



ELEKTROMAGNETISCHE SCHIRMUNG

Christian Koch
Field Application Engineer

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Inhalt

- Grundlagen
- Schirmöffnungen
- Elektrische Schirmung
- Magnetische Schirmung
- Schirmanbindung



GRUNDLAGEN



Was bedeutet „elektromagnetische Schirmung“?

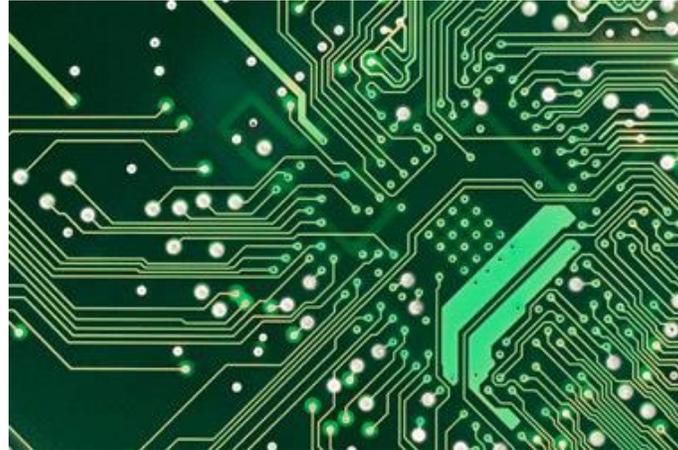


Grundlagen

- Elektromagnetische Felder werden von **elektrisch leitfähigen** Strukturen abgestrahlt bzw. aufgenommen.
- **Antennen** können sein:



Kabel, Schnittstellen,
Gehäuseöffnungen



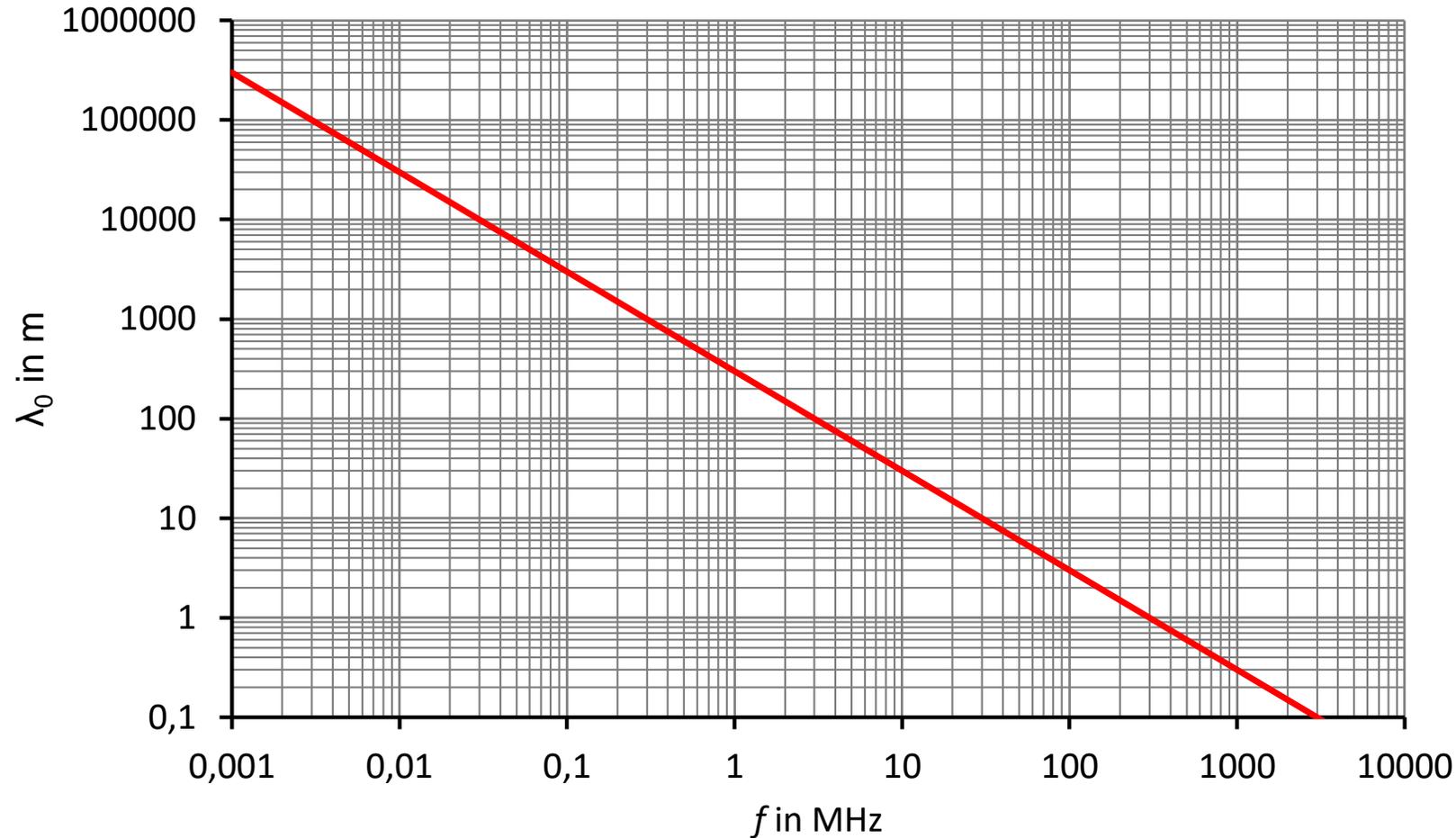
Leiterbahnen, Masseflächen,
Vias, Schlitze



Bauteile, Kühlkörper,
integrierte Schaltkreise

Grundlagen

Wellenlänge



- Zusammenhang Frequenz – Wellenlänge:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

- Beispiele:

$$f = 500\text{kHz} \rightarrow \lambda_0 = 600\text{m}$$

$$f = 8\text{MHz} \rightarrow \lambda_0 = 37,5\text{m}$$

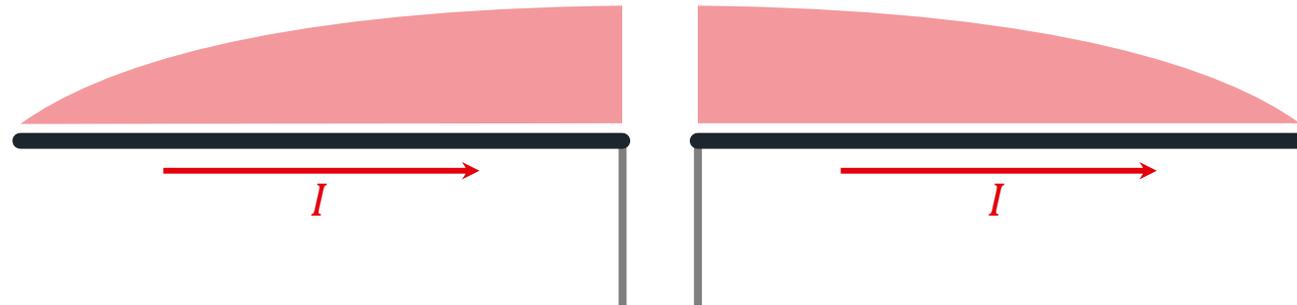
$$f = 100\text{MHz} \rightarrow \lambda_0 = 3\text{m}$$

$$f = 2,45\text{GHz} \rightarrow \lambda_0 = 12,5\text{cm}$$

Grundlagen

Halbwellendipol

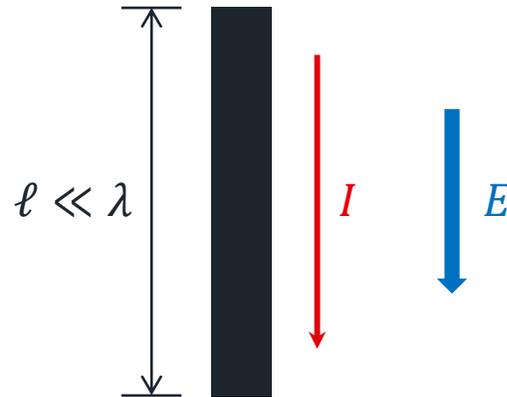
- Eine leitfähige Struktur ist nicht für jede Frequenz eine **gute Antenne**.
- Das **Verhältnis** der Strukturlänge zur Wellenlänge ist entscheidend.
- Entspricht die Länge der **halben Wellenlänge**, ist das Verhältnis **optimal** (Halbwellendipol).
- Signifikante Antennenwirkung tritt bei einer Länge von bis zu einem **Zwanzigstel** der Wellenlänge auf.



Grundlagen

Elementardipol

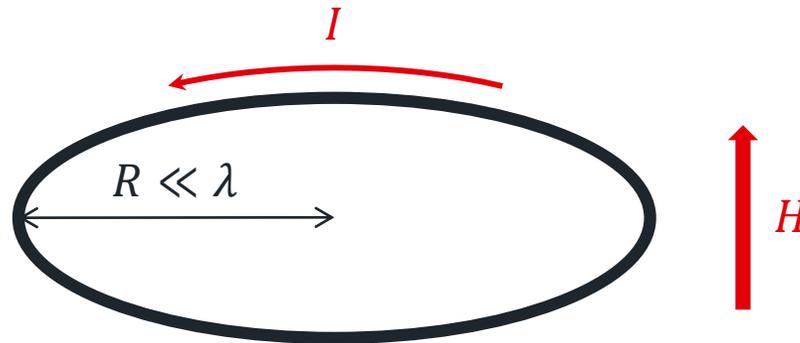
- Die einfachste Antenne ist ein **elektrischer** (Hertzscher) **Dipol**. Seine Länge ℓ ist klein gegenüber der betrachteten **Wellenlänge**.
- Über seine Länge fließt ein örtlich konstanter, zeitlich sich ändernder Strom I . An den Enden sammeln sich Ladungen.
- Der elektrische Dipol erzeugt ein **elektrisches Feld**.



Grundlagen

Elementardipol

- Eine weitere Elementarantenne ist die **Stromschleife** oder der **magnetische Dipol**. Sein Radius R ist klein gegenüber der betrachteten **Wellenlänge**.
- Über ihren Umfang fließt ein örtlich konstanter, zeitlich sich ändernder Strom I .
- Der magnetische Dipol erzeugt ein **magnetisches Feld**.



Grundlagen

Feldwellenwiderstand

- Der **Feldwellenwiderstand** Z_W ist das Verhältnis von elektrischer Feldstärke zu magnetischer Feldstärke in einem Abstand r von der Antenne.

$$Z_W = \frac{E}{H}$$

- Feldwellenwiderstand des elektrischen Dipols im **Nahfeld**:

$$|Z_{W,e}| = Z_{W0} \cdot \frac{\lambda}{2\pi r}$$

- Feldwellenwiderstand des magnetischen Dipols im **Nahfeld**:

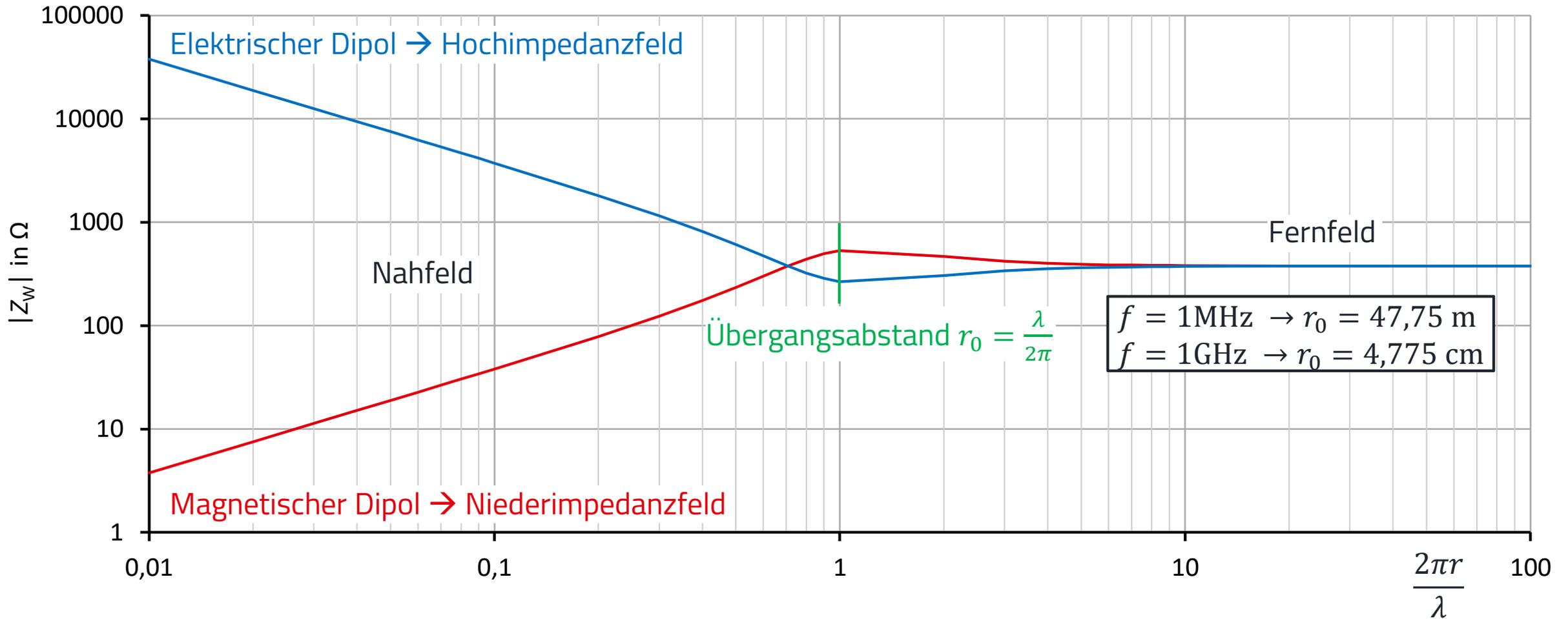
$$|Z_{W,m}| = Z_{W0} \cdot \frac{2\pi r}{\lambda}$$

- Der Faktor $Z_{W0} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377\Omega$ ist der Feldwellenwiderstand des freien Raumes (**Fernfeld**).

- Die meisten aus Sicht der EMV relevanten Störquellen lassen sich als einer der beiden Elementardipole charakterisieren.

Grundlagen

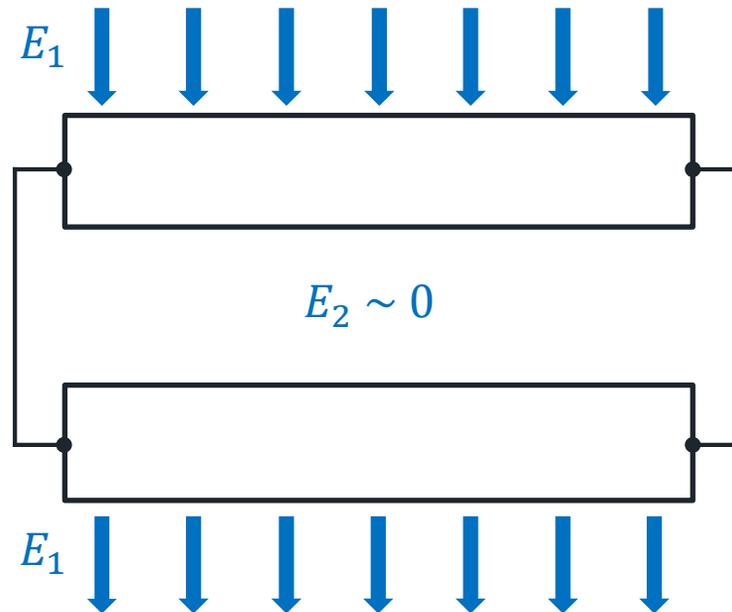
Feldwellenwiderstand



Grundlagen

Schirmung elektrischer Felder

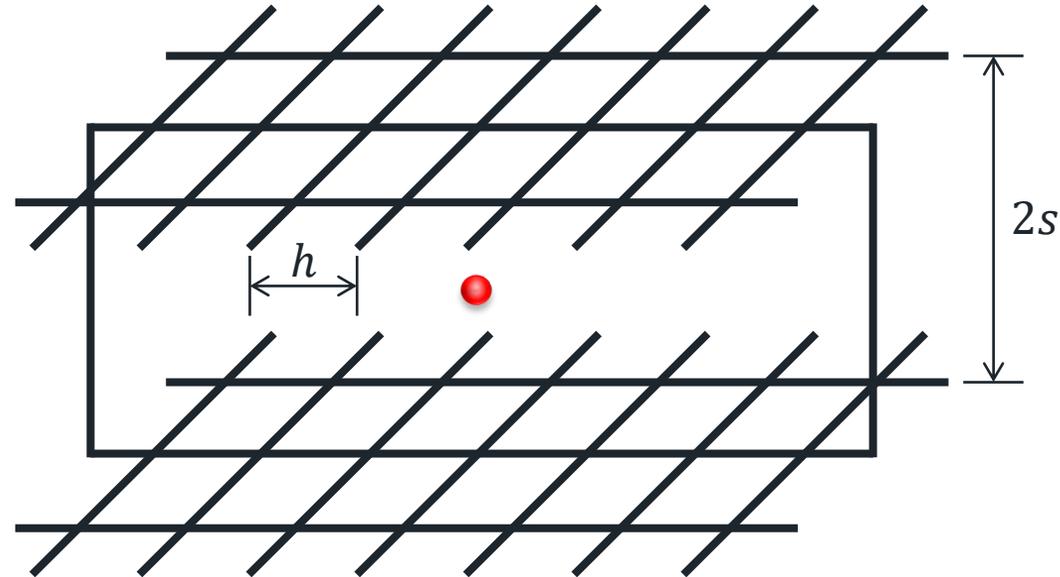
- Elektrische Felder lassen sich **leicht abschirmen**.
- Elektrische Feldlinien gehen von Ladungen aus und enden auf Ladungen.
- Es muss nur sichergestellt werden, dass sich die freien Ladungen **ausgleichen** können.
- Schirmwirkung **elektrisch leitfähig verbundener Platten** auf ein statisches elektrisches Feld:



Grundlagen

Schirmung elektrischer Felder

- Anstelle von Platten können auch **Gitter** mit der Maschenweite h und Stabdicke D verwendet werden.



