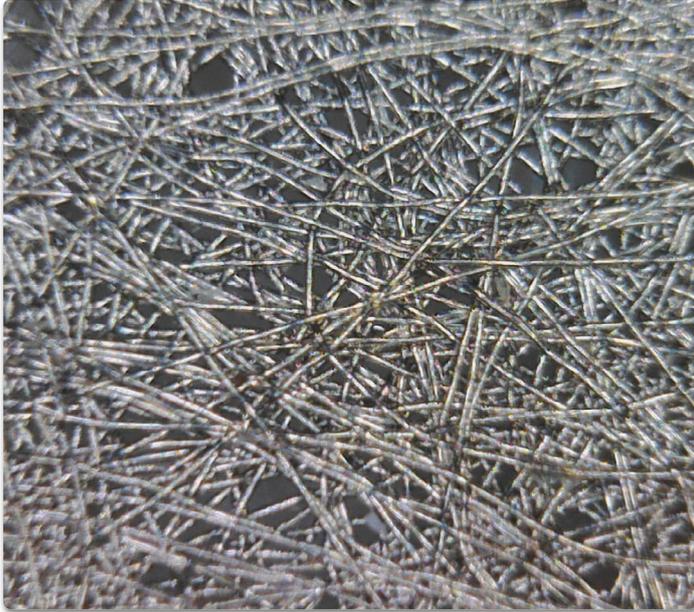


## Induktive Schirmdurchdringung

## Schirmmaterialien bewerten

Der Beitrag stellt Parameter zur Charakterisierung von Schirmmaterialien dar und erklärt, wie Magnetfelder Schirmungen durchdringen.



Flexibles Schirmmaterial, bestehend aus metallisierten Fasern

Es werden Schirmmaterialien aus leitfähigen Fasern betrachtet und es wird ein Messsystem vorgestellt, mit dem sich Schirmmaterialien hinsichtlich ihrer magnetischen Schirmungsfähigkeit bewerten lassen. Daraus werden Wirkzusammenhänge der frequenzabhängigen Schirmwirkung vertieft und relevante Materialparameter gewonnen.

## Einführung

Die Wirksamkeit einer Schirmung wird von den inneren spezifischen Materialparametern  $R'$ ,  $L'$  und  $C'$  (und deren stofflichen Struktur (Gewebe) bestimmt. Die Wirksamkeit eines massiven, nicht ferromagnetischen Metallschirmes ist von der Leitfähigkeit, vom Skinneffekt, der Frequenz und der Materialdicke abhängig. Massive metallische Schirme wirken gut, sind aufgrund der fehlenden Flexibilität aber für viele Anwendungen nicht geeignet. Es werden deshalb Schirme aus leitfähigen Fasern verwendet. Bei diesen sind die inneren, schirmenden Wirkzusammenhänge wesentlich komplexer.

Mit der Transferimpedanz  $ZT$  werden geschirmte Kabel beurteilt. Es wird nicht im Einzelnen das Schirmmaterial beurteilt. Die gemessene Transferimpedanz ist nicht allein vom Schirmmaterial, sondern auch vom Kabelaufbau und vom Aufbau der

Messanordnung abhängig. Es gilt aber, Parameter zu finden, die nur allein das Schirmmaterial charakterisieren.

Die Schirmdämpfung  $a_s$  beschreibt die Dämpfungseigenschaften des Schirmmaterials. Aus  $a_s$  lassen sich materialinterne elektrische Parameter ( $R'$ ,  $L'$  und  $C'$ ) und die stoffliche Struktur (Faserstruktur) nicht ermitteln.

Aufgabe ist es, Parameter und Messsysteme zu entwickeln, mit denen die inneren Wirkmechanismen und Materialeigenschaften von Schirmmaterial beschrieben werden können.

Im Folgenden wird untersucht, wie ein magnetischer Fluss  $\Phi$  Schirme durchdringen kann. Die Durchdringung folgt frequenzabhängig unterschiedlichen Wirkmechanismen.

