



EMC BASICS

Christian Koch
Field Application Engineer

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Agenda

- Grundlagen Kernmaterialien
- Begriffe der EMV
- Entstörung
 - Filtertopologien



Permeabilität

- Die **Permeabilität** μ beschreibt die Fähigkeit eines Materials, den **magnetischen Fluss**, hervorgerufen durch ein magnetisches Feld, zu **konzentrieren**.
- Die **relative Anfangspermeabilität** $\mu_{r,i}$ wird bei sehr kleiner Aussteuerung und bei einer niedrigen Frequenz (typ. 10kHz) messtechnisch bestimmt.
- Sie ist proportional zum Anstieg der Tangente im Nullpunkt der **Hysteresis-Neukurve**.

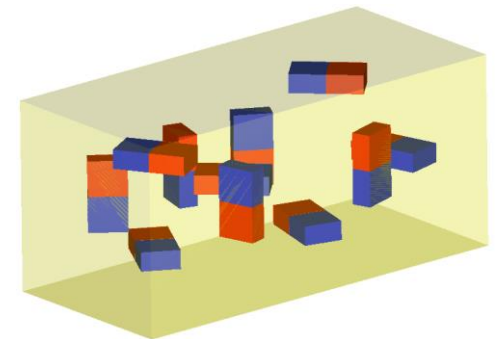
$$\mu_{r,i} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} \bigg|_{H=0}$$

- Typische Wertebereiche für **WE Entstörbauteile**:

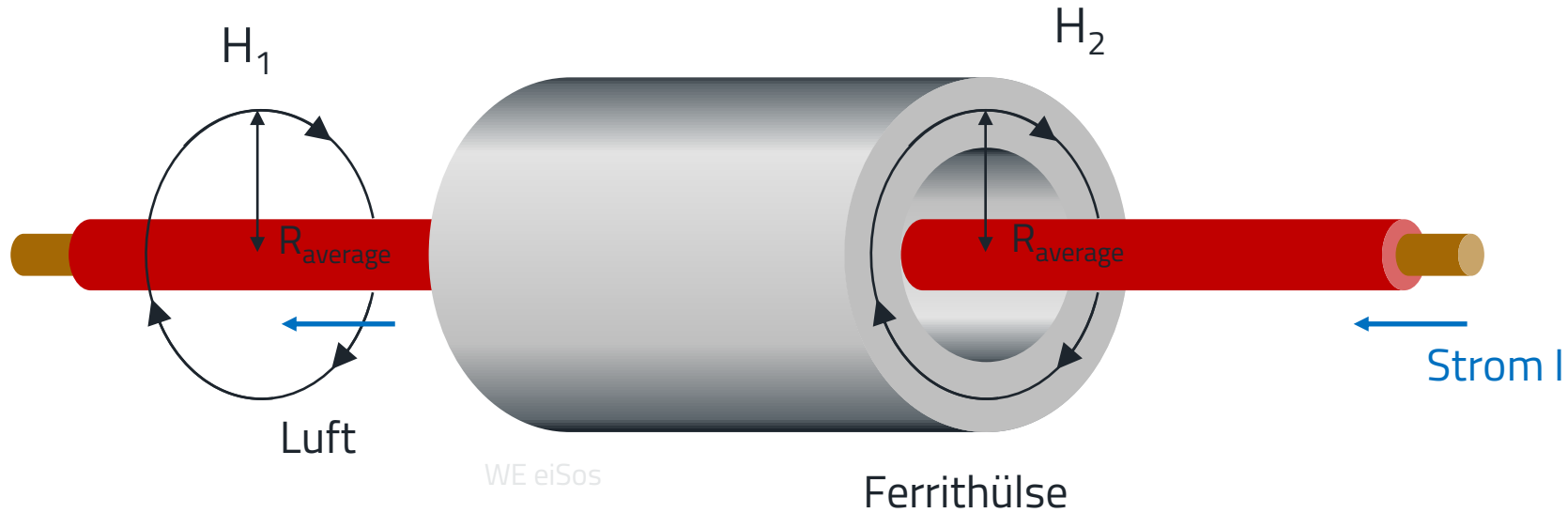
- | | |
|---|--------------------------------|
| ■ Eisenpulver (Fe): | $\mu_{r,i} = 50 \dots 150$ |
| ■ Nickel-Zink-Ferrit ($\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$): | $\mu_{r,i} = 50 \dots 1500$ |
| ■ Mangan-Zink-Ferrit ($\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$): | $\mu_{r,i} = 2000 \dots 10000$ |
| ■ Nanokristallines Material (Fe_{nk}): | $\mu_{r,i} = 5000 \dots 95000$ |

