feld, wo mittels einer geschlossenen Hülle (Faraday'scher Käfig) durch Ladungsverschiebung das Feld geschwächt werden kann. Grund dafür ist das nicht Vorhandensein von magnetischen Quellen, welche durch Verschiebung das Magnetfeld kompensieren könnten.

Der Schirm aus hochpermeablem Werkstoff macht sich hingegen die Brechung der magnetischen Feldlinien an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen

Materialien zu Nutze, siehe Abbildung 4. Indem ein Material mit magnetisch hoher Leitfähigkeit (Permeabilität) in das Magnetfeld eingebracht wird, bündeln sich durch diese Brechung die magnetischen Feldlinien im Inneren des Materials. Außerhalb des Materials wird das Feld reduziert. Je größer der Unterschied zwischen den Permeabilitäten μ_r ist, desto deutlicher zeichnet sich dieser Effekt ab (Abbildung 5). Tritt eine Sättigung aufgrund zu hoher Feldstärken ein, so reduziert sich die Wirkung.

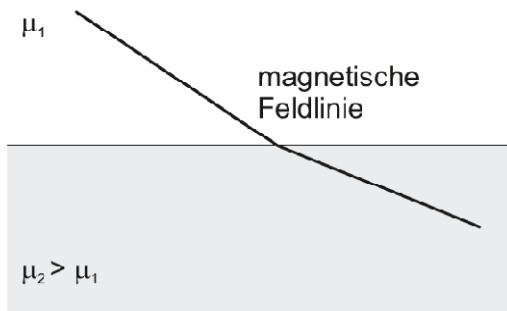


Abbildung 4: Brechung der Feldlinien an Grenzflächen[4]

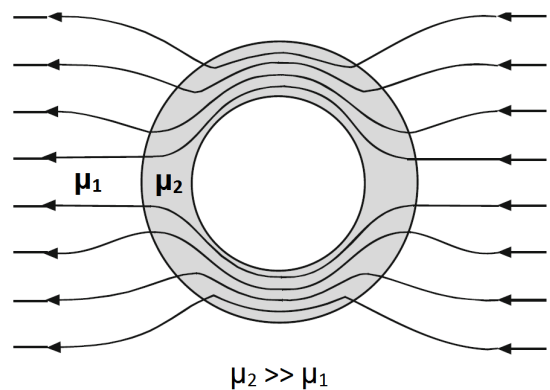


Abbildung 5: Schirmwirkung einer dickwandigen hochpermeablen Hohlkugel [5]

Der hochpermeable Schirm wird hauptsächlich zur Schirmwirkung bei magnetischen Gleichfeldern eingesetzt, aber er wirkt bis zu einem gewissen Grad auch bei veränderlichen Feldern (quasistationäre Felder). Mit zunehmender Frequenz sinkt jedoch die Polarisierbarkeit des Materials und dadurch auch die Permeabilität sowie die Schirmwirkung. [5]

Materialien

Beim hochpermeablen Schirm, welcher, wie schon beschrieben, hauptsächlich bei der Schirmung von magnetischen Gleichfeldern Anwendung findet, spielt die Materialstärke neben hoher Permeabilität die wichtigste Rolle. Die einzigen Metalle, welche eine Permeabilität $\mu_r > 1$ besitzen, sind Eisen, Nickel und Kobalt. Durch sehr große Permeabilitäten ($\mu_r > 100$) zeichnen sich die sogenannten ferromagnetischen

Stoffe aus, zu welchen weiches Eisen, weichmagnetischer Nickel, sowie verschiedene eisen-, nickel- und kobalthaltige Legierungen zählen. Der bekannteste Vertreter unter diesen Legierungen ist das sogenannte Mu-Metall (ca. 80% Nickel, ca. 15% Eisen, Rest aus Kupfer und Molybdän). Wie in untenstehender Tabelle gut ersichtlich ist, hat es im Gegensatz zu Reineisen doch eine deutlich höhere Permeabilitätszahl und somit auch ein besseres Schirmungsverhalten. [4]

Tabelle 1: Magnetostatische Eigenschaften einiger ferromagnetischer Stoffe
(Herstellerangaben Vacuumschmelze, Hanau)[4]

Material	Relative Anfangspermeabilität μ_A	Maximale Permeabilität μ_{\max}	Koerzitivfeldstärke H_{koerz}	Sättigungsflussdichte B_{Satt}	Spezifische Leitfähigkeit σ
	-	-	A/m	T	Ωm
Reineisen	2.000	40.000	6	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^6$
Mu-Metall	6.000	250.000	1,5	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^6$

Wichtig zu erwähnen ist bei den ferromagnetischen Schirmmaterialien, dass ihre Permeabilität keiner Linearität gehorcht, sondern von der Frequenz und dem Grad der Magnetisierung abhängt. Die relative Permeabilität errechnet sich wie folgt:

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (3)$$

In Abbildung 6 ist dieser Magnetisierungsverlauf (Hysterese) dargestellt. Er entsteht durch das Umpolen des Magnetfeldes. Die Feldstärke welche benötigt wird um eine magnetische Flussdichte von Null zu erreichen, wird Koerzitivfeldstärke genannt. Dieses Hystereseverhalten der ferromagnetischen Stoffe ist bei der Schirmung von niederfrequenten Feldern unerwünscht. Deshalb soll die Koerzitivfeldstärke möglichst gering gehalten werden, eine hohe Anfangspermeabilität ist hingegen erwünscht. Auch die Art der Weiterverarbeitung und Temperatur spielen für die

Permeabilitätszahl keine unwesentliche Rolle. Eine Sättigung der Materialien tritt nur bei sehr hohen Feldstärken auf, wie in Abbildung 6 sichtbar ist. [4]

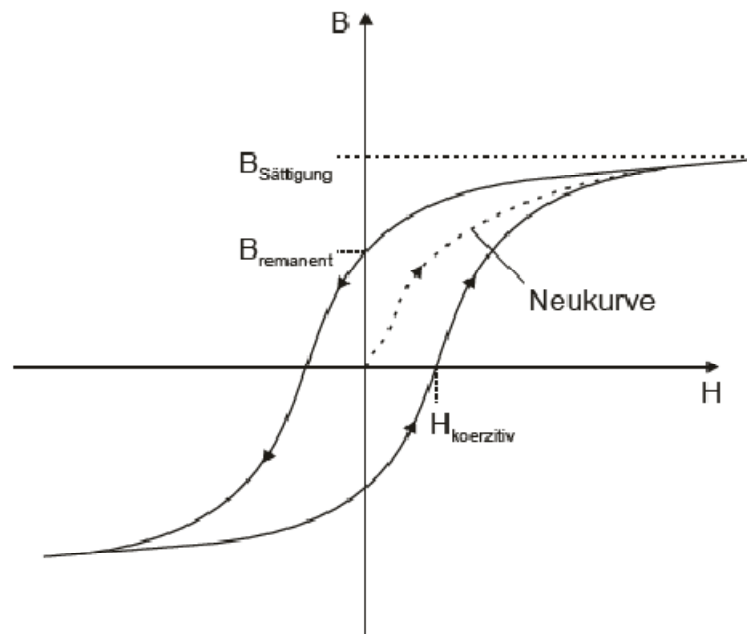


Abbildung 6: Typische Hysteresekurve eines Ferromagnetikums [4]

2.3.2 Elektrodynamischer Schirm

Mechanismus

Bringt man jetzt einen massiven Block aus elektrisch leitfähigem Material (siehe Abbildung 8) in ein sich zeitlich veränderliches Magnetfeld ein, so wird nach dem Induktionsgesetz innerhalb des Blocks ein wirbelförmiges elektrisches Feld induziert (um die magnetischen Flusslinien herum). Auf Grund der Leitfähigkeit des Materials bilden sich durch dieses elektrische Feld im Block ringförmige Ströme aus, sogenannte Wirbelströme (siehe Abbildung 7). Diese Ströme wiederum verursachen, bedingt durch das Durchflutungsgesetz, ein Magnetfeld, welches dem ursprünglichen Feld entgegengerichtet ist. Es kommt zur Überlagerung des ursprünglichen äußeren Feldes mit dem Rückwirkungsfeld. Die Folge ist ein resultierendes Feld mit geringerer magnetischer Flussdichte im Inneren des Blocks. [6] [4]

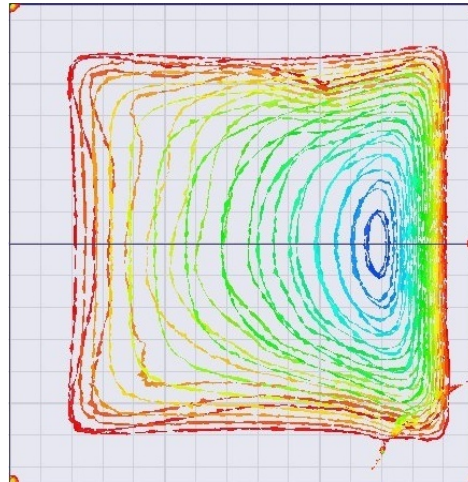


Abbildung 7: Stromdichte J in hohlem Aluminiumwürfel (oberes Schirmblech), Quelle des Magnetfeldes befindet sich in einer Entfernung von 5 m rechts vom Würfels

Der elektrodynamische Schirm ist stark von der Frequenz und vom Material abhängig. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, liefern im Mittelpunkt des Blocks alle Stromwirbel einen Beitrag zum Rückwirkungsfeld. Das bedeutet dieser Bereich ist schon bei niedrigen Frequenzen feldfrei (beide Felder heben sich gegenseitig auf). Mit zunehmender Frequenz wird, bedingt durch die Änderung des magnetischen Flusses, die Induktion verstärkt, wodurch schon eine geringe Fläche genügt um ausreichend große Wirbelströme zu erzeugen. Die Folge ist, dass sowohl Stromdichte, als auch die magnetische Feldstärke zum Rand hin zunehmen (Stromverdrängung). Ist die Frequenz groß genug, fließt der Strom nur mehr auf der Außenhaut (man spricht vom Skineffekt).

Aufgrund dieser Stromverdrängung ist das Innere des Blocks strom- und feldfrei, weshalb Bleche ausreichen um denselben Effekt zu erzielen. Mit wachsender Frequenz würde die Schirmwirkung gegen unendlich steigen, sie ist aber begrenzt durch die Verschiebungsströme, welche bei höheren Frequenzen (elektromagnetische Wellen) auftreten. [4] [5]

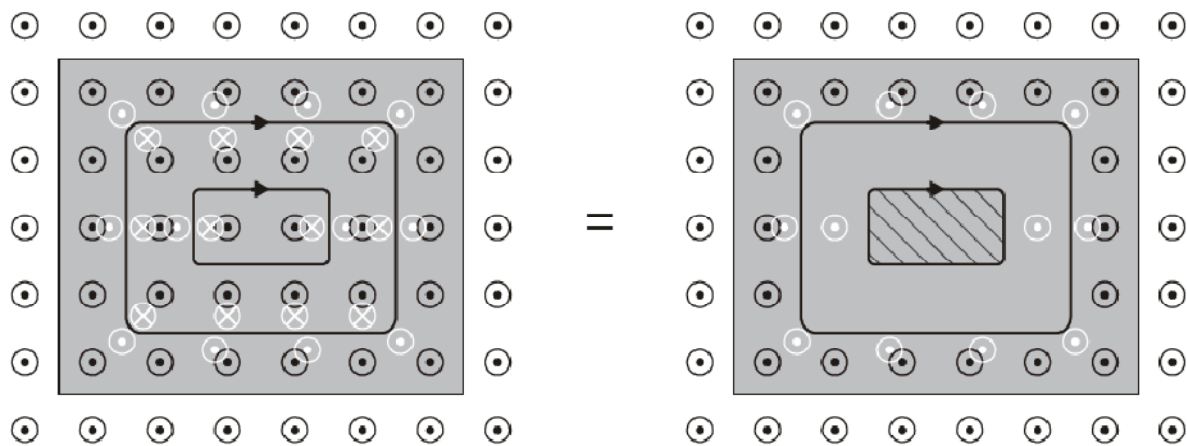


Abbildung 8: Elektrisch leitfähiger Block im quasistationären Magnetfeld. Links: äußeres Magnetfeld (schwarz) und Rückwirkungsfeld (weiß). Rechts: Überlagerung (resultierendes Feld) [4]

Bei Gleichfeldern hat der rein elektrodynamische Schirm keine Wirkung, da aufgrund des Induktionsgesetzes keine Ströme induziert werden.

Neben der Frequenz ist die Wirkung des Schirms auch von der Leitfähigkeit des Materials und den Schirmabmessungen abhängig. Trotz gleicher induzierter Feldstärke steigen durch eine bessere Leitfähigkeit die Schirmströme an, was zu einer Verbesserung der Dämpfung führt. Großflächigere Schirme besitzen bei gleichen Materialeigenschaften, durch Erzeugung eines stärkeren Gegenfeldes, höhere Schirmdämpfungswerte (siehe 2.4) als kleinflächigere. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wirkung des elektrodynamischen Schirms grundsätzlich von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Frequenz
- Wandstärke
- Leitfähigkeit
- Permeabilität
- Schirmgeometrie

Bei der Ausführung des Schirms ist darauf zu achten, dass Fugen (z.B. an Ecken, zwischen Blechen) bestmöglich vermieden werden. Reine Potentialausgleichsverbindungen sind nicht ausreichend. Die Bleche müssen auf der gesamten Länge verbunden werden, um eine Störung bei der Ausbildung der Wirbelströme zu vermeiden. Auch das Oberflächenverhalten der Materialien und das Ausbilden von Korrosionsschichten (elektrische Schlitze) müssen bei der Konstruktion und Auswahl der Materialien berücksichtigt werden.[5]

Materialien

Die klassischen Schirmmaterialien beim elektrodynamischen Schirm sind Metalle. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass es pauschal kein optimales Schirmmaterial gibt. Für jede Schirmanwendung müssen Vor- und Nachteile der Materialien gegenseitig abgewogen werden. Auch die Standardpotentiale dürfen bei Materialpaarungen nicht außer Acht gelassen werden.

Oft im Einsatz ist **Eisen bzw. Stahl**, welches in den unterschiedlichsten Erscheinungsformen Anwendung findet. Weiches Eisen eignet sich, wie in Kapitel 2.3.1 schon erläutert -aufgrund seiner hohen Permeabilität -neben der elektrodynamischen Schirmwirkung, besonders für magnetische Gleichfelder. Beim elektrodynamischen Schirm kommt oft Stahl zum Einsatz (unlegiert bzw. als hochlegierter rostfreier Edelstahl). Dabei hängt die Permeabilität, sowie die elektrische Leitfähigkeit, von der Verarbeitung bzw. dem Kohlenstoffanteil ab.

Unlegierter Stahl ist leicht zu verarbeiten, zu verschweißen und im Vergleich relativ günstig. Problematisch ist hingegen die geringe Korrosionsbeständigkeit, welche zu einer isolierenden Schicht führt. Auch geringere Leitfähigkeit und das höhere Gewicht können zu den Nachteilen gezählt werden (siehe Tabelle 2). Hochlegierter rostfreier Edelstahl hingegen ist durch seine Legierung mit Chrom quasi rostfrei, dies hat aber auch seinen Preis. Neben dem hohen Preis ist Edelstahl schwieriger zu verarbeiten und hat eine geringere Permeabilität als unlegierter Stahl.[4]

Tabelle 2: Materialparameter verschiedener Metalle [7][4]

Material	Permeabilität μ_r	Spez. Leitfähigkeit σ	Dichte ρ	Standardpotential E^0
	-	S/m	kg/dm ³	V
Aluminium	1	$35,7 \cdot 10^6$	2,7	-1,67
Stahl/Eisen	200 - 2000	$10,0 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^6$	7,85 - 7,87	-0,44
Edelstahl	1,02	$1,43 \cdot 10^6$	7,9	0,6 - 0,9
Kupfer	1	$57,1 \cdot 10^6$	8,96	0,34
Messing	1	$13,3 \cdot 10^6$	8,5	0,05 - 0,26
Silber	1	$62,5 \cdot 10^6$	10,49	0,8

Besonders etabliert hat sich als Schirmmaterial **Aluminium**, welches sich durch geringes Gewicht, einfache Bearbeitung und sehr hohe elektrische Leitfähigkeit auszeichnet. Es ist unmagnetisch, daher für niedrigste Frequenzen und Gleichfelder nicht geeignet und im Vergleich zu Stahl schwieriger zu schweißen. Auch bei der Festigkeit kann es nicht ganz mithalten. Zudem bildet sich bei Aluminium eine dünne Oxidschicht aus, welche das Material zwar vor Korrosion schützt, aber bei der Verbindung zwischen Teilen Probleme bereiten kann.

Ein weiteres anzutreffendes Material ist **Kupfer**. Bei höchster Leitfähigkeit bildet dieses Material auch keine Oxidschichten aus. Durch seine geringe Festigkeit ist es für selbsttragende Konstruktionen nicht geeignet, wird aber oft im Nachhinein zum Auskleiden von Räumen/Gehäusen verwendet. Bei größeren Anwendungen ist der Aufwand jedoch nicht mehr akzeptabel, zumal Kupfer sehr teuer ist.

Auch **Messing** (Kupfer-Zink-Legierung) wird wegen seiner Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit zum Teil eingesetzt. Findet aber wegen des hohen Gewichts und Preises eher bei kleinen Dreh- und Verbindungsstücken Verwendung.

Neben den Metallen gibt es noch **leitende Kunststoffe/Klebstoffe** welche zu Schirmungszwecken benutzt werden können. Diese Kunststoffschirme haben ihr Einsatzgebiet aber eher im Hochfrequenzbereich angesiedelt. [4]

2.4 Schirmdämpfung - Schirmfaktor

Um die Wirksamkeit eines Schirmes charakterisieren und mit anderen Schirmen vergleichen zu können, bedarf es der Festlegung von Definitionen:

- B_0 - magnetische Flussdichte **ohne** Schirm (vorher)
- B_1 - magnetische Flussdichte **mit** Schirm (nachher)

Mit dem Schirmfaktor und der Schirmdämpfung gibt es hier zwei unterschiedliche Größen.

Schirmfaktor Q

Der Schirmfaktor Q ist das Verhältnis von gedämpfter zu ungedämpfter magnetischer Flussdichte. Dieser Faktor ist durch die Phasenverschiebung meist komplex, wird aber in der Praxis größtenteils mit dem Betrag angegeben.

$$Q = \frac{B_1}{B_0} \quad (4)$$

Schirmdämpfung a_s

So wie es z.B. in der Nachrichtentechnik üblich ist Dämpfungen durch Pegelmaße auszudrücken, liegt es nahe, auch die Dämpfung eines Magnetfeldes durch einen Schirm, mittels Pegel zu beschreiben. Der Vorteil ist der große dynamische Bereich, welcher mit "handlichen" Zahlen dargestellt werden kann. Auch kann die Division sowie Multiplikation verschiedener Pegel durch Differenz- und Summenbildung erfolgen.

$$a_s = 20 \log \frac{|B_0|}{|B_1|} = 20 \log \left| \frac{1}{Q} \right| \quad (5)$$

Die Schirmdämpfung wird, wie bei Pegelmaßen üblich, in dB angegeben und beschreibt nur das Verhältnis zwischen den Beträgen.

Schirmfaktor und Schirmdämpfung gelten nur für einen Raumpunkt und können daher im Raum stark variieren. Deshalb ist bei der Betrachtung von diesen Werten immer höchste Vorsicht geboten.

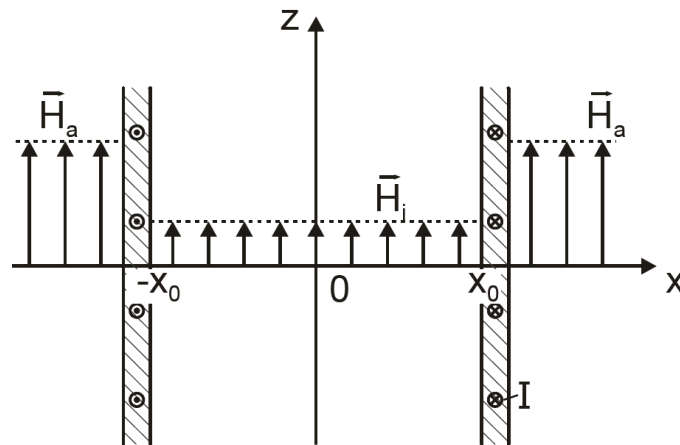


Abbildung 9: Großflächiger Parallelplattenschirm mit Abstand $2x_0$, Platten in großer Entfernung miteinander elektrisch verbunden [4]

In Tabelle 3 sind die Schirmdämpfungswerte verschiedener Metalle bei unterschiedlichen Materialstärken angeführt. Dabei handelt es sich um einen Parallelplattenschirm, mit dem Abstand $2x_0$, wo das Feld in einem Punkt in der Mitte gemessen wird. Die beiden Platten sind in großem Abstand ($y \gg x_0$) miteinander verbunden. Es ist zu erkennen, dass bei sehr geringen Wandabständen die hochpermeablen Werkstoffe eine bessere Schirmdämpfung besitzen. Mit größerem Abstand sind die gut leitenden Metalle jedoch deutlich effizienter was die notwendige Materialstärke betrifft. Grundsätzlich gilt beim elektrodynamischen Schirm, je größer der Wandabstand, desto höher ist die Dämpfung. Durch die größeren Schirmabmessungen kann eine größere Gegeninduktivität erzeugt werden, welche dem äußeren Magnetfeld entgegenwirkt. [4]

Tabelle 3: Mindest-Materialstärke d [mm] eines elektrodynamischen Parallelplattenschirms mit Wandabstand $2x_0$ bei 50 Hz [4]

Schirm-dämpfung	Wand-abstand $2x_0$	Alumi-nium	Kupfer	Eisen	Stahl	Edel-stahl
dB	m	-	-	-	-	-
20	0,01	41,9	30,9	11,6	10,8	75,8
	0,1	14,1	8,8	8,6	7,2	32
	1	1,4	0,9	5,6	3,5	3,6
	10	0,14	0,09	2,6	0,5	0,36
40	0,01	69,3	52,6	14,5	14,5	119,6
	0,1	41,9	30,9	11,6	10,8	75,8
	1	14,4	8,8	8,6	7,2	32,0
	10	1,4	0,9	5,6	3,5	3,6

2.5 Aktive Schirmwirkung

Beim aktiven Schirm wird durch einen Stromfluss ein Magnetfeld erzeugt, welches dem äußeren Feld entgegenwirkt und somit im Idealfall zur Feldauslöschung führt. Liegt ein Feld \mathbf{H}_0 vor, so ist die Erzeugung eines Gegenfeldes \mathbf{H}_g nötig, um das äußere Feld innerhalb eines bestimmten Bereichs kompensieren zu können. Dabei spielt die Höhe und Aufteilung des Stromes eine wichtige Rolle. Durch Einstellung des Stromes, was in der Praxis meist mittels einer gekoppelten Regelung umgesetzt wird, kann eine Verringerung des Magnetfeldes vorgenommen werden. Das äußere Feld gibt vor, welcher Strom in den Spulen eingespeist werden muss, um in einem bestimmten Bereich der Spulenanordnung ein Feldminimum zu erreichen. Um das Feld außerhalb der Spulenanordnung können, je nach Anordnung, auch Feldverstärkungen entstehen. Zwingend notwendig für eine effektive aktive Schirmung ist die Kenntnis über Form und Frequenz des Störfeldes. [4]

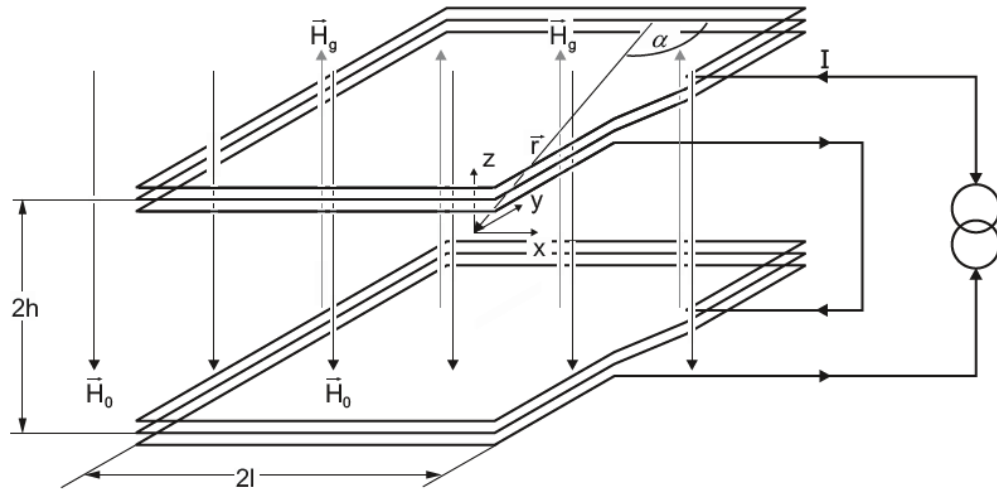


Abbildung 10: Prinzip eines aktiven Schirms mittels Spulen zur Erzeugung eines Gegenfelds[4]

2.6 ANSYS Maxwell - Finite Elemente Methode (FEM)

ANSYS ist eine sehr umfangreiche Finite-Elemente-Software, mit welcher Problemstellungen in vielen Bereichen der Physik (Strömungsmechanik, Strukturmechanik, Multiphysik und Systemsimulation, Elektromagnetik sowie Temperaturfelder) simuliert werden können. Im Zuge dieser Arbeit wird auf das Softwarepaket ANSYS Maxwell 3D zurückgegriffen. Maxwell 3D nutzt die Finite-Elemente-Methode um Elektrische-, Magnetostatische-, Transiente- und Wirbelstromproblemstellungen lösen zu können.