- Schirmdämpfung in der **Mitte** zwischen den Gittern:

$$A_{S,e} = 20 \cdot \log \left(\frac{2\pi \cdot s}{h \cdot \ln \left(\frac{h}{\pi \cdot D} \right)} \right) \text{dB}$$

Grundlagen

Schirmung magnetischer Felder

- **Warum lässt sich ein niederfrequentes Magnetfeld im Nahfeld nicht mit dünnem Alublech (z.B. 0,1mm) abschirmen?**
 - 1. Eine Rahmen(Loop) Antenne hat im Nahfeld eine geringe Impedanz, somit ist die Reflexionsdämpfung der Schirmung schlechter
 - 2. Durch die geringere Frequenz ist die Eindringtiefe ins Material größer, somit wird ein dickere Abschirmung benötigt
 - 3. Nur wenn das Abschirmmaterial eine ausreichend hohe Permeabilität (z.B. von 300) hat, kann es gezielt Magnetfelder umleiten

Grundlagen

Schirmung magnetischer Felder

- Magnetische Felder lassen sich nur **schwer abschirmen**, besonders Gleichfelder und niederfrequente Felder.
- Kategorisierung der Schirmungsmaßnahmen:
 - Gegen Gleichfelder und niederfrequente Felder → **Hochpermeable** Materialien
 - Gegen mittelfrequente Felder → Ausnutzen des **Skineffekts**
 - Gegen hochfrequente Felder → **Reflexion** und **Absorption**

Grundlagen

Schirmung magnetischer Felder

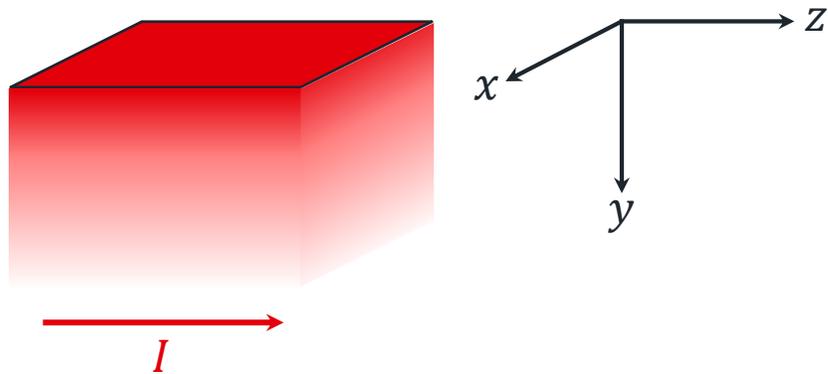
- Zur Schirmung von Gleichfeldern und niederfrequenten Feldern (16⅔ Hz, 50 Hz) nutzt man **hochpermeable** Materialien.
- Die Schirmwirkung ist umso effektiver,
 - je höher die Permeabilität ist,
 - je dicker der Schirm ist,
 - je kleiner das zu schützende Volumen ist.

Material	Relative Permeabilität μ_r
Nickel	100
Stahl	1000
Rostfreier Stahl	500
Mumetall	25000

Grundlagen

Schirmung magnetischer Felder

- Mittelfrequente magnetische Felder werden unter Ausnutzung des **Skineffekts** abgeschirmt.
- Magnetische Wechselfelder induzieren in leitfähigen Materialien **Wirbelströme**.
- Die Wirbelströme rufen ihrerseits Magnetfelder hervor, deren Richtung der Ursache (äußeres Magnetfeld) entgegengesetzt ist → **Kompensation**



- Stromdichte im Material:

$$|J_z(y)| = J_z(0) \cdot e^{-\frac{y}{\delta}}$$

- Eindringtiefe:

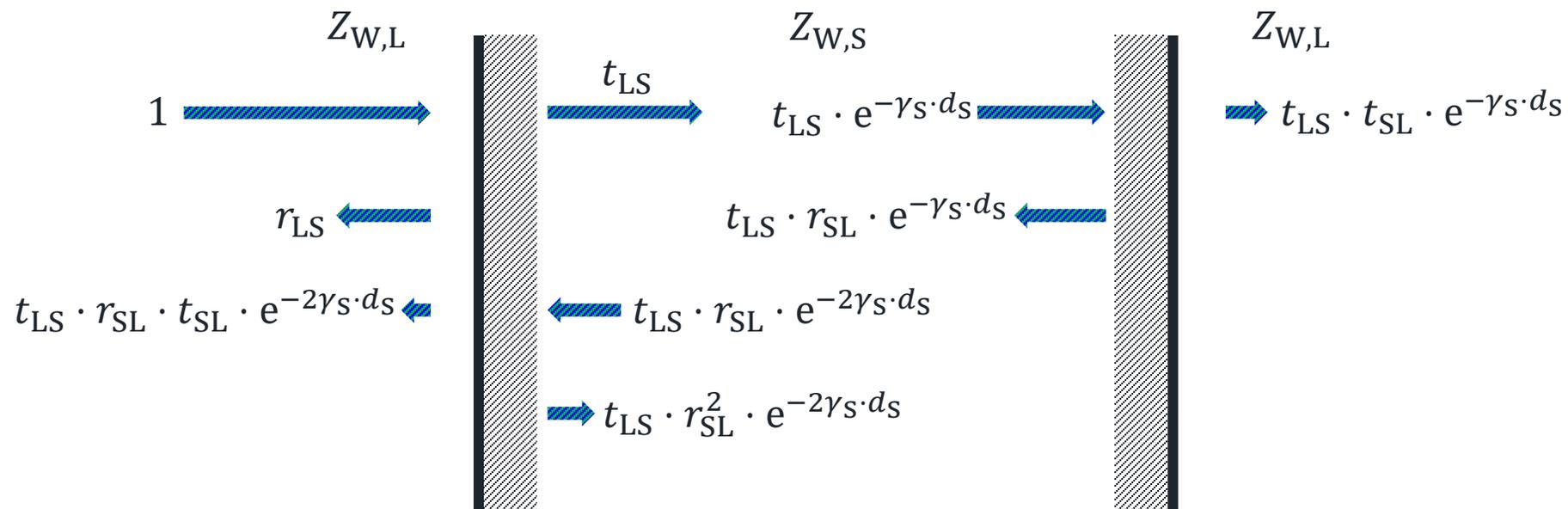
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu \cdot \sigma \cdot f}}$$

- Stahl ($\sigma = 8,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1000$):
 - $\delta(f = 50\text{Hz}) = 0,77\text{mm}$
 - $\delta(f = 10\text{kHz}) = 0,054\text{mm}$

Grundlagen

Theorie von Schelkunoff

- Schirmung hochfrequenter Felder → **Theorie von Schelkunoff**
- Elektromagnetische Welle mit Feldwellenwiderstand $Z_{W,L}$ trifft auf einen (unendlich ausgedehnten) Schirm mit der Impedanz $Z_{W,S}$ → Fehlanpassung → **Reflexion r + Transmission t**
- Transmittierter Anteil wird im Material gedämpft → **Absorption**



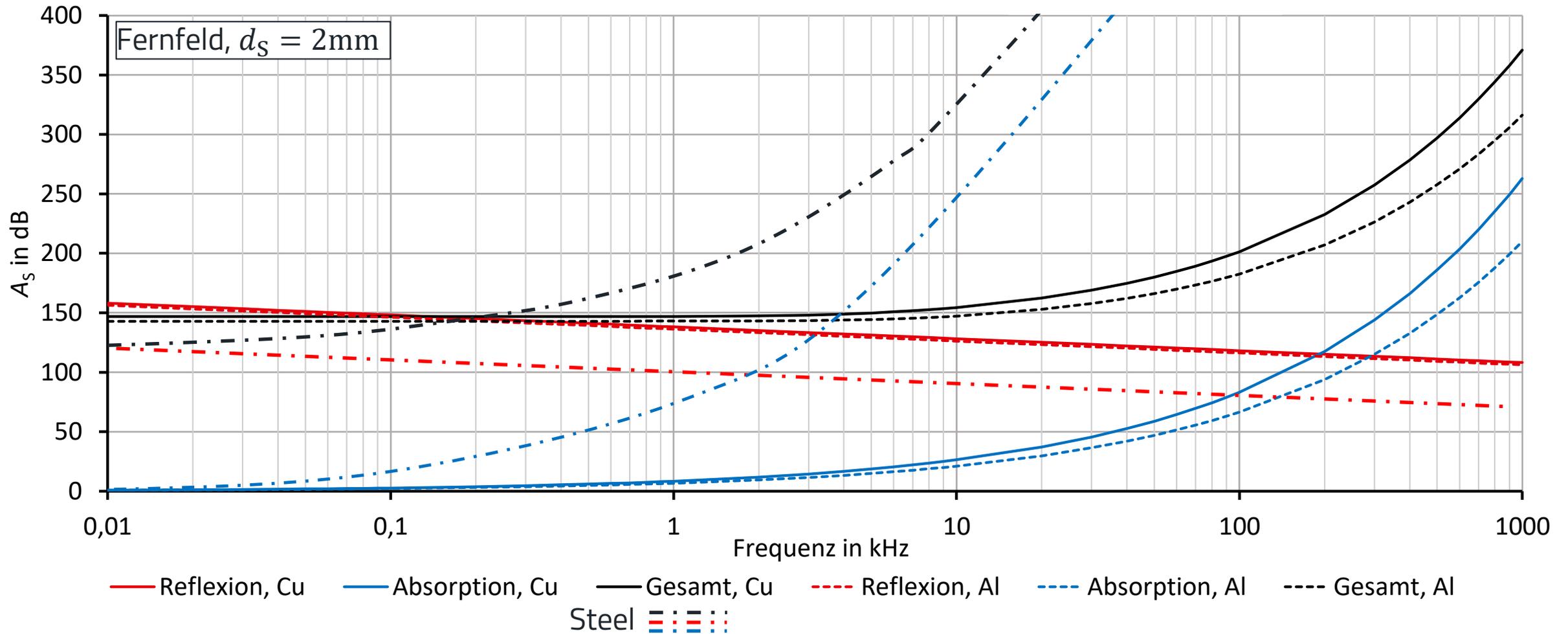
Grundlagen

Theorie von Schelkunoff

- **Mehrfachreflexionen** vergrößern die Transmission durch den Schirm und die Absorption im Schirm und verringern die Netto-Reflexion vor dem Schirm.
- Für ein **elektrisches Feld** tritt der Hauptanteil der Reflexion am Übergang Luft→Schirm (Index LS, **Vorderseite**) auf. Deshalb genügt ein dünner Schirm ($d_s < \delta$).
- Für ein **magnetisches Feld** tritt der Hauptanteil der Reflexion am Übergang Schirm→Luft (Index SL, **Rückseite**) auf. Bei einem dicken Schirm ($d_s > \delta$) können Mehrfachreflexionen vernachlässigt werden. Bei einem dünnen Schirm können sie aber die Schirmwirkung deutlich **reduzieren**.
- Für ein **elektromagnetisches Feld** (Fernfeld) ist die Reflexionsdämpfung hoch und Mehrfachreflexionen können vernachlässigt werden
- Die **Absorptionsdämpfung** ist umso höher, je dicker der Schirm, je höher die elektrische Leitfähigkeit und je höher die Frequenz ist.

Grundlagen

Theoretische Schirmdämpfung

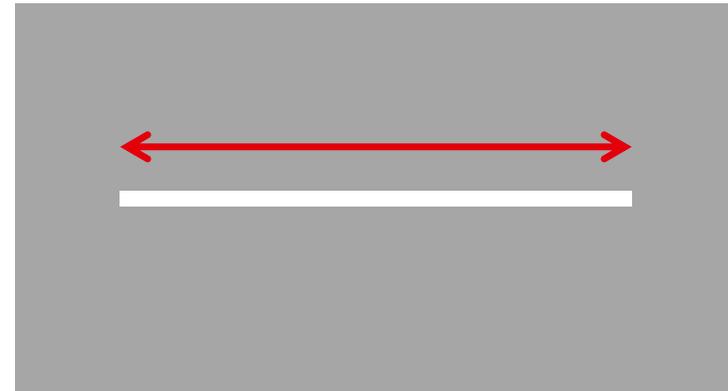
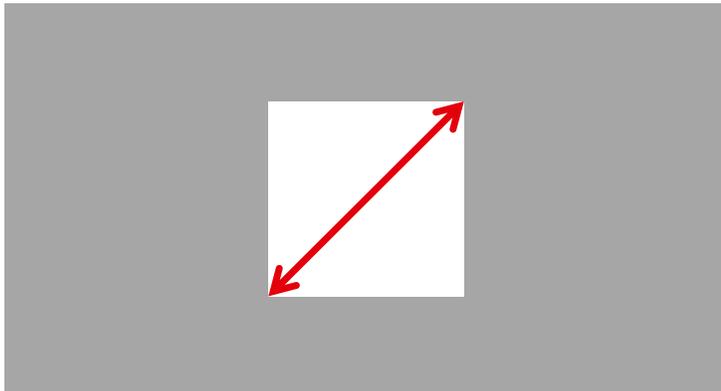


SCHIRM- ÖFFNUNGEN



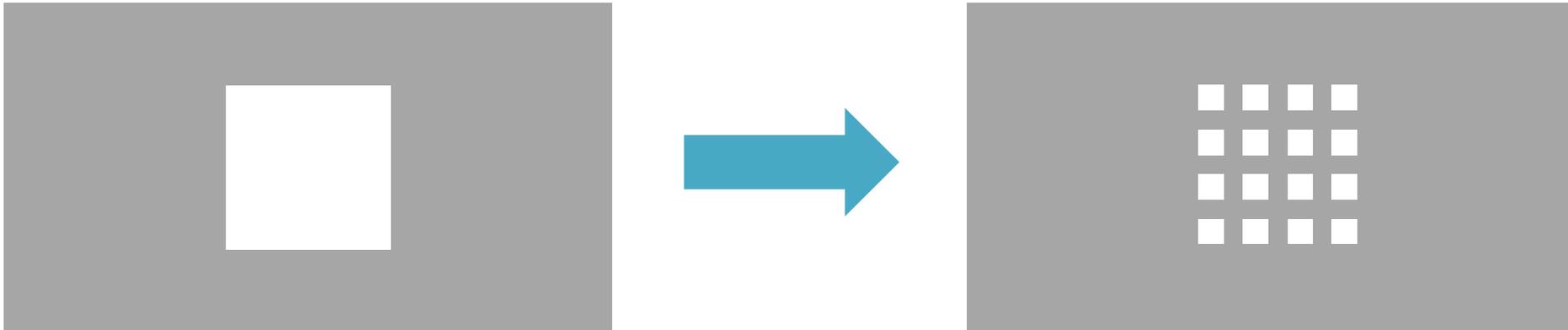
Schirmöffnungen

- Die Grenze der **messtechnischen Bestimmung** der Schirmdämpfung liegt bei ca. 120 dB.
- Kein realer Schirm ist perfekt, d.h. vollständig geschlossen.
- **Öffnungen** im Schirm wirken sich stärker auf die magnetische als auf die elektrische Schirmdämpfung aus.
- Bei hohen Frequenzen ist der **Reduktion** der Schirmdämpfung durch Leckagen mehr Bedeutung zu schenken als der **theoretischen** Schirmdämpfung eines Materials.
- Die **maximale lineare Dimension** einer Öffnung ist entscheidend, nicht deren Fläche.



