

# **Analytische Berechnung der Schirmwirkung von Karosserieblechen und Einsatz von aktiver Kompensation gegen niederfrequente Magnetfelder von HV-Leitungen in Elektrofahrzeugen**

B. Sc. Anika Henke, TU Dortmund, anika.henke@tu-dortmund.de

M. Sc. Robert Nowak, TU Dortmund, robert.nowak@tu-dortmund.de

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, stephan.frei@tu-dortmund.de

## **1 Einleitung**

Aus verschiedenen Gründen wird die Bedeutung der Elektromobilität immer weiter zunehmen. In Fahrzeugen mit Elektroantrieb werden üblicherweise Drehfeldmaschinen mit hohen Stromstärken eingesetzt. Um diese zu versorgen, werden sogenannte Hochvoltleitungen (Kfz-HV-Leitungen) verwendet. Es entstehen aufgrund der hohen Ströme in den Fahrzeugen niederfrequente magnetische Felder. Um Wechselwirkungen und Beeinflussungen mit der Umwelt, Personen und auch dem Fahrzeug selbst zu unterbinden, dürfen diese Felder gegebene Grenzwerte [1] nicht überschreiten. Je nach Verlegung der Leitung und Karosseriematerial kann die Fahrzeugkarosserie eine Abschirmung bieten und bei der Einhaltung der Grenzwerte unterstützen. Die Schirmwirkung der Fahrzeugkarosserie auf niederfrequente Ströme in HV-Leitungen ist Gegenstand verschiedener Untersuchungen.

In der Literatur finden sich zumeist numerische Ansätze für die Modellierung von Leitern mit endlichem Leiterquerschnitt und einer begrenzten Abschirmung (siehe beispielsweise [2]). Da die numerischen Lösungen mit langen Rechenzeiten verbunden sind und grundsätzliche Zusammenhänge nur schwer erkannt werden können, wird hier eine analytische Lösung vorgestellt. Hierbei werden die stromführenden Leiter unter der Karosserie angeordnet. Es wird also davon ausgegangen, dass die HV-AC-Leitungen außerhalb der Fahrgastzelle verlegt werden, um gegebenenfalls die Schirmwirkung der Karosserie nutzen zu können. Neben der als unendlich ausgedehnt angenommenen Karosserie müssen für die Einschränkung der Komplexität des Lösungsansatzes weitere Näherungen getroffen werden. So werden die Leiter als fadenförmig und unendlich lang angenommen. Durch diese Annahmen können die geltende partielle Differentialgleichung mit Hilfe eines Reihenansatzes gelöst werden. Untersucht werden unterschiedliche Leiteranordnungen und Schirmmaterialien. Die für verschiedene Konfigurationen berechneten magnetischen Flussdichten werden mit Personengrenzwerten verglichen und mögliche Kompensationsmaßnahmen untersucht.

## **2 Bestimmung der analytischen Lösung für eine beliebige Leiteranordnung**

Hier wird davon ausgegangen, dass die magnetischen und elektrischen Eigenschaften des Schirmmaterials linear, homogen und isotrop sind. Aufgrund der Symmetrie weisen die auftretenden magnetischen Felder keine  $z$ -Komponente auf. Deshalb wird diese im Folgenden nicht mit notiert, sondern als Null angenommen. Zu Vergleichszwecken wird

die „freie“ Lösung, d.h. die Lösung im freien Raum ohne Karosserie, bestimmt. Die magnetische Flussdichte eines langen, stromdurchflossenen Leiters mit Strom  $I$  parallel zur  $z$ -Achse im Vakuum ist bestimmt durch

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \mathbf{e}_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} \begin{pmatrix} -r_y \\ r_x \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Untersucht werden vor allem zwei verschiedene Anordnungen, die in Bild 1 skizziert werden. Abkürzend werden diese hier mit „lineare Leiteranordnung“ und „Dreiecksanordnung“ bezeichnet. Für ein Dreileitersystem in linearer Anordnung ergibt sich damit unter Berücksichtigung einer Phasenverschiebung von  $120^\circ$  zwischen den Leitern

$$\mathbf{B}_{\text{fr,linear}}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{e^{-\frac{j2\pi}{3}}}{(x+a)^2 + (y-h)^2} \begin{pmatrix} -(y-h) \\ x+a \end{pmatrix} + \frac{1}{x^2 + (y-h)^2} \begin{pmatrix} -(y-h) \\ x \end{pmatrix} + \frac{e^{\frac{j2\pi}{3}}}{(x-a)^2 + (y-h)^2} \begin{pmatrix} -(y-h) \\ x-a \end{pmatrix} \right). \quad (2)$$