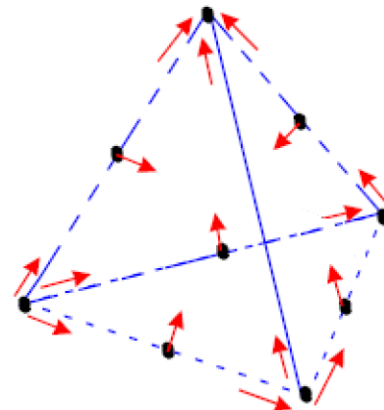


Abbildung 11: Tetraeder mit 10 Berechnungspunkten

Bei der FEM wird die zu simulierende Geometrie in viele einfache Teile zerlegt, sogenannte finite Elemente. Bei 2D-Anwendungen sind es Dreiecke, bei 3D Tetraeder (4-seitige Pyramide). Dadurch entsteht ein ganzes zusammenhängendes Gitternetz von Tetraedern, das sogenannte Mesh. Das Feld wird nun in jedem Element durch eine quadratische Gleichung 2. Ordnung, siehe Formel (6), angenähert (Basisfunktion). Dazu ist es nötig die Feldgrößen für alle Ecken und Kanten der Elemente zu berechnen, siehe Abbildung 11. Mit dieser Basisfunktion wird das Feld nun in allen 10 Punkten jedes Tetraeders berechnet:

$$H_x(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 \quad (6)$$

Alle anderen Größen werden aus diesen Feldlösungen bestimmt. Nachdem die Tetraeder definiert sind, werden die finiten Elemente in eine große, spärlich besetzte Matrix geschrieben:

$$[S][H] = [J] \quad (7)$$

Diese Matrix kann dann durch spezielle Verfahren für lineare Gleichungssysteme, wie z.B. das Gaußsche Eliminationsverfahren, gelöst werden. Da die Lösung aber nur eine Approximation darstellt, müssen die Abweichungen noch minimiert werden. Dies erfolgt mittels einer Schleifenberechnung, womit eine akzeptable Fehlabweichung erreicht werden soll. Dazu wird unter anderem die 3. Maxwell'sche Gleichung verwendet, welche die Quellenfreiheit des Magnetfeldes bestimmt:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

Aus der sich daraus ergebenden Lösung wird ein Fehlerterm ermittelt:

$$\operatorname{div} \mathbf{B}_{\text{solution}} = \text{err} \quad (9)$$

Die durch diese Fehlerterme, welche im ganzen Lösungsvolumen berechnet werden, erzeugte Energie wird mit der Gesamtenergie verglichen:

$$\text{percent error energy} = \frac{\text{error energy}}{\text{total energy}} \times 100\% \quad (10)$$

Diese Berechnung erfolgt solange, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird, oder die Anzahl der max. Schleifendurchläufe überschritten ist. Beides kann durch den Benutzer eingestellt werden.

Das Mesh wird dadurch automatisch, bei jedem Schleifendurchlauf, in gewissen Bereichen verfeinert, z.B. in Gebieten mit hoher Feldstärke oder bei Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit das Mesh manuell anzupassen. [8]

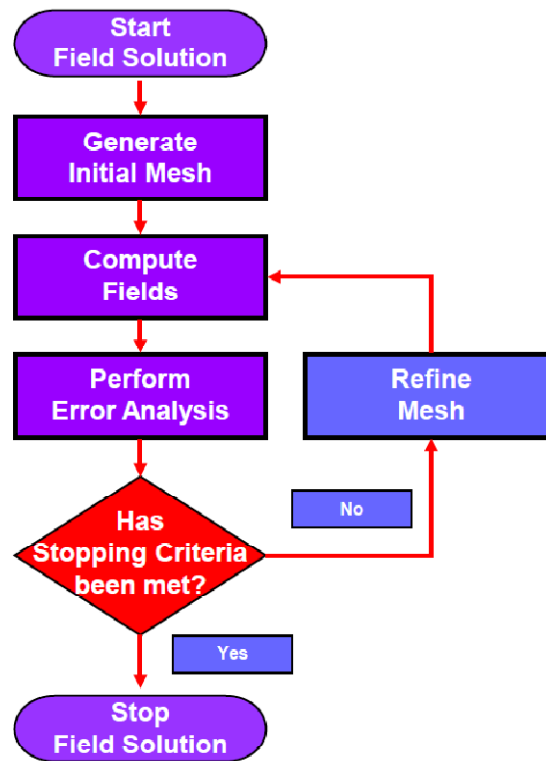


Abbildung 12: Adaptiver Verfeinerungsprozess des Mesh [8]

Zusätzlich zum Mesh ist es noch sehr wichtig, dass die richtigen Randbedingungen festgelegt werden, damit die Software das Feld auch korrekt berechnen kann. Dazu gehören die Parameter für den eingestellten Strom bzw. die Spannung (Excitations), die Einstellungen für die verwendeten Materialien, sowie die Parameter für den Rand und die Grenzflächen (Boundary Conditions).

Für die Boundary Conditions werden im Zuge dieser Arbeit folgende verwendet:

- Natural boundary: Für die Grenzen zwischen den Objekten. Das bedeutet, dass das H-Feld über die Grenze hinweg stetig ist.
- Neumann boundary: Die Neumann'sche Randbedingung gibt an, dass das H-Feld tangential zur Grenzfläche ist und somit der magnetische Fluss sie nicht passieren kann.
- Insulating: Bedeutet, dass leitende Teile ideal isolierend sind und kein Strom austritt. [8]

3 Modellbildung zur Schirmung von Räumen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Möglichkeiten zur Schirmung von Räumen erläutert. Die vergleichsweise einfachere und effektivere Methode zur Schirmung eines ganzen Raumes stellt der passive Schirm dar. Mittels des passiven Schirms können so die energietechnischen Frequenzen sehr gut abgeschwächt werden. Es sollen, anhand eines einfachen aber aussagekräftigen Modells, die unterschiedlichen Schirmmaterialien miteinander verglichen und in weiterer Folge eine Lösung für die Problematik von Fenstern und sonstigen Öffnungen im Raum gefunden werden. Für die analytische Berechnung solcher Magnetfelder ist die Lösung von zahlreichen Differentialgleichungen, basierend auf den Maxwell-Gleichungen notwendig. Weiters ist es nur sinnvoll eine analytische Berechnung durchzuführen, wenn bekannte Symmetrien und homogene Materialien vorliegen. Dadurch, dass dieses Gleichungssystem schon bei recht einfachen Berechnungen sehr komplex wird, kann man sich der Simulation mittels Finite-Elemente-Programmen behelfen, z.B. ANSYS Maxwell (siehe Kapitel 2.6). Diese führen eine Diskretisierung der Geometrie durch und können auch inhomogene Materialien berücksichtigen.

3.1 Modellentwicklung

Für die Simulation sollte ein Modell gefunden werden, das der Praxis sehr nahe kommt, aber durch seine Details und Größe nicht zu komplex wird. Die Problematik dieser Simulation besteht darin, dass die Größe des gesamten simulierten Bereichs schnell ein Ausmaß von weit mehr als 10 m annimmt, aber sich die entscheidenden Vorgänge im bzw. wenig außerhalb des Blechs, also im μm -Bereich abspielen. Da Rechenleistung nur begrenzt zur Verfügung steht, musste so ein Modell gefunden werden, welches eine annehmbare Rechenleistung/Rechenzeit beansprucht, aber für die spätere Aussagekraft wenig Einbußen hat.

Es wird dementsprechend ein Raum mit $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$ gewählt, dieser soll eine passive Schirmung aus Blech erhalten. Im Abstand a vom Raum wird ein Leiter der Länge l

mit einem Querschnitt von 240 mm^2 aus Aluminium platziert, welcher von einem Strom durchflossen wird. Dieser Leiter soll die Störquelle darstellen, bzw. das in weiterer Folge zu schirmende Magnetfeld verursachen. Abbildung 13 stellt das Grundmodell dar, welches im Zuge dieser Arbeit noch verändert bzw. ergänzt wird.

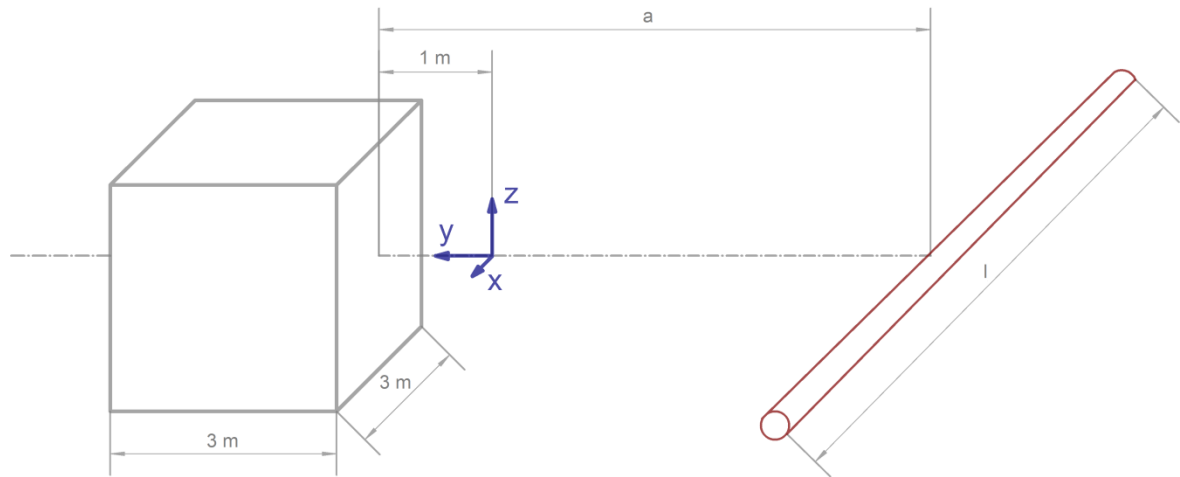


Abbildung 13: Grundmodell der Simulation

3.2 Modellbildung in ANSYS Maxwell 3D

Die Software bietet verschiedene Lösungsarten (Solution Types), um magnetische Problemstellungen zu lösen. Der für diese Arbeit wohl beste Solution Type ist "Eddy Current". Dieser zeichnet sich durch die Lösung von veränderlichen sinusförmigen Magnetfeldern bei verschiedenen Frequenzen aus, berücksichtigt Verschiebungsströme und eignet sich besonders gut für induzierte Felder und den Skin-Effekt.

Vorerst wird der stromdurchflossene Leiter allein betrachtet. Durch verschiedene Variationen der Simulationsparameter bzw. Abmessungen soll herausgefunden werden, welche Änderungen einen großen Einfluss auf den Verlauf des Magnetfeldes haben.

3.2.1 Variation der Region

Um ein Modell lösen zu können, muss eine Region definiert werden. Eine Region ist im Prinzip das äußerste Objekt, was alle anderen Objekte beinhaltet. Sie wird im Programm mittels Prozent definiert und gibt an, wieviel Platz zwischen dem Modell und dem Rand der Simulation gelassen werden soll. Die Prozent beziehen sich auf die Ausmaße des zu simulierenden Modells in die jeweilige Richtung (X-, Y-, Z-Achse). Sie ändert sich automatisch mit der Größe des Modells. Bekanntlicherweise braucht ein Leiter eine Hin- und Rückleitung. Würde man aber bei diesem Modell (Abbildung 14) eine klassische Leiterschleife verwenden, so würde auf Grund der kleinen Ausmaße des Modells die Rückleitung einen viel zu großen Einfluss auf die Simulation haben. Um in ANSYS einen Leiter definieren zu können, bei welchem der Strom auf der einen Seite eingespeist wird, und auf der anderen Seite abfließt, müssen die beiden Enden des Leiters die Region berühren. Das heißt in der X-Achse ist die Region mit 0 % angegeben und hat so die gleichen Ausmaße wie die gewählte Länge des Leiters.

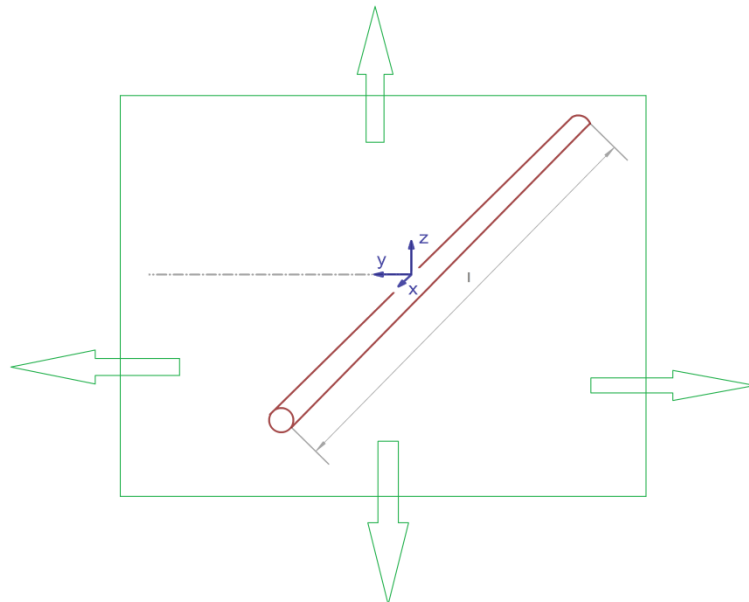


Abbildung 14: Variation der Region

Mit der Variation der Region soll nun herausgefunden werden, ab welcher Ausdehnung die Größe der Region keinen markanten Einfluss mehr auf die Simulation hat. Dazu wird im Abstand a vom Leiter (Abbildung 14) das Magnetfeld bei unterschiedlich großer Region berechnet. Folgende Parameter werden zusätzlich gewählt:

- $I = 500 \text{ A} / 50 \text{ Hz}$
- Leiterlänge: $l = 10 \text{ m}$

In Abbildung 15 sieht man das Magnetfeld, aufgetragen über dem Abstand zum Leiter, bei unterschiedlicher großer Region.

Es gilt, je größer der Simulationsbereich ist, desto genauer wird das Ergebnis. Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, ändert sich das Magnetfeld bei kleiner Region noch sehr stark. Ab einer Dimension von ca. 200 % ist die Änderung nur mehr gering.

Ähnliche Ergebnisse erhält man auch für die Aufpunktsgerten in X- und Z-Richtung, sowie für die Y-Richtung bei unterschiedlichen Höhen.

Wie bereits weiter oben schon erwähnt, ist die Größe des Modells eng mit dem Rechenaufwand verknüpft, weshalb hier ein vertretbarer Kompromiss gefunden werden muss. Es wird für zukünftige Simulationen eine Größe der Region von 250 % festgelegt. Diese sollte für eine akzeptable Genauigkeit ausreichen.

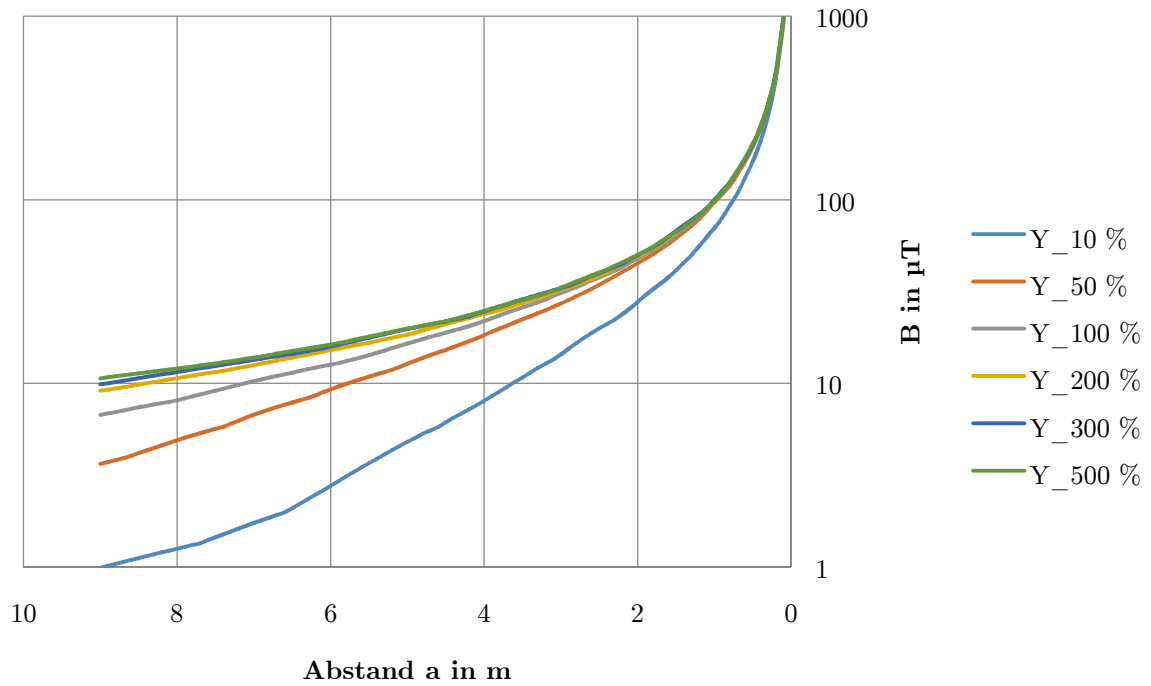


Abbildung 15: Magnetfeld bei unterschiedlicher Region

3.2.2 Vergleich mit Biot-Savart

Um ein Gefühl für die Genauigkeit der Simulation zu bekommen, wird das Modell zusätzlich mit dem Gesetz von Biot-Savart (siehe Kapitel 2.2) berechnet. Wie schon bei der vorigen Simulation, wird auch hier die magnetische Flussdichte entlang der Y-Achse berechnet. Der Abstand zum Leiter wird von 0 bis 10 m variiert:

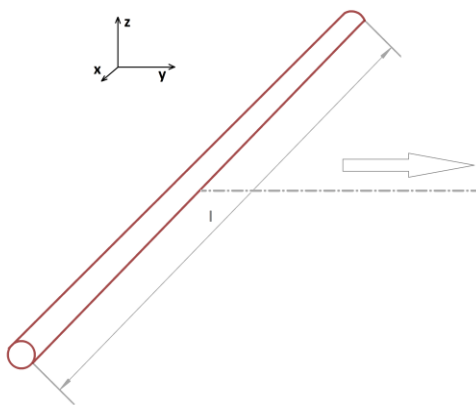


Abbildung 16: Variation des Abstandes

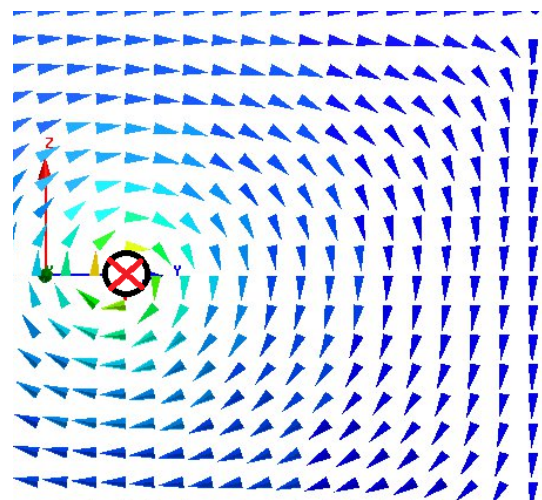


Abbildung 17: Vektorielle Darstellung des Magnetfeldes

In Abbildung 17 ist das resultierende Magnetfeld des stromdurchflossenen Leiters dargestellt. Die Feldlinien verlaufen aufgrund der Homogenität kreisförmig um den Leiter und nähern sich dem Rand tangential an (Neumann'sche Randbedingung).

Im untenstehenden Diagramm ist jetzt, neben der Kurve aus der Simulation (Y_mitte), auch die mit Biot-Savart berechnete Kurve dargestellt. Auf den ersten paar Metern sind die beiden Kurven nahezu ident. Wie man aber anhand der Abweichung in Prozent gut erkennen kann, nimmt die Differenz mit größerem Abstand zu. Grund dafür dürfte die Genauigkeit des Mesh's sein, welche mit größerem Abstand zu den Objekten in der Simulation abnimmt.

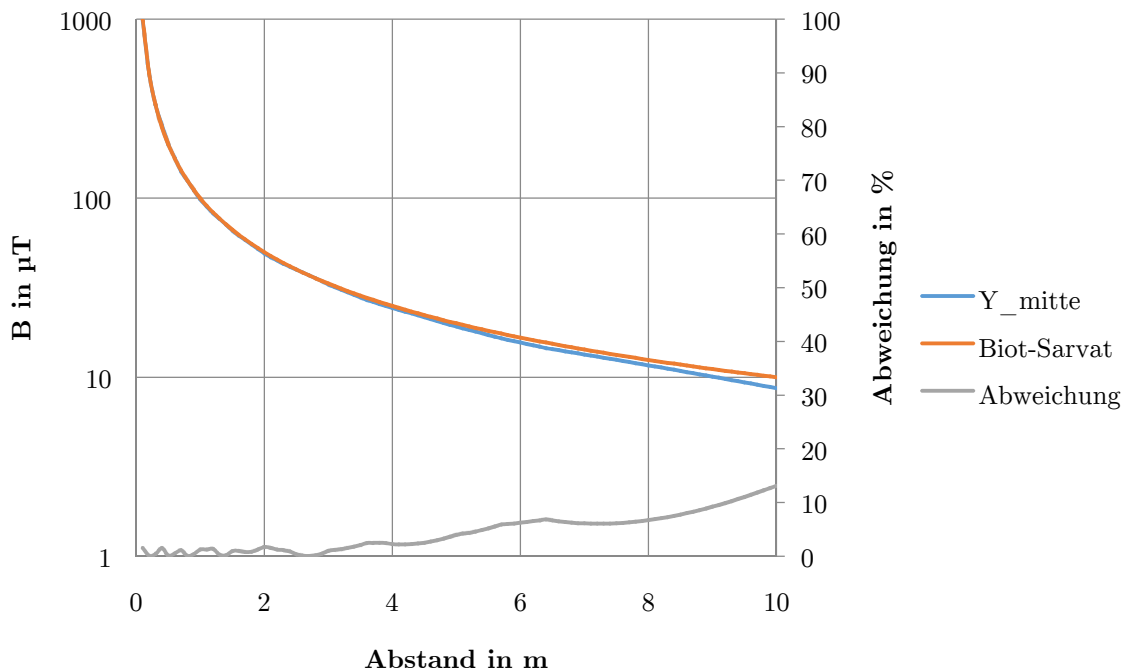


Abbildung 18: Vergleich mit Biot-Savart

3.2.3 Variation der Leiterlänge l

Der stromdurchflossene Leiter besteht, wie schon erwähnt, aus Aluminium und besitzt einen Querschnitt von 240 mm^2 . Wegen der Kompaktheit der Simulation, soll herausgefunden werden, inwiefern sich die Länge l des Leiters auf das Ergebnis auswirkt. Es wird erneut das Magnetfeld betrachtet, während die Länge des Leiters

variiert wird. Abbildung 19 zeigt die Verläufe des Magnetfeldes bei Leiterlängen von 5 m, 10 m und 20 m entlang der Y-Achse (siehe Abbildung 16).

