

# Dimensionierung von Abschirmungen

# As 01

2. Ausgabe

1 Blatt

## Verwendete Abkürzungen

- A = Abstand (cm)
- a = Stärke des Abschirmmaterials (cm)
- $c = \sqrt{\frac{D^2 \cdot A}{8}}$
- D = Durchmesser der Abschirmung (cm)
- d = mittlerer Durchmesser der Spulenwicklung (cm)
- e = 2,718 Basis der natürlichen Logarithmen
- f = Frequenz (Hz)
- F = Faktor aus Bild 6
- K = Faktor aus Bild 4
- L = Länge der Abschirmung (cm)
- $L_m$  = Induktivität mit Abschirmung
- $L_0$  = Induktivität ohne Abschirmung
- l = Wicklungslänge der Spule (cm)
- n = Windungszahl der Spule
- R = Radius der Abschirmung (cm)  
(Zylinder oder Kugel)
- r = Radius der Spulenwicklung (cm)
- $r_0$  = Radius der Kugel, die den gleichen Rauminhalt hat wie die äußere Oberfläche der Abschirmung (cm)
- $R_0$  = ohmscher Zusatzwiderstand ( $\Omega$ )
- $S, S_1$  = Spulen
- t = HF-Eindringtiefe (Skinneffekt) (cm)
- $t(\text{cm}) = 5,033 \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \sqrt{\frac{1}{f}}$  für Cu  $\rightarrow \frac{6,62}{\sqrt{f}}$
- W = Wirksamkeit der Abschirmung
- $\gamma$  = relative Leitfähigkeit (Cu = 100)
- $\rho$  = spezifischer Widerstand in  $\Omega \text{ pro cm}^2$
- $\mu$  = Permeabilität
- $\mu_0$  = Anfangspermeabilität

## A. Abschirmmittel für elektrostatische Felder

Alle besprochenen Abschirmmittel dienen gleich gut zur Abschirmung elektrostatischer Felder. Besondere Anforderungen hinsichtlich Materialstärke und Leitfähigkeit der Abschirmmittel sind nicht zu stellen.

## B. Abschirmmittel für elektrostatische Felder ohne magnetische Abschirmwirkung (Bild 1)

Es darf kein geschlossener Leitungsweg in der Abschirmung vorliegen, da sonst infolge der auftretenden Wirbelströme eine magnetische Abschirmung stattfindet.

**Anwendungsbeispiele:** a) Schutzwicklungen auf NF-Transformator zur Verhinderung kapazitiver Verkopplung zweier Wicklungen, Bild 1 a und 1 c.

b) Abschirmung zwischen Anodenspule und Antennenspule eines Senders zur Verhinderung kapazitiver Kopplung und damit Unterdrückung der Ausstrahlung von Oberwellen, Bild 1 b.

Eine plane Abschirmwand (Anwendungsbeispiel b) soll aus einzelnen, voneinander isolierten und in einer Ebene liegenden Leitern bestehen, die nur an einem Rand untereinander verbunden sind, um Verluste durch Wirbelströme zu verhindern und magnetische Abschirmung zu vermeiden.

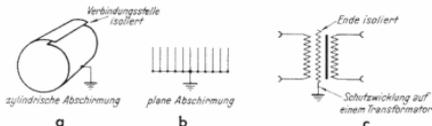


Bild 1. Abschirmungen für elektrostatische Felder ohne Beeinträchtigung der magnetischen Kopplung

## C. Abschirmmittel für magnetische Felder bei Hochfrequenz

**Wirkungsweise:** Das abzuschirmende Schallmittel (Spule) wird mit einem geschlossenen Behälter aus gut leitendem Material umgeben. Die magnetischen Kraftlinien induzieren in dem Abschirmbehälter Wirbelströme, die ihrerseits ein dem ursprünglichen Feld entgegengesetztes Magnetfeld erzeugen und das ursprüngliche Feld somit schwächen.

## Allgemeiner Dimensionierungshinweis für die Abschirmwirkung

Die Abschirmung ist um so wirksamer, je besser das Material leitet, je geringer der Übergangswiderstand von eventuellen Verbindungsstellen ist und je dicker das Material (im Vergleich zur Eindringtiefe) ist. Die Wirksamkeit der magnetischen Abschirmung nimmt daher mit der Frequenz ab.

## Formeln für die Abschirmwirkung

1. Zylindrische Abschirmungen  
Bedingung für die Gültigkeit der Formel (1)  $\frac{a}{t} > 2$  sowie Abschirmung dünn im Vergleich zu deren Durchmesser oder Länge.

$$W = 0,24 \frac{c}{t} e^{\frac{a}{t}} \quad (1)$$

W = Wirksamkeit der Abschirmung ist das Verhältnis der Feldstärke an einer bestimmten Stelle ohne Abschirmung zu derjenigen Feldstärke, die an derselben Stelle bei Vorhandensein der Abschirmung herrscht.