Bei der Dreiecksanordnung wird analog verfahren. Zur Lösung des eigentlichen Problems wird als Ausgangspunkt [3] verwendet. Zunächst wird der Raum in drei Bereiche unterteilt: Den Bereich I oberhalb der Karosserie, den Bereich II in der Karosserie sowie den Bereich III unterhalb der Karosserie. Im Folgenden bezeichnet  $A$  das magnetische Vektorpotential und  $\kappa$  die Leitfähigkeit. Zu lösen ist die Differentialgleichung

$$\Delta A = \mu\kappa j\omega A, \quad (3)$$

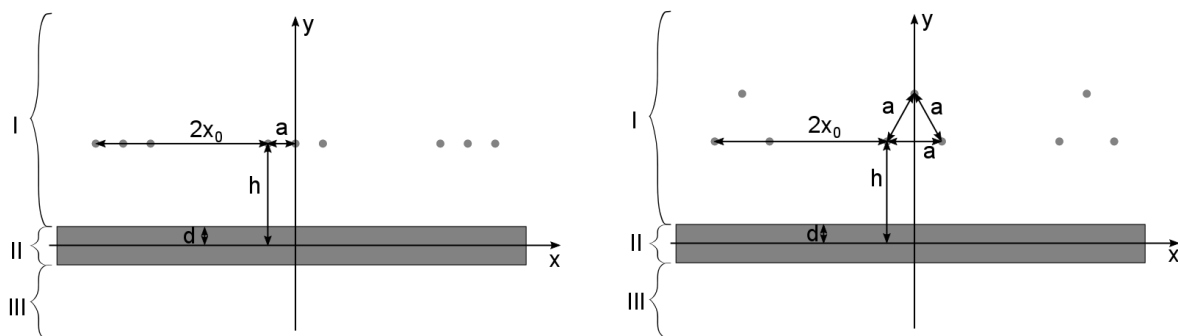
wobei sich diese in den Bereichen I und III aufgrund des angenommenen Vakuums (und damit  $\kappa = 0$ ) zur Laplacegleichung

$$\Delta A = 0 \quad (4)$$

vereinfacht. Ausgegangen wird nun von einer periodisch wiederholten Anregung. Später wird der Abstand der periodischen Wiederholungen so groß gewählt, dass der Strom bzw. das Magnetfeld der periodisch auftretenden Leiter nahezu keinen Einfluss mehr haben. Die Stromdichte eines Einzelleiters der Anregung wird nun als eindimensionale Fourierreihe in Abhängigkeit der  $x$ -Koordinaten entwickelt. Damit ergibt sich

$$f(x) = \frac{I}{x_0} e^{j\varphi_1} \left( \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi}{x_0} x\right) \right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{I}{x_0} e^{j\varphi_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{2N} + \cos\left(\frac{n\pi}{x_0} x\right) \right). \quad (5)$$

Die so gefundene Reihe wird als  $x$ -Abhängigkeit des Vektorpotentials gewählt (Separationsansatz), die  $y$ -Abhängigkeit sei noch unbekannt und wird durch die Funktionen  $F_{\text{In}}, F_{\text{IIn}}$



**Bild 1:** Skizzen der untersuchten Konfigurationen für die lineare Anordnung (links) sowie für die Dreiecksanordnung (rechts).

und  $F_{III_n}$  beschrieben. Der so gewonnene Ansatz wird in die Differentialgleichung eingesetzt. Dies liefert neue Differentialgleichungen für die  $y$ -Abhängigkeiten:

$$\left(\frac{n\pi}{x_0}\right)^2 \cdot F_{In}(y) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} F_{In}(y), \quad (6)$$

$$\left(\alpha^2 + \left(\frac{n\pi}{x_0}\right)^2\right) \cdot F_{II_n}(y) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} F_{II_n}(y), \quad (7)$$

$$\left(\frac{n\pi}{x_0}\right)^2 \cdot F_{III_n}(y) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} F_{III_n}(y). \quad (8)$$

Dabei gilt  $\alpha^2 = j\omega\kappa\mu$ . Als Ansätze zur Lösung dieser Differentialgleichungen werden die folgenden Funktionen gewählt, die die gegebene Geometrie berücksichtigen:

$$F_{In}(y) = C_{In} \cdot e^{-\frac{n\pi}{x_0}|y-h|} + D_{In} \cdot e^{-\frac{n\pi}{x_0}y}, \quad (9)$$

$$F_{II_n}(y) = C_{II_n} \cdot e^{k_n(y+d)} + D_{II_n} \cdot e^{-k_n(y+d)}, \quad (10)$$

$$F_{III_n}(y) = C_{III_n} \cdot e^{\frac{n\pi}{x_0}y} \quad (11)$$

mit  $k_n = \sqrt{\alpha^2 + \left(\frac{n\pi}{x_0}\right)^2}$ . Mit Hilfe der sich aus dem einfachen Durchflutungsgesetz und den Übergangsbedingungen zwischen den Bereichen ergebenden Bedingungen kann ein Gleichungssystem für die fehlenden Parameter  $C_{in}$  und  $D_{in}$  aufgestellt und gelöst werden. Es ergeben sich damit

$$C_{In} = \frac{\mu_0 x_0}{2n\pi}, \quad (12)$$

$$D_{In} = \frac{C_{In}}{N_n} \left(\beta_n - \frac{1}{\beta_n}\right) e^{\frac{n\pi}{x_0}(2d-h)} \sinh(2k_n d), \quad (13)$$