Große Differenzen sind nicht zu erkennen. Die Abweichung zwischen 5 m und 20 m beträgt max. 2,5% liegt aber meistens unter einem Prozent. Auch bei Verschiebung der Aufpunktgeraden um 1,5 m entlang der X-Achse ist kein erheblicher Unterschied feststellbar. Simulationen auf der X- und Z-Achse in 5 m Entfernung vom Leiter weisen ein ähnliches Verhalten auf. Es kann gezeigt werden, dass die Länge des Leiters in dem simulierten Bereich keinen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Aufgrund der Tatsache, dass die Region genau dieselbe X-Ausdehnung hat wie der Leiter und der zu simulierende Raum 3 m lang ist, wird für den Leiter in nachfolgenden Simulationen eine Länge von 10 m gewählt. Damit ist ein ausreichender Seitenabstand zum Raum gewährleistet. Bei 5 m wäre der Seitenabstand zwischen Raum und Region nur mehr ein Meter, wodurch die Randeffekte nicht mehr vernachlässigt werden könnten.

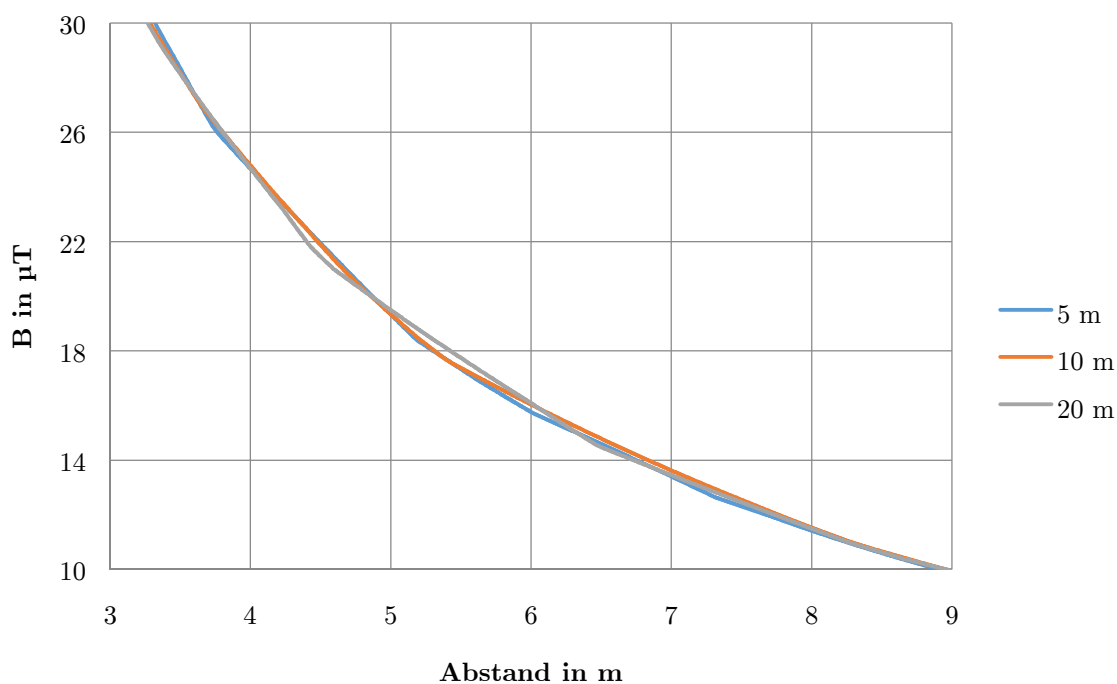


Abbildung 19: Magnetfeld bei unterschiedlicher Leiterlänge

4 Analyse der Schirmmechanismen mittels FEM

4.1 Passive Schirmung

Wie bereits in 3.1 erwähnt, wird zur grundsätzlichen Schirmung dieses Raumes der passive Schirm mittels Metallen verwendet. Dazu wird einerseits die Schirmwirkung eines komplett geschlossenen Raumes und in weiterer Folge die Veränderung der Schirmwirkung, durch Einfügen einer Öffnung im Raum, in Form eines Fenster, untersucht. Es wird sowohl der hochpermeable, als auch der elektrodynamische Schirm auf deren Wirkung analysiert und miteinander verglichen. Dafür werden drei unterschiedliche Metalle verwendet:

- Aluminium
- Eisen
- Mu-Metall

4.1.1 Geschlossener Raum

Der Raum soll mittels Schirmmaterial rundum mit Blechen verkleidet werden, sodass keine Lücken mehr vorhanden sind. Der Störfeldverursacher (stromdurchflossener Leiter) wird in einem Abstand von 5 m angeordnet und mit einem Strom von 500A und 50 Hz gespeist. Anhand dieses Modells werden nun die unterschiedlichen Materialien mit verschiedener Blechstärke untereinander auf ihre Schirmwirkung verglichen. Weiters wird noch die Höhe des Stromes, sowie der Leiterabstand variiert.

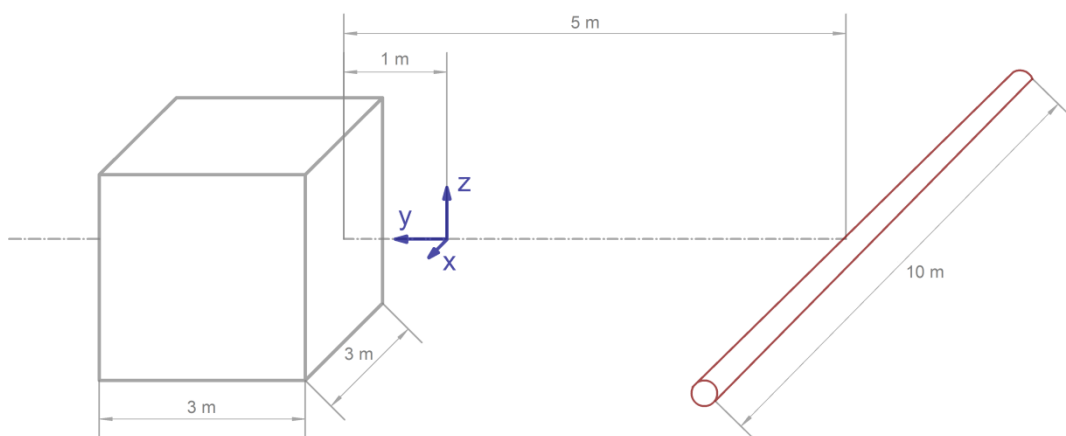


Abbildung 20: Simulationsmodell - Geschlossener Raum

Variation des Schirmmaterials

Der Vergleich der drei verschiedenen Schirmmaterialien erfolgt in Abbildung 21 mit einer Materialstärke von 1 mm. Im Diagramm wird wiederum das Magnetfeld entlang der Y-Achse dargestellt. Diese Achse verläuft mitten durch den Raum, welcher von Meter 1 - 4 im Diagramm gut ersichtlich ist. Der Verlauf "ohne" stellt das Magnetfeld ohne vorhandenen Schirm dar. Man kann deutlich die Schirmwirkung der Metalle erkennen. Die beiden hochpermeablen Stoffe Eisen und Mu-Metall, vor allem das Mu-Metall, verringern das Magnetfeld bereits deutlich vor der Schirmung. Durch die Permeabilität wird der magnetische Fluss förmlich in das Material hineingezogen und darin gebündelt. Aluminium hebt das Feld vor Eintritt in den Schirm sogar leicht an (Vergleich zu "ohne" Schirm). Zwischen Eisen und den beiden anderen Metallen ist ein deutlicher Unterschied im Hinblick auf die Wirksamkeit zu erkennen. Die beste Schirmwirkung im Raum hat das Aluminium.

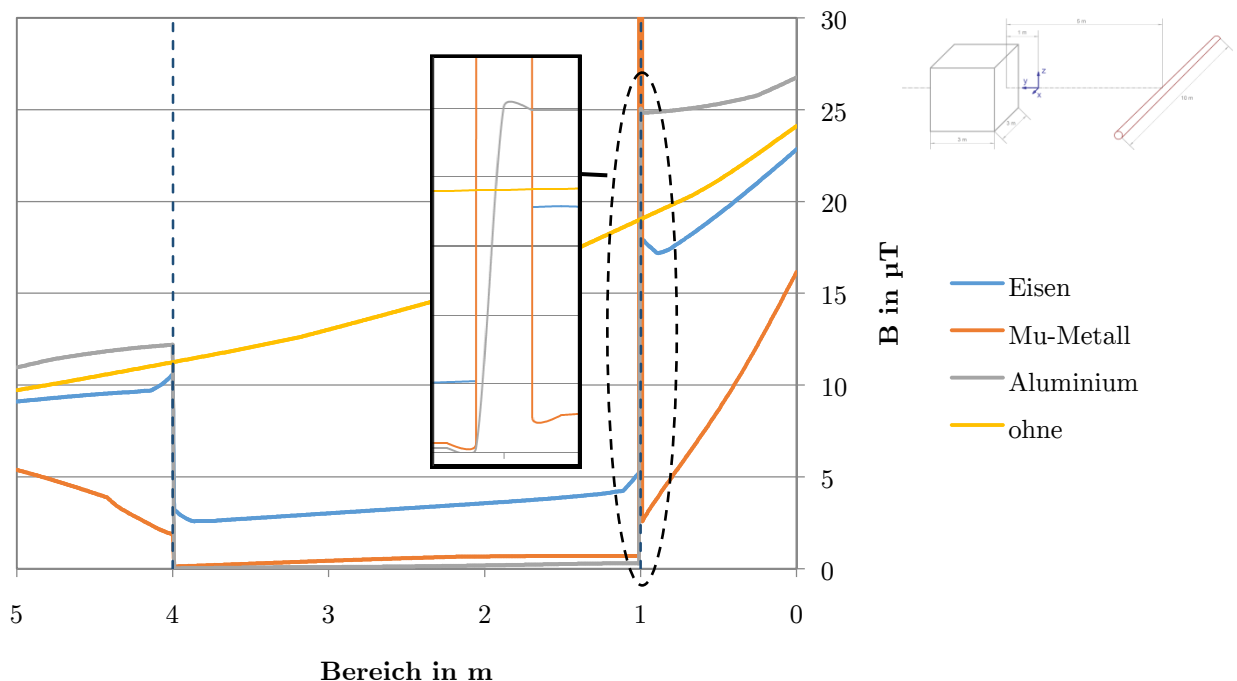


Abbildung 21: Vergleich der Schirmmaterialien, Materialstärke 1 mm

Die Wirksamkeit der Metalle gegenüber dem Verlauf "ohne" wird in Tabelle 4 mittels Schirmdämpfung angegeben. Da die Dämpfung über die Raumlänge nicht konstant ist, werden hier die mittleren Pegelwerte angeführt. Dazu wird die Schirmdämpfung über die gesamte Raumlänge berechnet und daraus der Mittelwert ermittelt.

Tabelle 4: Mittlere Schirmdämpfung im geschlossenen Raum

Schirmart	Magnetfeld B	Schirmdämpfung a_s
	μT	dB
ohne	14,2	-
Eisen	3,2	13
Aluminium	0,1	41
Mu-Metall	0,5	29

Auswirkung der Materialdicke

Wie bei den Grundlagen schon erwähnt, hat nicht nur das Material, sondern auch die Dicke des Schirmmaterials einen erheblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Raumschirmung.

Die drei Materialien weisen alle ungefähr dasselbe Verhalten in Bezug auf die verschiedenen Blechstärken auf. In Abbildung 22 ist Aluminium bei verschiedenen Blechstärken dargestellt. Bei einer Materialstärke von 0,5 mm reicht die Dämpfung noch nicht wirklich aus, um bereits am Beginn des Raumes das Magnetfeld ausreichend zu dämpfen. Diesen Effekt kann man auch bei Eisen und Mu-Metall beobachten. Beim elektrodynamischen Schirm ist die Materialstärke zu gering, um bei 50 Hz ein ausreichend großes Gegenfeld zu erzeugen. Beim hochpermeablen Schirm ist das Blech noch zu dünn um den Großteil des magn. Flusses im Material zu bündeln. Aber bereits ab 1mm ist schon ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Mit zunehmender Materialstärke verbessert sich dieses Verhalten noch.

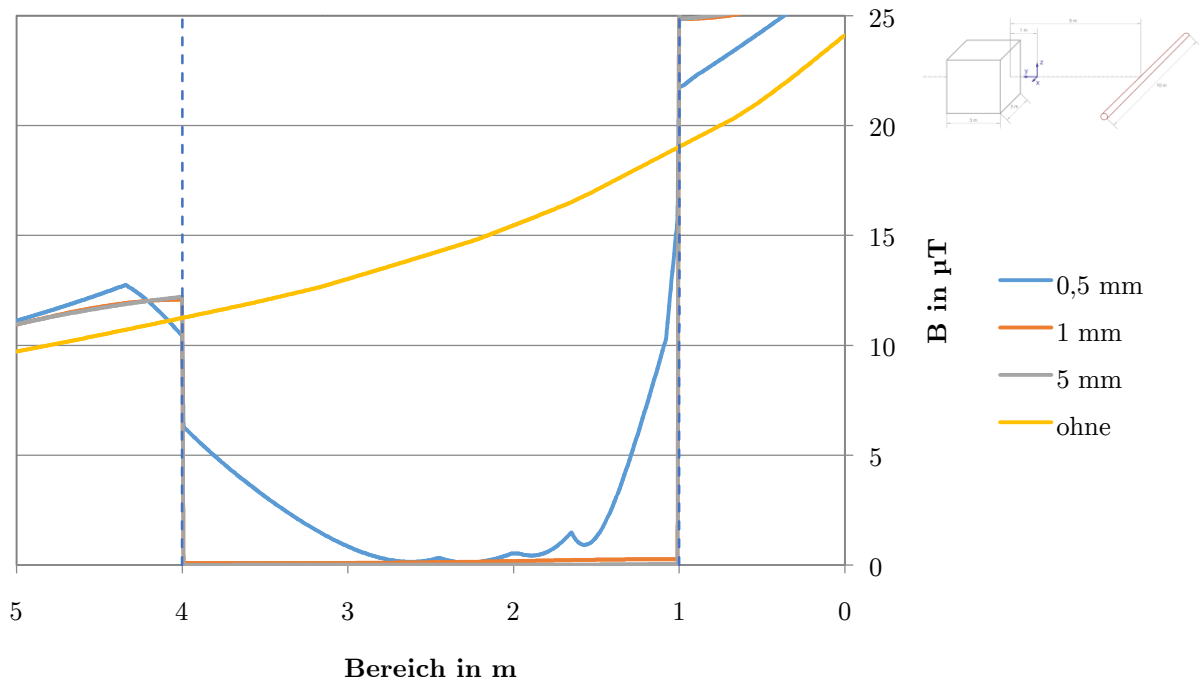


Abbildung 22: Vergleich der Materialstärke anhand von Aluminium

In Tabelle 5 sind die Materialien Eisen, Mu-Metall und Aluminium mit Blechstärken von 1 mm und 5 mm und ihre daraus resultierenden Magnetfelder angeführt. Bei einer 5-fachen Blechstärke ergibt sich so für Aluminium im Mittel nur eine bessere Dämpfung um den Faktor 1,42, was einem um 3 dB besseren mittleren Schirmdämpfungsfaktor entspricht. Bei Mu-Metall ist dieser Effekt etwas stärker ausgeprägt.

Tabelle 5: Magnetfeld bei Blechstärken von 1 mm und 5 mm

Schirmart	Magnetfeld B	Magnetfeld B	a_s
	1 mm	5 mm	
	μT	μT	-
Eisen	3,2	2,4	2,1
Aluminium	0,1	0,015	3
Mu-Metall	0,5	0,2	6,9

Variation des Stromes

Die Höhe des Stromes ist ausschlaggebend für das herrschende magnetische Feld.

Mit der Variation der Stromstärke soll nun herausgefunden werden, ob ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Höhe des Stromes und der Schirmdämpfung des Raumes gegeben ist.

In Abbildung 23 sind die Verläufe des Magnetfeldes bei eingestellten Stromstärken von 10, 100 und 500 A dargestellt. Zusätzlich sind die Verhältnisse von 500 A zu 100 A und 100 A zu 10 A in grau bzw. schwarz eingezeichnet. Diese zeigen, dass vor und nach dem Raum das Magnetfeld proportional zur Stromstärke ist. Im geschirmten Raum gibt es in der Nähe der Wände größere Abweichungen der Linearität, wobei im Wesentlichen auch im Raum relativ proportionale Verhältnisse vorliegen. Daraus lässt sich schließen, dass für zukünftige Simulationen mit ein und derselben Stromstärke gearbeitet werden kann. Um die Unterschiede deutlicher zeigen zu können, wird mit 500 A gearbeitet.

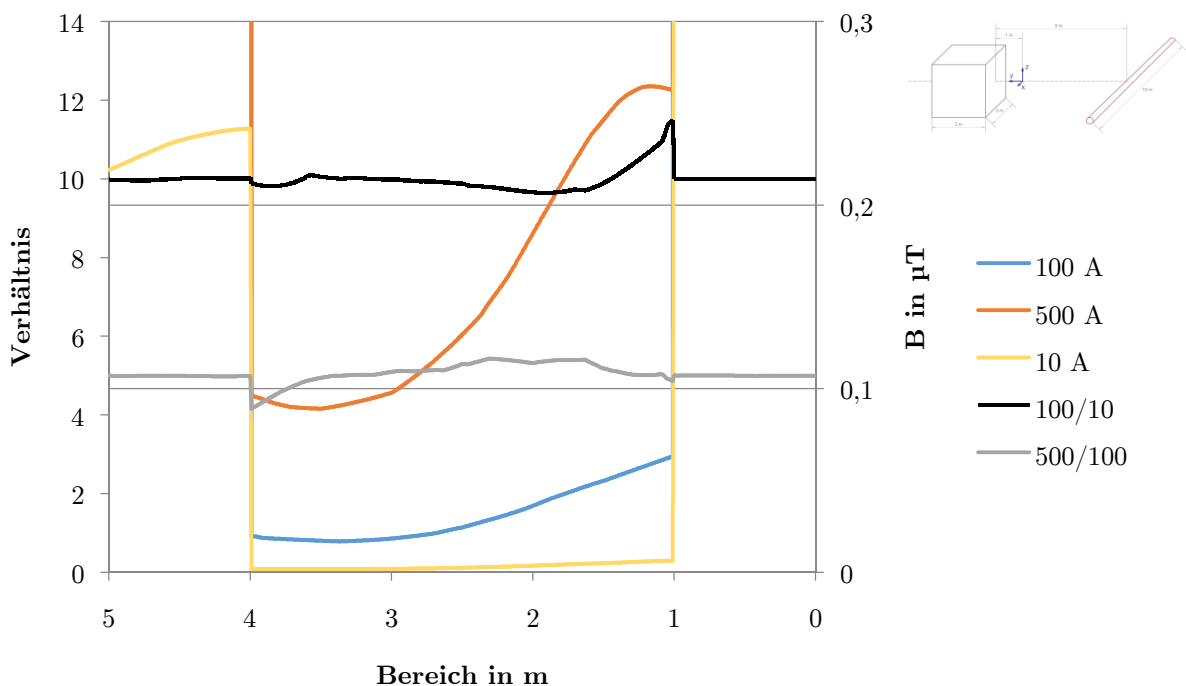


Abbildung 23: Raumschirmung bei unterschiedlicher Stromstärke / 1 mm - Aluminium

Variation des Leiterabstandes

Die Länge des Leiters ist nachwievor mit 10 m angenommen. Dieser Leiter wird jetzt in unterschiedlichen Abständen zum Raum positioniert. Logischerweise nimmt die Intensität des Magnetfeldes mit zunehmendem Abstand zum Raum ab. Es kann weiters gezeigt werden, dass bei größeren Abständen (Vergleich - "10/20") noch gute Proportionalität gegeben ist. Das heißt, mit halbiertem Abstand ergibt sich eine um den Faktor 3 größere magnetische Flussdichte inner- bzw. außerhalb des Raumes.

Je näher der Leiter jetzt am Raum platziert wird, desto inhomogener wird das Feld, wodurch keine Proportionalität mehr gegeben ist, siehe Verlauf "3/10".

Das Magnetfeld nimmt bekanntlicherweise mit $1/a$ (a...Abstand) ab, was bedeutet mit geringerem Abstand ist die Differenz zwischen Vorder- und Rückseite umso größer. Dies führt zu stärker ausgeprägten Feldunterschieden im Inneren des Raumes.

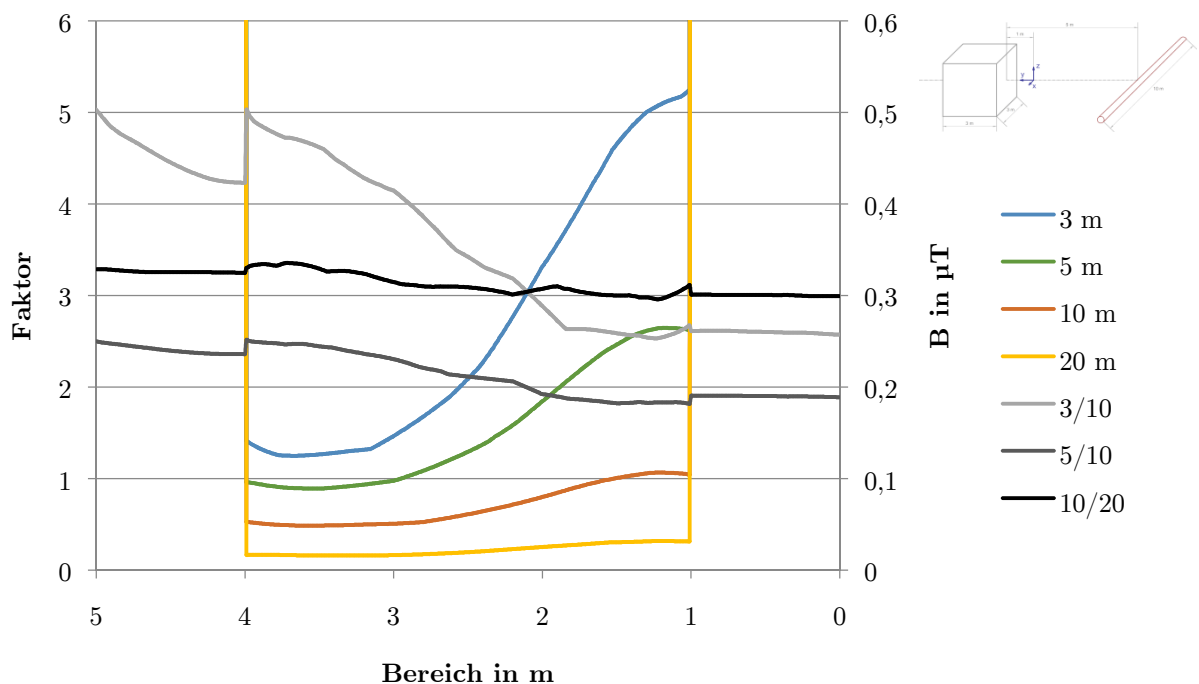


Abbildung 24: Raumschirmung bei unterschiedlicher Leiterentfernung

4.1.2 Raum mit Fensteröffnung

Das bisherige Modell wird jetzt um eine Raumöffnung ergänzt. Sprich es wird ein Fenster aus Glas mit den Maßen 1 x 1 m in der Mitte der Vorderwand eingefügt. Es soll nun untersucht werden, inwieweit sich dieses Fenster auf die Schirmung des Raumes auswirkt. Wiederum werden die drei Schirmmaterialien mit verschiedenen Blechstärken eingesetzt und auf ihre Unterschiede geprüft.