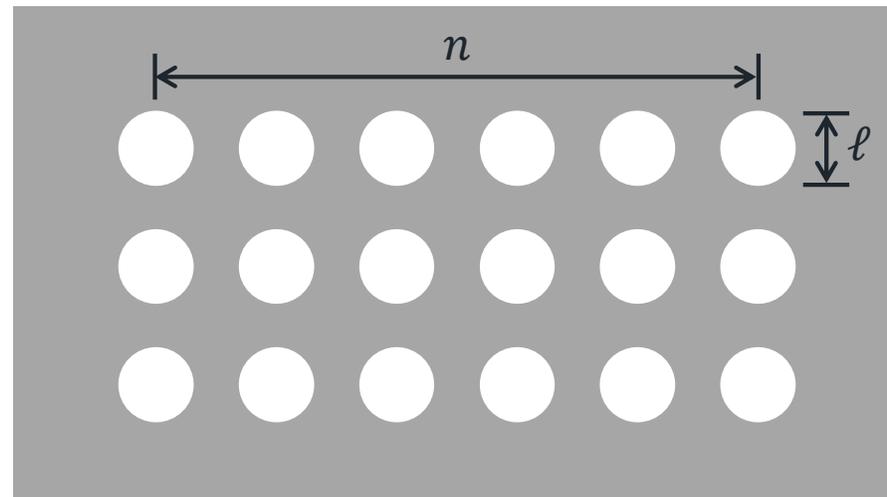
Schirmöffnungen

- Eine Öffnung der Länge $\ell = \lambda/2$ hat die gleiche Wirkung wie ein **Halbwelldipol**.
- Ist der **elektrische** Feldvektor **senkrecht** zum Schlitz orientiert, ist die Schirmdämpfung bei der zugehörigen Frequenz 0 dB.
- Wird eine größere Öffnung benötigt, z.B. zur Belüftung des Gehäuses, sollte die Fläche auf **viele kleine Öffnungen** verteilt werden.



Schirmöffnungen

- Für ein zweidimensionales **Lochraster** ist für die Reduzierung der Schirmdämpfung die maximale Anzahl Löcher n , die **in einer Reihe** liegen, ausschlaggebend.



- Schirmdämpfung mit $n \times m$ Aperturen:

$$A_{S,Ap} = 20 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{2 \cdot l \cdot \sqrt{n}} \right) \text{dB}$$

Schirmöffnungen

- Maximale Schlitzlänge für 20 dB Schirmdämpfung:

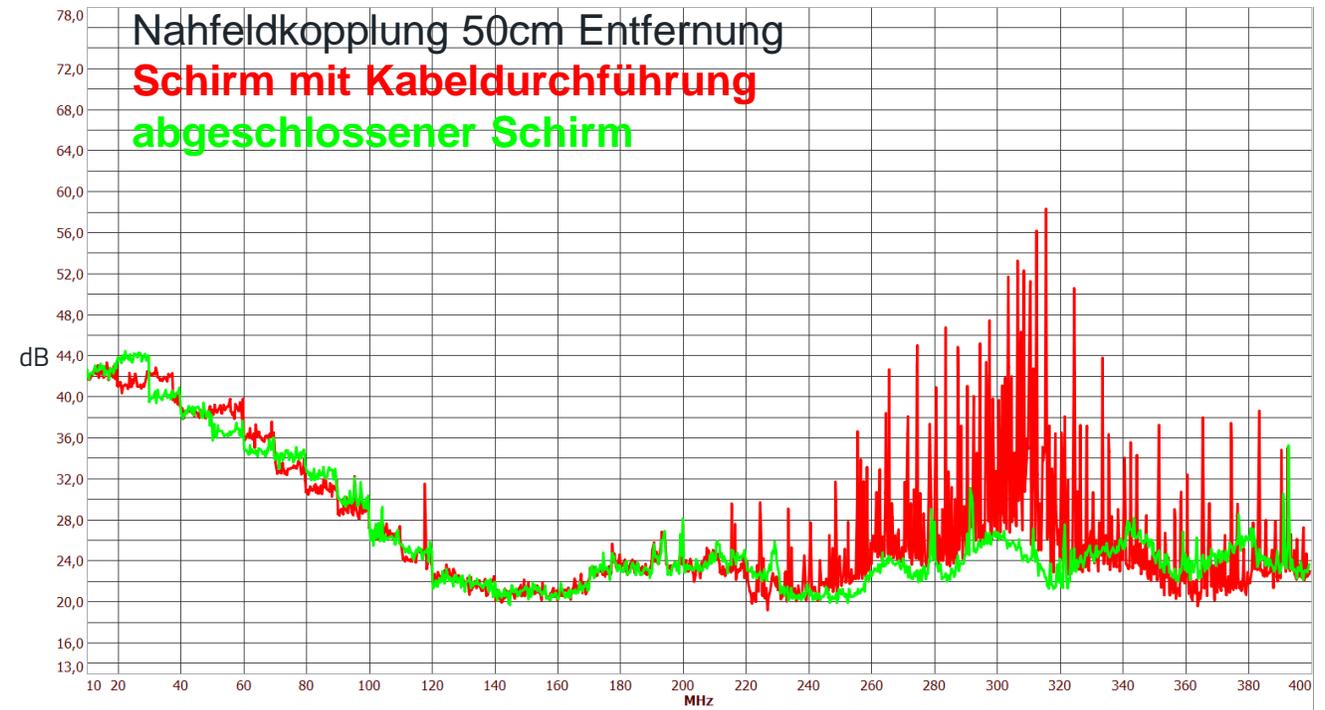
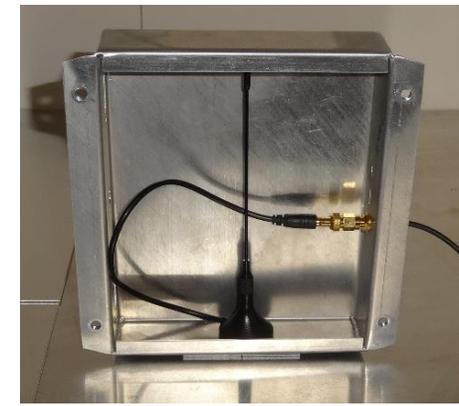
Frequenz in MHz	Länge in cm
30	50
50	30
100	15
300	5
500	3
1000	1,5
3000	0,5
5000	0,3

- Reduktion der Schirmdämpfung bei n gleich großen Öffnungen:

n	ΔA_S in dB
2	-3
4	-6
6	-8
10	-10
20	-13
40	-16
80	-19
100	-20

Gehäusedurchführungen

Ungefilterte, hochimpedant abgeschlossene Leitung aus geschirmten Gehäuse führen



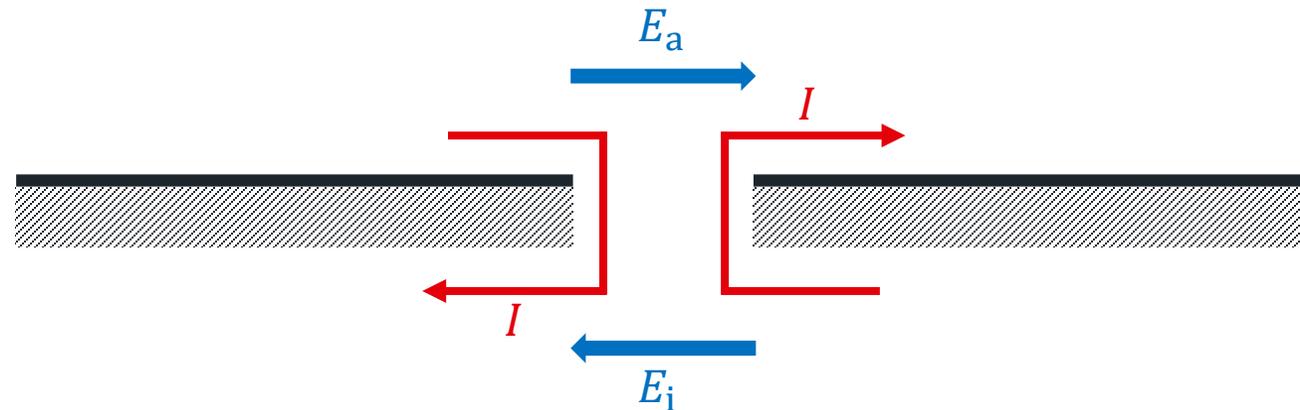
ELEKTRISCHE- SCHIRMUNG



Schirmungslösungen

Gehäuseübergang

- An Gehäuseübergängen (Gehäusekanten, Deckelkanten, Türkanten) ist darauf zu achten, dass möglichst eine **großflächige leitfähige Verbindung** gewährleistet ist.
- Gehäuseübergang ohne leitfähige Verbindung:



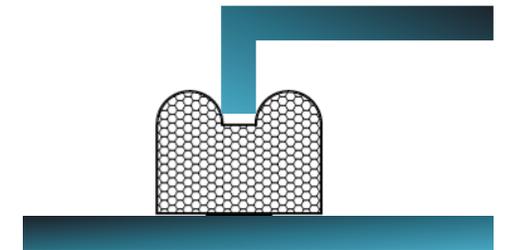
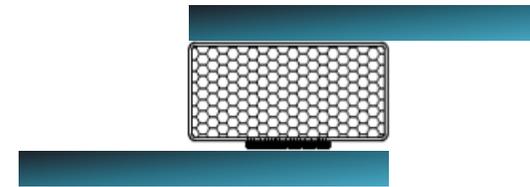
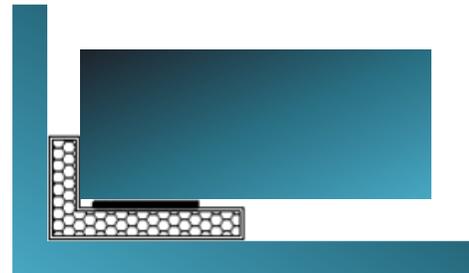
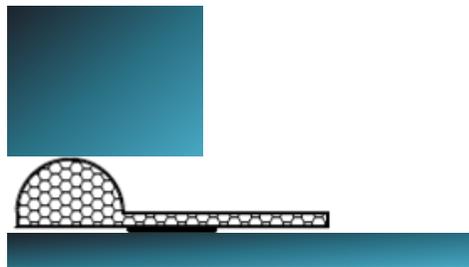
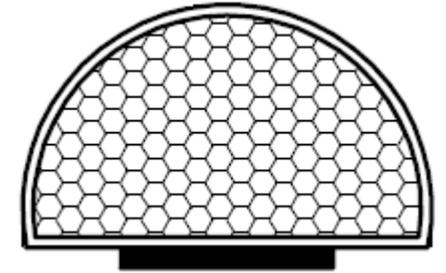
- Herstellen einer leitfähigen Verbindung:
 - Leitfähige Textildichtung
 - Kontaktfederstreifen



Schirmungslösungen

Gehäuseübergang WE-LT

- Leitende Textildichtung besteht aus einem **Schaumstoff**, der von einem **Nickel-Kupfer-Gewebe** umschlossen ist. An einer Seite befindet sich ein doppelseitiges Klebeband.
- Maximal erzielbarer Schutzgrad: IP54
- Brandschutz in Bahnanwendungen → EN 45545-2:2013+A1:2015 → R22/R23
- Anwendungsbeispiele:



Schirmungslösungen

Gehäuseübergang

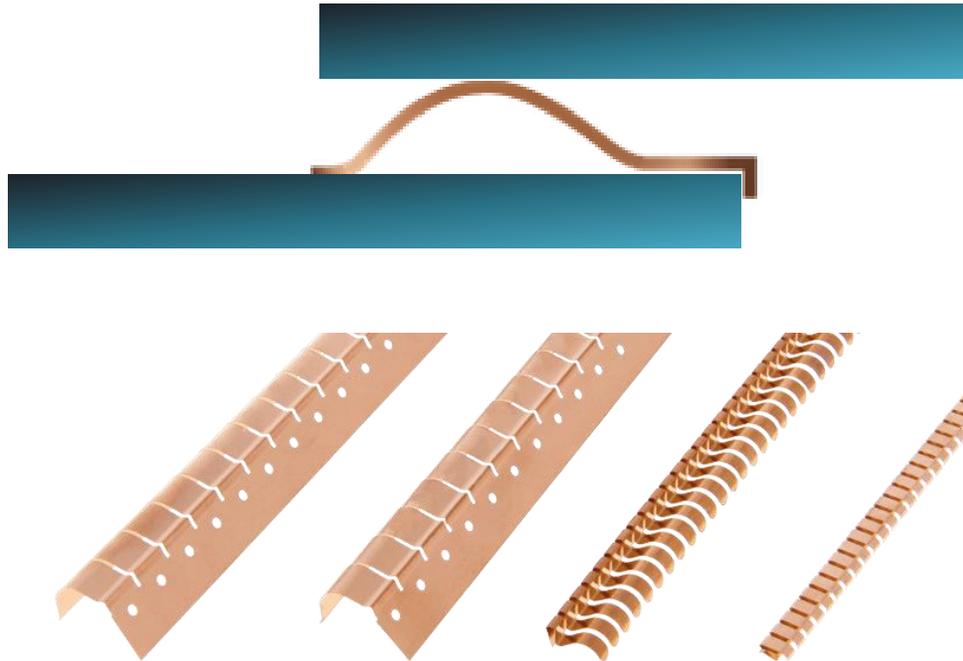
- Eignung von Materialpaarungen:

Grundmaterial	Nickel-Kupfer	Aluminium
Zink	--	++
Aluminium	--	++
Kupfer	+	-
Zinn	+	-
Nickel-Silber	+	-
Blei	+	-
Nickel	++	--
Silber	++	--
Nickel-Kupfer	++	--
Gold	++	--

Schirmungslösungen

Gehäuseübergang WE-CSGS

- Kontaktfederstreifen bestehen aus Kupfer-Beryllium oder aus Edelstahl.
- Anwendungsbeispiel:



Schirmungslösungen

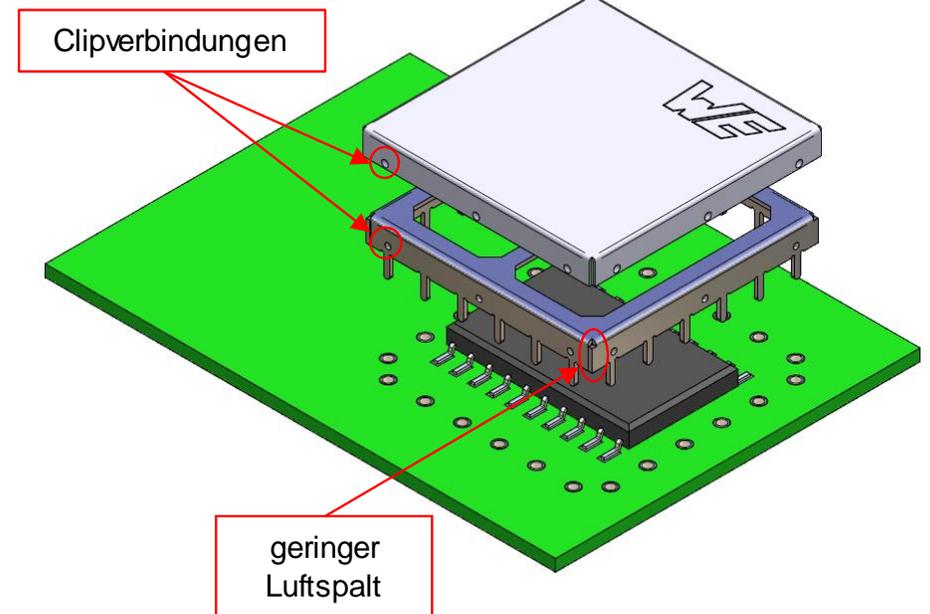
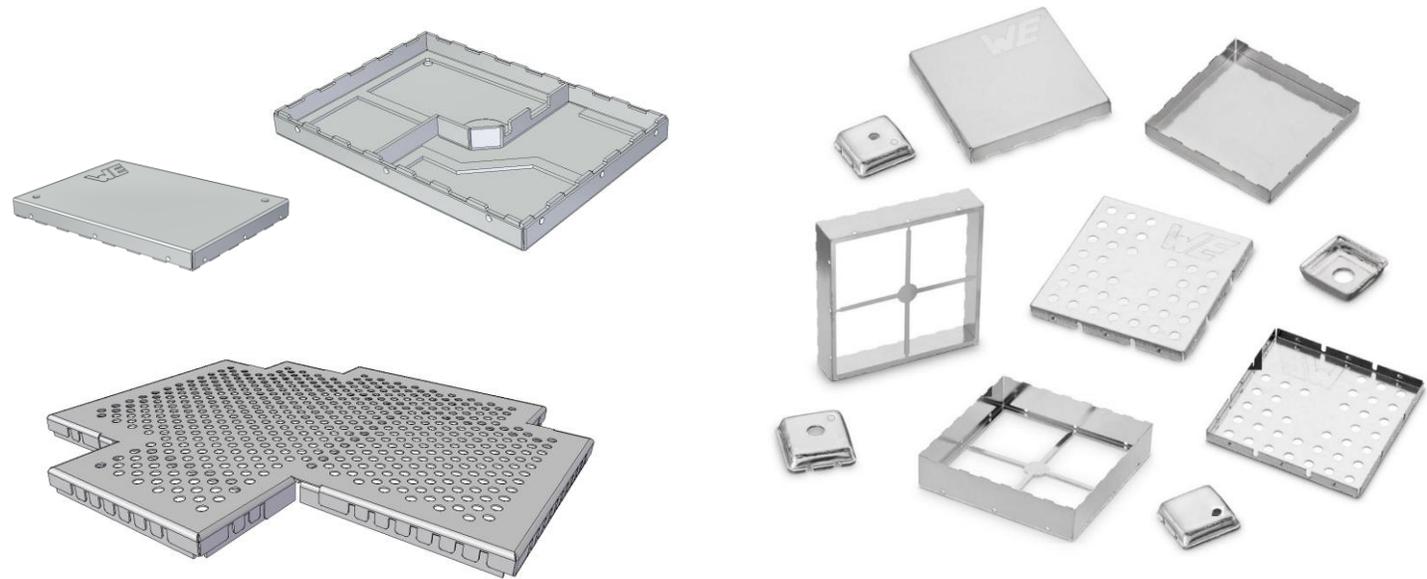
Platine WE-SHC