$$C_{II_n} = \frac{C_{In}}{N_n} (1 + \beta_n) e^{\frac{n\pi}{x_0}(d-h)}, \quad (14)$$

$$D_{II_n} = \frac{C_{In}}{N_n} (1 - \beta_n) e^{\frac{n\pi}{x_0}(d-h)}, \quad (15)$$

$$C_{III_n} = 2 \frac{C_{In}}{N_n} e^{\frac{n\pi}{x_0}(2d-h)}. \quad (16)$$

So ist eine Lösung für das Vektorpotential in Reihendarstellung gegeben durch:

$$A_I = \sum_{n=1}^{\infty} F_{In}(y) \frac{I}{x_0} e^{j\varphi_1} \left(\frac{1}{2N} + \cos\left(\frac{n\pi}{x_0}x\right)\right), \quad (17)$$

$$A_{II} = \sum_{n=1}^{\infty} F_{II_n}(y) \frac{I}{x_0} e^{j\varphi_1} \left(\frac{1}{2N} + \cos\left(\frac{n\pi}{x_0}x\right)\right), \quad (18)$$

$$A_{III} = \sum_{n=1}^{\infty} F_{III_n}(y) \frac{I}{x_0} e^{j\varphi_1} \left(\frac{1}{2N} + \cos\left(\frac{n\pi}{x_0}x\right)\right). \quad (19)$$

Die Gesamtlösung wird durch Überlagerung der Lösungen für die Einzelleiter gewonnen. Durch Rotationsbildung (welche hier aufgrund der gewählten Anordnung in einfache Ableitungen übergeht, da das magnetische Vektorpotential nur eine  $z$ -Komponente aufweist) wird die magnetische Flussdichte bestimmt.

$$B_{ix} = \frac{\partial A_i}{\partial y}, \quad B_{iy} = -\frac{\partial A_i}{\partial x}. \quad (20)$$

Für den speziellen Fall, dass alle drei Leiter in derselben Höhe  $h$  über der Karosserie parallel zueinander mit gleichmäßigem Abstand untereinander angeordnet sind, lässt sich die Fourierreihe der drei anregenden Terme sofort zusammen entwickeln, sodass später keine Überlagerung mehr notwendig ist. Dies reduziert für diesen Fall die Rechenzeit erheblich.

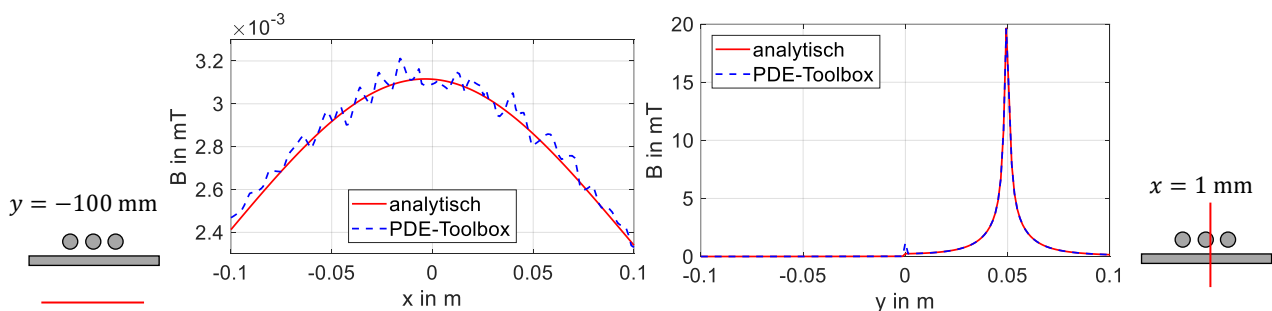
Alternativ zu diesem Vorgehen kann auch die bereits aus [3] bekannte Lösung der Doppelleitung verwendet werden, um daraus die Einzelleiterlösung abzuleiten. Dazu wird diese verschoben und der Abstand der beiden Leiter wird groß gewählt, sodass sich effektiv die Einzelleiterlösung ergibt.

### 3 Validierung der Lösung

Mit den folgenden typischen Parameterwerten wird die entwickelte Lösung untersucht:

|   |   |
|---|---|
| $d = 0,4 \text{ mm}$                                  | halbe Karosseriedicke   |
| $I = 400 \text{ A}$                                   | Stromamplitude des Stromes durch die einzelnen Leiter                                   |
| $x_0 = 10 \text{ m}$                                  | halber Abstand zwischen den periodischen Wiederholungen                                 |
| $f = 300 \text{ Hz}$                                  | Frequenz des erregenden Stromes   |
| $a = 11 \text{ mm}$                                   | Abstand zwischen den einzelnen Leitern (angenommener Leiterdurchmesser)                 |
| $h = d + 1 \text{ mm} + \frac{a}{2} = 6,9 \text{ mm}$ | Höhe der Leiter über der $x$ -Achse, Annahme einer Dämmschicht mit einer Dicke von 1 mm |
| $N = 20.000$  | maximaler Laufindex der Reihe   |