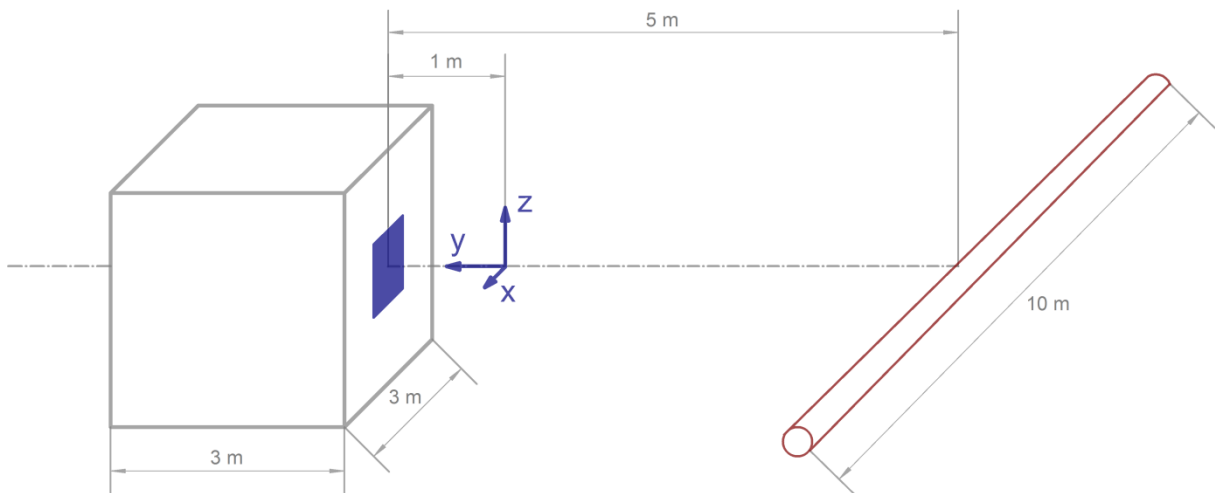


Abbildung 25: Simulationsmodell - Raum mit Fensteröffnung

Schirmung mit Eisen

Das Fenster gibt dem Magnetfeld die Möglichkeit durch die Öffnung in den Raum einzudringen. Abbildung 26 zeigt den Verlauf des Magnetfeldes bei unterschiedlichen Blechstärken. Die strichlierten Linien grenzen den Raum ab. Mit zunehmender Blechstärke kann das Magnetfeld am Beginn des Raumes besser gedämpft werden. Es erreicht ein Minimum nach etwa einem halben Meter. Danach steigt es aufgrund von Streufeldern, welche ein leicht erhöhtes Feld im Inneren des Raumes verursachen, wieder leicht an. Bei 0,5 mm Stärke ist der Fluss im Blech so gering, dass dieser Effekt nicht so zu tragen kommt, siehe auch Abbildung 27.

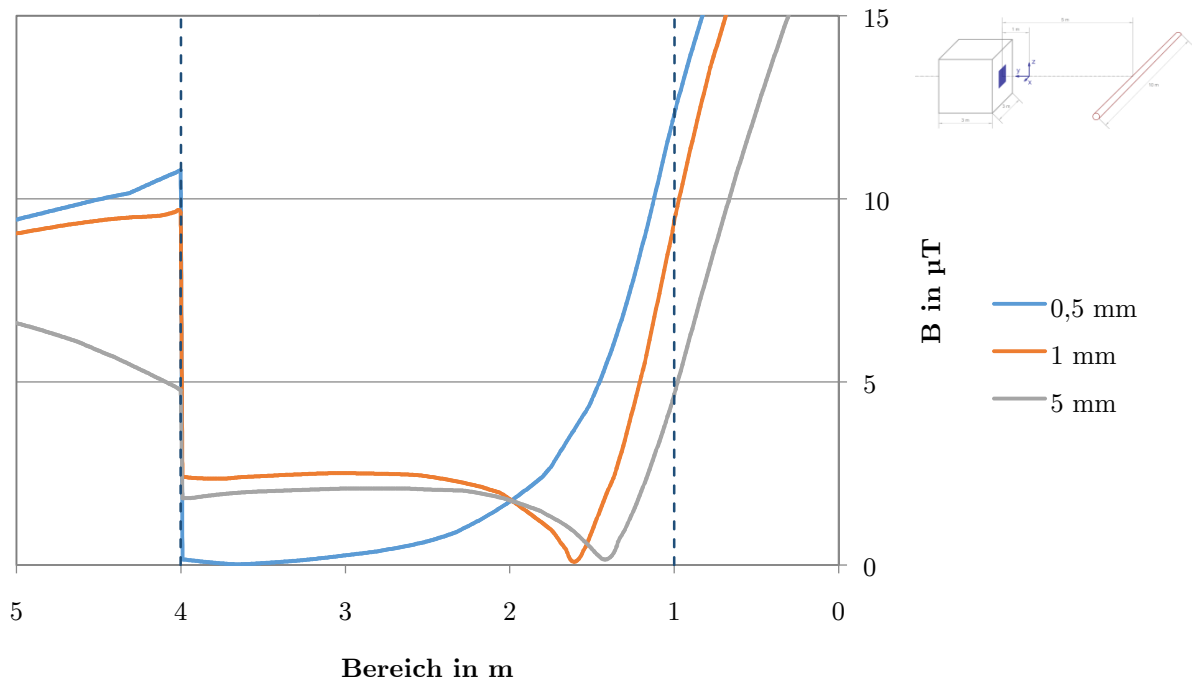


Abbildung 26: Unterschiedliche Materialstärke - Schirm aus Eisen

Abbildung 27 bildet einen Schnitt (YZ-Ebene) quer durch den Raum ab. Gut zu erkennen ist hier der deutliche Feldeintritt durch das Fenster auf der rechten Seite. Mit zunehmender Blechstärke kann mehr Magnetfeld ins Blech rund ums Fenster abgeleitet werden, was zur Verbesserung unmittelbar hinter dem Fenster führt. Am Konzentriertesten ist der Fluss an den Ecken und am Rand des Fensters, wo am meisten Feldlinien ins Blech ein- und wieder ausdringen. Wegen des Fensters wird der Fluss zusätzlich verdrängt. Dies führt zur vermehrten Ausbildung von Streufeldern in den Ecken rund ums Fenster, was eine Feldverzerrung im gesamten Raum zur Folge hat.

Durch die Auswahl der Skala kann dieser Effekt sehr gut veranschaulicht werden. Der dunkelblaue Bereich bedeutet jedoch nicht, dass dieser Bereich feldfrei ist. Aufgrund des, für die Darstellung notwendigen, Definitionsbereichs, stellt dies nur einen Bereich mit einer Flussdichte $< 0,4 \mu\text{T}$ dar. Um die verschiedenen Felddarstellungen sinnvoll miteinander vergleichen zu können, wird diese Skala für die gesamte Arbeit verwendet.

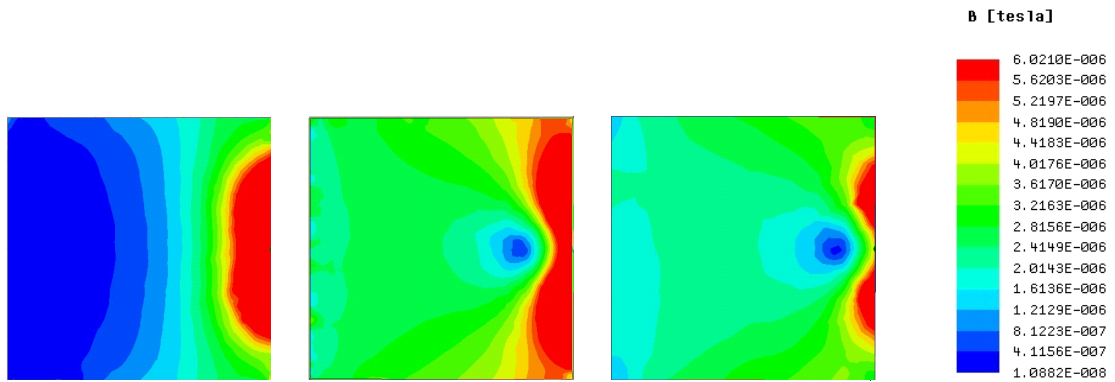


Abbildung 27: Schnitt - Eisen mit den Materialstärken 0,5 mm / 1 mm / 5 mm

Schirmung mit Mu-Metall

Ein ähnlicher Effekt wie beim Eisen kann auch beim Mu-Metall beobachtet werden, auch wenn er hier nicht so stark ausgeprägt ist. Das Feld steigt nach dem Minimum bei 1 mm bzw. 5 mm nurmehr gering an. Die Schirmwirkung ist generell deutlich besser als beim Eisen. Durch die höhere Permeabilität können die Feldlinien des Magnetfeldes stärker ins Material abgeleitet werden, wodurch weniger Feld durchs Fenster in den Raum eindringen kann.

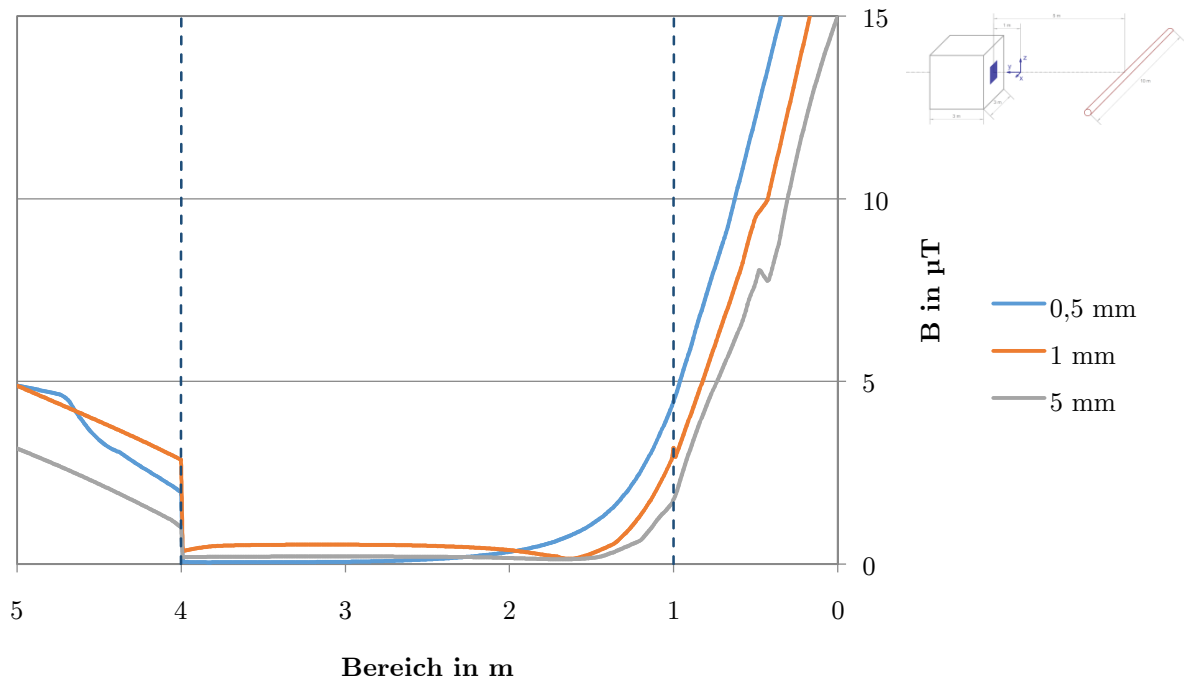


Abbildung 28: Unterschiedliche Materialstärke - Schirm aus Mu-Metall

Bei den Schnittbildern des Feldes in Abbildung 29 kann mit zunehmender Blechstärke eine deutliche Besserung des Schirmverhaltens festgestellt werden. Im Unterschied zum Eisen ist mit Mu-Metall eine wesentlich bessere Schirmung erzielbar. Vor allem bemerkbar macht sich der Unterschied, wenn Öffnungen, so wie hier das Fenster, vorhanden sind. Der Feldeintritt durchs Fenster ist bei 5 mm im Verhältnis zum Eisen nurmehr minimal.

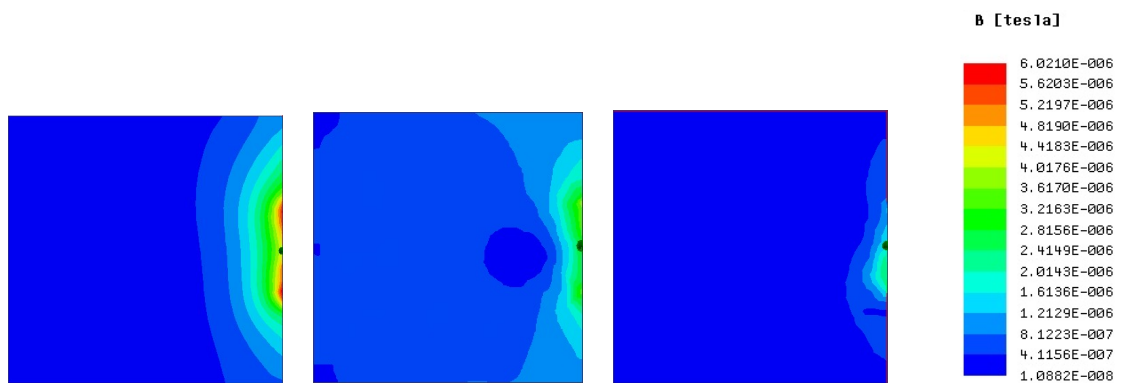


Abbildung 29: Schnitt -Mu-Metall mit den Materialstärken 0,5 mm / 1 mm / 5 mm

Schirmung mit Aluminium

Beim elektrodynamischen Schirm mit Aluminium hat die Materialstärke des Blechs keinen so gravierenden Einfluss auf den Verlauf des B-Feldes wie beim hochpermeablen Schirm mit Eisen und Mu-Metall. Alle drei Kurven haben einen ähnlichen Verlauf. Das Magnetfeld nimmt, nach Eintritt durchs Fenster, exponentiell bis zum Ende des Raumes ab und erreicht dort ihr Minimum. Trotz der 10-fachen Dicke des Materials, ist die Dämpfung zwischen den Kurven 0,5 mm und 5 mm nie größer als Faktor 3 (Maximalwert). Hingegen kann bereits mit 1 mm statt 0,5 mm eine Dämpfung erreicht werden, welche bis zu einer Halbierung der Flussdichte führt.

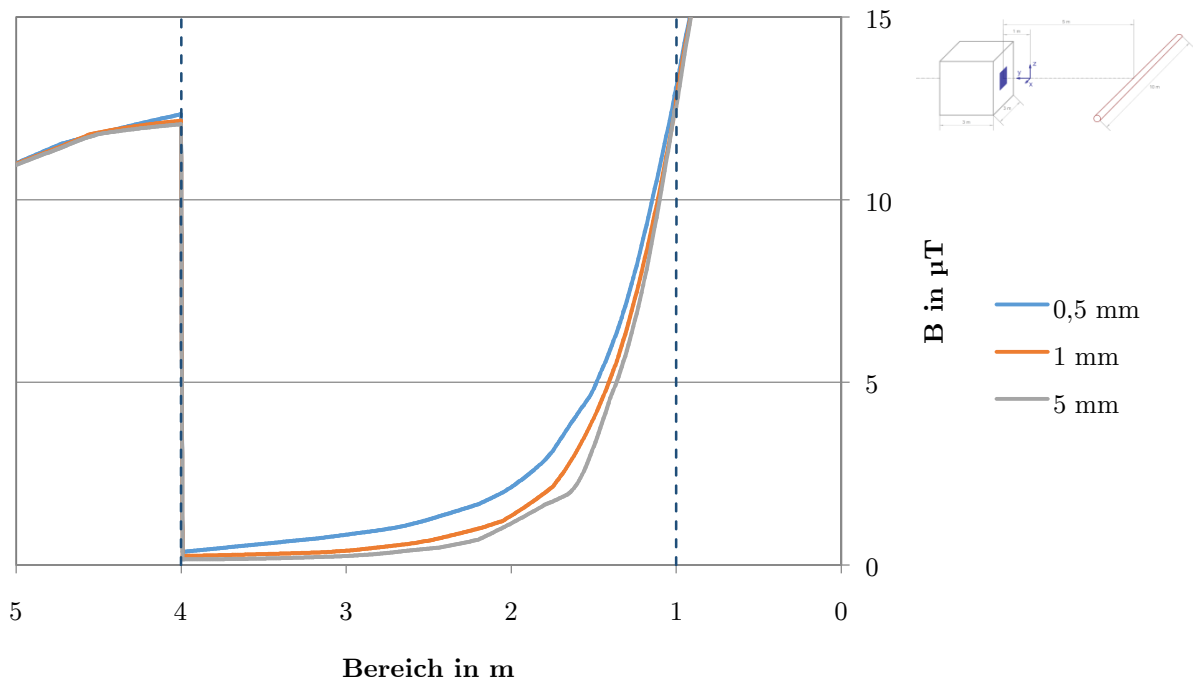


Abbildung 30: Unterschiedliche Materialstärke - Schirm aus Aluminium

Auch die Schnittbilder liefern eine ähnliche Erkenntnis. Das Feld nimmt, ausgehend vom Fenster, in alle Richtungen recht gleichmäßig ab. Die Intensität ist auf den ersten paar Zentimetern bei allen drei Materialstärken etwa in der gleichen Größenordnung, was mit dem roten Bereich eingefärbt ist. Während beim rechtsten Bild sich die Bereiche mit höherer Flussdichte nur ums Fenster bewegen, sind bei 1 mm und vor allem bei 0,5 mm in den Ecken noch deutlich Bereiche größerer Flussdichte erkennbar.

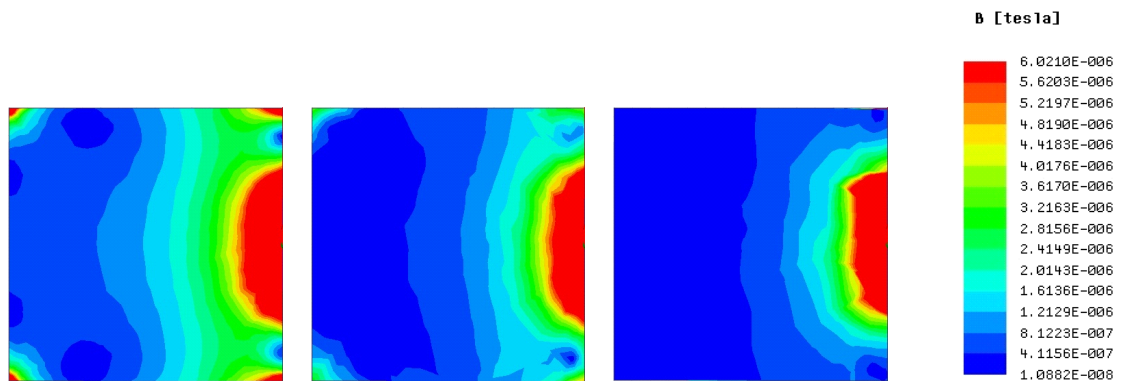


Abbildung 31: Schnitt - Aluminium mit den Materialstärken 0,5 mm / 1 mm / 5 mm

Materialvergleich - Materialauswahl

Die Gegenüberstellung der drei Materialien erfolgt, wie schon beim geschlossenen Raum, auch hier mit einer Blechstärke von 1 mm. Denn wie sich bis jetzt gezeigt hat, erreicht man mit dieser Materialstärke schon recht gute Ergebnisse. Der Aufwand/Preis für noch dickere Bleche spricht nicht für sich.

Der Vergleich in Abbildung 32 zeigt gut die Unterschiede zwischen hochpermeablem und elektrodynamischem Schirm. Während Ersterer (Eisen, Mu-Metall) das Feld, beim Eintritt durchs Fenster, mittels Brechung der Feldlinien verringern kann, dringt es beim elektrodynamischen Schirm nahezu ungehindert in den Raum ein. Mit zunehmender Raumtiefe gewinnt der elektrodynamische Schirm die Oberhand.

Vergleicht man die Dämpfungswerte von Aluminium und Mu-Metall, so ist die Legierung, wenn Raumöffnungen vorliegen, klar im Vorteil. Aufgrund des vielfachen Preises wird Mu-Metall jedoch hauptsächlich bei Spezialanwendungen und für kleine Schirmungsmaßnahmen eingesetzt.

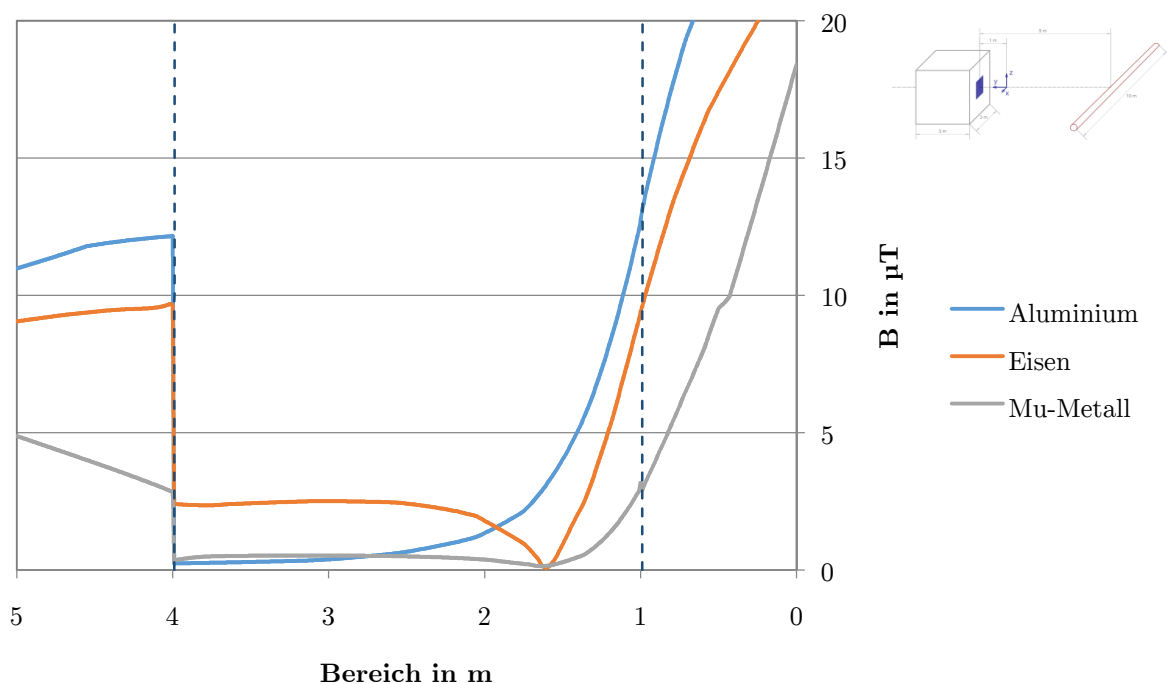


Abbildung 32: Vergleich der Schirmmaterialien bei 1 mm Materialstärke

4.2 Problematik Fensteröffnung - Feldanalyse

Der vorige Abschnitt hat gezeigt, dass durch Öffnungen das magnetische Feld massiv eintritt. Leider lassen sich solche idealen Räume, ohne Öffnungen, in der Praxis nur schwer umsetzen. Räume besitzen Öffnungen für die Lüftung, oft wird ein Fenster gewünscht, bzw. gefordert. Man hat gesehen, dass mittels eines Mu-Metall Schirms mit einer Materialstärke > 1 mm, sich recht gute Ergebnisse erzielen lassen. Wie schon erwähnt ist dieses Material aber sehr teuer. Herkömmliches Mu-Metall wird meist in 0,1 mm dicken Folien geliefert, wo ein Quadratmeter bereits um die 600€ kostet. [9]

Aluminium ist da wesentlich günstiger, hat aber bei Raumöffnungen das Problem, dass wegen der fehlenden Permeabilität die Feldlinien dort leichter eindringen können, siehe Abbildung 33.