- Abschirmgehäuse für die lokale Entstörung
- Rahmen + Deckel Lösung (Two-piece solution)
- Deckel Lösung (One-piece solution)
- Tiefziehteil
- Varianten: SMD und THT
- technische Zeichnung im DXF oder STP. Format

- **Verwendete Materialien:**

- Weißblech
- Neusilber

- **SMT Klammern:**



Schirmungslösungen

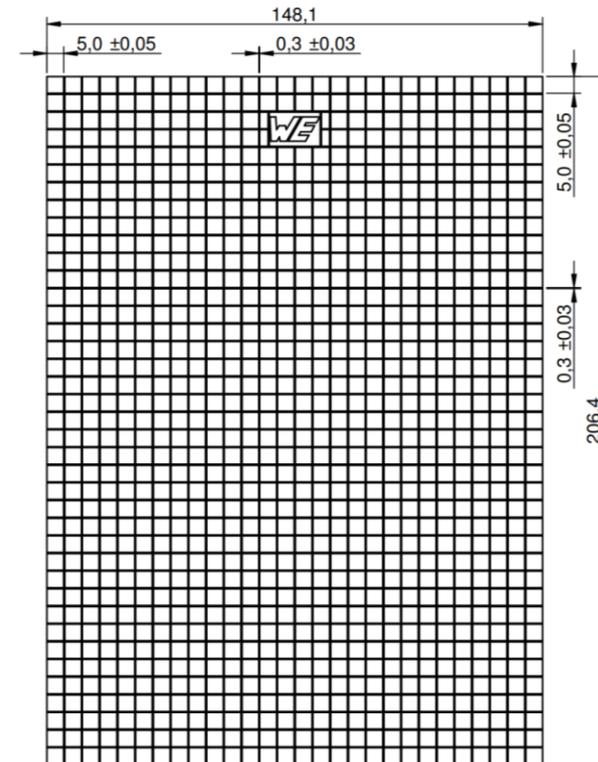
Platine

- Do-it-yourself Schirmgehäuse:
 - Verzinnte Stahlplatte (0,2mm)
 - Quadratisches Raster (5mm)



ShieldDIY

Do it yourself Custom Shielding Cabinets

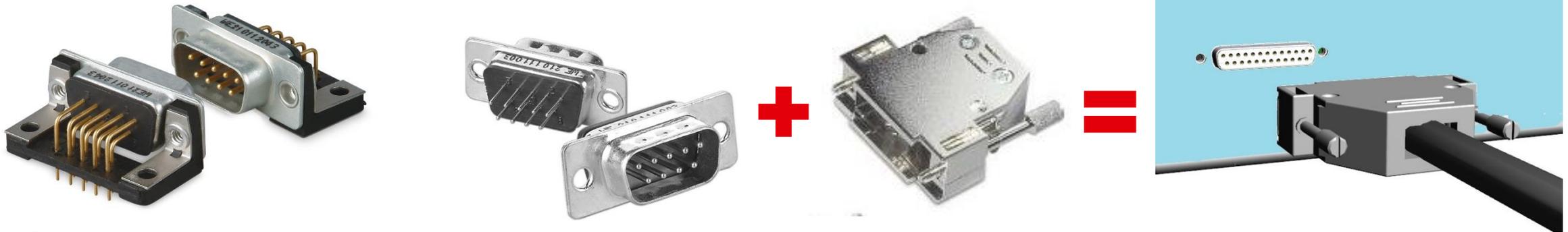


Etching depth is 0,1 mm

Schirmungslösungen

Schnittstelle

- Gefilterte **D-SUB** Schnittstelle für RS-232, RS-485 oder Spannungsversorgung (max. 5A @ 100V_{DC}):



- D-SUB Filteradapter:



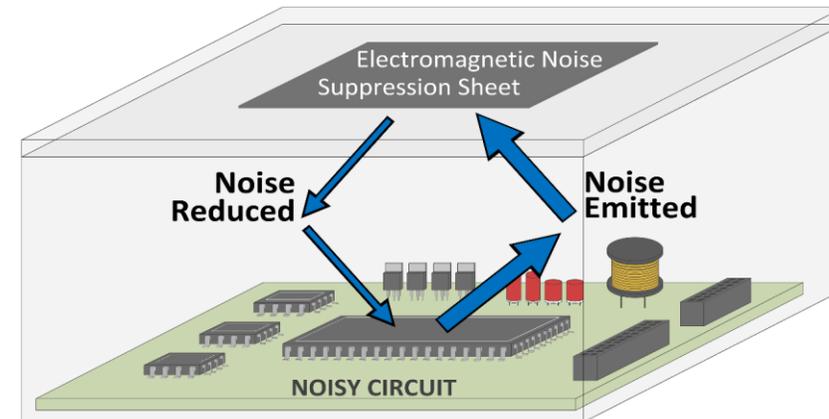
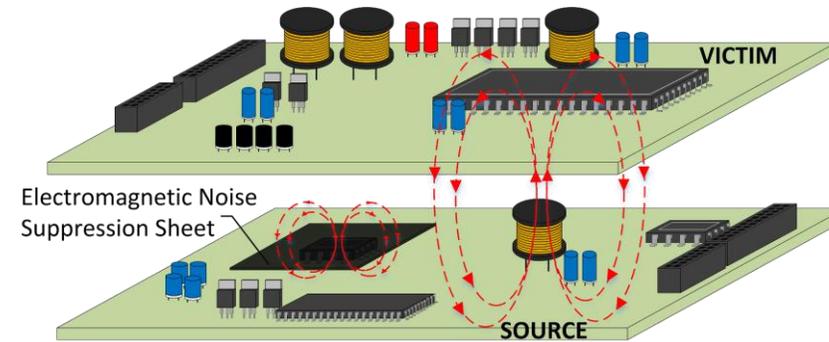
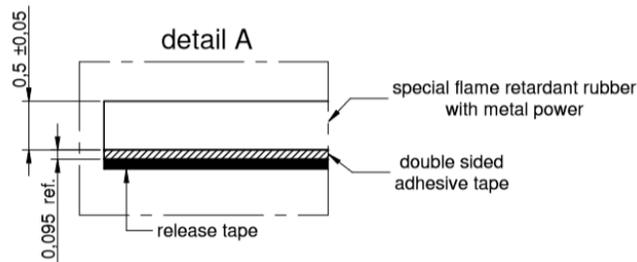
MAGNETISCHE- SCHIRMUNG



Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

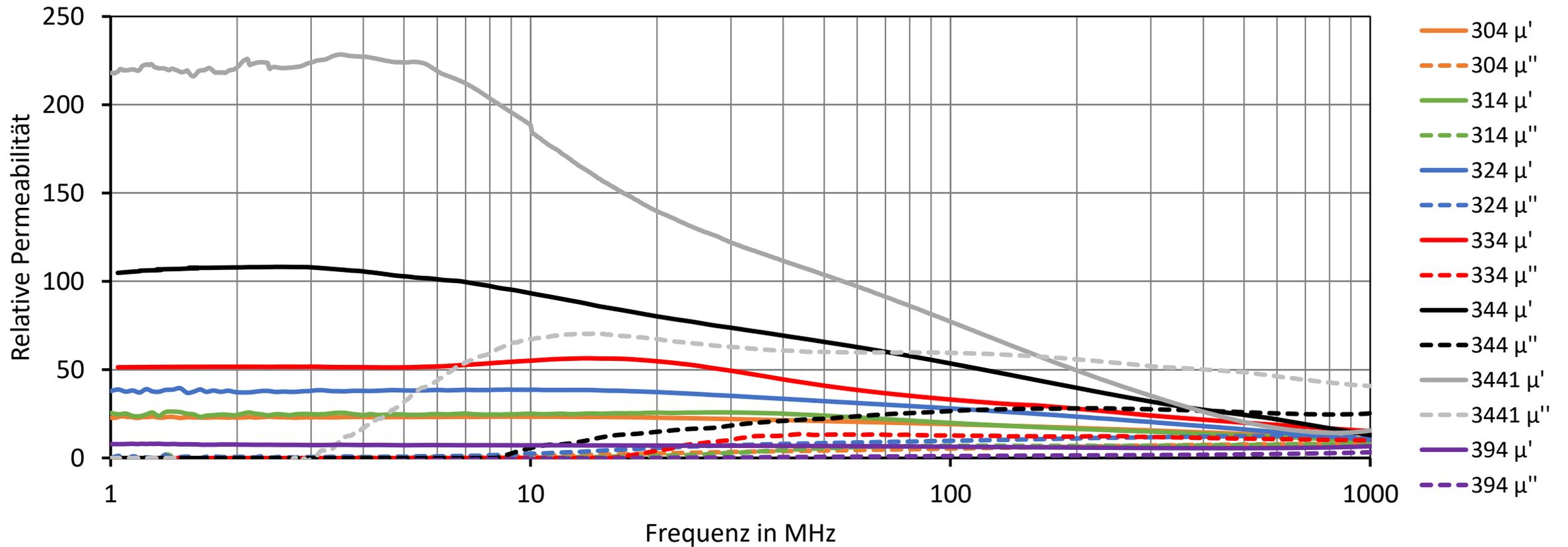
- **Flexible Absorberfolie WE-FAS** mit Klebefläche zur Anbringung auf der Platine oder am Gehäuse
- Wirkungsweise → **Reflexion** und **Absorption** im Nah- und Fernfeld



Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

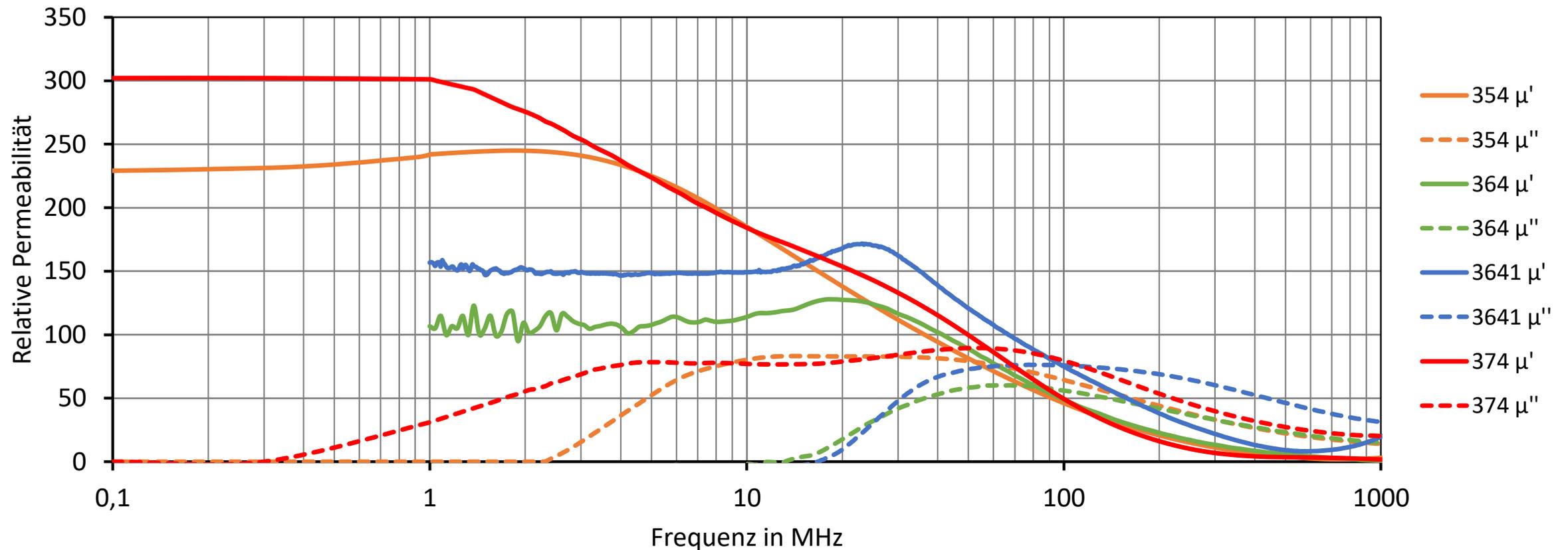
- Komplexe relative Permeabilität der WE-FAS Materialien:



Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

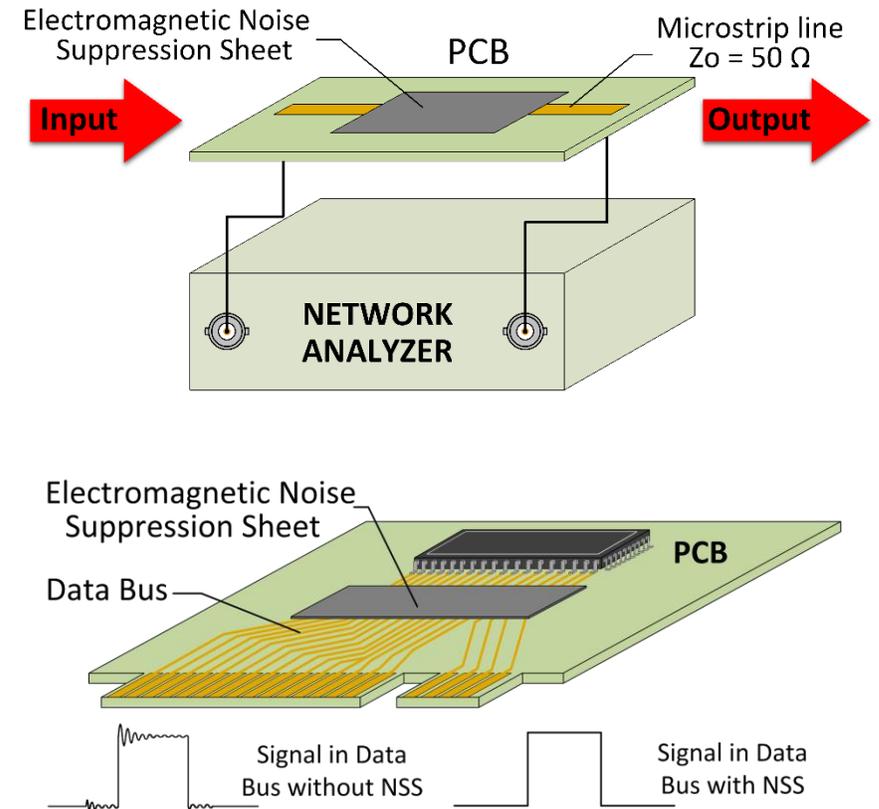
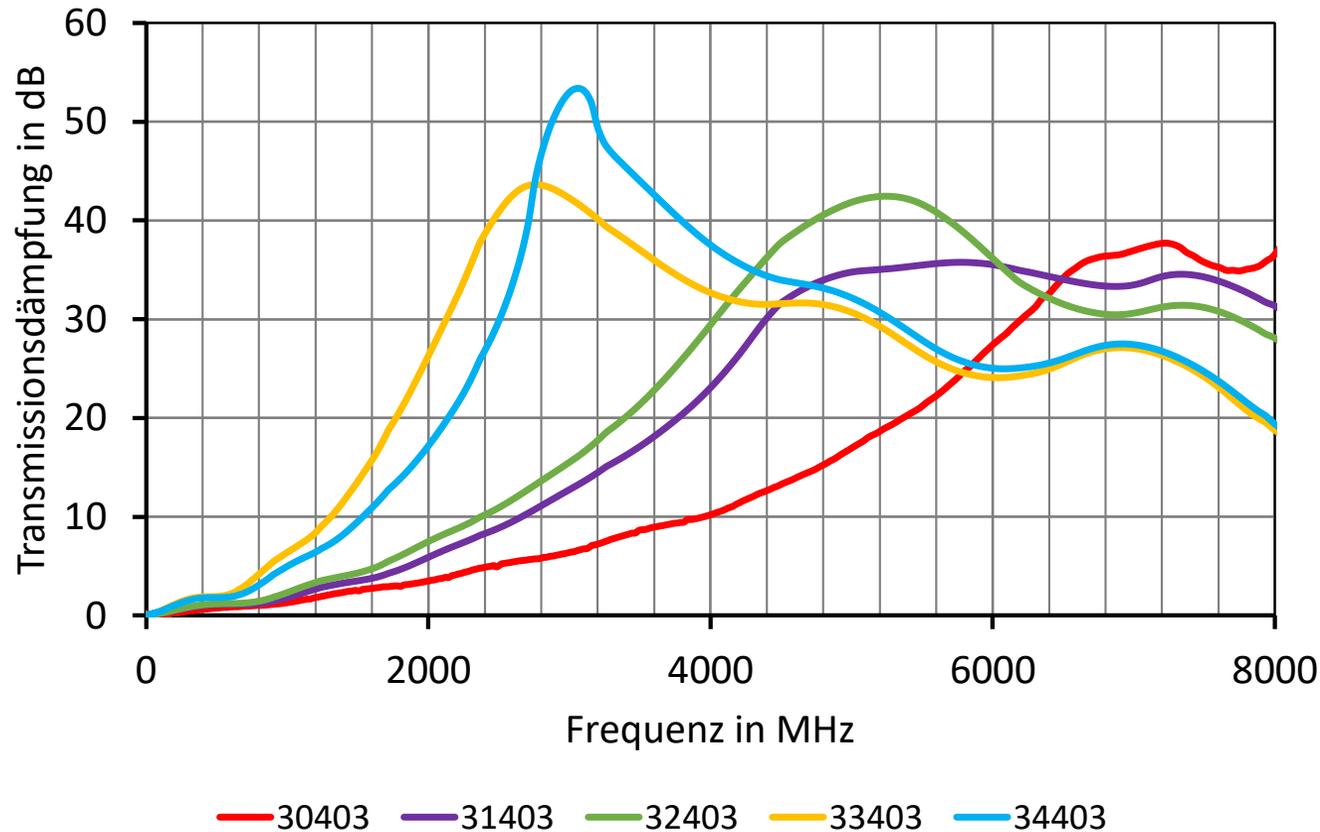
- Komplexe relative Permeabilität der WE-FSFS Materialien:



Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

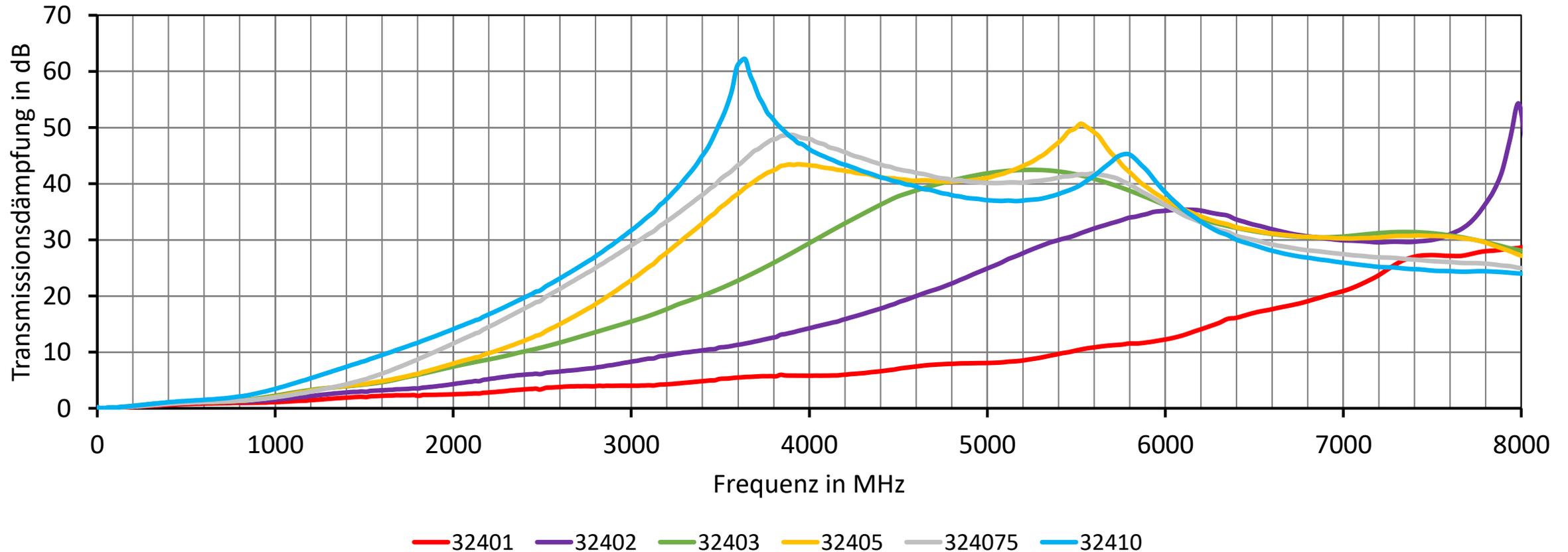
- Transmissionsdämpfung der **WE-FAS EMI** abhängig vom **Material** (Dicke: 0,3mm):



Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

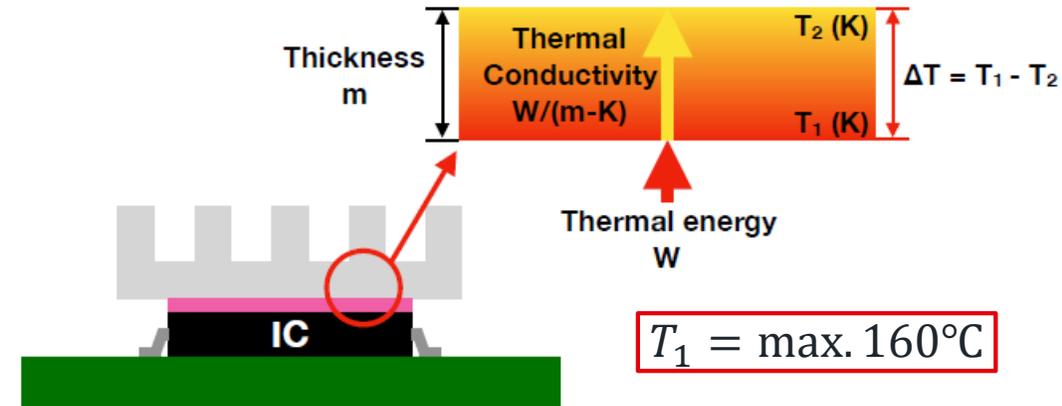
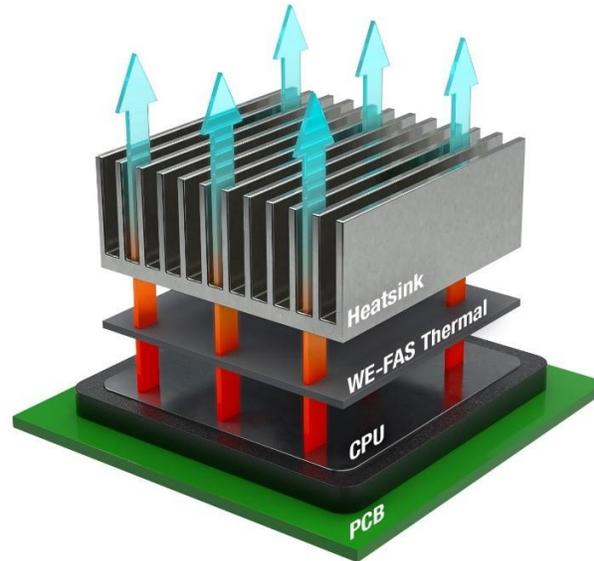
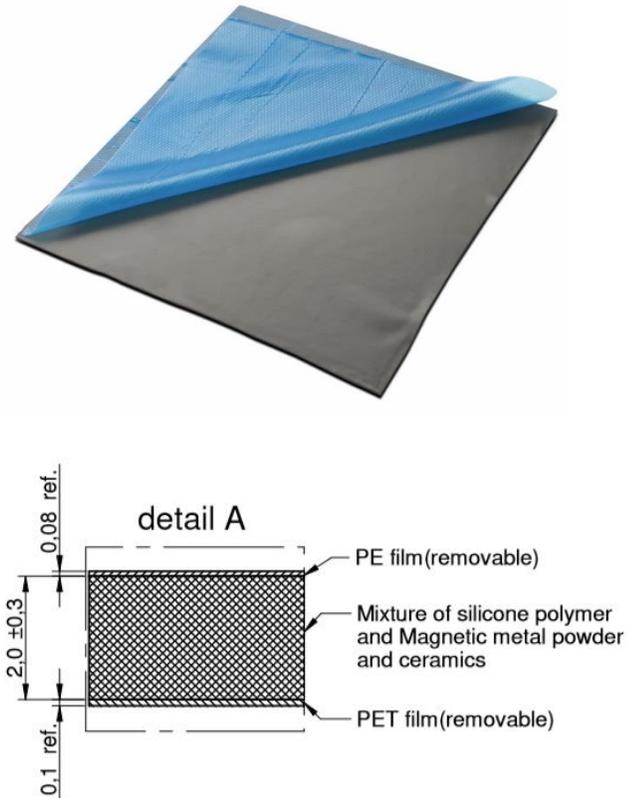
- Transmissionsdämpfung der **WE-FAS EMI** abhängig von der **Materialdicke** (Material 324; 0,1...1mm):



Schirmungslösungen

Kühlkörper

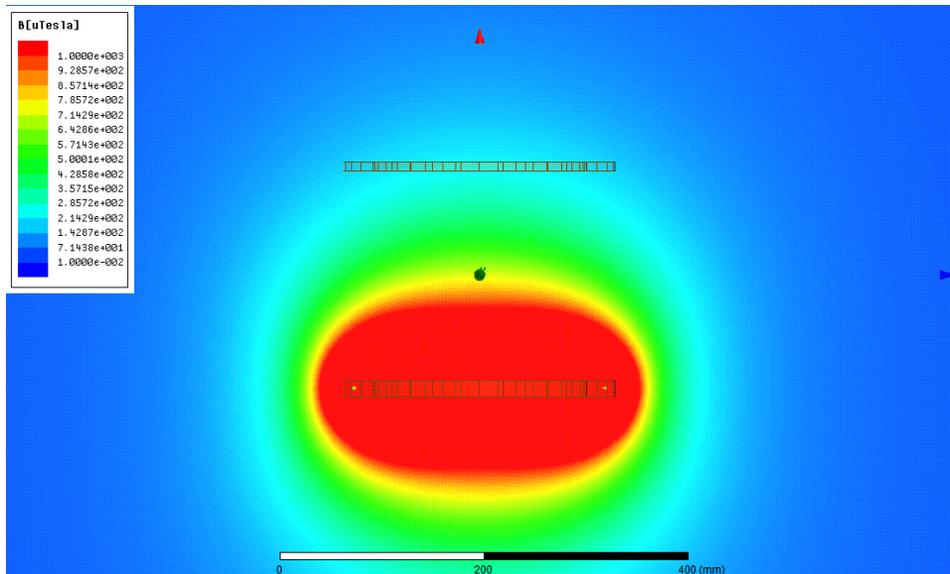
- Flexible Ferritfolie **WE-FAS TC** mit Keramikpartikeln zur **Wärmeleitung** ($\kappa = 1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)