Verglichen wird dabei mit der numerischen Lösung von Gleichung (3), die mithilfe von MATLAB und den entsprechenden Toolboxen bestimmt wird [4]. Damit resultiert Bild 2. Untersucht wird dabei der Verlauf der magnetischen Flussdichte für die Schnitte  $y = -100 \text{ mm}$  sowie  $x = 1 \text{ mm}$ . Insgesamt zeigt sich dabei eine gute Übereinstimmung. Für  $y = -100 \text{ mm}$  lässt sich deutlich sehen, dass die Diskretisierung der numerischen Lösung nicht sehr genau ist. Der grobe Kurvenverlauf der numerischen und der analytischen Lösung ist jedoch ähnlich.



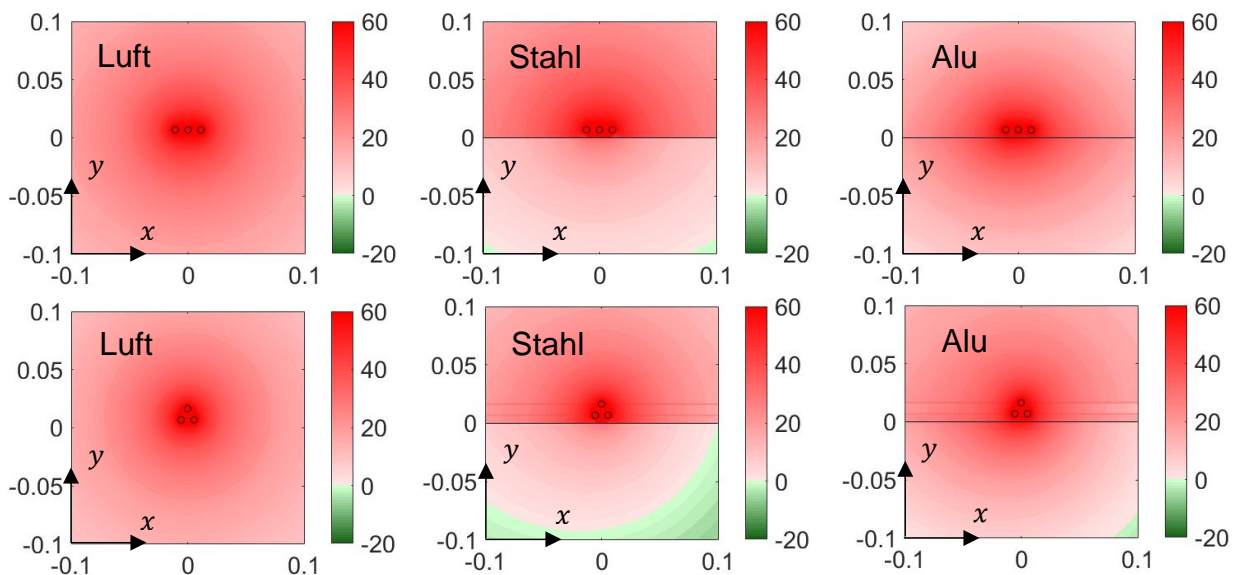
**Bild 2:** Resultierende Feldverläufe entlang der angegebenen Konturen zum Vergleich der analytischen Lösung mit der numerischen Lösung.

## 4 Magnetfelder in Kfz und Personenschutzgrenzwerte

In diesem Kapitel werden zunächst die typischen Magnetfelder im Kfz für unterschiedliche Karosseriematerialien berechnet. Darauf folgt der Vergleich mit Personenschutzgrenzwerten.

### 4.1 Typische Magnetfelder in Kfz

In Kfz kommen in der Regel zwei Leiteranordnungen in Betracht. In Bild 3 sind für die lineare Anordnung (obere Zeile) sowie für die Dreiecksanordnung (untere Zeile) jeweils die freie Lösung, die Lösung für eine Stahlkarosserie sowie die Lösung für eine Aluminiumkarosserie für die magnetische Flussdichte (von links nach rechts) dargestellt. In Abhängigkeit von der  $x$ - und der  $y$ -Koordinate in m wird hier das Verhältnis zwischen den auftretenden Flussdichten und dem zulässigen Grenzwert (konstant für eine Frequenz, siehe folgendes Unterkapitel) in dB dargestellt. Dazu werden die oben genannten Parameterwerte verwendet. Außerdem werden eine relative Permeabilität von  $\mu_r = 500$  und eine Leitfähigkeit von  $\kappa = 5,88 \cdot 10^6$  S/m als Materialparameter für eine Stahlkarosserie [5] sowie  $\mu_r = 1$  und  $\kappa = 4 \cdot 10^7$  S/m für eine Aluminiumkarosserie verwendet [6].