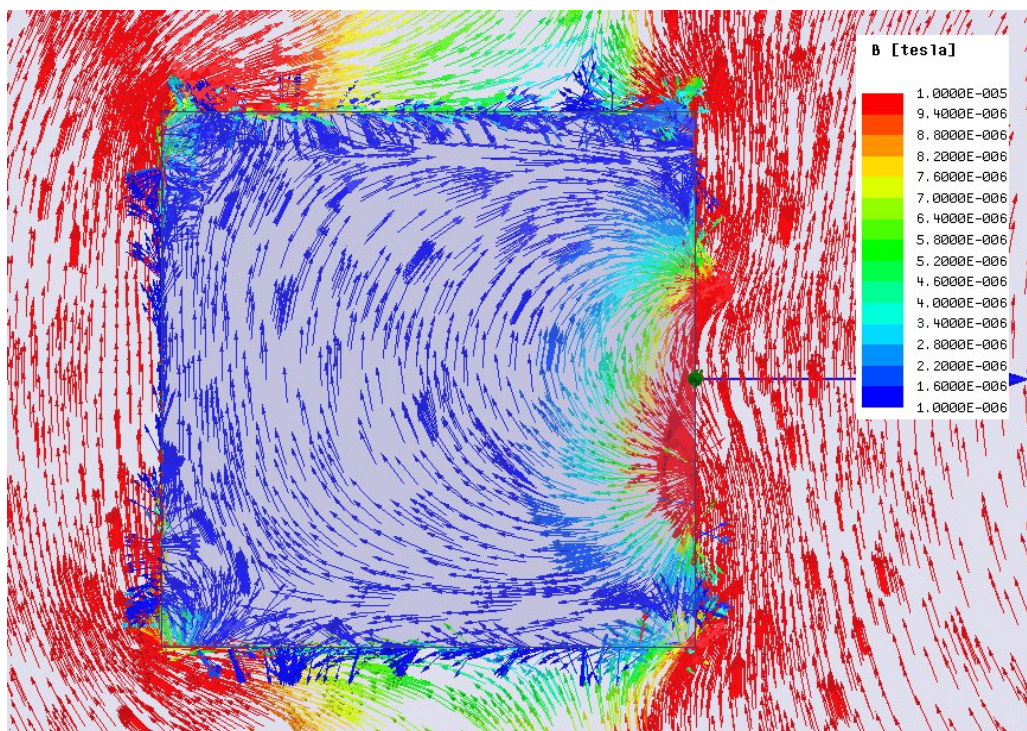


Abbildung 33: Verlauf der Feldlinien - Raum mit Fenster

Es gilt jetzt, eine Möglichkeit zu finden, die durch die Öffnung, in diesem Fall ein Fenster, eindringenden magnetischen Feldlinien mit einer zusätzlichen Maßnahme zu verringern. Zusätzlich erschwerend ist die Bedingung, dass das Sichtfeld nur bedingt eingeschränkt werden darf. Das heißt, ein engmaschiges Gitter aus hochpermeablem Werkstoff ist nicht zielführend, da für eine gute Wirkungsweise ausreichend Material erforderlich ist.

Begutachtet man den Feldlinienverlauf in Abbildung 33, so ist schön zu erkennen, wie durch den Wirkmechanismus des elektrodynamischen Schirms an Ober- und Unterseite das Störfeld mittels Rückwirkungsfeld kompensiert wird. Die Idee besteht jetzt darin, das einfallende Magnetfeld auch mit Hilfe eines Gegenfeldes zu kompensieren. Wie bereits in ähnlicher Weise in Kapitel 2.5 erklärt wird, gibt es die Möglichkeit durch einen stromdurchflossenen Leiter so ein Feld zu erzeugen. Die Feldlinien verlaufen hier im Uhrzeigersinn. Das bedeutet der Leiter muss so vom Strom durchflossen werden, dass dieser ein Magnetfeld mit entgegengesetztem Drehsinn erzeugt.

4.3 Aktive Schirmung der Fensteröffnung

Es sollen verschiedenste Anordnungen für die aktive Schirmung ausgearbeitet werden. Diese sollen dann auf ihre Wirksamkeit überprüft und anschließend miteinander verglichen werden. Die einfachste Variante besteht aus einem stromdurchflossenen Leiter, welcher vor dem Fenster platziert wird.

4.3.1 Ein Leiter

Für die aktive Schirmung mit einem Leiter wird ein Draht aus Kupfer, mit einem Querschnitt von 10 mm^2 , in der Mitte waagrecht vor dem Fenster positioniert (X-Achse), siehe Abbildung 34. Waagrecht deshalb, weil das zu schirmende Störfeld ebenfalls um die waagrechte X-Achse rotiert. Damit breiten sich jetzt die Feldlinien von Stör- und Kompensationsleiter beide in Y- und Z-Richtung aus.

Der Abstand zwischen Fenster und Leiter beträgt 2 mm. Die Rückführung des Stromes erfolgt in einem Abstand von 10 cm zum Raum. Es wurde auch versucht, mittels Bohrlöchern, den Leiter innerhalb des Raumes, also auf der anderen Seite des Fensterglases anzubringen, wodurch aber kein merklicher Unterschied feststellbar war.

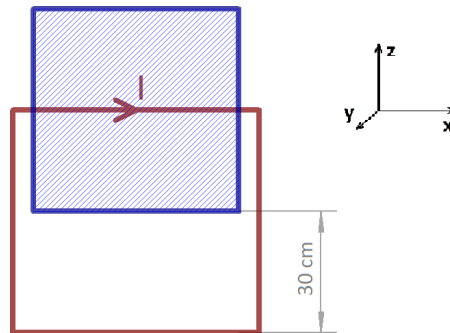


Abbildung 34: Positionierung des Kompensationsleiters

Abbildung 35 zeigt das resultierende Vektorfeld des Störfeldes, ohne Kompensationsleiter, Abbildung 36 das Vektorfeld des Kompensationsleiters, ohne Störfeld. Vergleicht man die zwei Bilder miteinander, so ähneln sich die beiden Felder im Inneren des Raumes. Bei genauerem Betrachten ist jedoch gut zu erkennen, wie sich das Störfeld nach rechts und das Feld des Kompensationsleiters genau in die entgegengesetzte Richtung dreht. Genau der Effekt, welcher erzielt werden soll.

Beim rechten Bild stellt der obere rote Fleck den stromdurchflossenen Leiter dar, welcher das Gegenfeld erzeugt. Der untere Fleck großer Flussdichte kommt durch den Rückleiter zustande, welcher 30 cm unter dem Fenster zurückläuft. Auch dieser hat einen kleinen Einfluss auf das resultierende Magnetfeld im Inneren. Für die Wirkung des Kompensationsleiters sind grundsätzlich zwei Faktoren ausschlaggebend, die Höhe der Stromstärke und die Position.

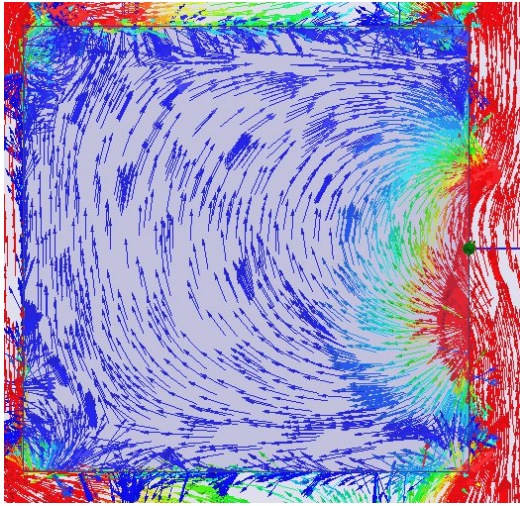


Abbildung 35: Feldlinien des Störfeldes,
ohne Kompensationsleiter

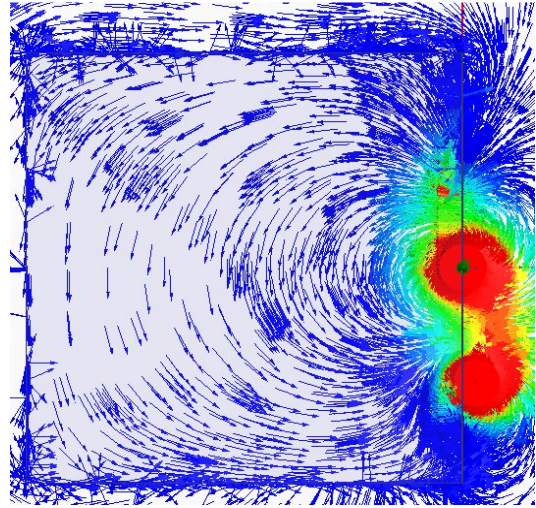


Abbildung 36: Feldlinien des
Kompensationsleiters, kein Störfeld

Position des Kompensationsleiters:

Der Leiter wird mit 10 A und 50 Hz bestromt. Entscheidend ist dabei die Richtung, der Strom muss in die entgegengesetzte Richtung des Störleiterstromes fließen. Neben der Position in der Mitte, wird der Leiter auch 40 cm ober- bzw. unterhalb davon positioniert.

In Abbildung 37 wird der Verlauf dieser Magnetfelder dargestellt. Wird der Leiter mittig platziert, so sieht man doch eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Verlauf ohne aktive Schirmung. Dadurch, dass die Aufpunktsgerade hier mitten durch den Leiter verläuft, ist das Feld beim Eintritt in den Raum noch sehr hoch, nimmt dann aber rasch ab. Wird der Leiter hingegen um 40 cm nach oben bzw. unten versetzt, so ist die Wirksamkeit der aktiven Schirmung nurmehr minimal gegeben.

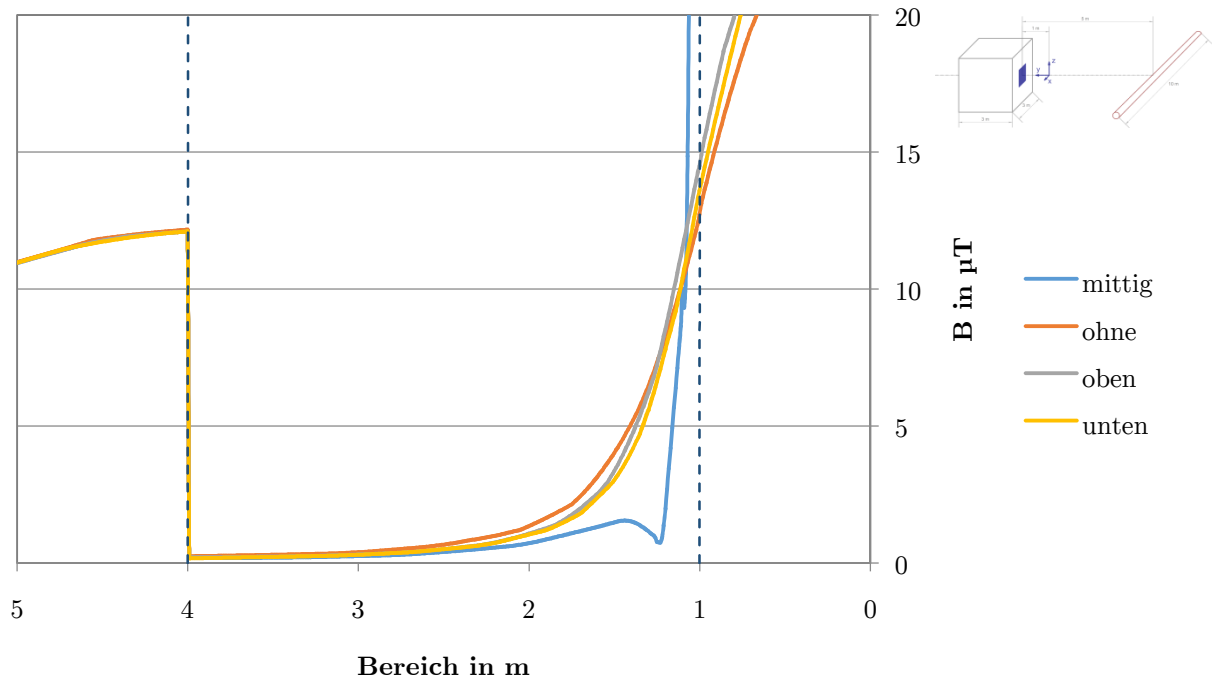


Abbildung 37: Variation der Position des Kompensationsleiters bei 10 A

Auch bei den Schnittbildern ist der Unterschied klar zu sehen, vergleicht man das linke mit den beiden anderen Bildern. Bei mittiger Platzierung wird das Feld, vor allem in der Mitte, sichtlich geschwächt. Es kann auch eine Verringerung des Feldes im hinteren Bereich erzielt werden. Bei oberer bzw. unterer Platzierung des Leiters wird eine Bündelung des Feldes rund ums Fenster erreicht. Das Feld dringt jedoch weiter in den Raum ein, als bei mittiger Platzierung. Die Feldverteilungen von oberer und unterer Leiteranordnung sehen sehr ähnlich aus.

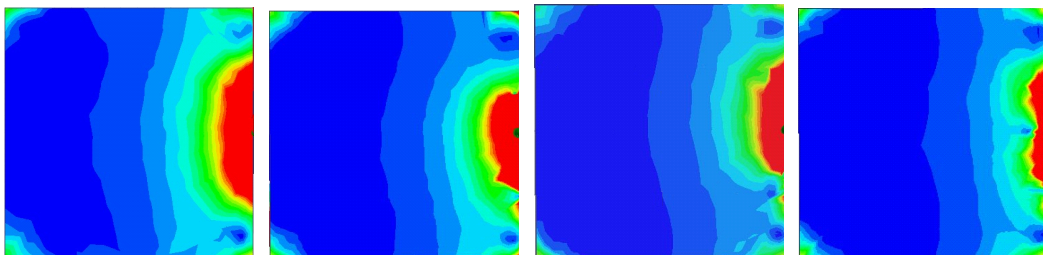


Abbildung 38: Schnitt -ohne, obere, untere und mittlere Position des Leiters (10 A)

Variation der Stromstärke

Wie schon angemerkt, ist die Höhe des Kompensationsstromes wichtig für die Effektivität des Schirmes. Ist ein zu geringer Strom eingepreßt, so ist das Gegenfeld nicht ausreichend für eine effektive Kompensation. Wird ein zu hoher Strom eingespeist, ist das Feld überkompensiert, was wiederum zu unerwünscht großen Flussdichten führt.

In Abbildung 39 sind die Verläufe des Magnetfeldes bei den Stromstärken 3, 5, 10 und 20 A dargestellt. Zum Vergleich wird noch der Verlauf ohne aktive Kompensation dargestellt. Die Kurven mit kleinen Stromstärken (3 A, 5 A) erreichen schon nach wenigen Zentimetern gute Werte für **B**, besonders die "5 A" Kurve. Jedoch steigt die Flussdichte dann wieder steil an, ehe sie exponentiell zum Raumende sinkt (Anm.: Dieser "Zacken" entsteht durch die gewählte Aufpunktsgerade in der Mitte. Es entsteht nur ein lokales Minimum in Leiternähe). Je mehr Strom zur Erzeugung des Gegenfeldes eingespeist wird, desto größer ist das Magnetfeld rund um den Leiter, was hier durch die größere Flussdichte am Anfangsbereich gezeigt wird. Danach sinkt die Flussdichte jedoch rasant ab und führt so zu guten Feldverhältnissen. Die "20 A" Kurve führt, beim Vergleich mit der Kurve "ohne" auf den ersten 30 cm sogar zu einer deutlichen Felderhöhung, zeigt dann aber ab 50cm die beste Kompensationswirkung.

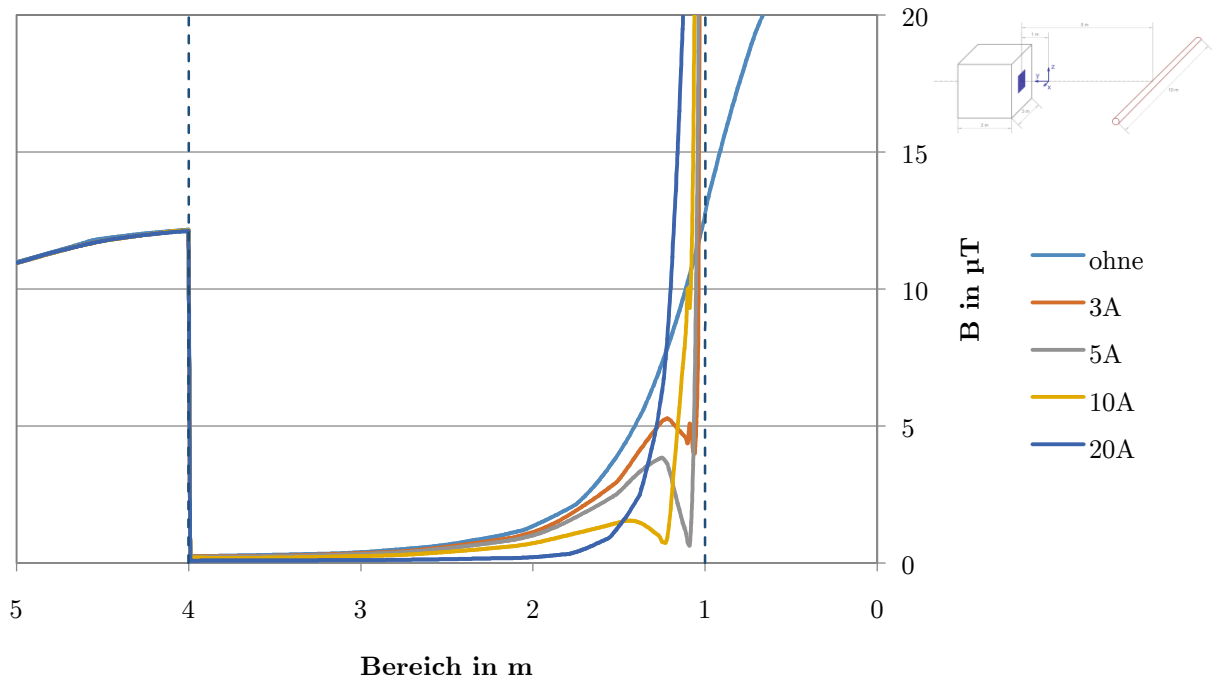


Abbildung 39: Variation der Stromstärke des Kompensationsleiters

Die gute Kompensation des Leiters mit 20 A kann auch in Abbildung 40 gezeigt werden, wo im hinteren Bereich das Restfeld sehr gering ausfällt. Die stärkere Felderhöhung, hier im Bereich um den Leiter, kann beim Vergleich mit der "10 A - Variante" in Abbildung 38 festgestellt werden. Diese stellt einen Kompromiss aus schnellem Abfall des B-Feldes am Beginn und gute Verhältnisse im hinteren Bereich dar.

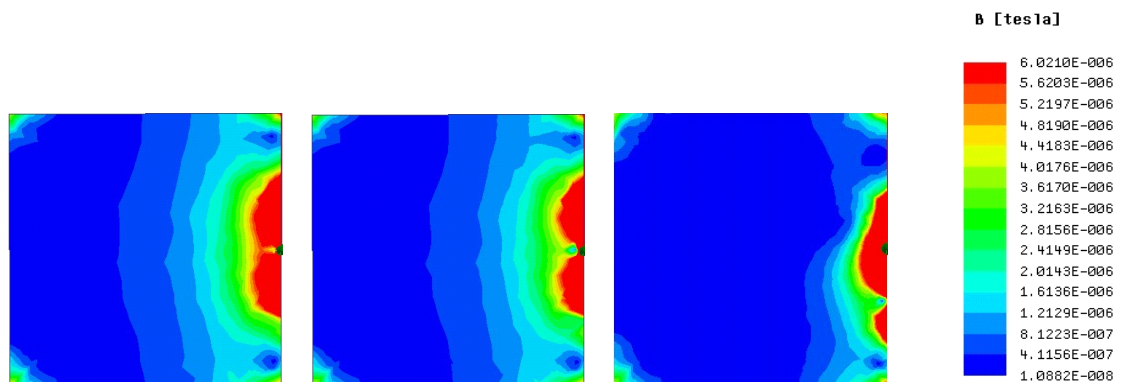


Abbildung 40: Schnitt bei Stromstärken 3 A, 5 A und 20 A

4.3.2 Zwei Leiter

Da die größte Feldschwächung bei der 1-Leiter-Version in der Mitte des Fensters stattfindet (siehe Abbildung 38), soll mit einem zusätzlichen Leiter eine gleichmäßigere Kompensation erreicht werden. Hierzu werden die zwei Leiter im Abstand a voneinander mittig am Fenster platziert. Beide Leiter werden mit demselben Strom gespeist.

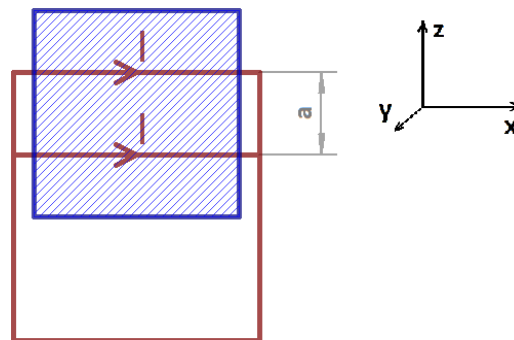


Abbildung 41: Positionierung der zwei Kompensationsleiter

Variation der Stromstärke

Die beiden Kompensationsleiter werden hier (Abbildung 42) in einem Abstand a von 40 cm vor dem Fenster platziert. Es werden in beide Leiter jeweils Ströme von 3, 5, 10 bzw. 15 A eingespeist. Bis einschließlich der Stromstärke von 10 A, kann mit zunehmendem Strom ein besseres Kompensationsverhalten erzielt werden. Die Kurven besitzen dadurch einen höheren Gradienten und können das Feld noch weiter senken. 15 A sind für gute Schirmungsverhältnisse im Nahbereich des Fensters aber schon etwas zu viel. Das Feld senkt sich zwar noch schneller, baut aber aufgrund des hohen Stromes schon ein relativ großes Gegenfeld auf. Dieses überlagert das ursprüngliche Störfeld und führt so zu einer Anhebung des Magnetfeldes im Bereich des Fensters (siehe Abbildung 43). Bei einem Abstand von 60 bzw. 80 cm zwischen den Leitern ergeben sich ähnliche Verläufe des Magnetfeldes wie hier bei 40 cm. Die Unterschiede, welche sich durch die verschiedenen Abstände ergeben, werden im nächsten Punkt behandelt.