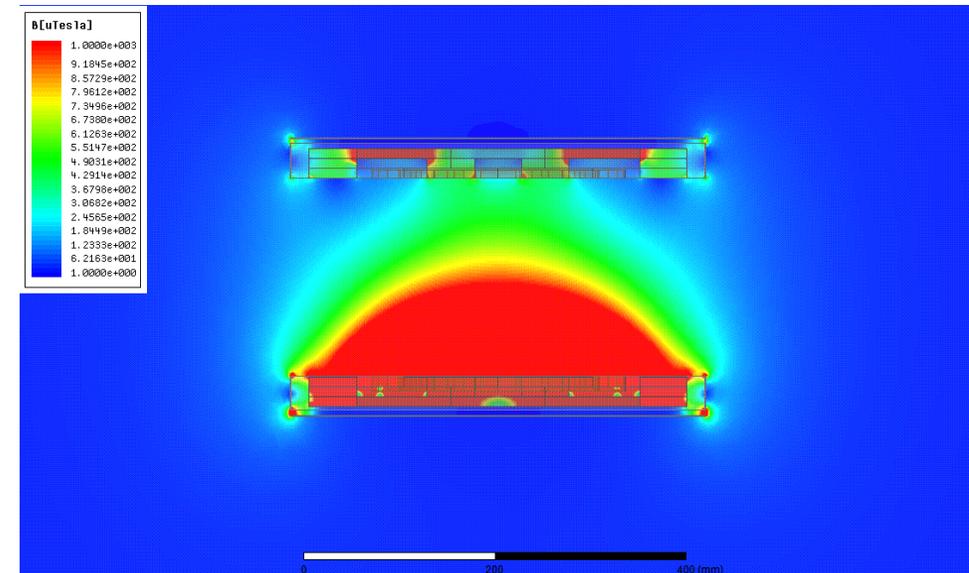
Schirmungslösungen

Platine/Gehäuse

- Effizienzsteigerung bei Drahtlosladespulen



Ohne zusätzliche Ferritfolie



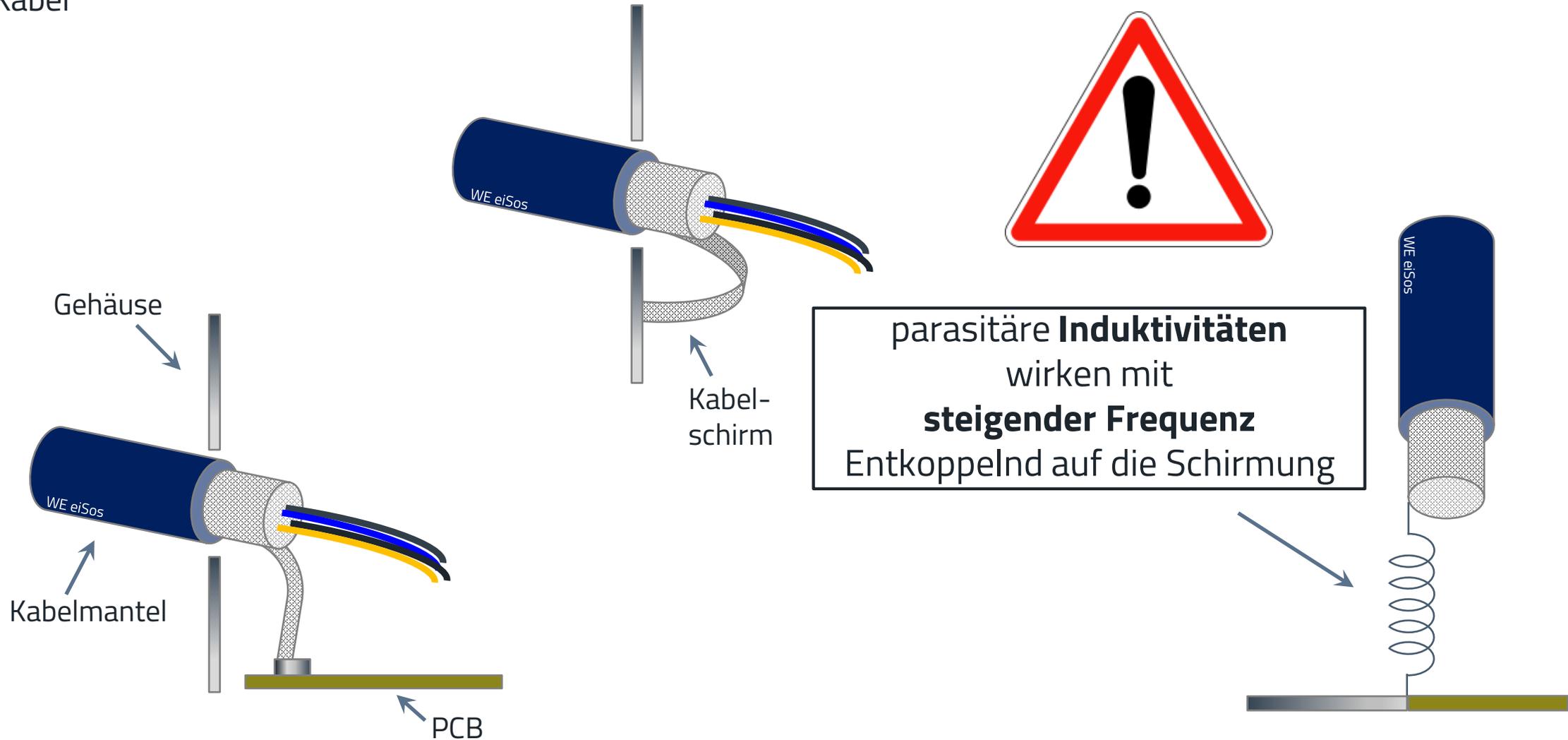
Mit zusätzlicher Ferritfolie

SCHIRM- ANBINDUNG



Schirmungslösungen

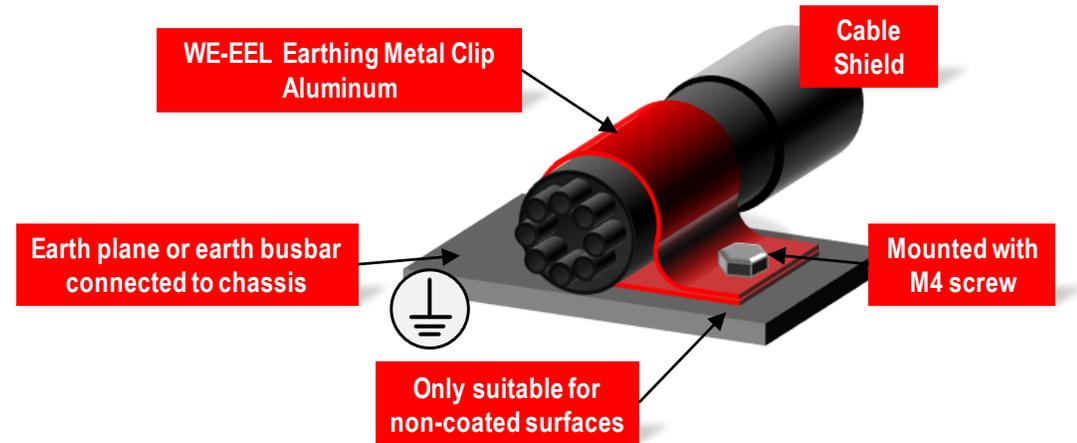
Kabel



Schirmungslösungen

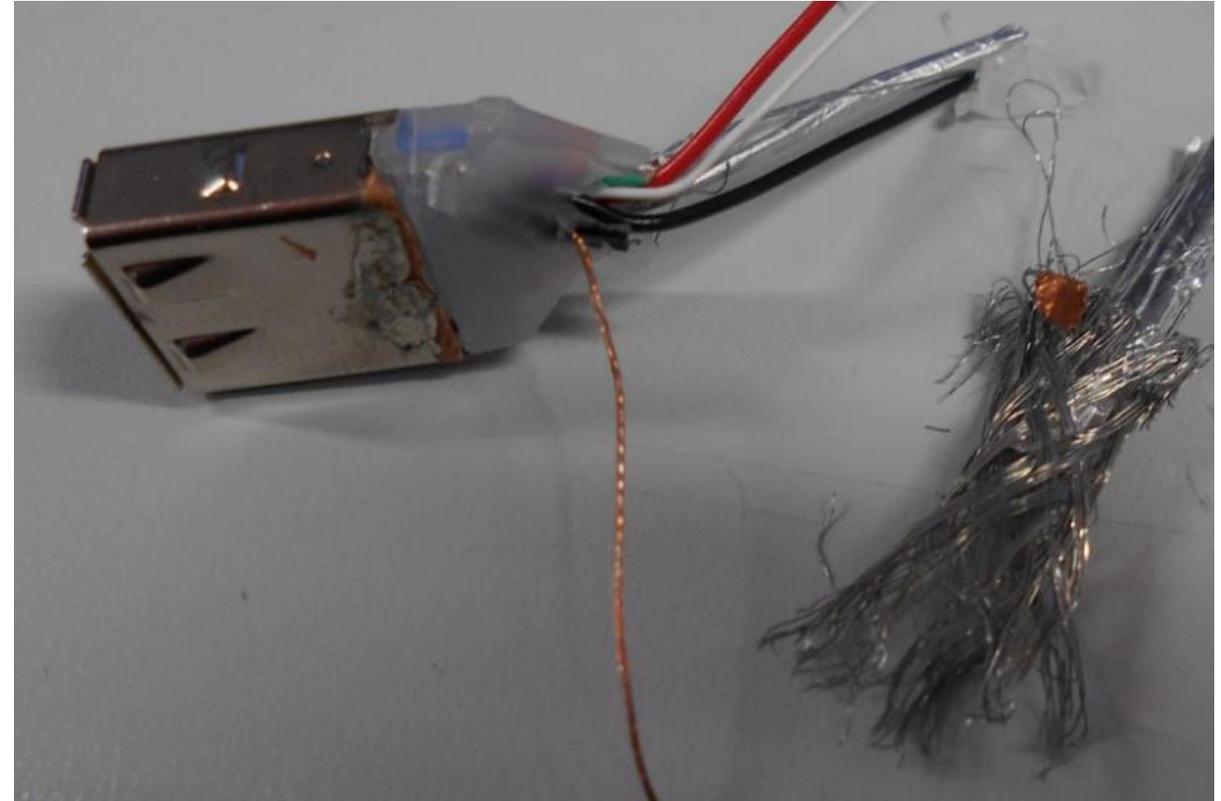
Kabel

- Schirmung von Kabeln und Kabelbündeln:



Cable Shielding

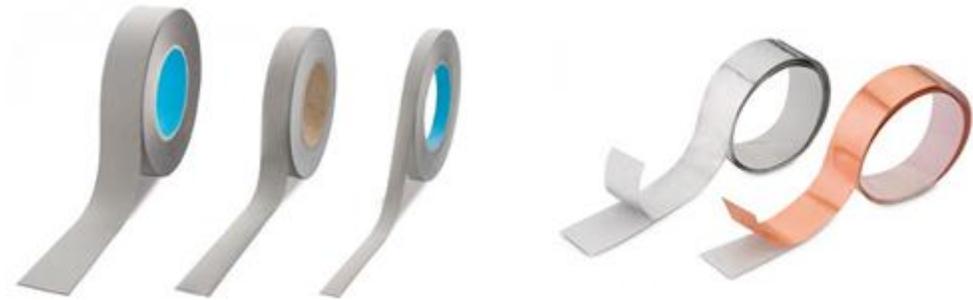
Example: USB 3 Cable – „High Quality“



Schirmungslösungen

Kabel

- Schirmung von **Flachbandkabeln** mit leitfähigem Gewebeband oder metallischem Klebeband:

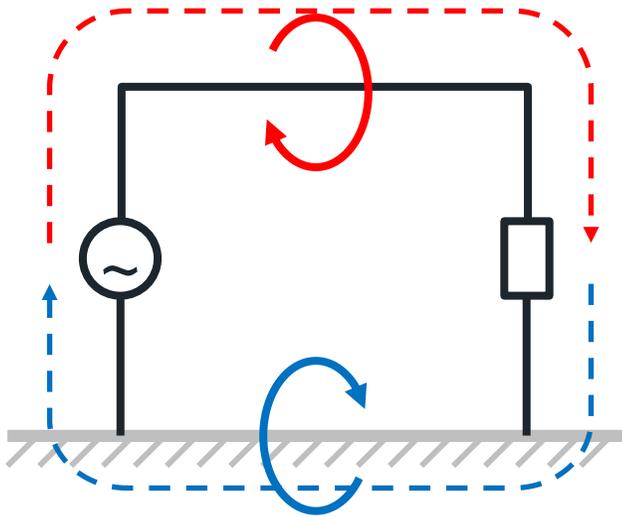


- Beidseitige elektrische Kontaktierung ist notwendig.

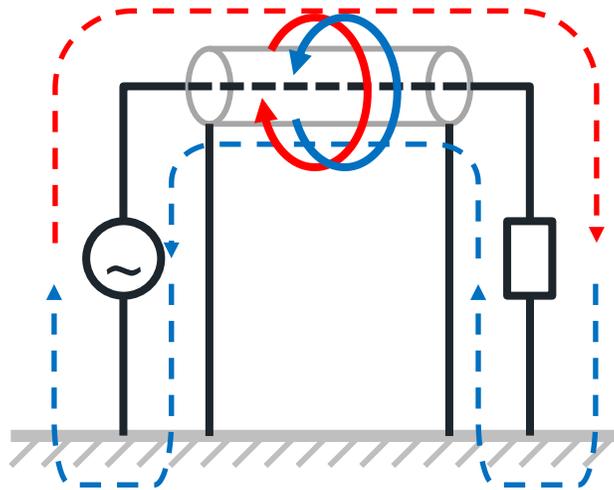
Schirmungslösungen

Kabel

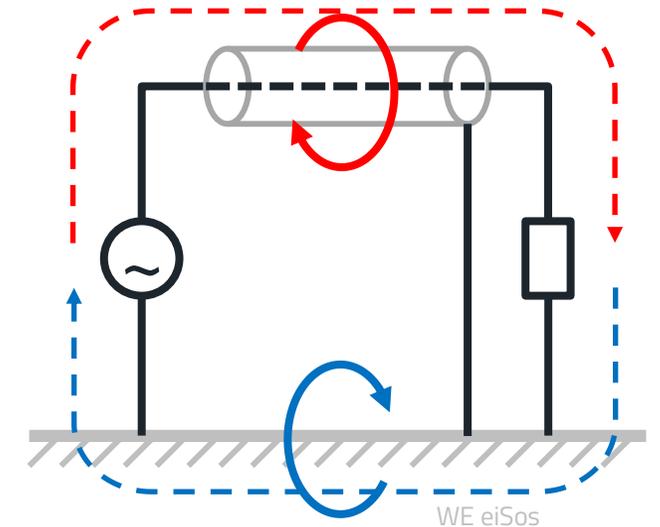
- Schirm auflegen



Strahlt ab



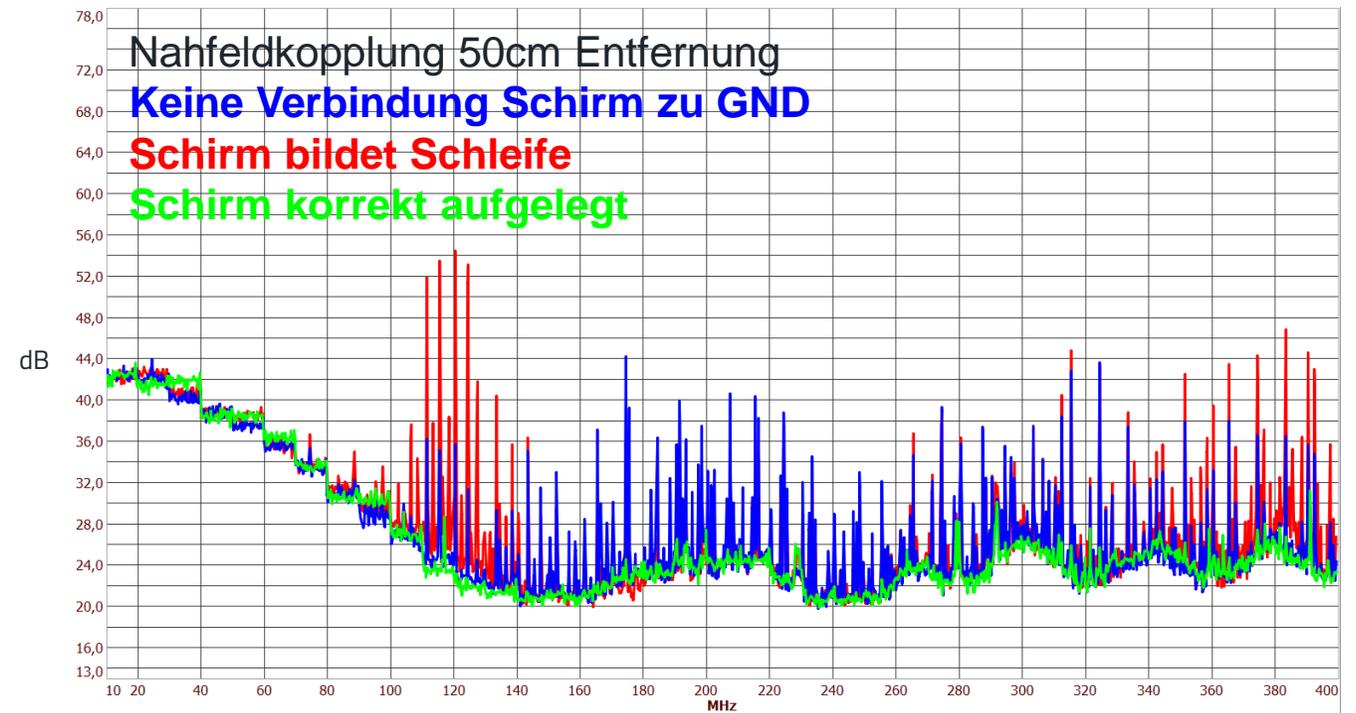
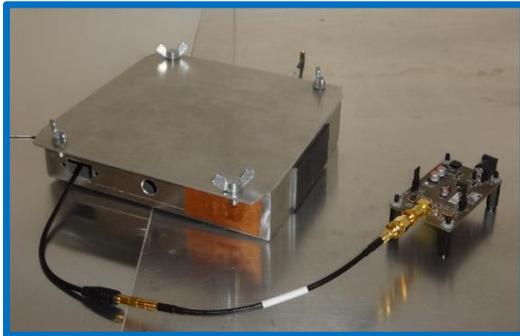
E-Feld wird geschirmt
H-Felder heben sich auf



E-Feld wird geschirmt
H-Felder strahlen ab

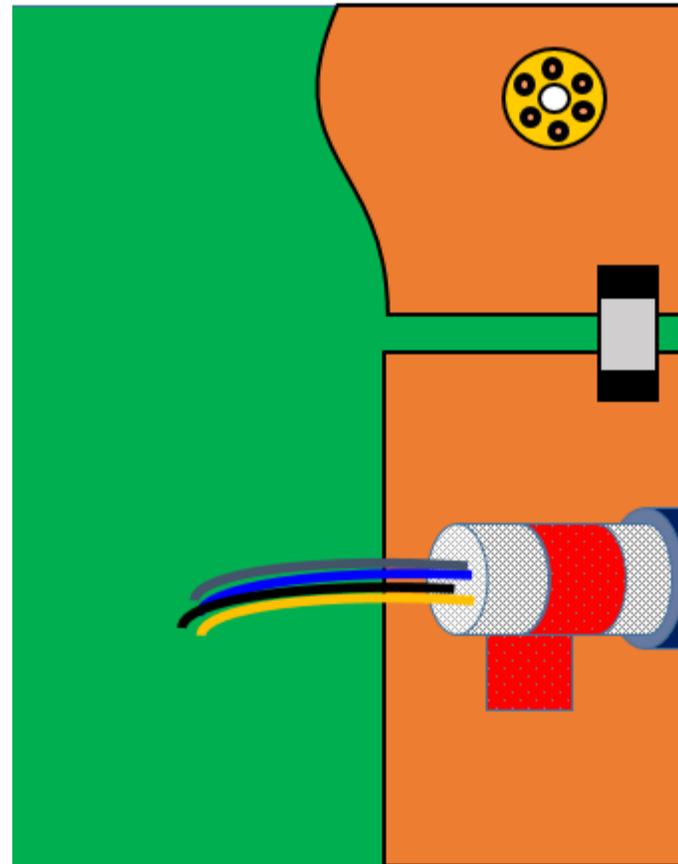
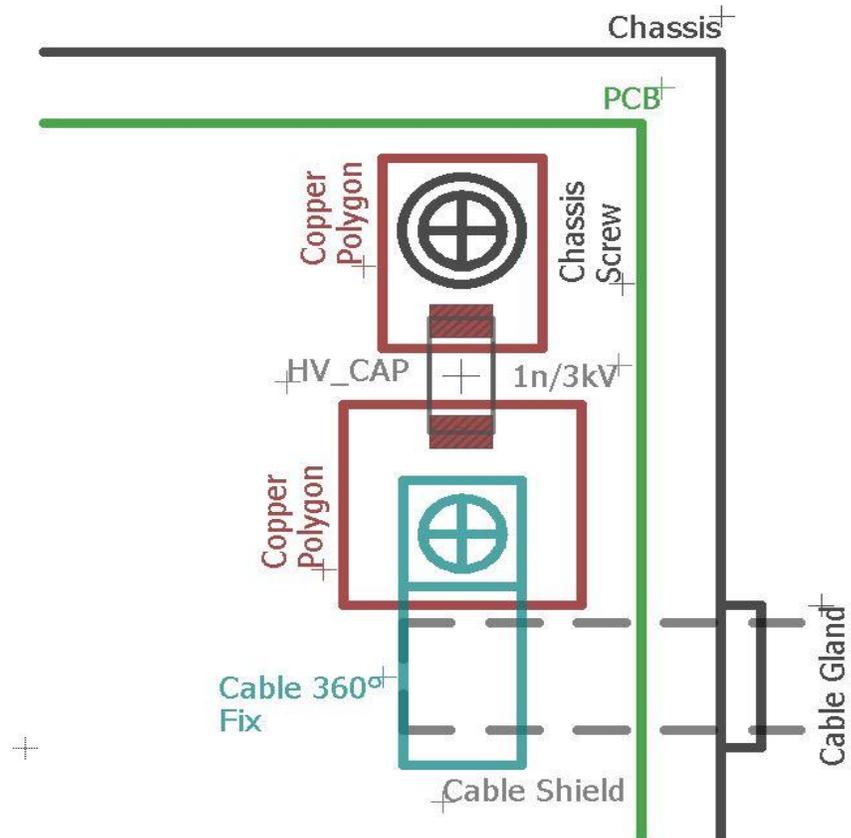
Korrekte Schirmanbindung

Warum reicht es nicht aus den Schirm irgendwo auf Masse zu legen?