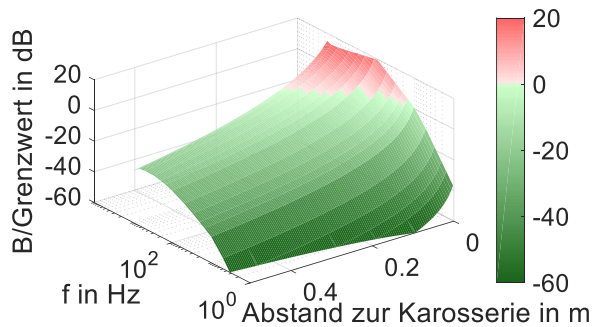


**Bild 3:** Beträge der resultierenden magnetischen Flussdichten normiert auf die zulässigen Grenzwerte (siehe Kapitel 4.2) in dB für lineare (oben) und Dreiecksanordnung (unten).

### 4.2 Vergleich mit Personenschutzgrenzwerten

Zeitlich veränderliche magnetische Felder erzeugen auch im menschlichen Körper unerwünschte elektrische Felder und Wirbelströme. Deshalb werden von unterschiedlichen Organisationen Grenzwerte für die zulässigen magnetischen Felder, die den menschlichen Körper durchsetzen dürfen, festgelegt. Gemein ist ihnen, dass mit steigender Frequenz die zulässige magnetische Flussdichte sinkt. Als Grenzwerte werden hier die von ICNIRP 1998 [1] veröffentlichten Abschätzungen der maximal zulässigen Flussdichten verwendet. Es sind auch neuere Richtlinien derselben Organisation vorhanden. Dennoch

werden bewusst die älteren Grenzwerte verwendet, da diese strenger ausfallen und zum Teil immer noch herangezogen werden.



**Bild 4:** Magnetische Flussdichte bezogen auf Grenzwert in dB.

Für weiter voneinander entfernte erregende Leiter, als oben angenommen, können sich die auftretenden Felder weniger stark kompensieren, sodass tendenziell eine schlechtere Einhaltung der Grenzwerte erwartet werden kann. Mit den oben genannten Parametern, aber variabler Frequenz, lässt sich die Frequenzabhängigkeit der Einhaltung der Grenzwerte unterhalb der Karosserie untersuchen. Untersucht wird dabei der Verlauf des Betrages der magnetischen Feldstärke unterhalb der Karosserie für zunehmenden

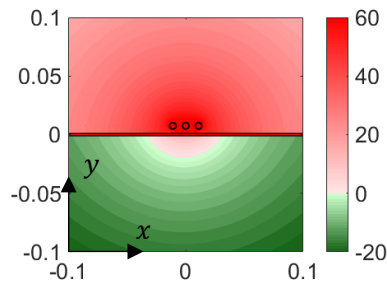
Abstand von der Karosserie. In Abhängigkeit von der Frequenz in Hz wird hier die jeweils auf die Grenzwerte normierte Feldstärke in dB für die lineare Leiteranordnung aufgetragen. Damit ergibt sich Bild 4. Das Maximum wird hier in etwa bei einer Frequenz von 300 Hz erreicht. Deshalb wird im Folgenden diese Frequenz verwendet.

## 5 Maßnahmen zur Einhaltung der Personengrenzwerte

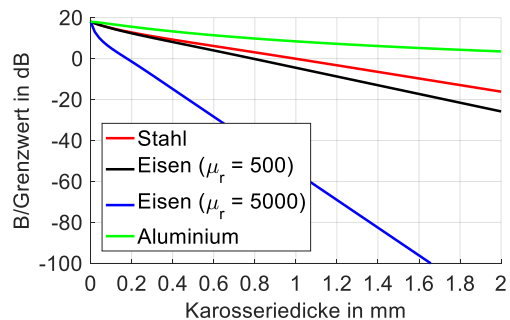
Um einer Überschreitung der Grenzwerte entgegen zu wirken, kommen unterschiedliche Reduktionsmaßnahmen in Frage. Diese werden im Folgenden untersucht und diskutiert.

### 5.1 Geometrie und Materialparameter

In Einzelfällen kann die Materialdicke vergrößert werden, um die Schirmwirkung zu erhöhen. Beispielhaft ist in Bild 5 für eine Stahlkarosserie mit einer Dicke von 2 mm der Verlauf des Betrages der

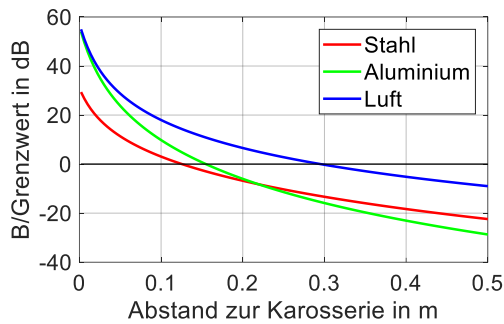


**Bild 5:** Magnetische Flussdichte bezogen auf Grenzwert in dB bei einer Karosseriedicke von 2 mm.



**Bild 6:** Auf Grenzwert normierte magnetische Flussdichte für verschiedene Materialien bei  $(x|y) = (0 \text{ cm}|-10 \text{ cm})$ .

magnetischen Feldstärke dargestellt. Zu erkennen ist, dass unterhalb der Karosserie die Grenzwerte fast überall deutlich unterschritten werden. In Abhängigkeit von der Karosseriedicke wird der Verlauf der magnetischen Flussdichte, ausgewertet 10 cm unterhalb der Karosseriemitte an der Stelle  $x = 0 \text{ cm}$ , in Bild 6 normiert auf die zulässigen Grenzwerte in dB dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Karosseriedicke die Flussdichte abnimmt. Dabei wird diese Abnahme durch die Materialparameter insofern geprägt, als dass für höhere relative Permeabilität die Schirmwirkung zunimmt, also ein schnellerer Abfall über der Schirmdicke zu beobachten ist.