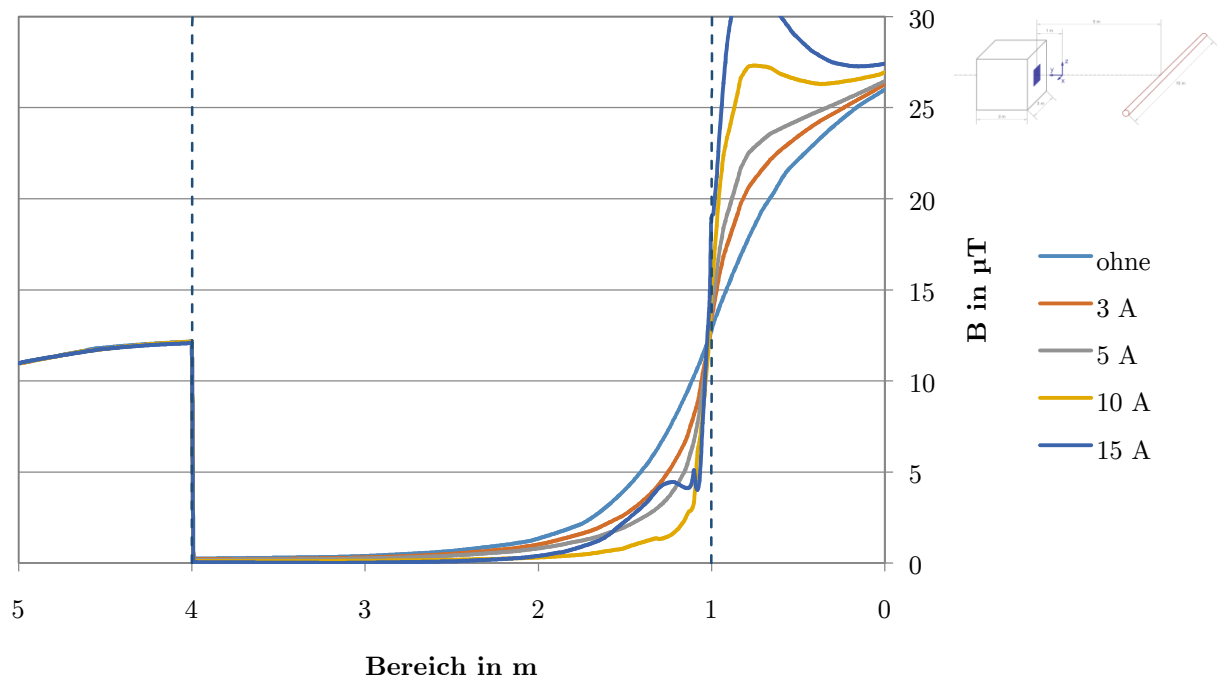


Abbildung 42: Zwei Leiter - Vergleich der Stromstärke bei einem Abstand von 40 cm

Bei den Schnittbildern in Abbildung 43 mit zwei Leitern, sind die Feldverteilungen für 3, 10 und 15 A dargestellt. Auch hier ist die Verschlechterung bei zu hohem Strom erkennbar, wenn man die zwei Bilder mit 10 und 15 A miteinander vergleicht. Auch der Rückleiter macht sich bei diesen beiden Bildern deutlich bemerkbar, beim mittleren Bild durch den untersten roten Buckel. Immerhin fließen hier 20 A und beim rechten Bild bereits 30 A zurück.

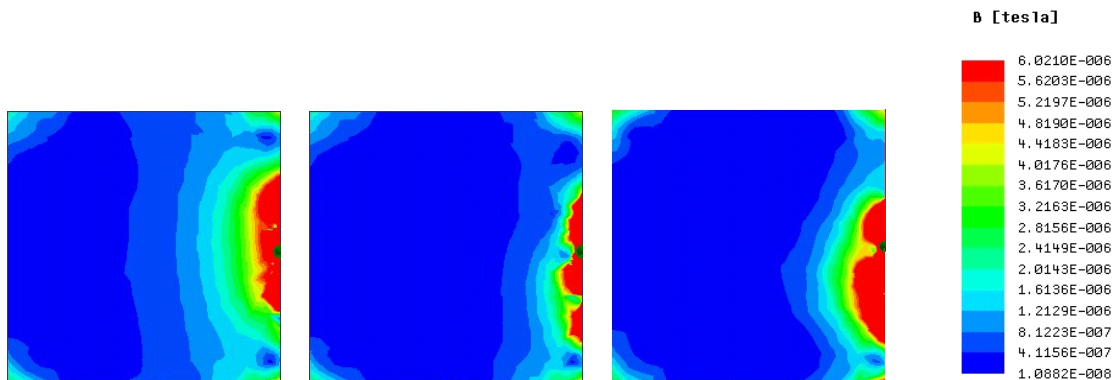


Abbildung 43: Zwei Leiter - Magnetfeld bei 3, 10, und 15 A ($a = 40$ cm)

Variation des Abstandes

In untenstehender Abbildung 44 sind die Verläufe der Magnetfelder bei unterschiedlichem Abstand a der zwei Leiter abgebildet. In den beiden Leitern wird jeweils ein Strom von 10 A eingespeist.

Diese Grafik liefert die Erkenntnis, dass mit geringerem Abstand das Feld besser kompensiert werden kann, als mit größerem. Wird der Abstand allerdings zu gering gewählt, wie es bei "20 cm" der Fall ist, so werden durch die gegenseitige Beeinflussung der beiden Leiter die Feldverhältnisse wieder ungünstiger im Bereich des Fensters.

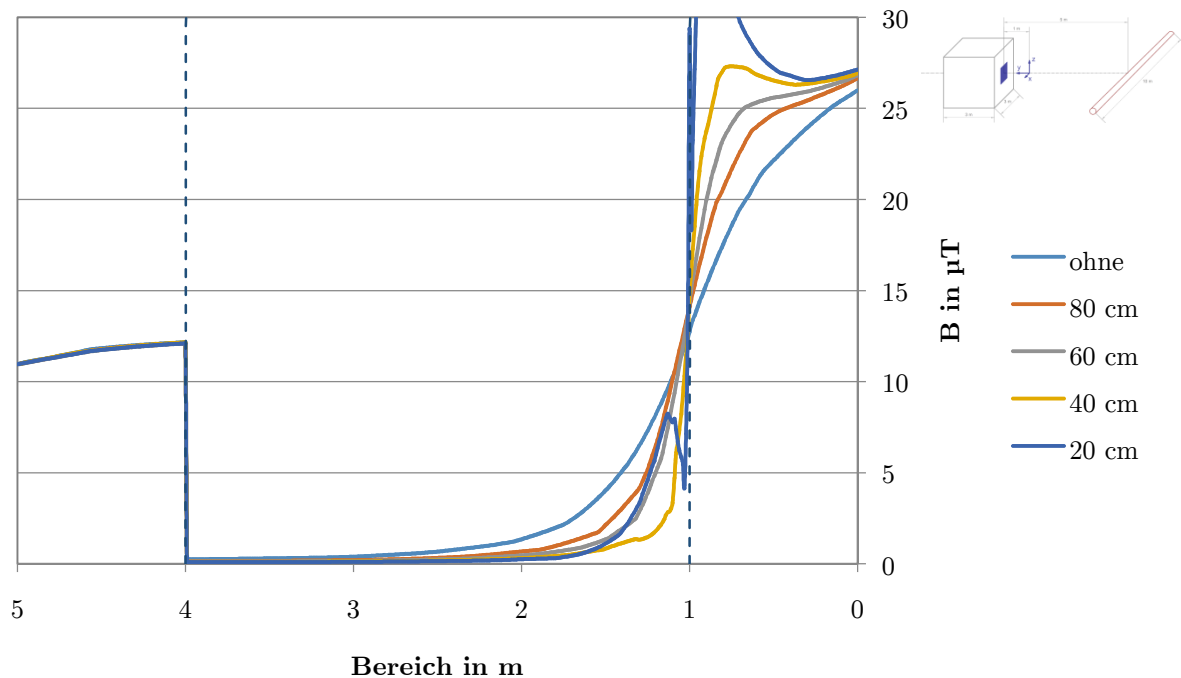


Abbildung 44: Zwei Leiter - Vergleich bei Leiterabständen 20, 40, 60 und 80 cm (10 A)

4.3.3 Drei Leiter

Um die Gleichmäßigkeit und die Wirkung des aktiven Schirms noch erhöhen zu können, werden jetzt drei stromdurchflossene Leiter vor dem Fenster platziert. Neben dem einen Leiter in der Mitte werden noch zwei weitere links und rechts mit dem

Abstand a positioniert. Variiert man hier, wie schon zuvor bei zwei Leitern, den Abstand a von 10 cm bis 40 cm, so kommt man auch hier zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind zwar nicht mehr ganz so deutlich, aber mit 20 cm erhält man trotzdem das beste Ergebnis für die Wirksamkeit des Schirms.

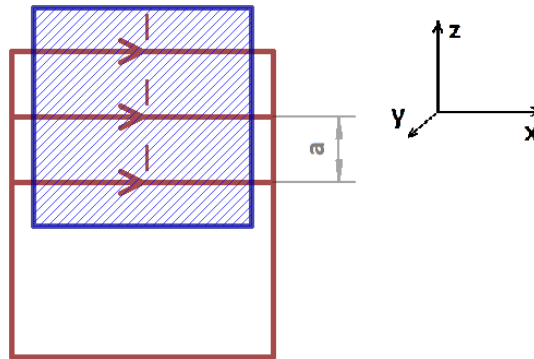


Abbildung 45: Positionierung der drei Kompensationsleiter

Variation des Stromes bzw. der Stromaufteilung

Neben der Möglichkeit, alle drei Kompensationsleiter mit demselben Strom zu speisen, können für die einzelnen Leiter jeweils auch unterschiedliche Stromstärken verwendet werden. Die beste Wirkung wird erreicht, wenn der mittlere Stromfaden einen etwas größeren Wert aufweist wie die zwei äußeren. Zur Erklärung, 5-10-5 A bedeutet 5 A fließen in den beiden äußeren Leitern und 10 A im mittleren.

In Abbildung 46 wird das B-Feld bei den verschiedenen Stromaufteilungen dargestellt. Der Abstand a zwischen den drei Leitern beträgt jeweils 20 cm. Vergleicht man die Verläufe, so fällt auf, dass jene mit niedrigeren Stromwerten im Nahbereich des Fensters die bessere Wirkung zeigen. Jener Verlauf mit 5-10-5 A zeigt am Beginn, durch den größeren Strom, schlechtere Verhältnisse, erreicht aber ab ca. 0,5 m die niedrigsten Werte im Vergleich.

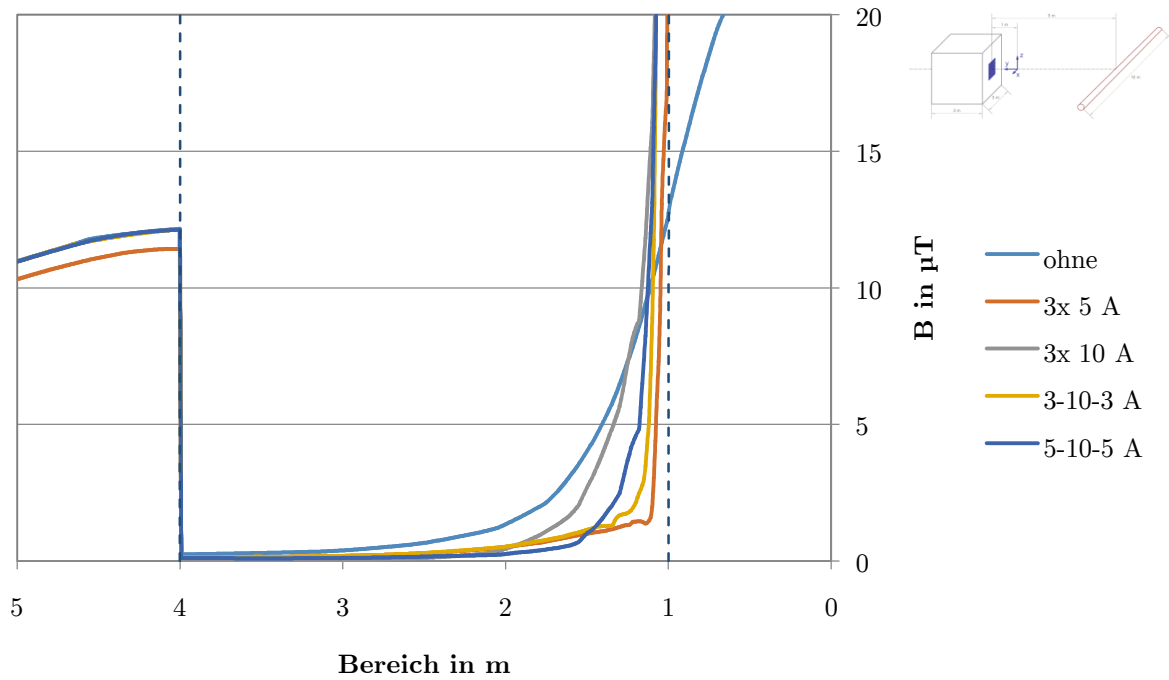


Abbildung 46: Vergleich unterschiedlicher Stromaufteilungen bei einem Abstand von $a = 20$ cm

Auch aus den Schnittbildern können ähnliche Erkenntnisse gewonnen werden. Durch den größeren Strom im mittleren Leiter erreicht man geringere Flussdichten im hinteren Bereich des Raumes. Dies geht auf Kosten des höheren Magnetfeldes rund ums Fenster und der größeren Beeinflussung durch den Rückleiter.

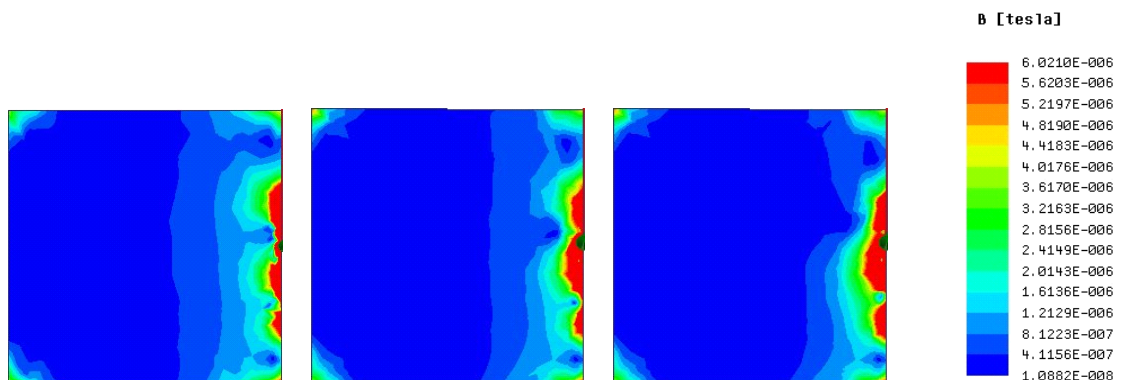


Abbildung 47: Drei Leiter - Magnetfeld bei 3x 5 A / 3-10-3 A / 5-10-5 A

4.3.4 Schirmung mittels vieler Kompensationsleiter

Im vorigen Abschnitt hat man gesehen, dass durch die unterschiedliche Speisung der einzelnen Leiter verschiedene Effekte erzielt werden können. Soll das Feld im Nahbereich des Fensters die größte Kompensation aufweisen, oder ist es wichtiger im hinteren Raumbereich ein niedrigeres Magnetfeld vorzufinden. Je mehr Leiter, desto mehr Möglichkeiten. Es existiert eine Studie, welche sich mit der aktiven Schirmung niederfrequenter magnetischer Felder beschäftigt hat. In dieser wird versucht mittels vieler nanobeschichteter Leiterbahnen einen kleinen Hohlkörper zu schirmen. Aufbauend auf die Idee dieser Arbeit soll hier versucht werden ähnliches für den Raum mit Fenster anzuwenden.

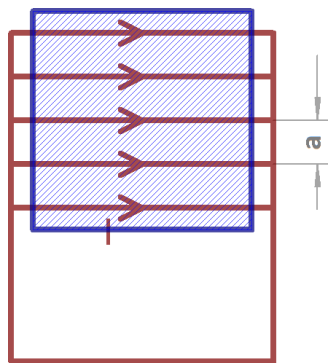


Abbildung 48: Schematik der Kompensationsleiter für 50 bzw. 100 Drähte

Im ersten Schritt sollen daher die vielen Nanoschichten durch dünne Kupferdrähte ersetzt werden. Dies verringert den Rechenaufwand und soll einen ersten Eindruck liefern. Es werden also als erstes 50 und später 100 dünne Drähte, mit einem Querschnitt von 1 mm^2 , gleichmäßig mit dem Abstand a übers Fenster verteilt, siehe Abbildung 48. Diese sollen mit kleinen Strömen gespeist werden. Die Hin- und Rückleiter zu den einzelnen Drähten haben aufgrund des größeren Summenstroms einen Querschnitt von 10 mm^2 . Der Abstand zum Fenster beträgt wie schon bei den vorigen Simulationen 2 mm .

Die Kupferleiter werden im Abstand $a = 20$ mm (50 Leiter) bzw. $a = 10$ mm (100 Leiter)voneinander angeordnet. Mit der großen Anzahl einzelner Leiter gibt es jetzt viele Möglichkeiten, den Strom aufzuteilen. Drei mögliche Varianten werden in Abbildung 49 dargestellt. Die Stromaufteilungen von V1 & V2 werden in folgenden Tabellen aufgelistet. Die Werte in der Klammer geben den Summenstrom aller Kompensationsleiter an:

Tabelle 6: Stromaufteilung für 50 Leiter V2(11 A)

Leiter		Stromstärke
Nr.		A
1 - 10	41 - 50	0,1
11 - 20	31 - 40	0,2
21 - 30		0,5

Tabelle 7: Stromaufteilung für 100 Leiter V1(12,1 A)

Leiter		Stromstärke
Nr.		A
1 - 10	91 - 100	0,01
11 - 20	81 - 90	0,02
21 - 30	71 - 80	0,05
31 - 40	61 - 70	0,1
41 - 45	56 - 60	0,2
46 - 48	52 - 55	0,5
49 - 51		1

Fließt in allen Kompensationsleitern der gleiche Strom, hier 0,1 A je Leiter (Variante mit 100), so ist die Wirkung im Vergleich zu den variablen Stromstärken doch deutlich geringer. Zwischen den Varianten mit 50 und 100 Leitern ist, wenn die Stromaufteilung in etwa gleich angelegt wird, kaum ein Unterschied feststellbar. Die besten Ergebnisse können mit einer pyramidenartigen Stromverteilung erreicht werden (siehe Tabelle 6, Tabelle 7). Wird in der Mitte des Fensters mehr Strom

eingespeist, so steigt das Feld im Nahbereich der Öffnung, sinkt dann aber rasch auf einen niedrigen Wert (z.B. Verlauf V1). Bei einer gleichmäßigeren Variante (V2) kann im Nahbereich das Magnetfeld besser kompensiert werden.

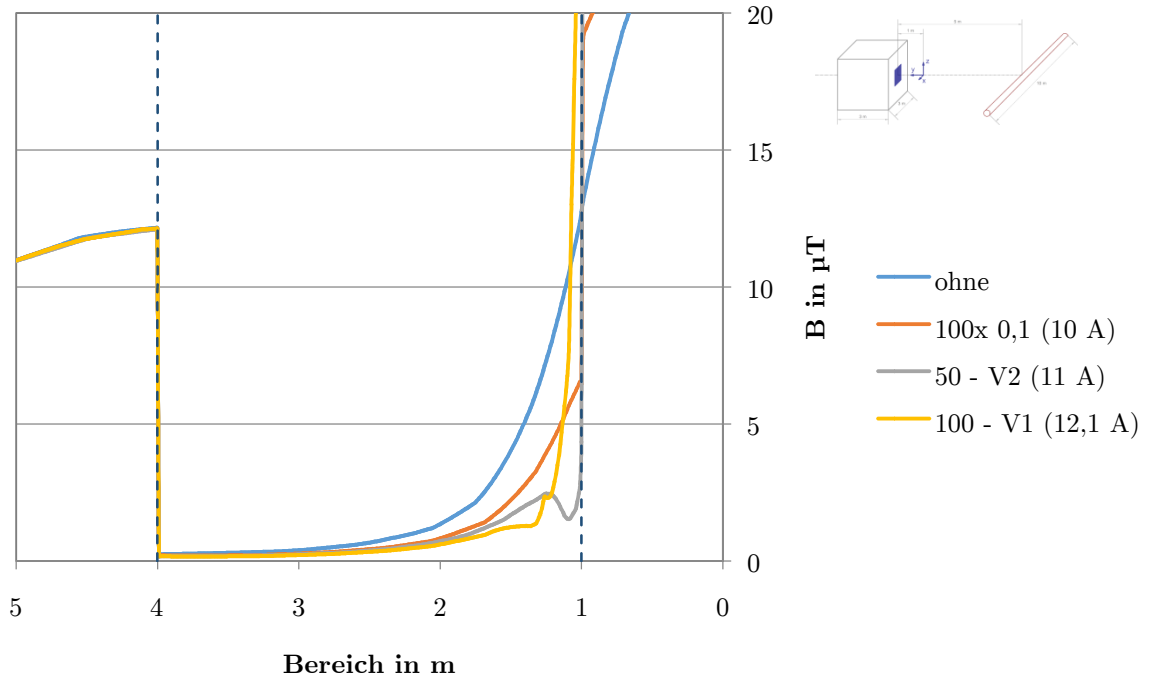


Abbildung 49: Vergleich unterschiedlicher Stromaufteilungen mit 50 bzw. 100 Leitern

In Abbildung 50 werden die Schnittbilder obiger Verläufe dargestellt. Ein gravierender Unterschied ist zwischen V1 & V2 nicht auszumachen.