Ferritmaterial

- ungeordnet
- weichmagnetisch



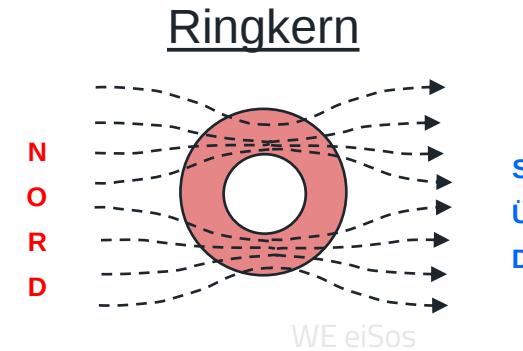
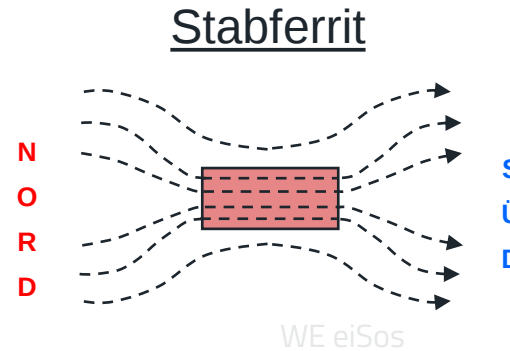
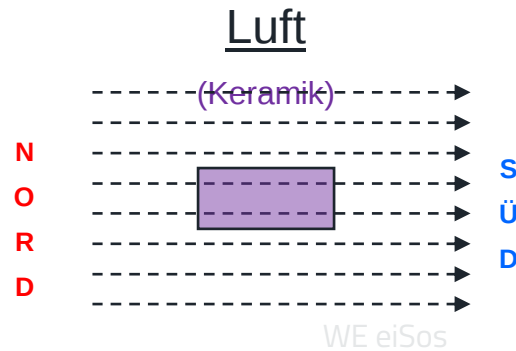
Das Magnetfeld – magnetische Feldstärke



$$H_1 = H_2 = H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R_{average}}$$

$$B_1 \neq B_2$$

Das Magnetfeld – magnetische Flussdichte



Induktion in Luft:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

lineare Funktion, da $\mu_r = 1 = \text{konstant !}$

Die relative Permeabilität ist ein

Material
Temperatur
Frequenz
Strom
Druck

Induktion in Ferritmaterial:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