Schirmungslösungen

Kabel



1 Meg Ohm Widerstand parallel !

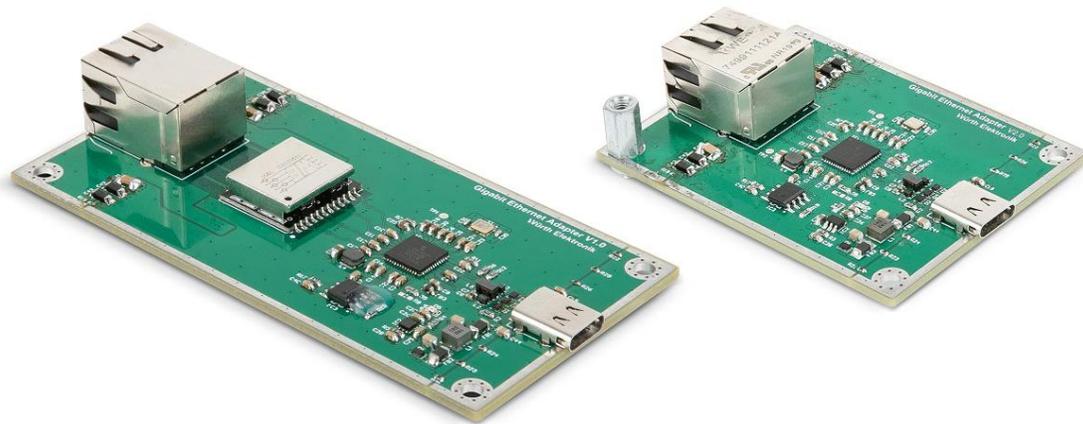
885342210004 1nF/3kV/1808

885342211009 1nF/3kV/1812

Reference Designs zu Gigabit Ethernet

Gigabit Ethernet and PoE with Gigabit Ethernet

Detailed explanation of the screen connection available in the app note!



Referenz Design: <https://www.we-online.com/rd016>

Application Note: <https://www.we-online.com/anp116>



Referenz Design: <https://www.we-online.com/rd022>

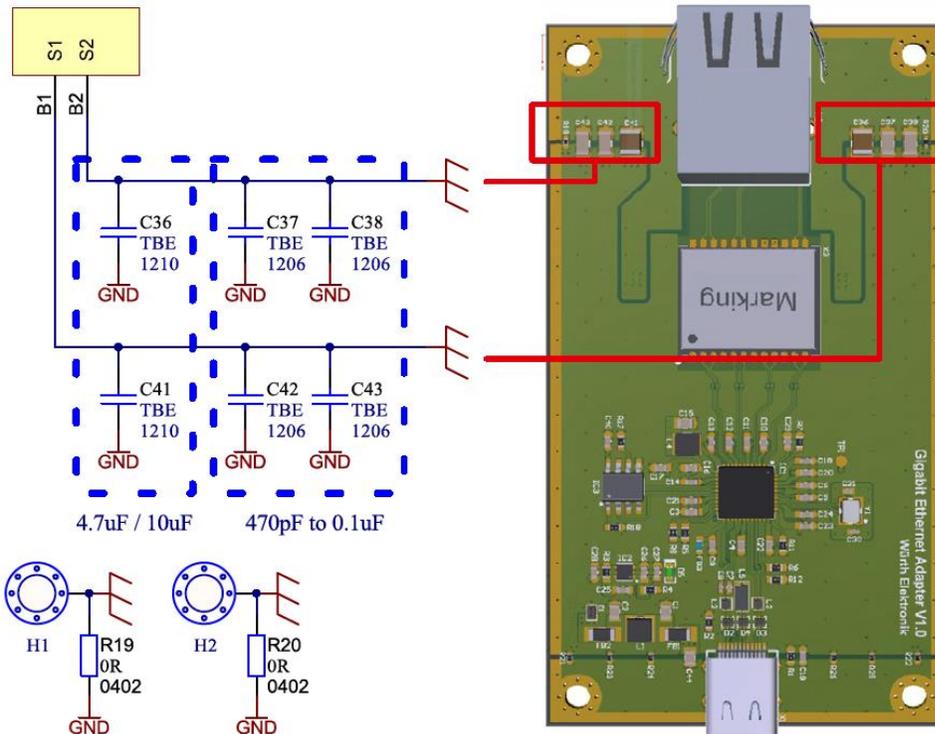
Application Note: <https://www.we-online.com/anp122>

Schirmanbindung

Overview

ANNP116 - Gigabit-Ethernet-Interface

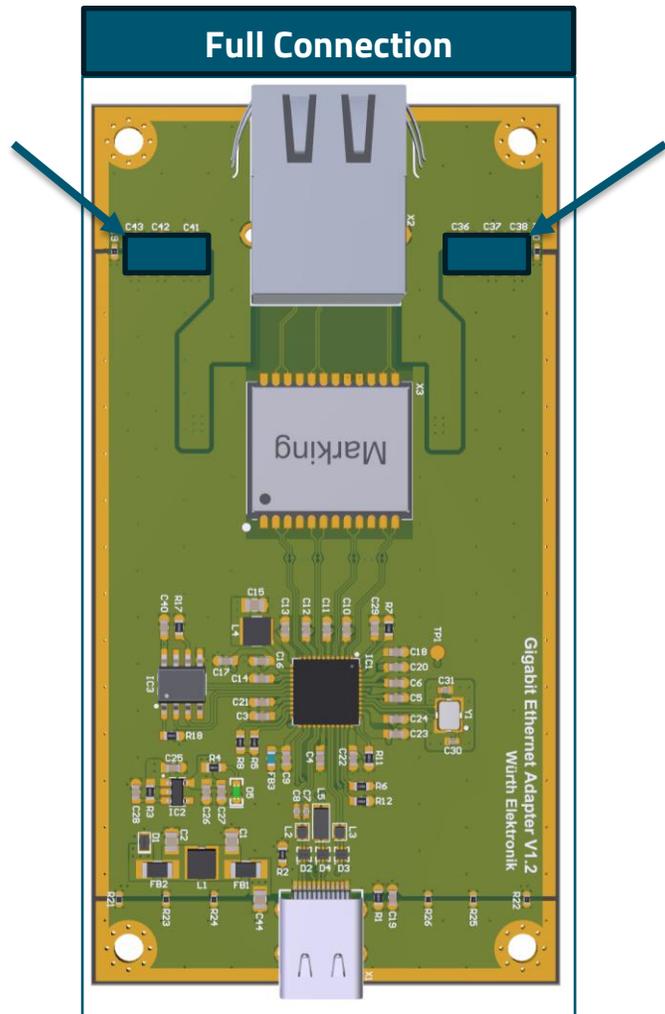
4 Options for shield connection



1. Full contact
2. 1 nF Y-Capacitors
3. 2 · 10 nF MLCC Capacitors
4. 1 · 10 nF MLCC Capacitors

Schirmanbindung

#1 – Full Connection

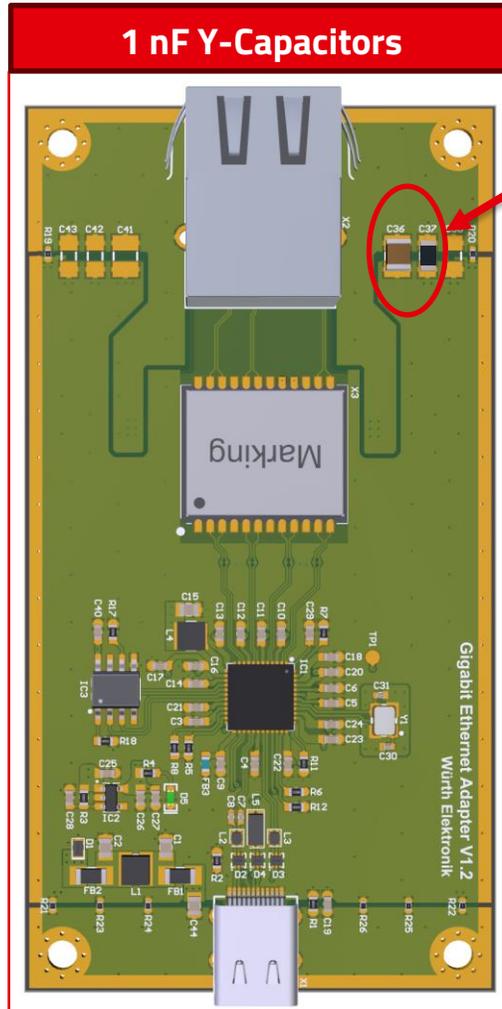


Full Connection

The shield of the socket (chassis) is **connected directly to** the ground plane of the circuit board.

Schirmanbindung

#2 - 1 nF Y-Capacitors



1 nF Y-Capacitors:

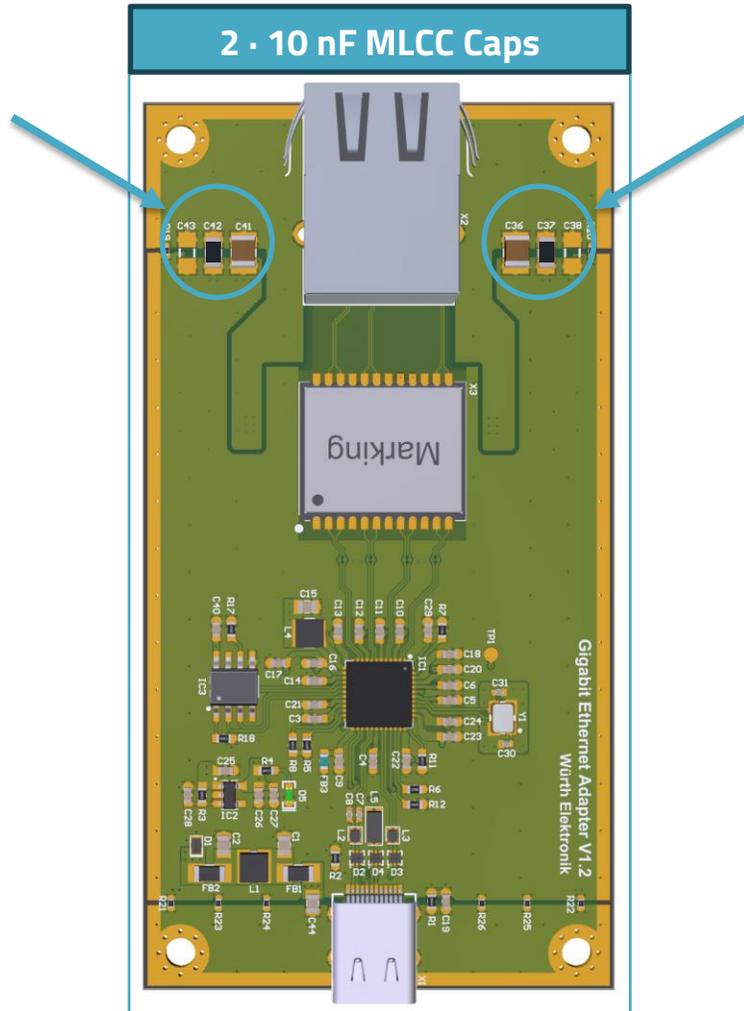
Classic connection, often mentioned in online sources and consisting of



- an SMD Y capacitor and
- An parallel connected **1 MΩ SMD Resistor**.

Schirmanbindung

#3 - 2 x 10 nF MLCC-Capacitors



2 · 10 nF MLCC Capacitors:

Capacitive shield connection, consisting of

two 10 nF MLCCs (100 V Type)

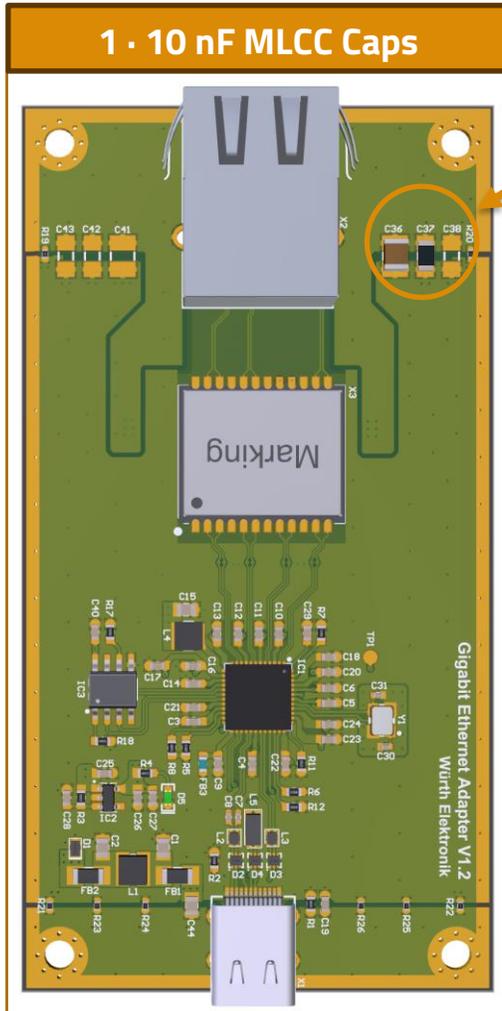
- With a parallel **SMD Varistor**.



The varistor protects the capacitors from damage caused by transient overvoltages.

Schirmanbindung

#4 - 1 x 10 nF MLCC-Capacitor



1 · 10 nF MLCC Capacitor

Capacitive shield connection, consisting of

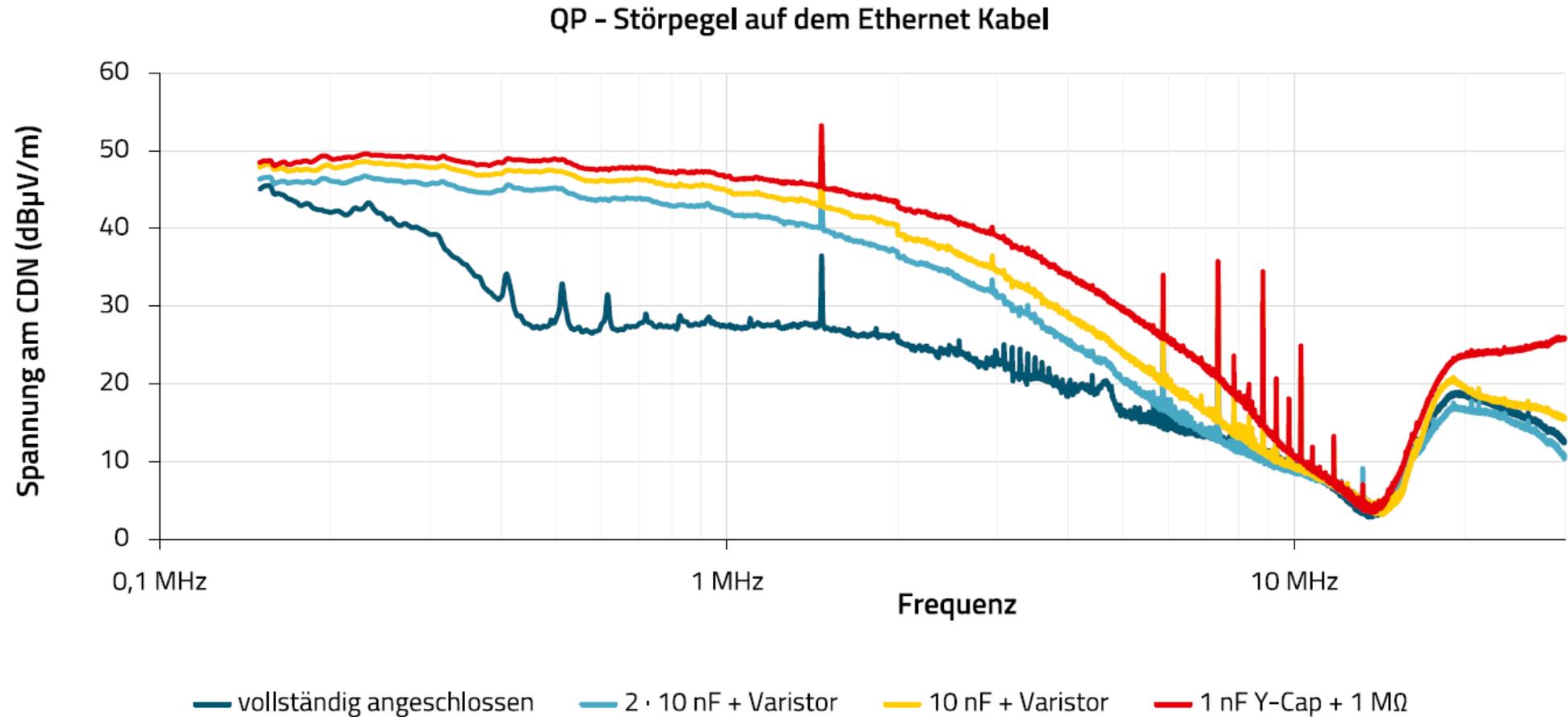


- **one 10 nF MLCC** (100 V Typ) with
- A parallel **SMD Varistor**.