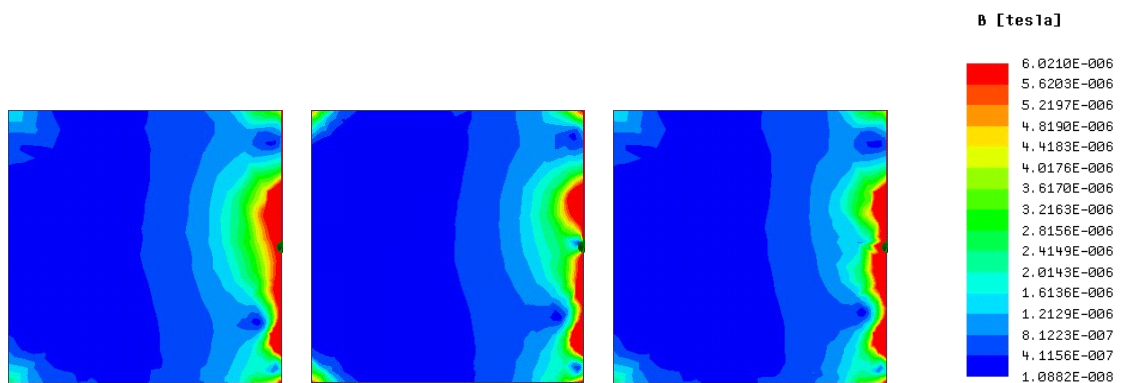


Abbildung 50: 50 bzw. 100 Leiter - Magnetfeld bei 100x 0,1 A / 50x (V2) / 100x (V1)

4.3.5 Schirmung durch dünne leitfähige Silberschichten

Studie zur aktiven Schirmung mittels leitfähigen Nanoschichten

In der Studie *"Feasibility of New Nanolayered Transparent Thin Films for Active Shielding of Low Frequency Magnetic Field"* [10] wird eine mehrschichtige, nanometerdicke leitfähige Schicht aus Silber auf eine Glasoberfläche aufgetragen. Diese Schicht ist so dünn, dass sie zu ca. 60 % lichtdurchlässig ist. Normale zweifach verglaste Fenster besitzen einen Lichttransmissionsgrad von etwa 80 %. Das heißt, man kann trotz der Silberschicht durch das Glas hindurchsehen. Der Strom wird über 12 einzelne Bahnen geführt und besitzt Stromstärken von bis zu 1,5 A pro Leiterbahn. Auch bei dieser Studie wurde mit einer Frequenz von 50 Hz gearbeitet. Das Testgehäuse hat Abmessungen von $a = 50$ cm und $b = 30$ cm. Die Öffnung c ist 40 cm breit. Das Gehäuse besteht aus 1 mm dickem PEC (perfect-electric-conductor). [10]

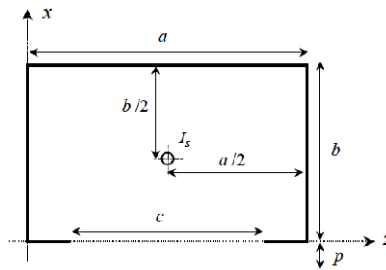


Abbildung 51: Studie - Abmessungen des Testgehäuses [10]

Das Störmagnetfeld wird hier, im Gegensatz zu dem Modell dieser Arbeit, im Inneren des Gehäuses erzeugt. Es soll somit verhindert werden, dass das Feld vom Gehäuse nach außen dringt. Durch den mittig im Gehäuse platzierten Störleiter fließt ein Strom von 25 A. Im Abstand $p = 5$ cm wird das Restfeld gemessen, welches trotz Schirmung noch durch die Öffnung hindurch tritt. Es werden laut numerischer Berechnung, allerdings zweidimensional, Schirmdämpfungswerte (ohne Schirm / mit passivem & aktivem Schirm) im Bereich von 12 bis 21 dB erreicht. [10]

Anwendung am Modell

Im nächsten Schritt sollen jetzt die Kupferdrähte durch dünne leitfähige Schichten aus Silber ersetzt werden. Hierzu werden 20 Leiterbahnen mit einer Schichtdicke von 700nm direkt auf der Fensterglasaußenseite platziert, siehe Abbildung 52. Bei der Studie sind es ca. 70 nm. Aufgrund der viel größeren Abmessungen in diesem Modell, ist es mit der Software nicht möglich, solch dünne Schichten zu berechnen. Für den Schirmeffekt dürfte dieser Unterschied keinen allzu markanten Einfluss haben. Die 45 mm breiten Bahnen werden im Abstand von 5,25 mm angeordnet.

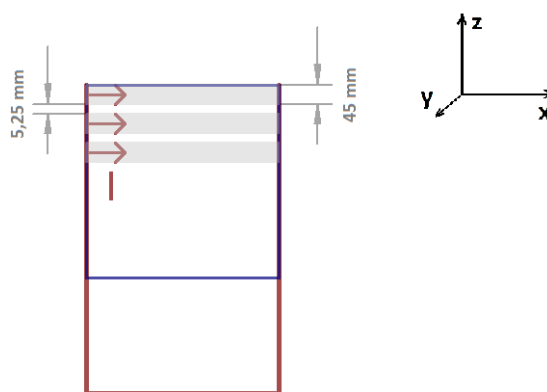


Abbildung 52: Schematik der Leiterbahnschichten aus Silber

Für die Verläufe des Magnetfelds im Raum in Abbildung 53 bzw. Abbildung 54 werden zwei verschiedene Stromaufteilungen V1 & V2 betrachtet. Wieder hat sich die pyramidenförmige Stromaufteilung als die beste Variante erwiesen. Pyramidenförmig bedeutet in der Mitte die größten Ströme und abfallend Richtung oben und unten immer kleinere Stromstärken.

Tabelle 8: Stromaufteilung für Leiterbahnen V1(11,8 A)

Leiter		Stromstärke
Nr.		A
1 - 3	18 - 20	0,1
4 - 5	16 - 17	0,2
6 - 8	13 - 15	0,5
9	12	1
10	11	3

Tabelle 9: Stromaufteilung für Leiterbahnen V2(14,6 A)

Leiter		Stromstärke
Nr.		A
1 - 4	17 - 20	0,1
5 - 6	15 - 16	0,2
7 - 8	13 - 14	0,5
9	12	1
10	11	4

Mit der Stromaufteilung V1 kann nach ca. 20 cm ein Minimum erreicht werden, wo eine Dämpfung von ca. 26 dB vorliegt. Erhöht man die Ströme in der Mitte des Fensters, so lässt sich im hinteren Bereich des Raumes eine niedrigere Flussdichte erreichen (V2). Wird der Strom in der Mitte niedriger gewählt, tritt das Minimum früher ein, aber mit einer geringeren Dämpfung. Je nach Anwendungsanforderung kann so die Schirmdämpfung in einem gewissen Maße beeinflusst und angepasst werden.

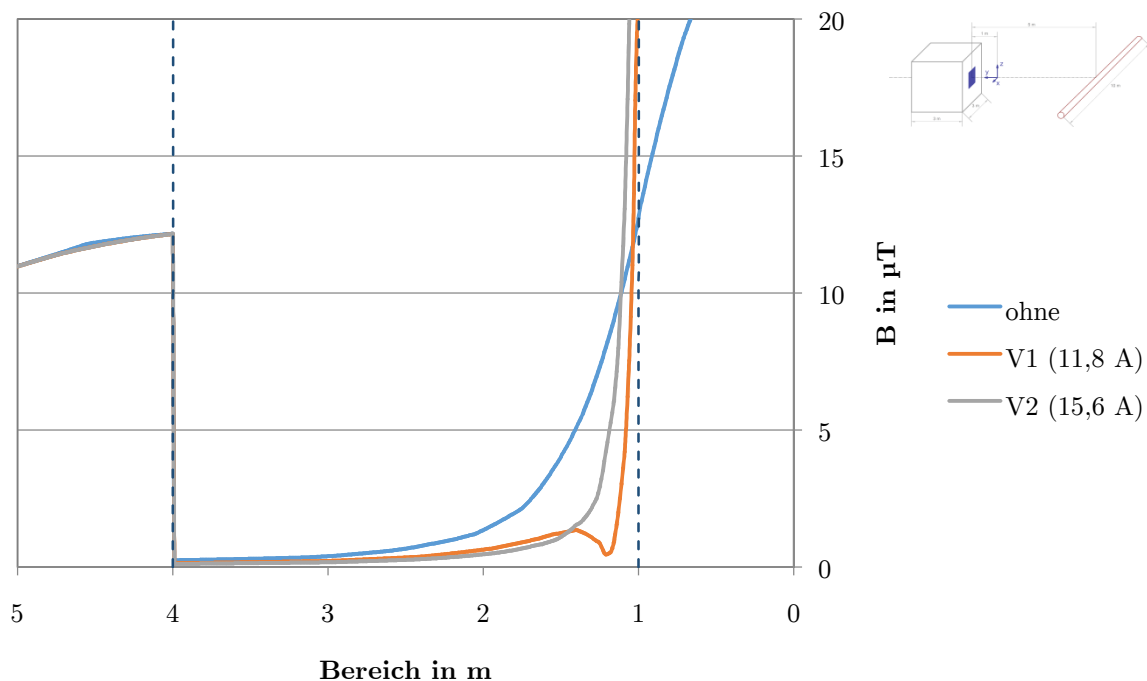


Abbildung 53: Leiterbahnen - Vergleich unterschiedlicher Stromaufteilungen

In Abbildung 54 sind die Feldverteilungen ohne eine aktive Schirmung und mit den Stromaufteilungen V1 und V2 dargestellt:

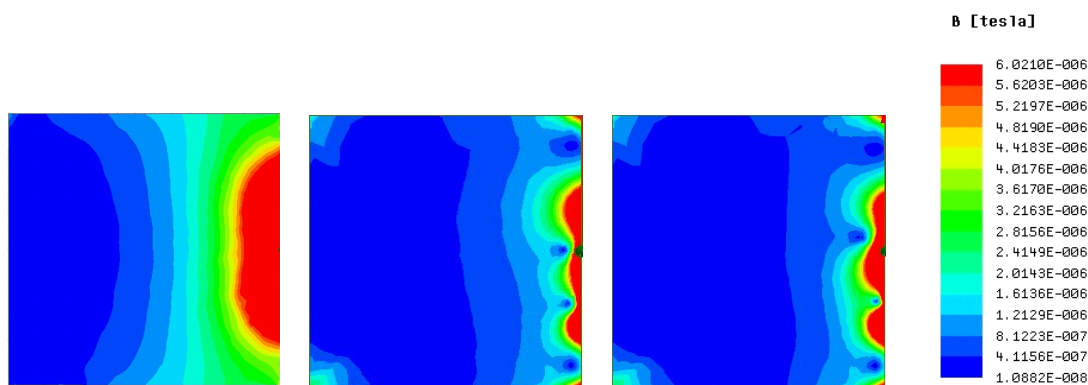


Abbildung 54: Magnetfeld ohne aktiven Schirm, bei V1 & V2

4.3.6 Vergleich der aktiven Schirmvarianten

Für den Vergleich über die Wirksamkeit der verschiedenen Schirmmodelle, wird von den unterschiedlichen Leiteranordnungen je eine Variante herangezogen. Von den

Modellen mit den 50 bzw. 100 Kompensationsleitern aus Kupfer wird hier, für eine bessere Übersichtlichkeit im Diagramm, keines angeführt, ferner sie nur als Vorläufer der Variante in 4.3.5 dienen. Auch das Modell mit nur einem Leiter wird hier aufgrund der doch deutlich schlechteren Schirmungsverhältnisse vernachlässigt.

In Abbildung 55 wird jetzt das Modell mit zwei Leitern, bei einem Abstand von 40 cm und mit 2×10 A, verwendet. Bei der 3-Leiter-Variante ist der Verlauf mit 3×5 A, mit einem Abstand von jeweils 20 cm, dargestellt. Für den dritten Verlauf wird das Leiterbahnmodell mit der Stromaufteilung V1 (siehe Tabelle 8) herangezogen. In der Nähe des Fensters weisen die drei Verläufe, aufgrund der verschiedenen Anordnung bzw. der Höhe des Stromes unterschiedliche Merkmale auf. Mit zunehmendem Abstand zum Fenster nimmt jedoch der Einfluss des aktiven Schirms ab und der passive Schirm gewinnt zunehmend an Bedeutung, wodurch sich die drei Kurven annähern.

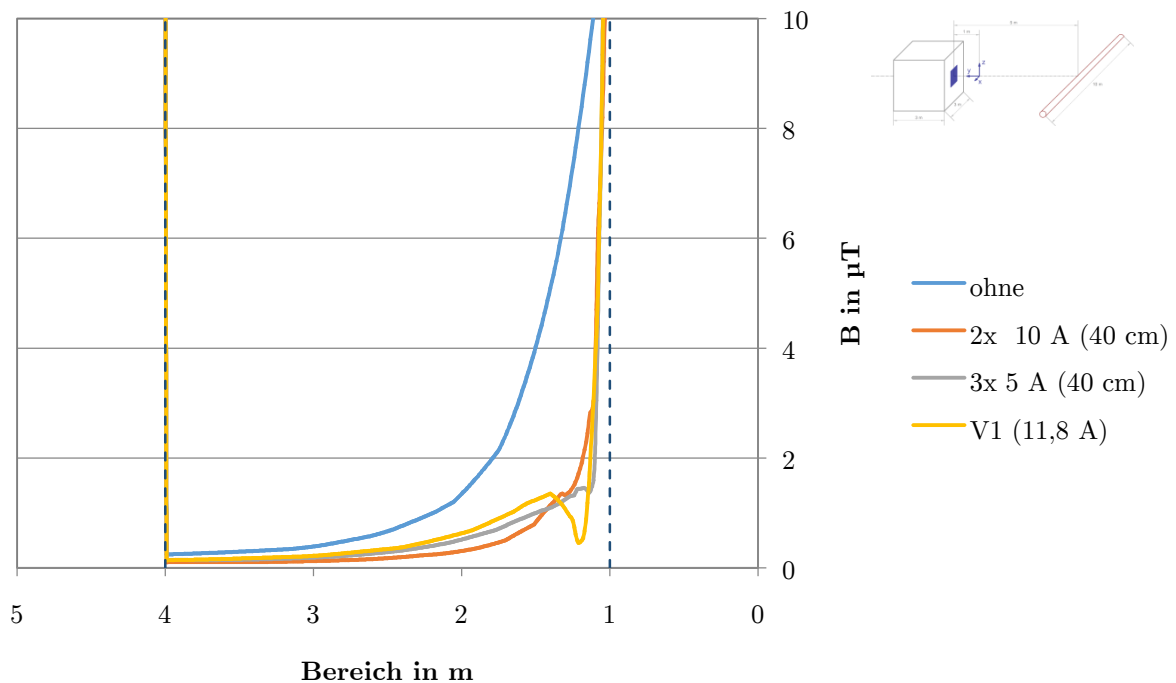


Abbildung 55: Vergleich der verschiedenen aktiven Schirmmodelle

In untenstehender Tabelle werden die Schirmdämpfungswerte (ohne/mit aktivem Schirm) 20 bzw. 50 cm hinter dem Fenster angeführt. Die 20 cm befinden sich ca. beim Minimum des Verlaufs V1, weshalb dieser bei 20 cm mit ca. 25 dB den größten Wert aufweist. Demgegenüber stehen 13 und 15 dB für die 2- und 3-Leiter Variante. Nach einem halben Meter beträgt der Unterschied zwischen den einzelnen Varianten nicht einmal mehr 4 dB.

Tabelle 10: Schirmdämpfung bei Abstand 20 bzw. 50 cm vom Fenster

Schirmart	Stromstärke	a_s bei 20cm	a_s bei 50cm
	A	dB	dB
Zwei Leiter 40 cm	2x 10 A	13,1	13,7
Drei Leiter 40 cm	3x 5 A	15,1	12,1
Leiterbahn V1	11,8 A	24,9	10,2

Man sieht, dass für gute Schirmdämpfungswerte es nicht zwingend notwendig ist, eine hochaufwendige Schirmung übers komplette Fenster zu realisieren. Es reichen zwei, drei dünne Drähte aus, welche im oder vor dem Fenster platziert werden. Zwar hat man mit mehreren Leiterbahnen eine bessere Möglichkeit, das Gegenfeld anzupassen, aber dafür ist ein viel größerer Aufwand nötig, was sich auch im Preis widerspiegelt. Zudem werden die Lichtverhältnisse durch eine geringere Lichttransmission etwas beeinflusst. Im Hinblick auf eine einfachere und praktisch leichter umsetzbare Lösung wird die Variante mit drei Leitern favorisiert. Sie bietet im Vergleich zum 2-Leiter-Modell mehr Möglichkeiten der Feldanpassung. Dadurch können bessere Feldverhältnisse geschaffen werden, bei minimal mehr Aufwand.

5 Auslegung des aktiven Schirms mit drei Kompensationsleitern

In diesem Kapitel soll die Variante mit der aktiven 3-Leiter-Kompensation noch genauer analysiert und verbessert werden. Wie man in den bisherigen Simulationen gesehen hat, ist es nicht möglich das Feld in allen Bereichen des Raumes perfekt zu schirmen. Anordnung und Stromverteilung der Kompensationsleiter haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Auch der Rückleiter wirkt sich auf das Feld im Inneren des Raumes negativ aus. Das Ziel ist, durch gewisse Adaptionen, eine gleichmäßigere Schirmung zu erreichen. Diese verbesserte Lösung soll dann für die Gesamteffektivität der Raumschirmung herangezogen werden.

5.1 Verbesserung der Schirmwirkung

Abbildung 56 zeigt das Vektorfeld im Raum bei der aktiven Schirmung mit 3 Leitern und jeweils 5 A. Zu erkennen sind drei Positionen, wo eine Verbesserung wünschenswert wäre: Unter dem Fenster, welche durch das Störfeld des Rückleiters verursacht wird, in bzw. knapp unter der Fenstermitte und der Bereich am oberen Ende der Fensteröffnung. Dieser entsteht durch den vermehrten Austritt der Feldlinien und ist vermutlich am Schwierigsten zu beherrschen.

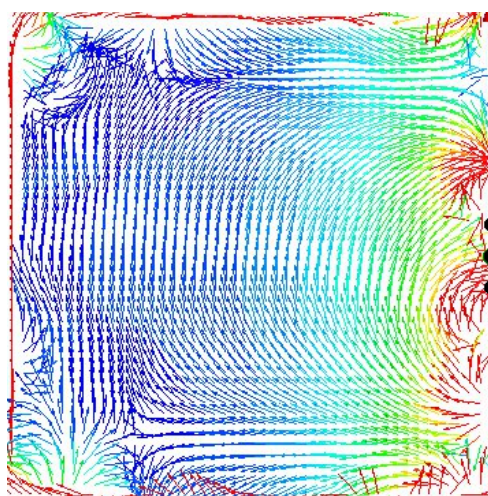


Abbildung 56: Vektorfeld bei 3x 5A aktiver Schirmung

Magnetfeld des Rückleiters

In Abbildung 56 ist der Einfluss des Rückleiters durch die roten Feldlinien unter dem Fenster zu erkennen. Durch diese Feldlinien entsteht, durch die entgegengesetzte Stromrichtung des Rückleiters, ein Magnetfeld mit derselben Drehrichtung wie der des Störleiters. Dies führt zu einer Verstärkung, anstatt einer Schwächung des Feldes. Um den Einfluss auf den Feldeintritt durchs Fenster zu verringern, kann die Rückführung des Stromes weiter unten, z.B. in Bodennähe erfolgen. Zusätzlich kann der Rückleiter, bedingt durch die Flussdichteabnahme mit dem Abstand, weiter vom Raum entfernt platziert werden. Das ist in der Praxis jedoch schwieriger umzusetzen. Wird der Rückleiter jetzt in Bodennähe anstatt knapp unter dem Fenster platziert, so ist eine leichte Verbesserung in Abbildung 57 zu sehen. Es wird erreicht, dass das Feld im Vergleich weniger weit streut und eine geringere Feldverzerrung von der Raumöffnung nach unten stattfindet. In der unteren Ecke, wo jetzt in der Nähe die Rückleitung erfolgt, entsteht eine leichte Felderhöhung.

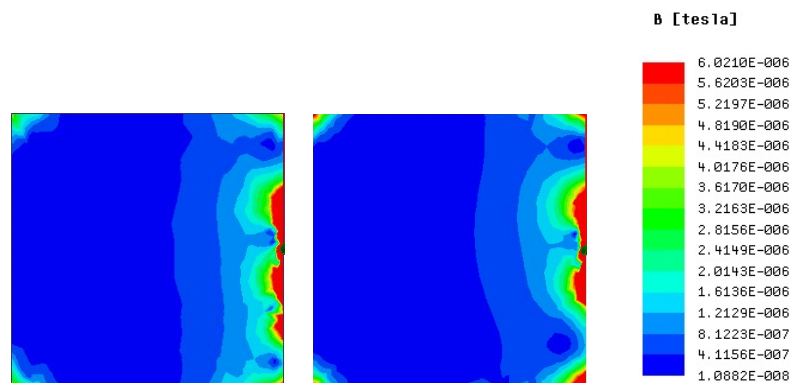


Abbildung 57: 3x 5 A: Rückleitung 30 cm bzw. 100 cm (am Boden) unter dem Fenster

Stromaufteilung / Leiterposition

Es wurde in den Simulationen schon gezeigt, dass sowohl die Stromhöhe, als auch das Verhältnis zwischen den einzelnen Kompensationsleitern, eine wesentliche Rolle spielen. Wird viel Strom eingespeist, so nimmt das Magnetfeld ab einer gewissen Entfernung schnell ab, was aber dazu führt, dass im Nahbereich des Fensters große

Flussdichten auftreten. Hingegen bei einer moderaten Stromspeisung wird das Feld, bei besseren Verhältnissen um das Fenster, im hinteren Bereich des Raumes weniger kompensiert. Die Stromstärke, Stromaufteilung, sowie die Position der einzelnen Leiter sollen durch Anpassung zu einer Verbesserung der Schirmwirkung führen.

Als Indikator wird dazu das Restfeld bei verschiedenen Abständen gemessen. Für den Nahbereich des Fensters wird der Abstand von 20 cm (Z_{20}) gewählt. Die Entfernung von 100 cm (Z_{100}) wird zur Beurteilung für den schnellen Feldabfall herangezogen. Zusätzlich wird das Feld noch bei unterschiedlichen Höhen entlang der Y-Achse betrachtet.

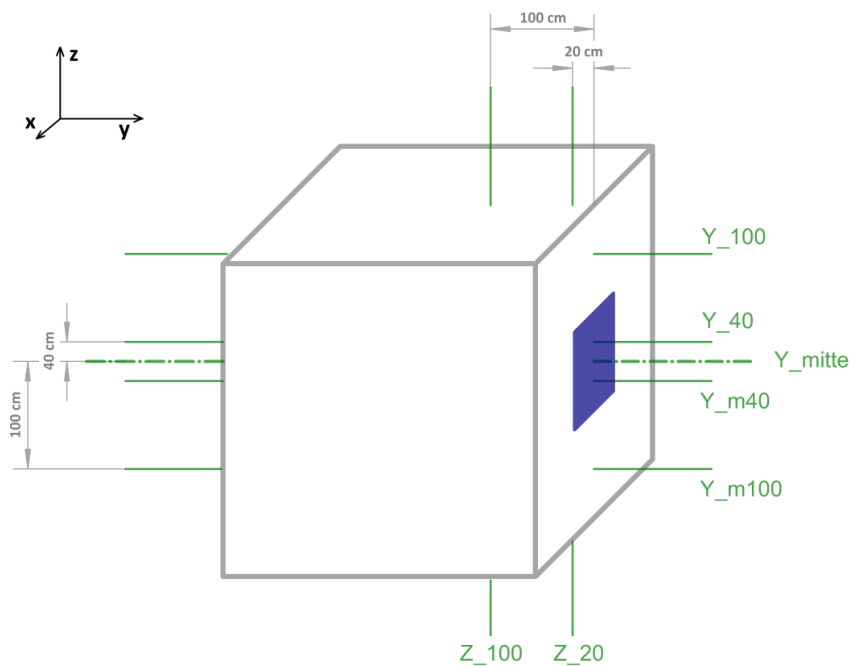


Abbildung 58: Schematik - Platzierung der Aufpunktsgesamten

Mit dem Leiterabstand von jeweils $a = 20$ cm (siehe Abbildung 45) werden schon gute Ergebnisse erzielt. Durch weitere Analysen der magnetischen Vektorfelder, wie in Abbildung 56, sollen noch mehr Fortschritte erzielt werden. Bringt man den oberen Leiter, auf Grund der dort auftretenden großen Flussdichten, in eine höhere Position, so ergeben sich kaum Verbesserungen; Eher verschlechtern sich dadurch die

Gegebenheiten im restlichen Raum. Positioniert man jedoch den unteren Leiter etwas weiter unterhalb, so sind im unteren Fensterbereich deutlich positive Veränderungen sichtbar. Recht gute Verhältnisse ergeben sich mit einem Abstand von $a_2 = 30$ cm anstatt $a_2 = 20$ cm Diese werden in untenstehender Abbildung 59, anhand von zwei Beispielen, dargestellt.