## Beschreibung der magnetischen Schirmdurchdringung

Auf der Unterseite des Schirmmaterials (Bild 1) wird ein linienförmiger Strom  $i_1$  eingespeist. Der vom Strom erzeugte magnetische Fluss  $\Phi_1$  durchdringt

frequenzabhängig das Schirmmaterial. Auf der Oberseite des Schirmmaterials wird die Spannung  $u_2$  induziert. Es gilt:

$$\Phi_1 = L_{12} i_1 \quad \text{Gl. 1}$$

$$u_2 = \omega L_{12} i_1 \quad \text{Gl. 2}$$

Die Induktivität  $L_{12}$  stellt die Verbindung vom  $i_1$  zu  $u_2$  her. Sie ist infolge des Skinneffekts frequenzabhängig. Ihr Verlauf beschreibt die Wirkung des Skinneffekts und somit die magnetischen Eigenschaften des Schirmmaterials. Die Spannung  $u_2$  kann hinter der Schirmung weitere Störgrößen wie Ströme, Magnetfelder und elektrische Felder auslösen. Im Weiteren wird die Frequenz- und Strukturabhängigkeit dieses Wirkmechanismus betrachtet.

Zur Messung von  $L_{12}$  dient eine spezielle Messkammer (Bild 2). Das Schirmmaterial wird in das metallisch geschlossene Gehäuse eingelegt. Unterhalb des Schirmmaterials befindet sich die 50-Ohm-Streifenleitung 1 deren Strom  $i_1$  als Rückstrom durch das Schirmmaterial fließt. Das von  $i_1$  erzeugte Magnetfeld durchdringt entsprechend der

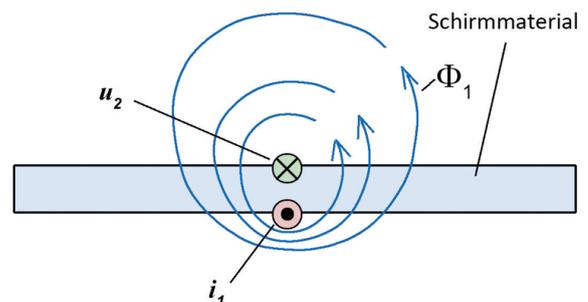
Schirmmaterial Messgerät  
Streifenleitung, magnetische Kopplung

Bild 1: Wirkprinzip der Magnetfeldkopplung (dargestellt unter Vernachlässigung des Skinneffekts)