## 2. Ebene Abschirmungen

Wichtigster Fall: Zwei koaxiale Spulen ähnlicher Konstruktion und Größe sind durch eine ebene Wand abzuschirmen. Die folgende Formel (2) gilt genau für eine Abschirmung unendlich großer Ausdehnung; in der Praxis gilt es, wenn die Länge und Breite erheblich größer sind als d oder  $A + A_1$  (Bild 2).

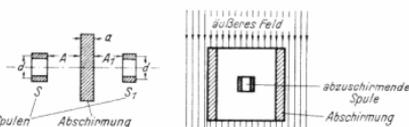


Bild 2. Gegenseitige Abschirmung zweier koaxialer Spulen (siehe Formel 2)

Bild 3. Abschirmung von Spulen gegen äußere Felder (Formel 3)

$$W = 0,0127 d a \gamma f \quad (2)$$

W = Wirksamkeit der Abschirmung ist das Verhältnis von in  $S_1$  induzierter Spannung ohne Abschirmung zu der hierin induzierten Spannung bei Vorhandensein der Abschirmung.

## 3. Erzeugung feldfreier Räume innerhalb eines gleichförmigen magnetischen Feldes

Die folgende Formel gilt für zylinderförmige und kugelförmige Abschirmung. Für den ersten Fall ist angenommen, daß das äußere Feld parallel zur Zylinderachse verläuft und der Zylinder unendlich lang ist. Für die Praxis reicht es, wenn die Länge des Zylinders einem so lang ist, wie sein Durchmesser; für diesen Fall gilt die berechnete Feldstärke für den Zylindermittelpunkt, und zwar auch dann, wenn die Enden offen sind (Bild 3).

Die Formel für die Kugel läßt eine angenäherte Berechnung für andersförmige Räume (Würfel usw.) zu, indem man diese auf eine Kugel gleichen Volumens umrechnet.

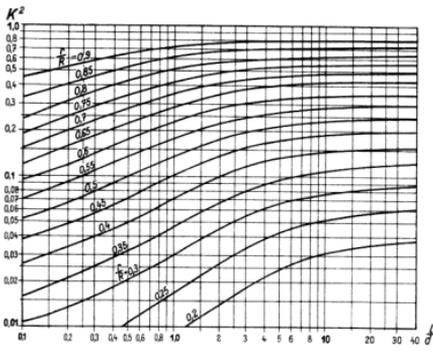
$$W = 0,353 \frac{R}{t} e^{\frac{a}{t}} \quad \text{Zylinder}$$

$$W = 0,236 \frac{R}{t} e^{\frac{a}{t}} \quad \text{Kugel} \quad (3)$$

Die Wirksamkeit W der Abschirmung ist das Verhältnis der Feldstärke ohne Abschirmung zur Feldstärke in der Abschirmung an der gleichen Stelle.

## Formeln für die Rückwirkungen der Abschirmung

Neben der eigentlichen Abschirmwirkung tritt eine Rückwirkung auf das abgeschirmte Schallelement auf. Bei der Spule verkleinert sich die Induktivität, und die Dämpfung wird größer.

Bild 4. Diagramm für  $K^2$  in Formel (4)

## 1. Verminderung der Induktivität

Die zylindrische Abschirmung wird als verlustarme Spule mit einer Windung betrachtet, dann gilt

$$L_m = L_0 (1 - K^2) \quad (4)$$

Der Faktor  $K^2$  kann aus Bild 4 entnommen werden. Er ist abhängig vom Verhältnis Spulenlänge zu Spulendurchmesser und Spulenradius zu Abschirmradius.

Genau gültig ist die Formel (4) nur dann, wenn die Abschirmung sehr lang gegen die Spulenlänge ist.

Grenzwert: Länge der Abschirmung  $>$  Durchmesser der Abschirmung, ferner soll sie an beiden Enden um mindestens den Spulenradius länger sein als die Spule selbst, siehe Bild 5.

Ist dieser Grenzwert erreicht, so wird die Induktivität etwas kleiner, als aus Formel (4) hervorgeht.

Nach Unterschreitung dieses Grenzwertes gilt folgende Formel:

$$\frac{L_m}{L_0} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \frac{1}{\Delta \cdot F} \right] \quad (5)$$

Der Faktor  $F$  kann aus Bild 8 entnommen werden. Er ist abhängig vom Verhältnis Spulendurchmesser zu Spulenlänge.

Die Induktivitätsverminderung ist in der Praxis vernachlässigbar, wenn der Durchmesser der Abschirmung größer als der doppelte Spulendurchmesser wird, sofern  $\frac{1}{d}$  gleich oder kleiner als 2 ist.