-abhängiger Parameter

Permeabilität – komplexe Permeabilität

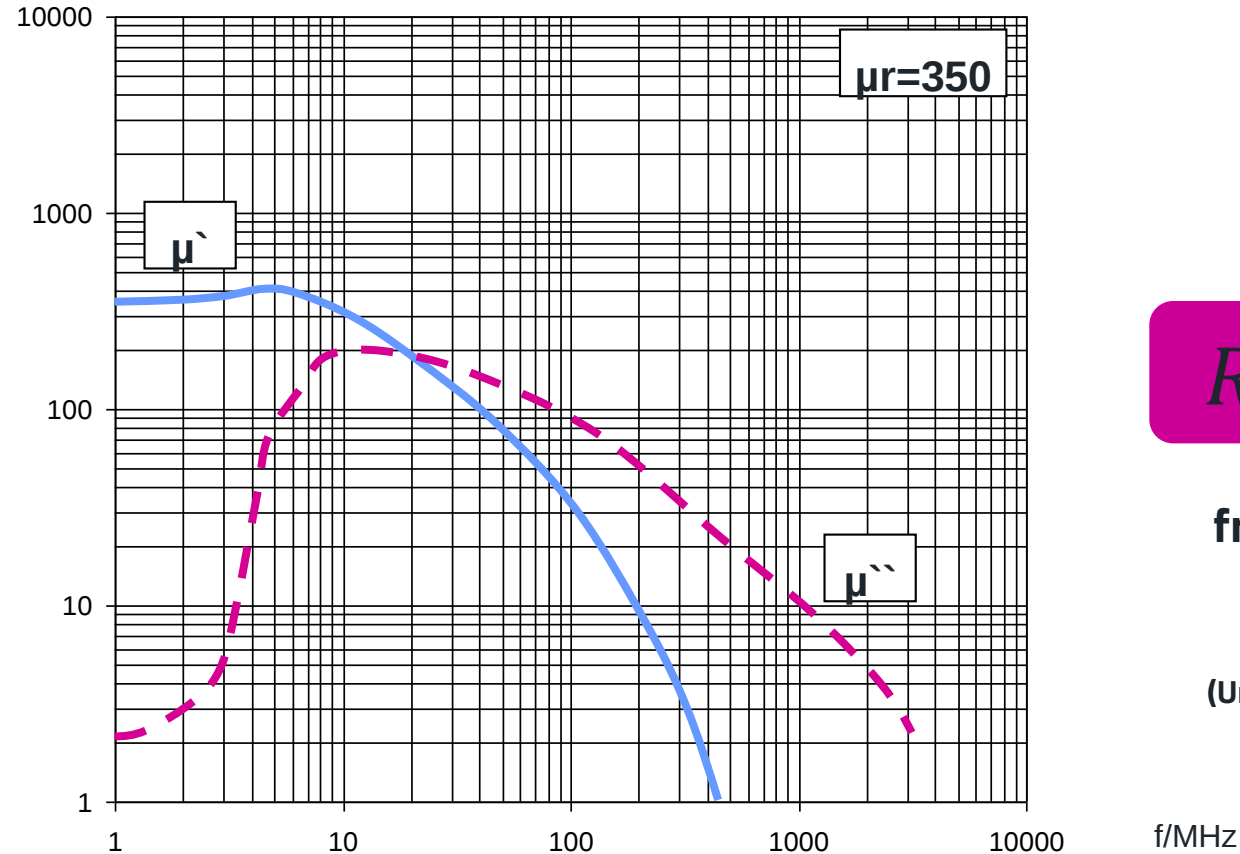
$$\underline{Z} = j\omega L_0(\mu' - j\mu'') = R + jX$$

$$X_L = j\omega L_0\mu'$$

frequenzabhängiger
Induktivitätsanteil
(Magnetisierbarkeit)