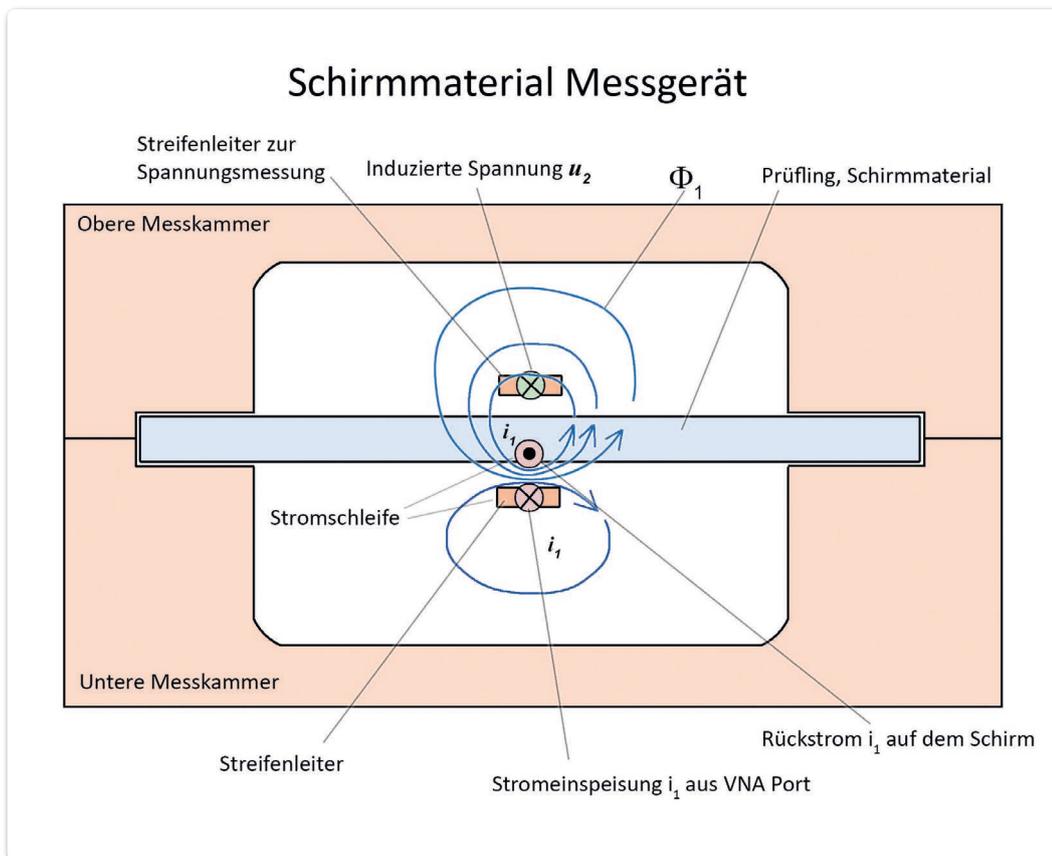
Autoren:

Gunter Langer

Amirali Taghavi

Langer EMV-Technik GmbH

www.langer-emv.de



**Bild 2: Messanordnung mit Streifenleitungen und Messkammer**

Schirmwirkung des Schirmmaterials. Auf der Oberseite des Schirmmaterials befindet sich die 50-Ohm-Streifenleitung 2. Darin wird durch den magnetischen Fluss  $\Phi_1$  die Spannung  $u_2$  induziert.

$L_{12}$  beschreibt, wieviel magnetischer Fluss  $\Phi_1$  vom Schirmmaterial durchgelassen wird, der dann die Spannung  $u_2$  induzieren kann:

$$L_{12} = -u_2 / (\omega i_1)$$

Wenn kein Schirmmaterial in der Messkammer liegt (Bild 2), erhält man die Leerlaufinduktivität  $L_{12}$  der Messanordnung (Bild 3). Sie ist im weiten Bereich konstant. Bei 1 GHz wird das Ende des linearen Frequenzgangs der Messkammer erreicht.

#### Wirkmechanismen der Magnetfeldschirmung

Die vom Magnetfeld induzierte Spannung  $u_2$  (Bild 4) wird vom Streifenleiter als  $u'_2$  abgegriffen. Sie ist etwas kleiner als  $u_2$  auf der Oberfläche des Schirmes, da