**Bild 7:** Magnetische Flussdichte bezogen auf Grenzwert in dB bei einer Karosserie-dicke von 0,8 mm mit einer Frequenz von 300 Hz.

In Bild 7 wird der Verlauf der magnetischen Flussdichte unterhalb der Karosserie für den Schnitt parallel zur  $y$ -Achse für die unterschiedlichen Materialien mit zunehmendem Abstand von der Karosseriemitte untersucht. Es zeigt sich, dass aufgrund der angenommenen Materialparameter die hochpermeable Schirmung und die Wirbelstromschirmung unterschiedliche starke Einflüsse haben: Bei Aluminium dominiert die Wirbelstromschirmung (relative Permeabilität  $\mu_r = 1$ ), bei Stahl kommt die hochpermeable Schirmung hinzu. Dafür ist hier der Einfluss der Wirbelstromschirmung etwas geringer aufgrund der geringeren

Leitfähigkeit des Materials. Durch eine geeignete Wahl des Materials kann also für den jeweiligen Anwendungsfall eine Optimierung stattfinden.

## 5.2 Kompensationsmaßnahmen

Eine weitere Möglichkeit der Reduktion der magnetischen Felder besteht in der Einführung von Kompensationsleitern. Hierbei erfolgt in einen zusätzlichen Leiter bzw. in die Schirme bereits vorhandener Leiter eine Strominjektion mit dem Ziel, so die vorhandenen Felder zu minimieren. Im optimalen Fall werden in alle Schirme Ströme von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Phase eingekoppelt. Dadurch heben sich die entstehenden Felder gerade auf, sodass außerhalb der Leiter die Feldstärke Null beträgt. Da dies jedoch wegen der notwendigen hohen Leiterquerschnitte und Ströme unwirtschaftlich ist, soll nun untersucht werden, inwiefern beispielsweise die Strominjektion in nur einen Schirm oder einen weiteren Leiter die Feldstärken zu reduzieren vermag.

### 5.2.1 Kompensationsstrom in einem Schirm

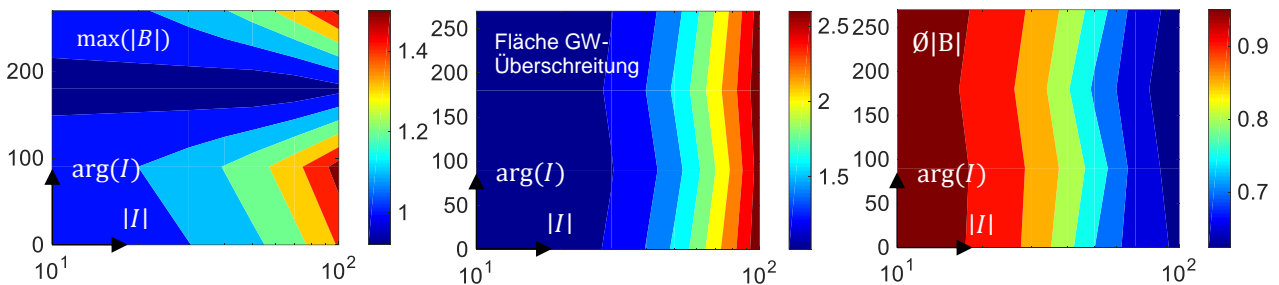
Wird in den Schirm eines Leiters ein Wechselstrom von zunächst unbekannter Amplitude und Phase eingekoppelt, so führt dies dazu, dass außerhalb dieses Leiters ein Feld erzeugt werden kann, welches prinzipiell dem gleicht, das aus einem Strom beliebiger Amplitude und beliebiger Phase im Innenleiter ohne Strominjektion in den Schirm resultiert. Dadurch kann also einer der drei vorhandenen Leiter als Kompensationsleiter für die beiden vorhandenen Leiter betrachtet werden. Eine Feldkompensation weit entfernt von den Leitern kann dadurch jedoch nicht erreicht werden. Dies ist zu erwarten, da die Stromsumme aller durch die Innenleiter fließenden Ströme sich zu Null ergibt. Weit entfernt von den erregenden Leitern spielen anschaulich die Abstände zwischen den Leitern nur noch eine kleine Rolle, sodass sich die Felder zu großen Teilen kompensieren können. Eine Strominjektion führt allerdings zu einem zusätzlichen Strom, welcher nicht kompensiert wird und damit die magnetische Flussdichte erhöht.