Als Richtwert kann man sich merken, daß für den Fall Abschirmdurchmesser = 2 · Spulendurchmesser bei  $\frac{1}{d} = 2$  die Induktivitätsabnahme etwa 15% beträgt.

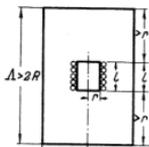


Bild 5. Grenzwerte der Abmessungen von Abschirmung und Spule für Formel (4)

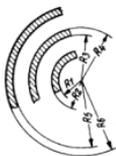


Bild 6. Zur Formel (8) für mehrfache Abschirmung

## 2. Erhöhung der Dämpfung

Die Dämpfungserhöhung kann ausgedrückt werden durch einen zusätzlichen, mit der Spule in Reihe liegenden ohmschen Widerstand  $R_z$ , siehe Bild 7. Die Größe dieses Widerstandes ist ungefähr:

$$R_z = \frac{9,37 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 \cdot r \sqrt{f \mu}}{c^4} \quad (6)$$

Voraussetzung: Dicke der Abschirmung erheblich größer als die Eindringtiefe; ist dies nicht der Fall, so gilt:

$$R_z = \frac{47 \cdot n^2 \cdot \mu}{a} \left( \frac{r}{c} \right)^4 \quad (6a)$$

## D. Abschirmmittel für magnetische Felder bei Niederfrequenz

Als Abschirmmaterialien dienen ferromagnetische Stoffe, vorzugsweise solche mit hoher Anfangspermeabilität. Die Wirkungsweise beruht darauf, daß infolge der guten magnetischen Leitfähigkeit der Abschirmung die Feldlinien entlang der Abschirmung geführt werden.

## 1. Formel für einlagige Abschirmung

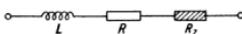
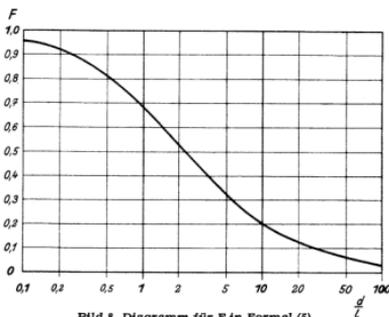
$$W = 0,22 \mu_0 \left[ 1 - \left( \frac{a}{r_0} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$W$  = Wirkungsgrad der Abschirmung = Verhältnis der Feldstärke ohne Abschirmung zur Feldstärke mit Abschirmung.

## 2. Formel für die Wirksamkeit mehrlagiger Abschirmungen

Die Formel ergibt, daß mit einlagiger Abschirmung ein maximaler Abschirmfaktor von 0,22  $\mu_0$  erreicht werden kann.

Ungefähr die Hälfte dieses Wertes wird erreicht, wenn die Materialstärke  $\frac{r_0}{5}$  gemacht wird.

Bild 7. Zusätzlicher Dämpfungswiderstand  $R_z$ , hervorgerufen durch die AbschirmungBild 8. Diagramm für  $F$  in Formel (5)

Für größere Abschirmfaktoren sind mehrere konzentrische Abschirmungen vorzuziehen, die durch dazwischenliegende Lufträume getrennt werden. Die beste Abschirmwirkung ergibt sich bei gleichzeitig geringstem Materialaufwand dann, wenn bei den ineinander angeordneten Abschirmzylindern die Radien nach einer geometrischen Reihe anwachsen, also  $R_2 : R_1 = R_3 : R_2 = R_4 : R_3$  usw. (Bild 6).

Die Abschirmwirkung ist dann angenehert

$$W = \frac{\mu^n}{4} \left( 1 - \frac{1}{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right) \quad (8)$$

$n$  = Zahl der Abschirmzylinder

Die Schirmwirkung ist also in der Hauptsache durch die Permeabilität der verwendeten Eisensorte bedingt und wächst bei  $n$  Abschirmzylindern mit  $\mu^n$ .

Die Wirkung mehrlagiger Abschirmungen kann noch erheblich verbessert werden, wenn in die Lufträume Abschirmungen aus Kupfer eingebracht werden. Physikalischer Grund: Auftreten von Wirbelströmen im Kupfer, siehe Abschnitt B. Bei magnetischen Gleichfeldern bringen solche Zwischenlagen keine Verbesserung.

## Rückwirkungen

Wird eine Luftspule mit einer ferromagnetischen Abschirmung umgeben, so erhöhen sich die Induktivität und die Dämpfung. Hierfür Zahlenwerte anzugeben ist sehr schwer, da die  $\mu_0$ -Werte der verwendeten Materialien sehr verschieden sind.