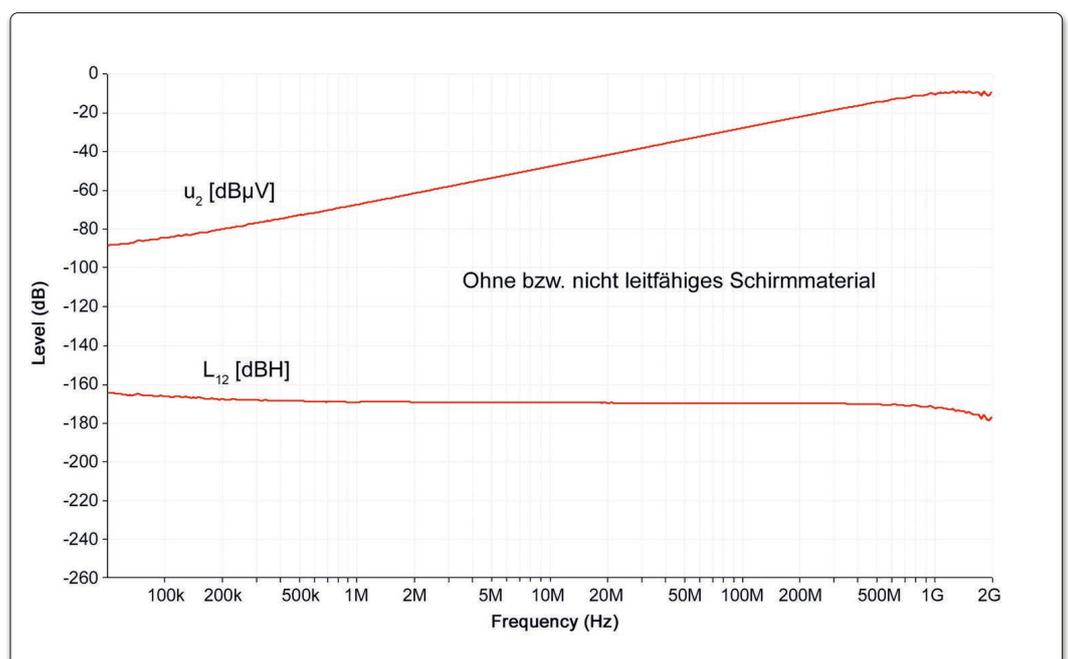
das Magnetfeld zwischen dem Streifenleiter und dem Schirmmaterial durchdringt. Dieser Effekt wird im Weiteren vernachlässigt und nur  $u_2$  verwendet.

Die im Streifenleiter induzierte Spannung  $u_2$  (Bild 5) hängt von der Wirksamkeit der magnetischen Schirmung des Schirmmaterials ab. Die dazugehörige

frequenzabhängige Induktivität  $L_{12}$  beschreibt die magnetische Durchdringung des Schirmmaterials. Im Bild 5 sind beide Größen für das Schirmmaterial S10 dargestellt, ein flexibles metallisiertes Fließ. Dessen leitfähige Fasern bilden kurzgeschlossene Maschen. Aus den Metallkörpern der Fasern wird das Magnetfeld mit steigender Frequenz verdrängt (0,5 bis 200 MHz).

Unter 1 MHz besitzt das Schirmmaterial keine dämpfende Wirkung (Bild 5). Die im Streifenleiter induzierte Spannung  $u_2$  und die Induktivität  $L_{12}$  sind wie bei leerer Messkammer. Ab ca. 0,5 MHz bleibt die Induktivität der leeren Messkammer konstant bei -169,8 dBH (3,23 nH). Unterhalb 400 kHz steigt die Induktivität scheinbar an. Das hat wahrscheinlich seine hauptsächliche Ursache in einem steigenden Anteil  $u_2$ , der durch den Einfluss des elektrischen Feldes der Streifenleitung 2 entsteht (wird getrennt betrachtet).

Erstes induktives Wirkprinzip: Ab 0,5 MHz macht sich der Skin-Effekt in den Metallbestandteilen des Schirmmaterial bemerkbar (Bild 6). Die Spannung  $u_2$  und die Induktivität  $L_{12}$  nehmen progressiv ab (Bild 5).