In der Praxis ist es insbesondere relevant, dass die vorgegebenen Personengrenzwerte eingehalten werden. Dadurch werden erhöhte Felder in unkritischen Bereichen tolerierbar, falls dafür im Gegenzug die Grenzwertüberschreitung reduziert oder sogar eliminiert

werden kann. Deshalb ist es sinnvoll, die magnetische Feldenergie in einem kleinen Bereich um die Leiter auszuwerten und die Wirksamkeit von Kompensationsmaßnahmen hier zu untersuchen. Tatsächlich zeigt sich hier, dass durch die Wahl einer geeigneten Stromstärke sowie Phase des Kompensationsstroms eine Verringerung der mittleren magnetischen Energiedichte in dem betrachteten Bereich möglich wird, allerdings nur um äußerst geringe Anteile. Im Gegenzug werden nun in einem sehr viel größeren Bereich die Grenzwerte überschritten.

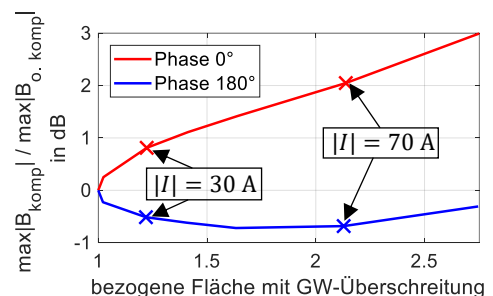
### 5.2.2 Einfügen eines externen Kompensationsleiters

Als weitere Möglichkeit der Reduktion der auftretenden Felder bietet sich die Strominjektion in einen externen Leiter an. Auch hier wird zunächst die mittlere magnetische Energiedichte im Bereich mit Grenzwertüberschreitung um die Leiter untersucht. Ebenso wie bereits bei der Strominjektion in einen Schirm lassen sich so nur minimale Verbesserungen erzielen. Denkbar sind jedoch noch drei weitere potentielle Entscheidungskriterien.



**Bild 8:** Einfluss eines Kompensationsstromes auf die maximal auftretende magnetische Flussdichte (links), die Fläche mit Grenzwertüberschreitung (Mitte) sowie den Durchschnitt des Betrags der magnetischen Flussdichte (rechts), Werte jeweils bezogen auf Fall ohne Kompensationsmaßnahme.

Zum einen kann der maximal auftretende Betrag der magnetischen Flussdichte untersucht werden. Sollte nur eine knappe Grenzwertüberschreitung vorliegen, so kann durch eine Verringerung der maximalen Flussdichte der Grenzwert möglicherweise eingehalten werden. Außerdem kann die Fläche, in der es zu einer Grenzwertüberschreitung kommt, betrachtet werden. Betrachtet wird dazu der Bereich zwischen  $x = -0,5 \text{ m}$  und  $x = 0,5 \text{ m}$  sowie zwischen  $y = -0,5 \text{ m}$  und  $y = 0,5 \text{ m}$ . Dieser wird mit jeweils 250 Schritten in  $x$ - und  $y$ -Richtung diskretisiert. Wenn es also außerhalb dieses Bereiches zu einer Grenzwertüberschreitung kommt, so wird dies hier nicht betrachtet. Im letzten Schritt kann nun noch der durchschnittliche Betrag der Flussdichte in den Bereichen mit Grenzwertüberschreitung betrachtet werden. Beispielhaft sollen hier die resultierenden Bilder für den Fall der linearen Leiteranordnung mit eingefügter Kompensationsleitung oberhalb der Leiter betrachtet werden. Damit ergibt sich Bild 8. Zu erkennen ist zunächst, dass es je nach Wahl der Phase des Kompensationsstromes durchaus zu einer leicht verringerten maximalen magnetischen Flussdichte kommen kann, auch für größere Kompensationsströme. Mit zunehmendem Betrag des Kompensationsstromes steigen jedoch sowohl die Fläche, in der es zu Grenzwertüberschreitungen

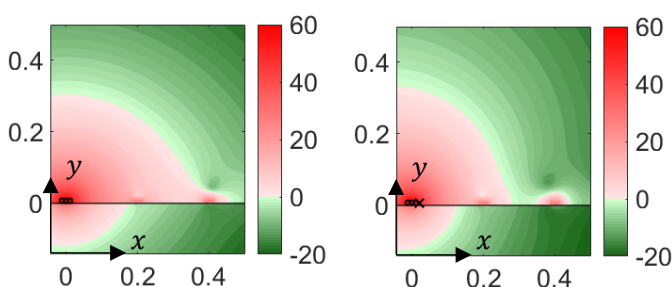


**Bild 9:** Zusammenhang zwischen maximaler Flussdichte und Fläche mit Grenzwertüberschreitung bezogen auf kompensationslosen Fall.