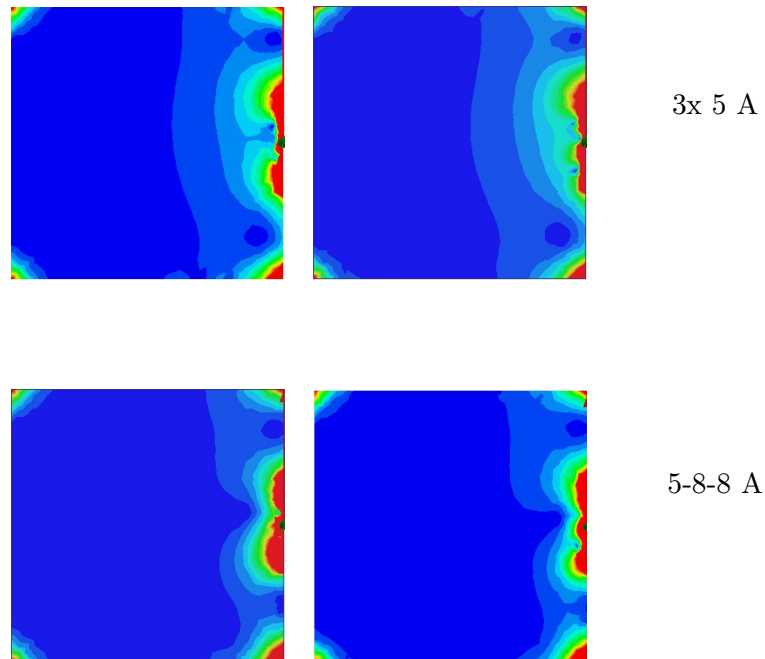


Abbildung 59: Veränderung der unteren Leiterposition
links: $a_2 = 20$ cm/ rechts: $a_2 = 30$ cm

Im letzten Schritt soll die Aufteilung des Stromes angepasst werden. Dazu wird als Erstes der Nahbereich des Fensters betrachtet. Der Abstand von $a_2 = 30$ cm wird beibehalten. In Abbildung 60 sind dazu die durchschnittlichen Schirmfaktoren von ein paar ausgewählten Stromvariationen angeführt. Dazu wird das Magnetfeld im Abstand von 20 cm hinterm Fenster berechnet. Dieses wird mit dem Magnetfeld ohne die aktive Schirmung, sprich nur die Aluminiumhülle, verglichen. Dieser Faktor beschreibt den durchschnittlichen Schirmfaktor über die Höhe des Raumes im Abstand von 20 cm (Z_{20} in Abbildung 58).

Die beste Dämpfung, mit knapp über 14 dB, wird mit der Kombination 4-8-6 A erreicht. Keine gute Wirkung erreicht man hingegen, bedingt durch die geringe Stromstärke in der Mitte, mit 7-3-6 A.

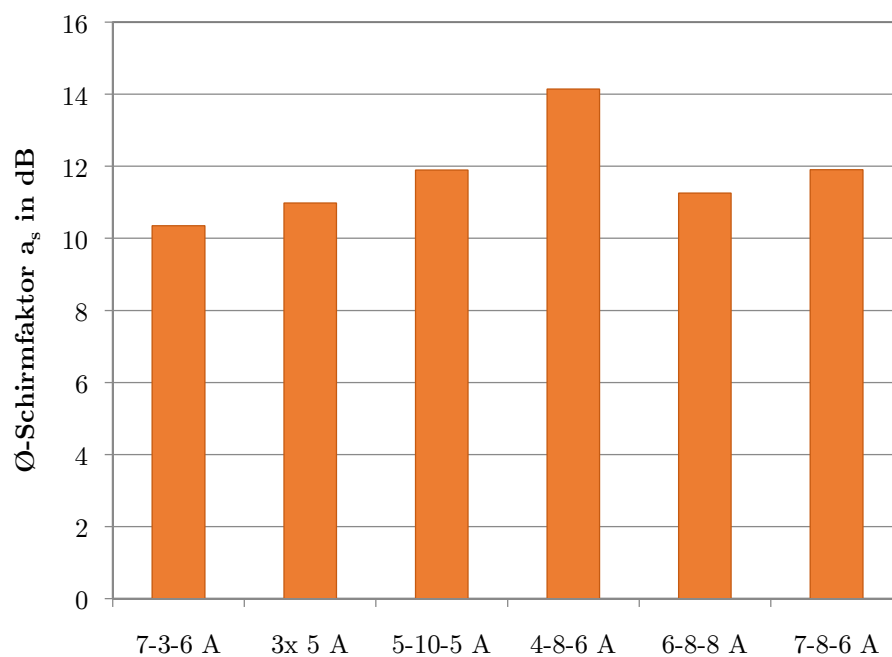


Abbildung 60: Durchschnittlicher Schirmfaktor a_s in dB - Abstand **20 cm** von der Fensterfläche

Die nächste Abbildung zeigt ebenfalls den durchschnittlichen Schirmfaktor a_s , allerdings in einem Abstand von 1 m zum Fenster (Z_100). Diese soll zeigen, wie stark das Feld bei einem Meter abgeschwächt wird und gibt Aufschluss über die Dämpfung im Großteil des Raumes. Denn schon bei dieser Entfernung sinkt das Feld im Verhältnis nur mehr gering.

Hier können ganz andere Stromvariationen ihre Stärken ausspielen. Diese entstehen durch den größeren Gesamtstrom, welcher durch die drei Leiter fließt, z.B. 22 A bei 6-8-8 im Gegensatz zu 18 A bei 4-8-6, der besten Kombination im Nahbereich. Die Varianten mit 3x 5 A bzw. 7-3-6 A erreichen hingegen nur etwa die Hälfte dieses Schirmfaktors.

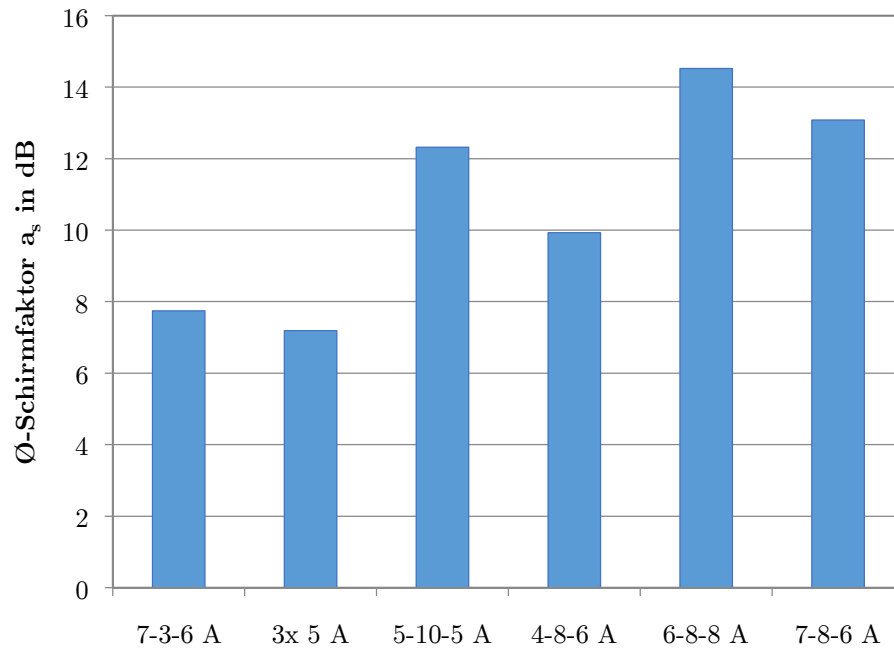


Abbildung 61: Durchschnittlicher Schirmfaktor a_s in dB - Abstand **100 cm** von der Fensterfläche

Um die Wirksamkeit der Kompensation im ganzen Raum besser beurteilen zu können, wird noch die durchschnittliche Schirmdämpfung über die gesamte Raumlänge ermittelt. Dies wird in fünf unterschiedlichen Höhen durchgeführt. Der daraus berechnete Mittelwert dieser Dämpfungswerte ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die Tendenz dieser Werte unterscheidet sich zu jenen in Abbildung 61 kaum. Das bedeutet, dass bei 1 m die direkten Auswirkungen der Kompensationsleiter bereits abgeschlossen sind. Auf den gesamten Raum gesehen spielen die ersten 20 cm in dieser Betrachtung daher eine eher untergeordnete Rolle. Die Gesamtwirksamkeit der Schirmung über den ganzen Raum kann damit aber gut eingestuft werden. Die beste Schirmdämpfung zeigt die Stromaufteilung 6-8-8 A. Die Variante 7-8-6 nimmt sowohl im Nahbereich, als auch bei der Betrachtung über den gesamten Raum die zweitbeste Position ein, stellt also einen Kompromiss zwischen Nahbereich und Gesamtwirksamkeit dar.

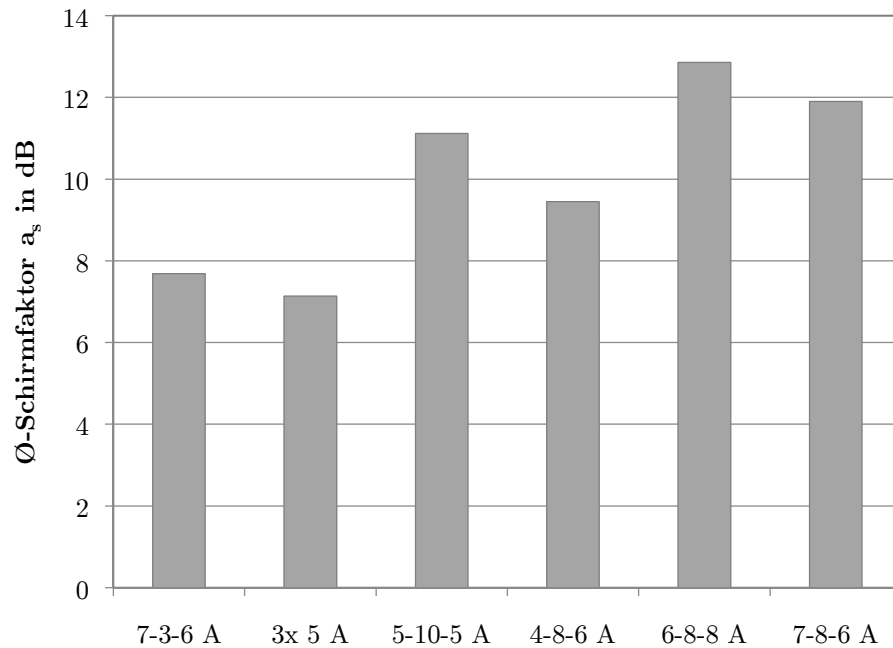


Abbildung 62: Durchschnittlicher Schirmfaktor a_s in dB - Y-Achsen

5.2 Wirksamkeit der Raumschirmung

Um eine Aussage über die Effektivität der erarbeiteten Schirmvarianten tätigen zu können, wird in diesem Punkt ein Vergleich angestellt. Es soll der Raum ohne jegliche Schirmung mit den Varianten

- Passive Schirmung durch 1 mm Aluminiumblech - ohne Fenster
- Passive Schirmung durch 1 mm Aluminiumblech - mit Fenster
- Passive & Aktive Schirmung mit Stromaufteilung 6-8-8 A

verglichen werden.

Dazu wird im ersten Schritt in Abbildung 63 der Verlauf des Magnetfeldes über die gesamte Raumlänge aufgetragen. Dabei stellen die Kurven jeweils den Mittelwert aus allen Y-Aufpunktsgerten in Abbildung 58 dar.

Die bestimmende Schirmung ist die passive Aluminiumhülle. Durch die aktive Kompensation kann der Feldeintritt durch die Raumöffnung nochmals deutlich verringert werden.

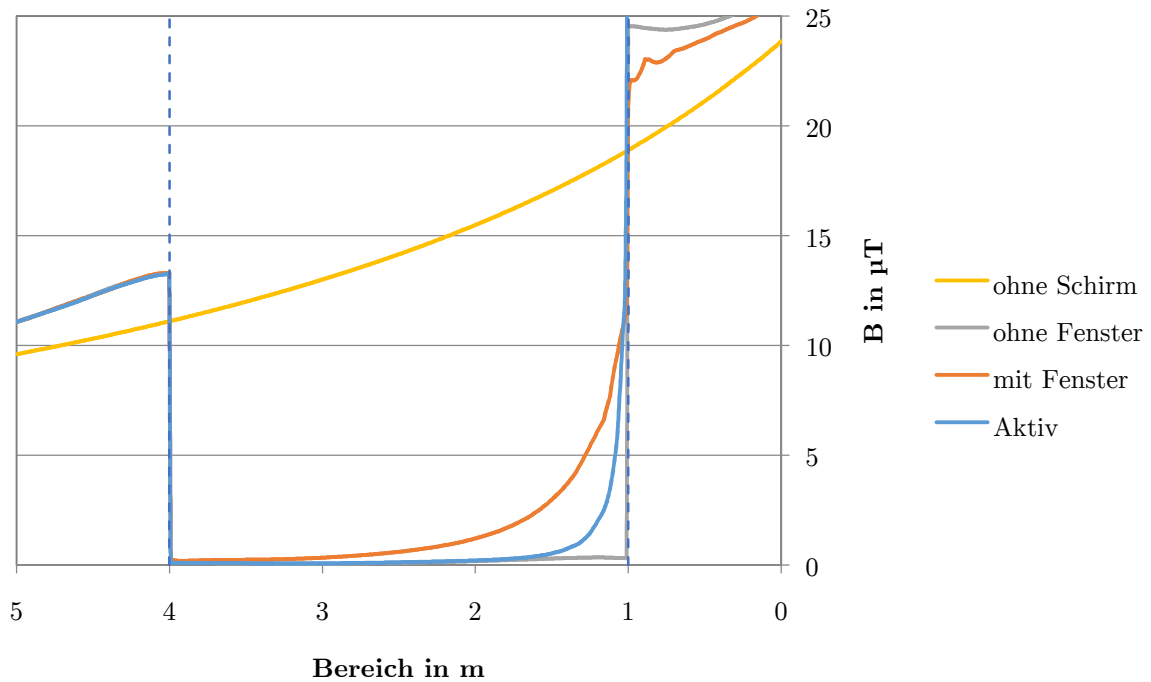


Abbildung 63: Vergleich des Magnetfeldverlaufs im Raum - Ohne Schirmung, Passiv mit 1 mm Aluminium, Passiv mit Fensteröffnung, Aktiv mit drei Leitern (6-8-8 A)

Die zugehörigen Feldbilder werden in Abbildung 64 abgebildet. Links die, bis auf leichte Felderhöhungen in den Ecken, sehr gute passive Schirmung mittels Aluminium. In der Mitte die Veranschaulichung des Feldeintritts durch das Fenster. Im Vergleich mit dem rechten Bild wird die Bedeutung der aktiven Kompensation sichtbar.

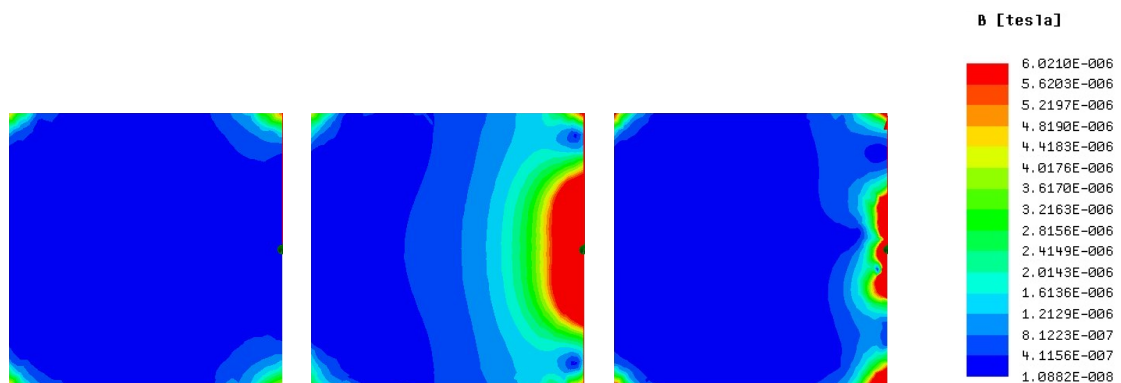


Abbildung 64: Vergleich - Passiv ohne Fenster, Passiv mit Fenster und aktiv mit Stromaufteilung 6-8-8 A

Abbildung 65 zeigt mittels der Schirmdämpfung a_s die Wirkung der drei Varianten auf den ungeschirmten Raum. Es ist wiederum der Durchschnittswert über die gesamte Raumlänge aufgetragen. Das bedeutet, durch die rein passive Schirmung, ohne Öffnung, kann eine Dämpfung von bis zu 41 dB erreicht werden. Mit Hilfe der aktiven 3-Leiter-Kompensation (6-8-8 A) wird trotz des Fensters noch eine Dämpfung von 37,5 dB erreicht.

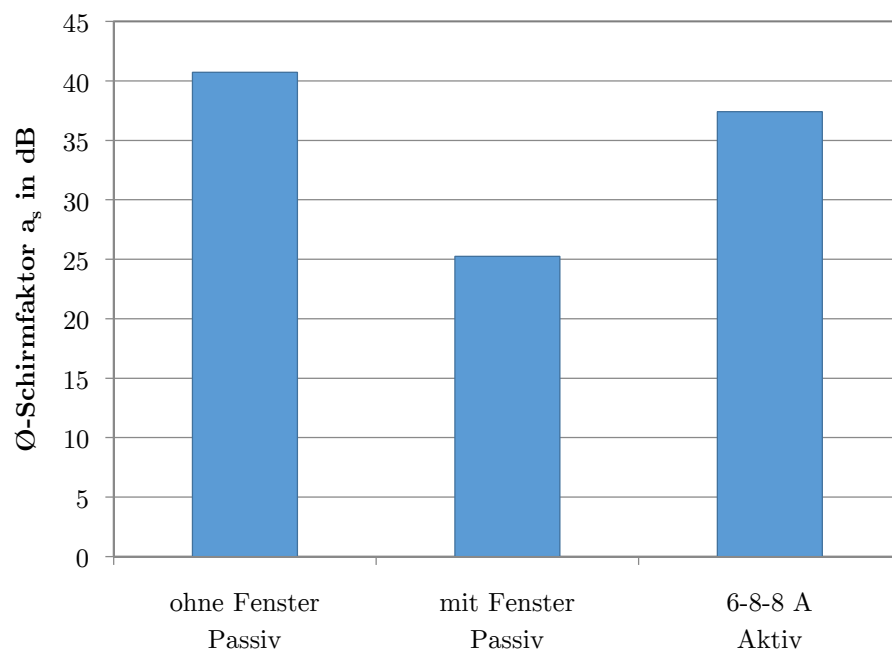


Abbildung 65: Vergleich der Schirmdämpfung im Raum - Passiv mit 1 mm Aluminium, Passiv mit Fensteröffnung, Aktiv mit drei Leitern (6-8-8 A)

5.3 Berechnungsaufwand einer Simulation

Aufgrund der schon angesprochenen komplexen Berechnungen ist ausreichend Rechenleistung nötig, um die Simulationen durchführen zu können. Daher wurde für die Berechnung der meisten Simulationen der Hochleistungsrechner der TU Graz herangezogen.

Um eine Idee von dem Rechenaufwand zu bekommen, sollen hier ein paar Eckdaten angeführt werden. Als Beispiel wird die Variante mit drei Leitern (3x 5 A)

herangezogen. Diese Berechnung wurde auf dem Hochleistungsrechner der TU Graz durchgeführt. Für diese Simulation wird ein Mesh mit 1 475 501 Tetraedern erzeugt. Bei der Berechnung werden 34,2 GB RAM verwendet. Die gesamte Simulationsdauer beläuft sich auf 07h und 52 min.

Bei dem Modell mit den leitfähigen Silberschichten war der Rechenaufwand, aufgrund der kleineren Details, nochmals um ca. 50 % größer.

6 Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit werden Methoden zur Schirmung von niederfrequenten magnetischen Feldern erarbeitet, analysiert und auf ihre Wirkung hin untersucht.

Grundsätzlich existieren zwei Arten zur Feldreduktion, die aktive und die passive Schirmung. Unter passiv versteht man die Schirmung eines Objektes nur durch Vorhandensein eines Schirmmaterials. Dies kann durch zwei verschiedene physikalische Effekte erreicht werden. Beim hochpermeablen Schirm, welcher sich weichmagnetischen Werkstoffen wie Eisen und Mu-Metall bedient, wird durch Brechung der magnetischen Feldlinien der magnetische Fluss im Schirmmaterial gebündelt. Dadurch wird das Feld rundum das Material, vor allem für magnetische Gleich- und niederfrequente Wechselfelder, verringert. Der elektrodynamische Schirm hingegen induziert, infolge des magnetischen Wechselfeldes, Wirbelströme im leitfähigen Material, welche ihrerseits wiederum ein magnetisches Gegenfeld erzeugen. Es kommt zur Feldreduktion. Der aktive Schirm bildet durch den gezielten Stromfluss in einer Leiteranordnung ein geeignetes Gegenfeld.

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Software ANSYS Maxwell wird die Schirmung an einem Raum sowie an einem Raum mit Fenster vorgenommen, welcher von einem äußeren Störmagnetfeld umgeben ist. Neben der sehr guten Schirmwirkung durch Mu-Metall, erweist sich Aluminium als eine gute und vor allem viel günstigere Alternative. Durch das Fenster kann das Magnetfeld aber nahezu ungehindert in den Raum eindringen. Zusätzlich zu der passiven Schirmung mit 1 mm - Aluminiumblech wird deshalb am Fenstereine aktive Magnetfeld-Kompensation angewendet. Die Sicht beim Fenster soll durch die notwendigen Maßnahmen nur minimal beeinträchtigt werden. Es werden Modelle mit 1, 2, 3, 50 und 100 Kompensationsleitern, sowie nanobeschichtete, durchsichtige Leiterbahnen auf ihre Wirksamkeit analysiert und miteinander verglichen. Aus den vielen Ausführungen erweist sich die Variante mit

drei stromdurchflossenen Kupferleitern, im Hinblick auf Aufwand zu Nutzen, als die sinnvollste.

Durch noch etwaige Verbesserungen von Position, Stromstärke usw. des 3-Leiter-Modells, kann somit im Raum eine durchschnittliche Schirmdämpfung von bis zu 37,5 dB erreicht werden. Das bedeutet eine Reduktion des Magnetfeldes um den Faktor 74. Ohne Fenster beträgt die Dämpfung 41 dB.

Es kann gezeigt werden, dass trotz des erheblichen Feldeintritts beim Fenster, durch gezielte aktive Kompensation, das Magnetfeld signifikant gesenkt werden kann.

Rundum diese Thematik sind noch einige Fragen offen, an denen noch weitergearbeitet werden sollte. Im Hinblick auf eine praktische Umsetzung, wird für jeden Einsatz eine individuelle Lösung nötig sein. Phasenlage und Stärke des störenden Magnetfeldes wirken unterschiedlich auf den Schirmmechanismus, welcher somit an die Gegebenheiten angepasst werden muss. Bei veränderlichen Bedingungen könnte dafür eine Regelung des Stromes, bzw. der Stromaufteilung zum Einsatz kommen.

Auch die Wärmeentwicklung der Kompensationsleiter darf nicht vernachlässigt werden und muss in die Überlegungen mit einfließen. Neben den noch offenen technischen Fragen, muss auch noch die ökonomische Sachlage betrachtet werden.

7 Literatur

- [1] Österreichs E-Wirtschaft, *Elektrische und magnetische Felder - Fragen und Antworten*. Wien: Österreichs E-Wirtschaft Akademie GmbH, 2014.
- [2] Dr. Ernst Schmutzner, VO Elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Systeme, 2014.
- [3] Valentin Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [4] Hans A. Wolfspenger, *Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [5] Wolfgang Kürner Adolf J. Schwab, *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [6] Heinrich Kaden, *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*. Berlin_Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.
- [7] Max Heinzler, Karl Eberscheg, *Tabellenbuch Metall*. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2002.
- [8] ANSYS Inc., *user's guide – Maxwell 3D*. Canonsburg: ANSYS Inc., 2012.
- [9] Jutta Richter. (2017, Jan.) db-electronic. [Online]. <http://www.db-electronic.de/produkte/mumetall-folie.html>
- [10] M.S. Sarto, A. Tamburrano M. D'Amore, "Feasibility of New Nanolayered Transparent Thin Films for Active Shielding of Low Frequency Magnetic Field," University of Rome, Rom, Italien, Studie 2005.