**Bild 3: Frequenzgang und induktive Verkopplung der Messkammer ohne Schirmmaterial ( $i_1$  const.)**

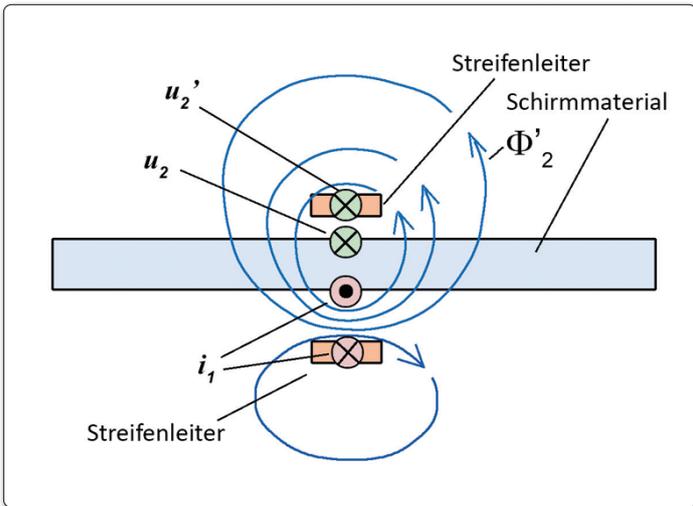


Bild 4: Abgriff der Spannung  $u_2$  mit einer Streifenleitung

Die induzierte Spannung erreicht ihren kleinsten Wert bei 200 MHz. Dort beginnt ein neuer Wirkmechanismus, der sich der Feldverdrängung im Metall der Fasern überordnet (Bild 7):

Zweites induktives Wirkprinzip: Ab 200 MHz steigt  $u_2$  mit 20 dB/Dekade linear an, die Induktivität geht in einen konstanten

Verlauf über: -235,9 dBH (0,16 pH), vgl. Bild 5. Durch die luftgefüllten Öffnungen im Schirmmaterial dringt ein Magnetfeldanteil von  $\Phi_2$ . Dieser Magnetfeldanteil war bisher schwächer als der durch das Metall der Schirmung dringende. Letztlich ist bei weiter steigender Frequenz alles Feld aus dem Metall des

Schirmmaterials verdrängt. Das Magnetfeld durchdringt das Schirmmaterial nur noch durch die luftgefüllten Hohlräume (Bild 7). Das Feldbild ändert sich bei steigender Frequenz nicht mehr, d.h., die Induktivität bleibt konstant. Die Wirkung der Induktivität  $L_{12}$  kann über den Bereich hinaus extrapoliert werden.

Die Koppelinduktivität  $L_{12}$  des Schirmmaterials ist ein Materialparameter, sie kann als Materialparameter in Form der spezifische Linieninduktivität  $L'_{12}$  [pH/cm] angegeben werden.

**Vergleich unterschiedlicher Schirmmaterialien**

Die induktive Schirmdurchdringung wurde an sechs Schirmmaterialien gemessen und im Bild 8 dargestellt.

Oberhalb von ca. 2 MHz tritt bei drei Materialien (S10, S2 und 02) eine gute Schirmwirkung ein. Bei weiteren drei Materialien (01, 03 und 04) war die Schirmwirkung bis 1,5 GHz nicht oder nur gering vorhanden!

Die schirmende Wirkung der Materialien ist stark unterschiedlich. Sie schwankt zwischen wirkungslos und wirksam. Die Frequenzbereiche der unterschiedlichen Wirkzusammenhänge verschieben sich je nach Material unterschiedlich.

Das Schirmmaterial 04 hat keine magnetische schirmende Wirkung, es verhält sich ähnlich wie Luft (leere Messkammer). Das Schirmmaterial 03 erreicht bei 1 GHz eine Magnetfelddämpfung von nur 3 dB, das Schirmmaterial 1 erreicht 12 dB.

Die Schirmmaterialien 02, S2 und S10 sind wirksam und machen die frequenzabhängigen Wirkungsbereiche der relevanten Wirkmechanismen deutlich. Bis 200 MHz wirkt das Schirmmaterial durch Feldverdrängung aus den Metallkörpern der Maschen. >200 MHz wird die Wirkung durch die metallfreien Öffnungen und der Größe der Maschen und deren ohmschen Widerstand bestimmt (40...65 dB Dämpfung). Die Strukturierung des Schirm-