The varistor protects the capacitors from damage caused by transient overvoltages.

Schirmanbindung

Conducted interference (QP) on the Ethernet cable



Schirmungslösungen

Masseanbindung

- Leitfähige Gehäuseteile und Masseflächen einzelner Platinen sollten **niederimpedant** miteinander verbunden werden.
- **Mechanische** Varianten der Verbindung:



Abstandsbolzen

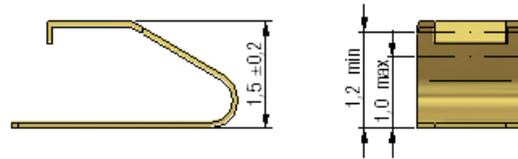


Erdungsband

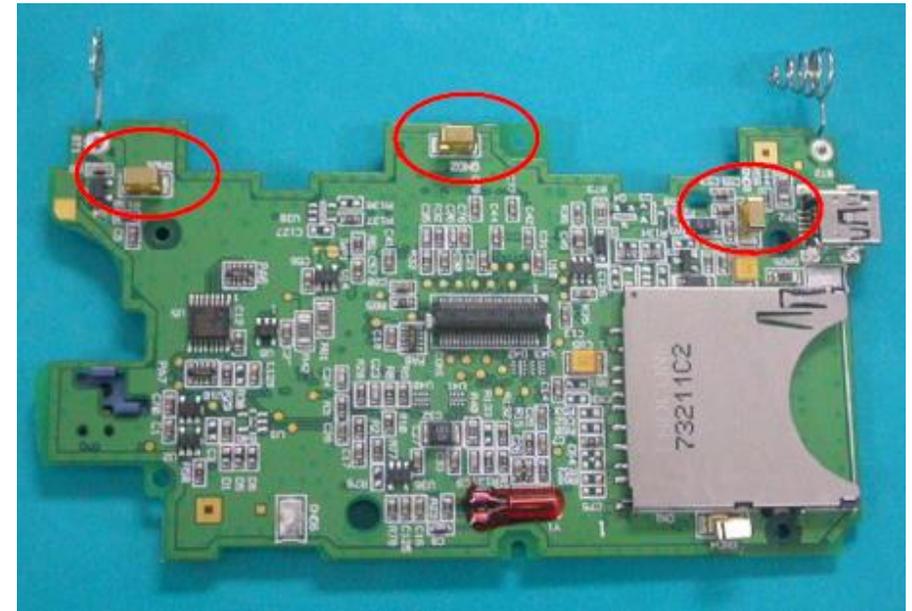
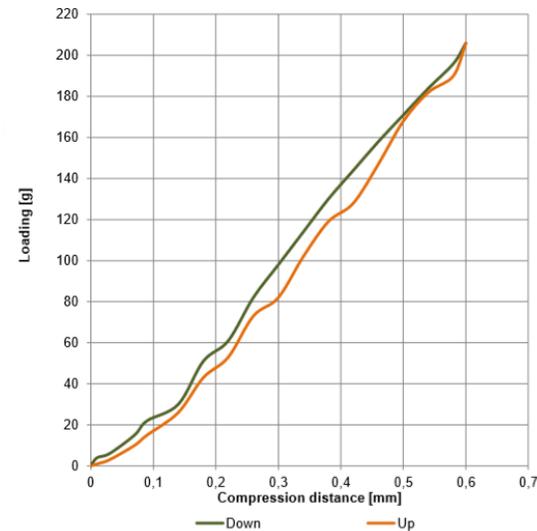
Schirmungslösungen

Masseanbindung

- Oberflächenverlötbare **Kontaktfedern** aus Kupfer-Beryllium oder Phosphor-Bronze **WE-SECF**
- Beschichtung:
 - Au: 38nm
 - Sn: 1,5 μ m



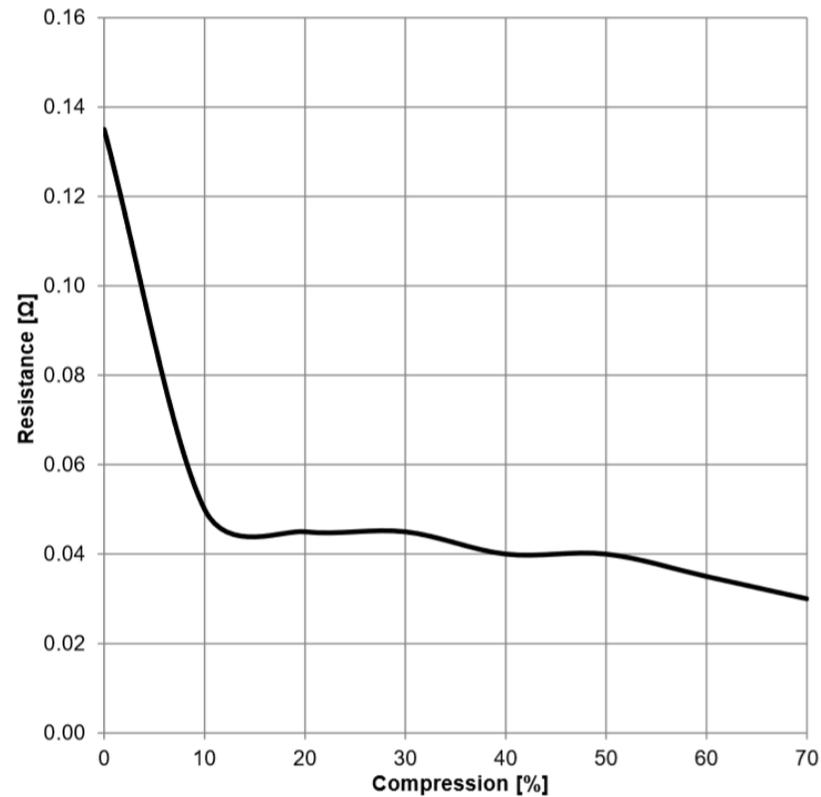
Force Deflection Diagram:



Schirmungslösungen

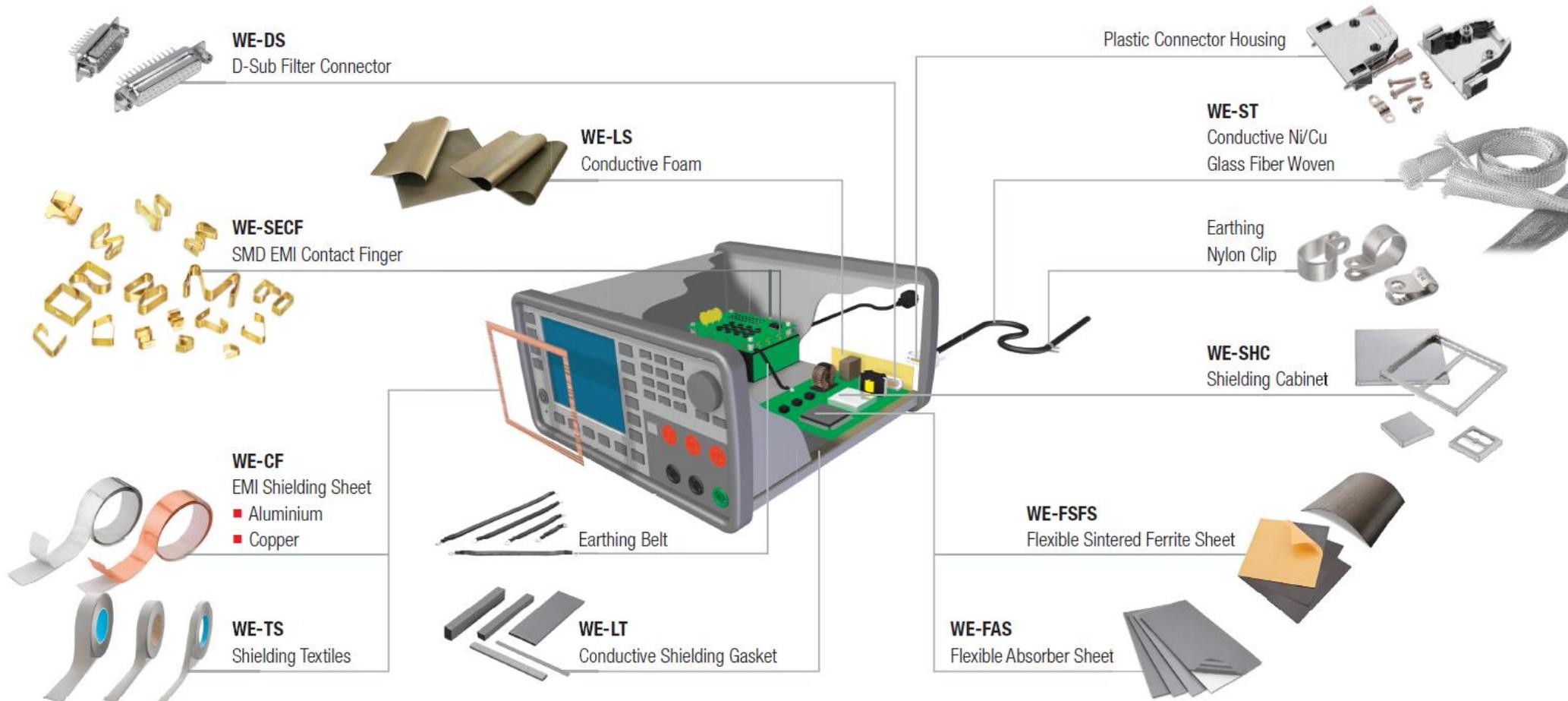
Masseanbindung

- Oberflächenverlötbare **Schaumstoffblock** mit Zinnbeschichtung **WE-SMGS**
- Optimale Kompression: 20...70%



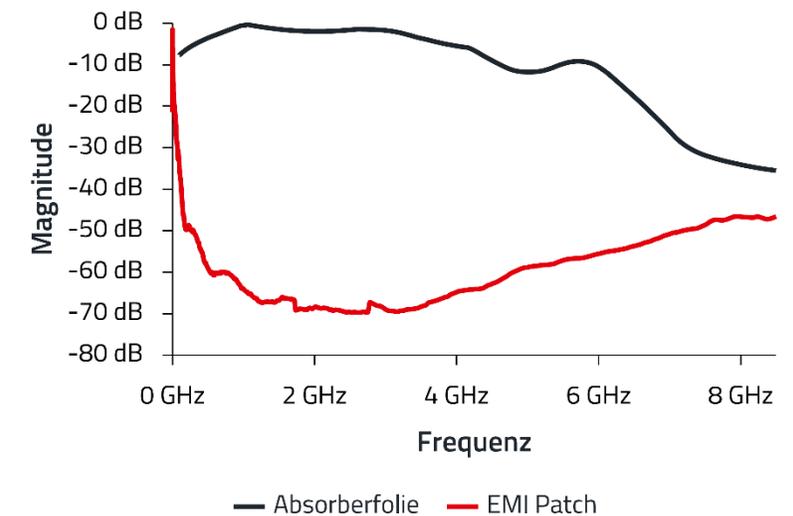
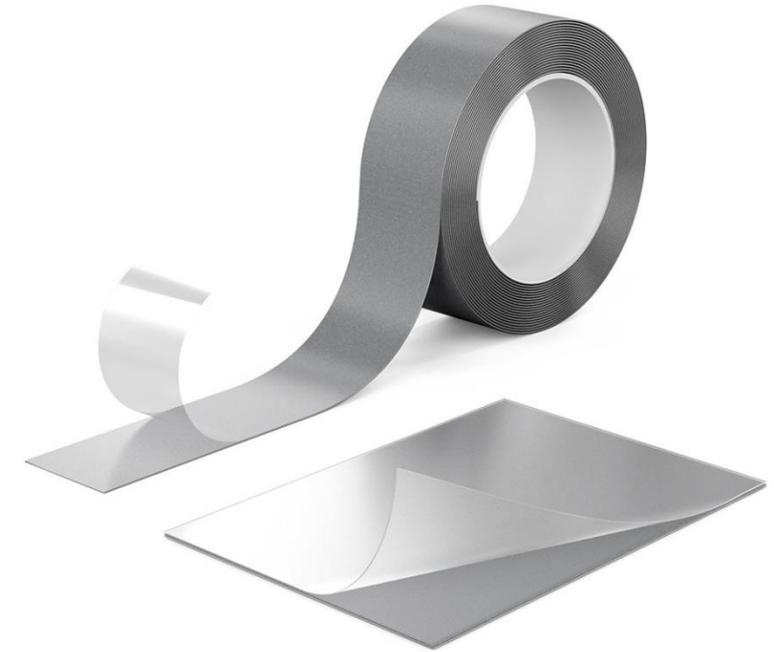
Schirmungslösungen

Übersicht



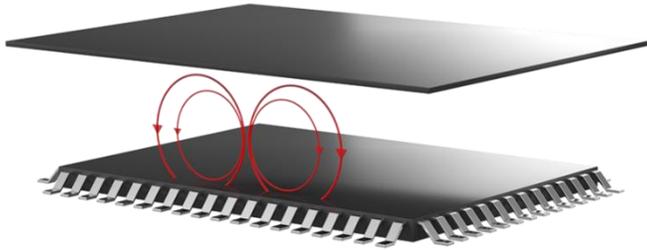
WE-EMIP EMI Patch

- WE-FAS mit integrierter Aluminiumschicht, vereint die Vorteile einer EMI-Absorberfolie mit denen eines Abschirmbands.
- Merkmale:
 - Höhere Dämpfung als bei herkömmlichen Absorberfolien.
 - Lösung für breitbandige Störer
 - Perfekt anpassbare Lösung für Tests, EMV-Labore und für die Endprodu
- Anwendungen:
 - Hohe Dämpfung von EMI und Wärmeableitung
 - Nicht isolierte Version für GND-Verbindung und Massebezugsfläche
 - Gute Absorption auch bei Hochfrequenztechnologien (5G, IoT, ...) oder Ics

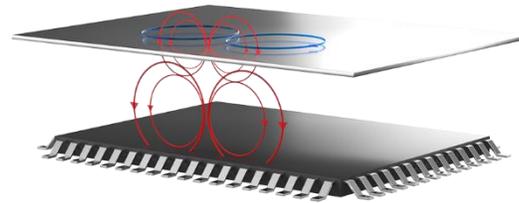


WE-EMIP EMI Patch

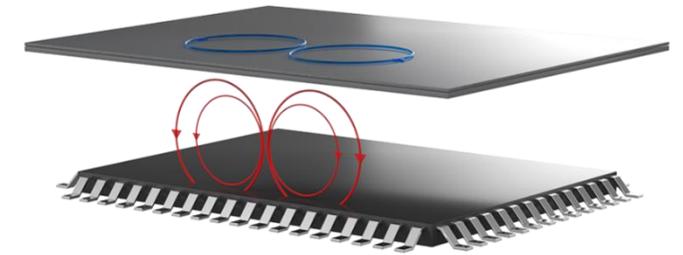
How it works



- Wird die Absorberschicht alleine verwendet, dämpft sie die elektromagnetischen Störungen.



- Die Metallschicht dämpft ebenfalls elektromagnetische Störungen! Induzierte Wirbelströme wirken dem eigentlichen Störfeld entgegen.



- Die Kombination des Metalls mit der Absorberschicht verhindert Rückstrahlung.
- Die im Nahfeld gemessene elektromagnetische Abstrahlung wird stark reduziert.