$$R = \omega L_0\mu''$$

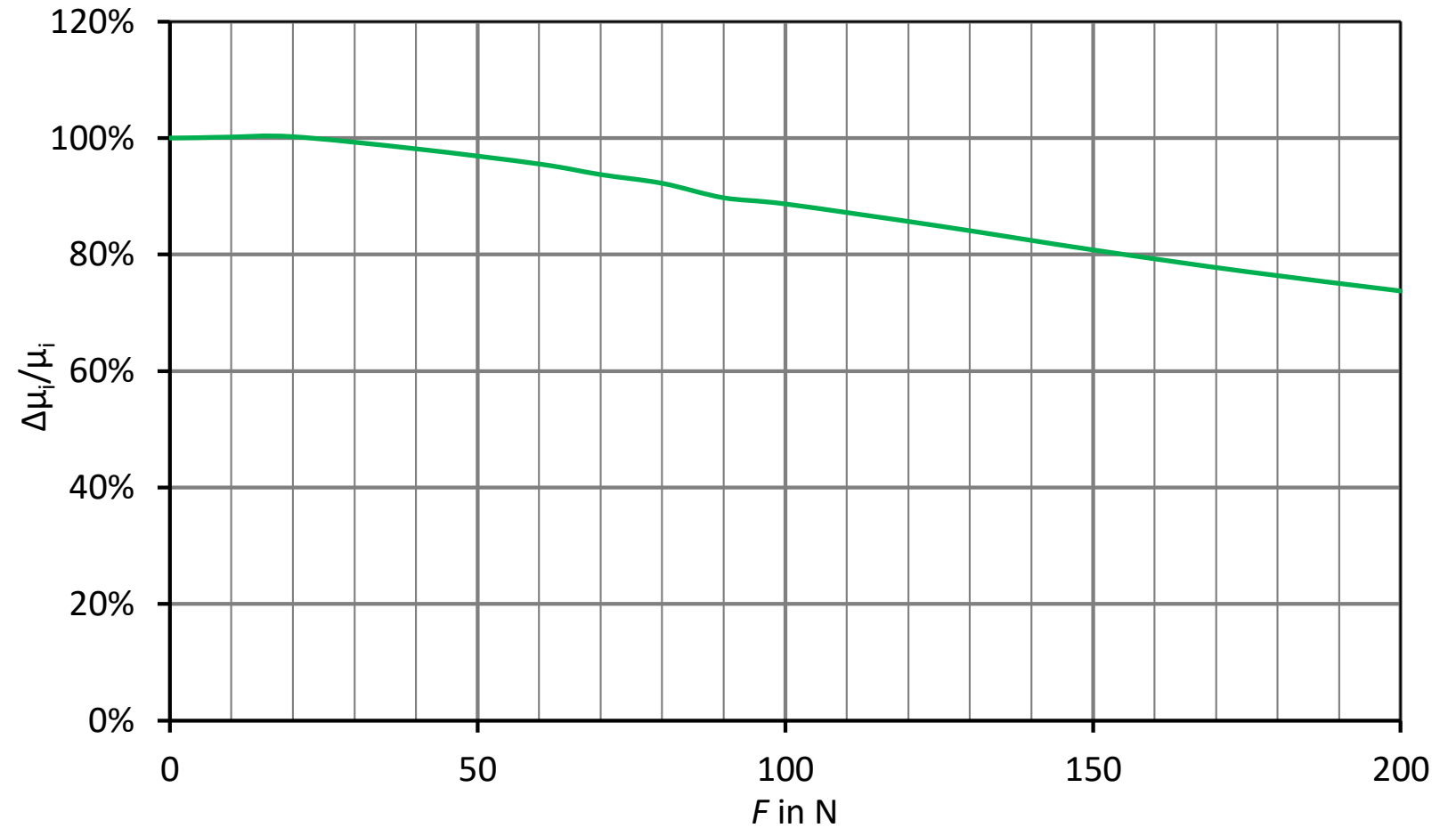
frequenzabhängige
Kernverluste
(Ummagnetisierungsverluste)



Permeabilität - Druckabhängigkeit

■ Beispiel:

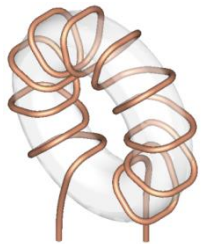
- NiZn Ringkern
- $f_{\text{meas}} = 100\text{kHz}$



Impedanz einer Spule mit Ferritkern

Luftspule + Ferritkern

- Modell für die **Impedanz** unterhalb des Eigenresonanzpunktes einer Spule mit Ferritkern:



Impedanz der Luftspule $\underline{Z}_0$

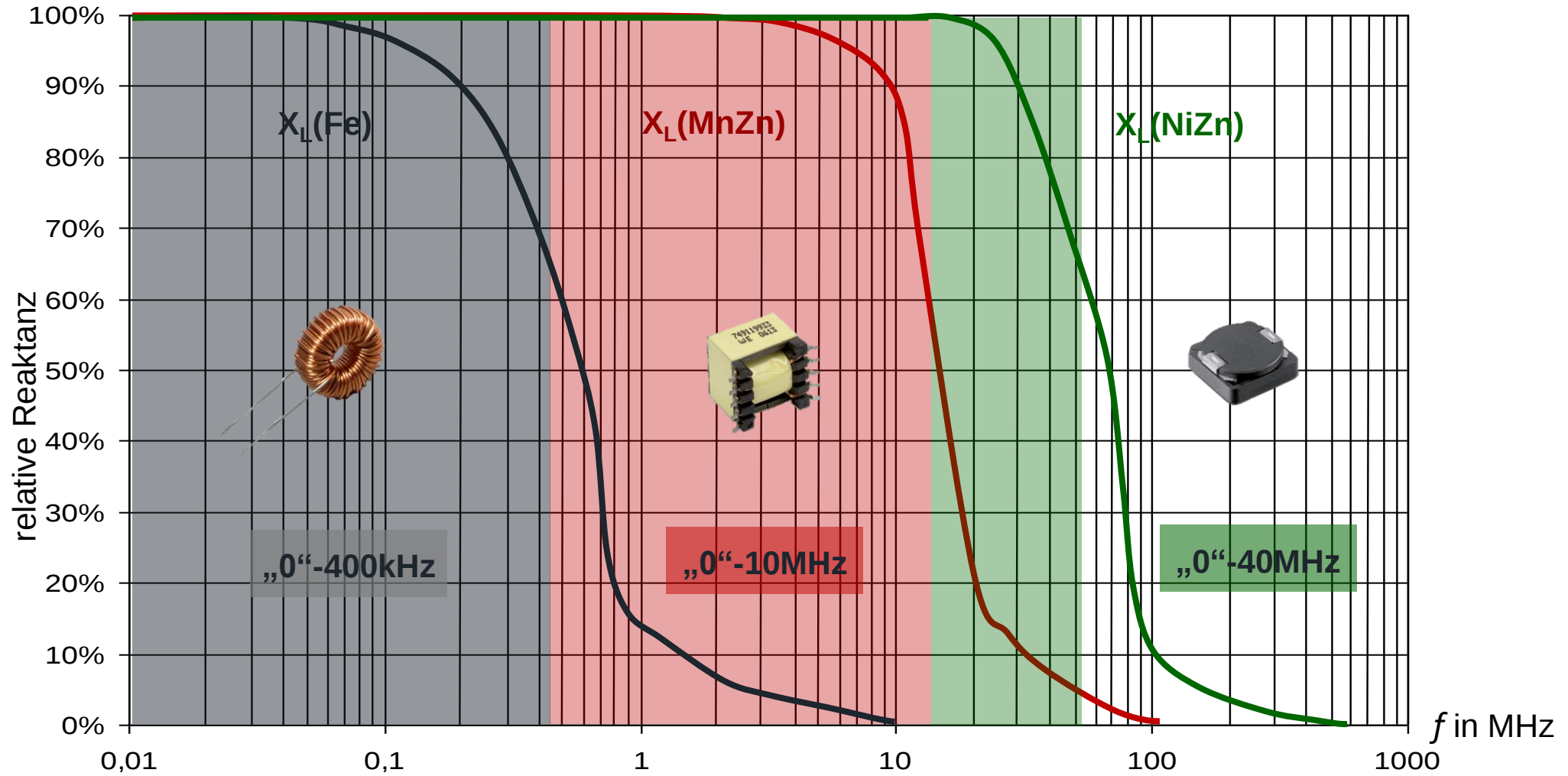


Ferritpermeabilität $\underline{\mu}_r$

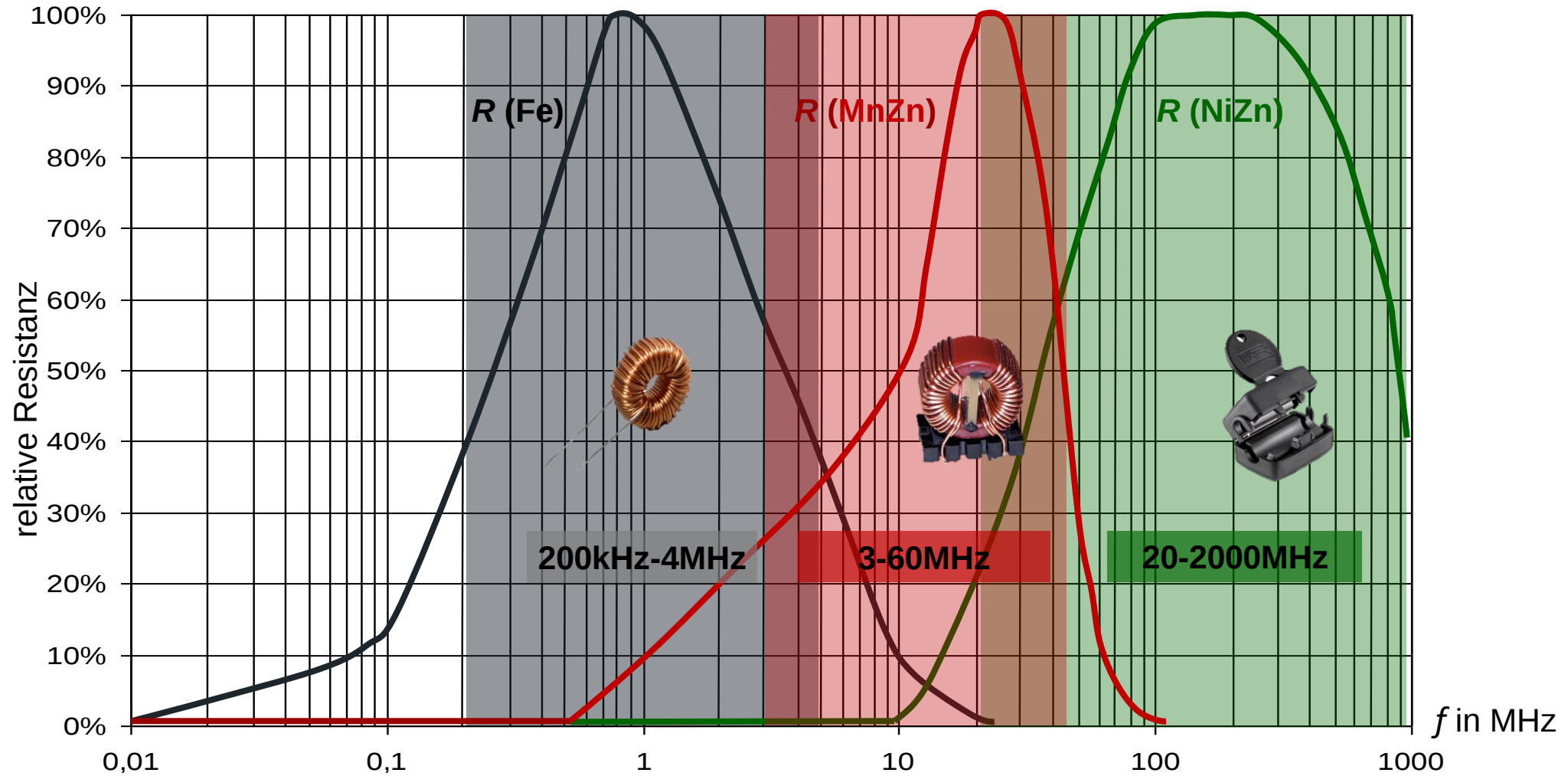


$$\begin{aligned}\underline{Z}(f) &= \underline{Z}_0(f) \cdot \underline{\mu}_r(f) \\ &= j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_0 \cdot [\mu'_r(f) - j \cdot \mu''_r(f)] \\ &= j \cdot X_L(f) + R(f)\end{aligned}$$