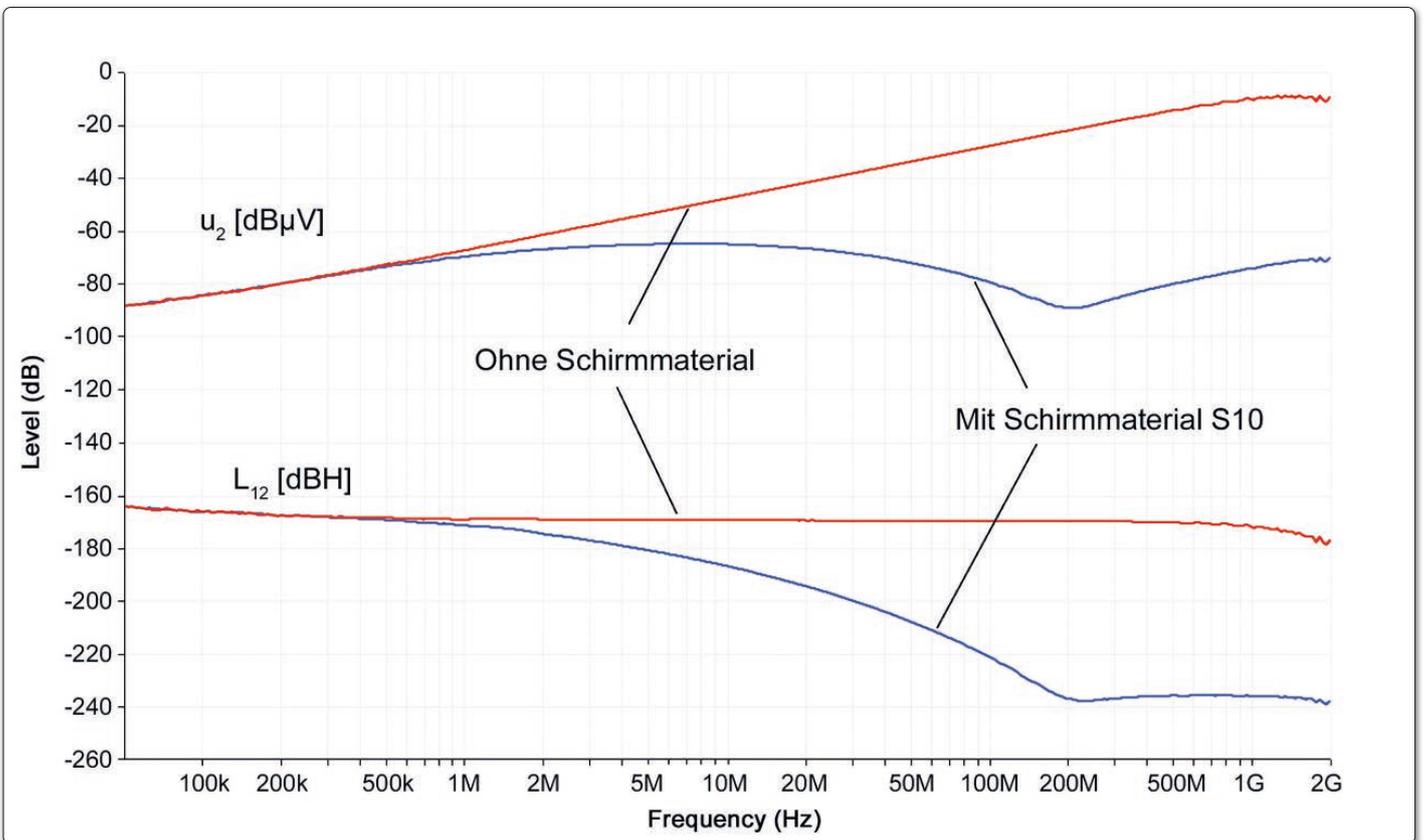
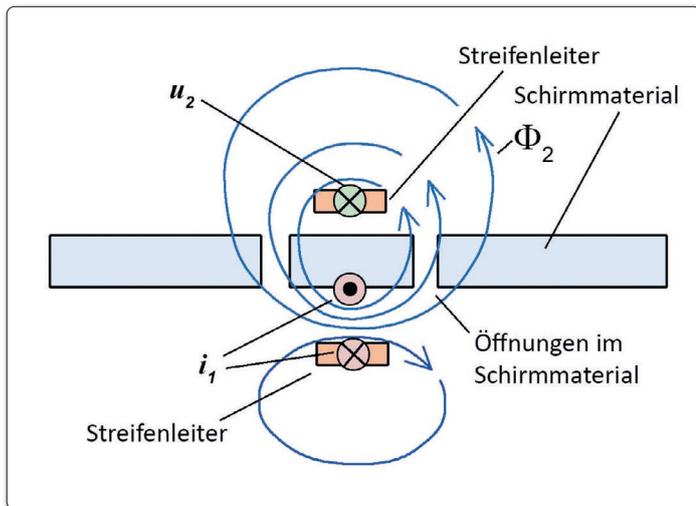
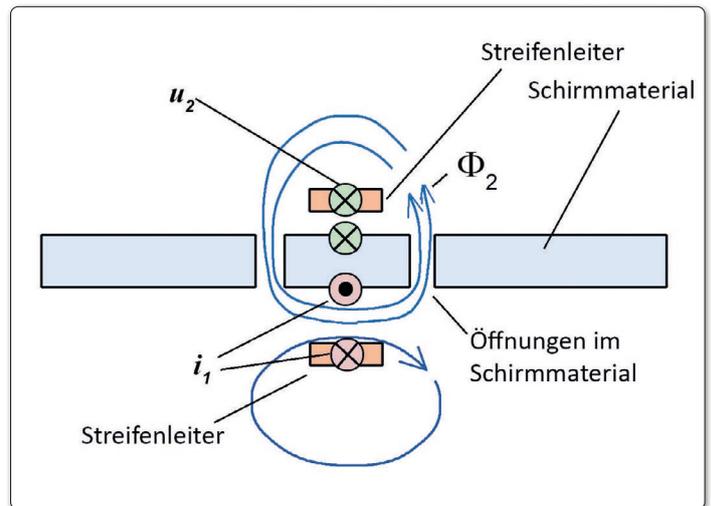