kommt, als auch die Summe der Beträge der magnetischen Flussdichte in diesen Bereichen. Dafür sinkt aber die durchschnittliche magnetische Flussdichte im betrachteten Bereich. Damit ist es also durchaus denkbar, dass insgesamt eine Verbesserung der Verhältnisse für einen konkreten Anwendungsfall erreicht werden kann. Allerdings müssen bei der Auslegung der Kompensationsleiter stets die genauen Gegebenheiten untersucht werden, da eine ungünstige Auslegung zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse führen kann. Beispielhaft wird dies in Bild 9 für den Zusammenhang zwischen der Fläche, in der eine Grenzwertüberschreitung auftritt, und der maximal auftretenden Flussdichte dargestellt für zwei unterschiedliche Wahlen der Phase des Kompensationsstromes. Es zeigt sich hier, dass sowohl eine leichte Verringerung als auch eine deutliche Erhöhung der maximalen Flussdichte in Verbindung mit einer größeren Fläche der Grenzwertüberschreitung auftreten kann.

In einigen Fällen kommt es zu einer Verzerrung der Verläufe im Gegensatz zum Fall ohne Kompensation, sodass die Grenzwerte nun zwar im betrachteten Gebiet teilweise eingehalten werden, aber andererseits dafür nun an anderen Stellen überschritten werden. Es liegt also eine lokale Verbesserung vor. Anwendung kann dies finden, wenn beispielsweise mit Hilfe eines zusätzlichen Leiters das Feld in einen Bereich konzentriert werden kann, in dem sich üblicherweise keine Personen aufhalten und im Gegenzug in dem Gebiet mit Personen die Felder abgesenkt werden können. Um dies zu untersuchen, wird nun ein konkreter Auswertungspunkt ausgewählt. An diesem wird der Betrag der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von Kompensationsstrom (Betrag sowie Phase) für unterschiedliche Positionen der Kompensationsleiter untersucht. In Bild 10 wird der resultierende Feldverlauf mit dem Verlauf ohne Kompensationsmaßnahme verglichen. Die o.g. Verzerrung ist hier deutlich zu erkennen.



**Bild 10:** Resultierender Feldverlauf ohne Kompensationsleiter (links) und mit Kompensationsleiter (rechts).

nun ein konkreter Auswertungspunkt ausgewählt. An diesem wird der Betrag der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von Kompensationsstrom (Betrag sowie Phase) für unterschiedliche Positionen der Kompensationsleiter untersucht. In Bild 10 wird der resultierende Feldverlauf mit dem Verlauf ohne Kompensationsmaßnahme verglichen. Die o.g. Verzerrung ist hier deutlich zu erkennen.

## 6 Zusammenfassung

In dem Beitrag wird ein semianalytisches Verfahren für die Berechnung der Schirmwirkung von ausgedehnten leitfähigen Platten gegen Magnetfelder von geradlinigen, parallelen Leiteranordnungen vorgestellt. Dieses Verfahren wurde auf unterschiedliche Konfigurationen angewendet, um grundsätzliche Aussagen zur Schirmwirkung von Fahrzeugkarosserien zu erhalten. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Einhaltung von Personengrenzwerten durch die Karosserie deutlich unterstützt werden kann. Kompensationsleiter bieten für die betrachteten Fälle jedoch nur geringe Potentiale zur Verringerung der auftretenden Flussdichten. Nur in einem relativ kleinen Volumen lassen sich damit Verbesserungen erzielen. Insofern sind andere Möglichkeiten wie beispielsweise die Einhaltung eines gewissen Abstandes zwischen Personen und den HV-Leitungen möglicherweise leichter und kostengünstiger umzusetzen.

## Literaturangaben

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP Guidelines for limiting Exposure to Time - Varying electric, magnetic and electromagnetic Field (up to 300 GHz). Health Physics 74 (4) (1998), S. 494-522
- [2] K. Feldhues, M. Diebig, S. Frei: Analysis of the Low Frequency Shielding Behavior of High Voltage Cables in Electric Vehicles, Gothenburg: EMC Europe (2014)
- [3] A. Kost, M. Ehrlich: „Abschirmung magnetischer Störfelder mit Stahlplatten“, 3. Internat. Kongress f. Elektromagnetische Verträglichkeit, Karlsruhe, Berlin, Offenbach, VDE-Verlag (1992), S. 421-432
- [4] \_\_\_\_\_, Partial Differential Equation Toolbox™: User's Guide. R2016b. Natick: The MathWorks, Inc (2016)
- [5] M. Klingler: „Modeling and simulation of powertrains for electric and hybrid vehicles“, Workshop on EMC Issues in Hybrid and Electric-Propulsion Vehicles at 2009 IEEE Int. EMC Symp., Austin, TX, USA, URL: [http://www.jastech-emc.com/papers/IEEE-EMC\\_TP4\\_2009.pdf](http://www.jastech-emc.com/papers/IEEE-EMC_TP4_2009.pdf) (2009, Stand: 29.11.2017)
- [6] F. M. Tesche, M. Ianoz und T. Karlsson: „EMC Analysis Methods and Computational Models“, New York: Wiley (1997)