Bild 5: Induktive Durchdringung des Schirmmaterials S10



**Bild 6: Induktive Durchdringung des Schirmmaterials im unteren Frequenzbereich ohne Skin-Effekt**



**Bild 7: Induktive Durchdringung des Schirmmaterials mit Skin-Effekt, das Magnetfeld wird in die luftgefüllten Hohlräume gedrängt**

materials bestimmt die Wirkung in den beiden Bereichen.

Die Koppelinduktivität  $L_{12}$  des Schirmmaterials ist ein Materialparameter, welcher die Durchdringung des Schirmmaterials beschreibt. Sie lässt sich auf einen 10 mm langen Linienstrom

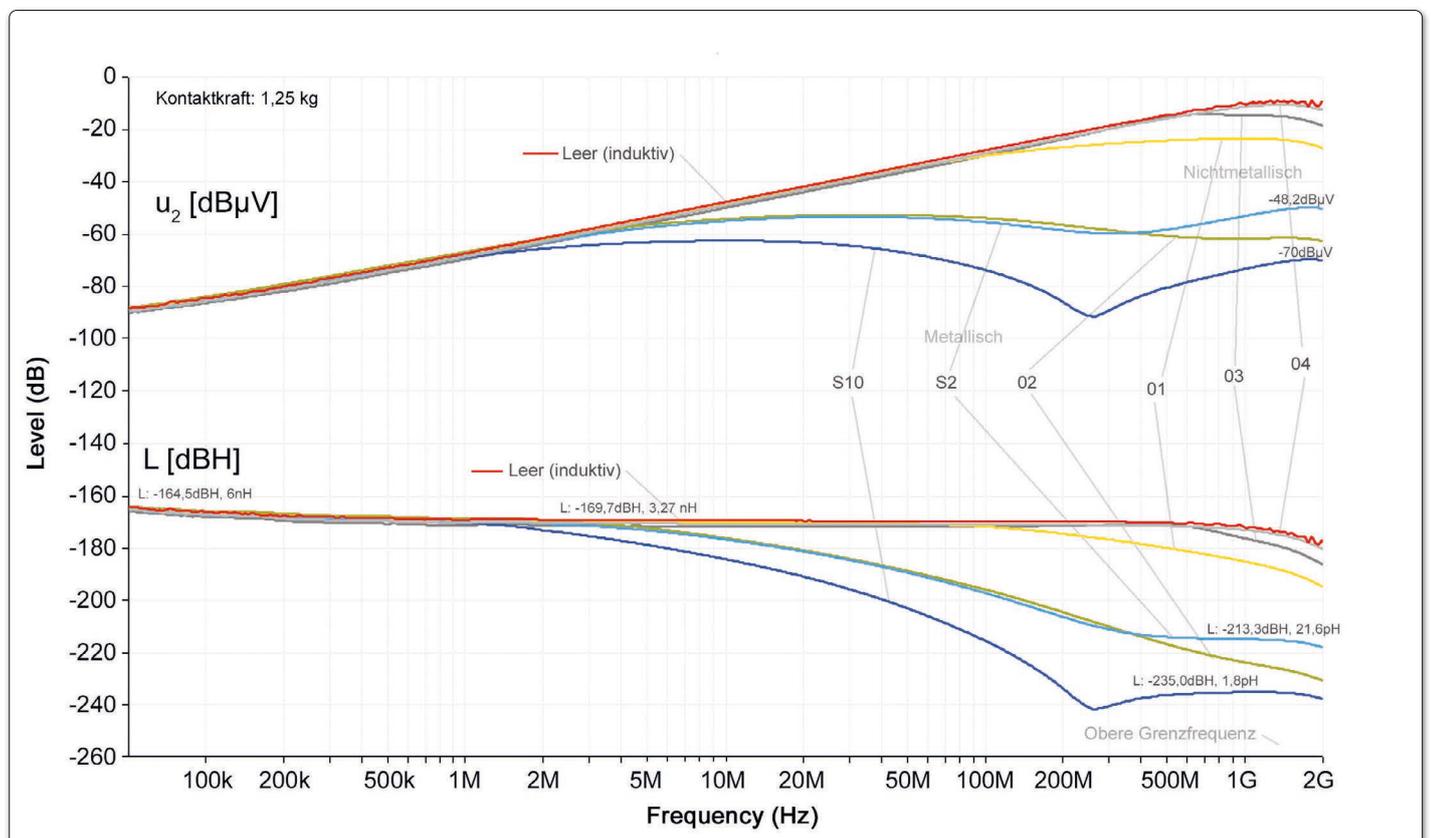
normieren. Die Magnetfeld-dämpfung ist der Abstand in dB zur Messung ohne Schirmmaterial (Leermessung). Sie kann berechnet werden mit:

$$L_{12}(\text{Material [dBH]}) - L_{12}(\text{leer [dBH]})$$

Konstruktiv hängt die Wirkung der Magnetfeldschirmung von der Größe der Maschen sowie deren Querschnitt, Leitfähigkeit und Staffelung ab.

Die Messergebnisse in Bild 8 machen die Wirkung der Schirmmaterialien gegen Magnetfeld

deutlich. Das hat Bedeutung für die Anwendung und Entwicklung von Schirmmaterial. Bei der Entwicklung von Schirmmaterial ist es wichtig, konstruktiven Einfluss auf die Wirkmechanismen der beiden Bereiche zu nehmen. ◀



**Bild 8: Magnetische Schirmeigenschaften von sechs Schirmmaterialien bei induktiver Kopplung**