Kernmaterial - Magnetisierungsanteil



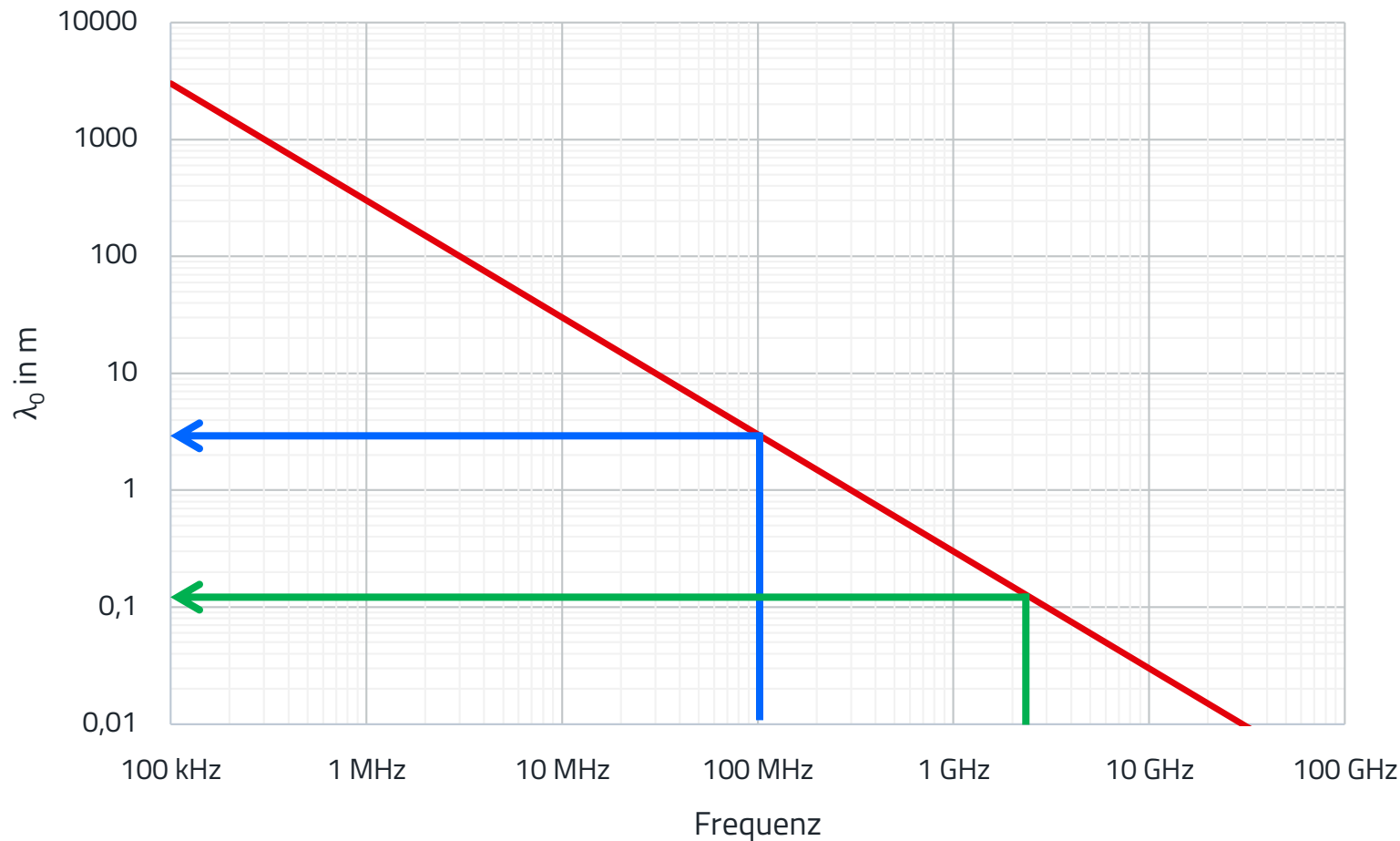
Kernmaterial - Verlustanteil



Begriffe in Zusammenhang mit EMV

- Frequenz, Wellenlänge
- Störabstand
- Gleichtakt, Gegentakt
- Signalübertragungsarten
- Kopplung zwischen Stromkreisen
- Einfügedämpfung

Frequenz, Wellenlänge



■ Vakuum

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

$c_0 = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

■ Medium

$$\lambda = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

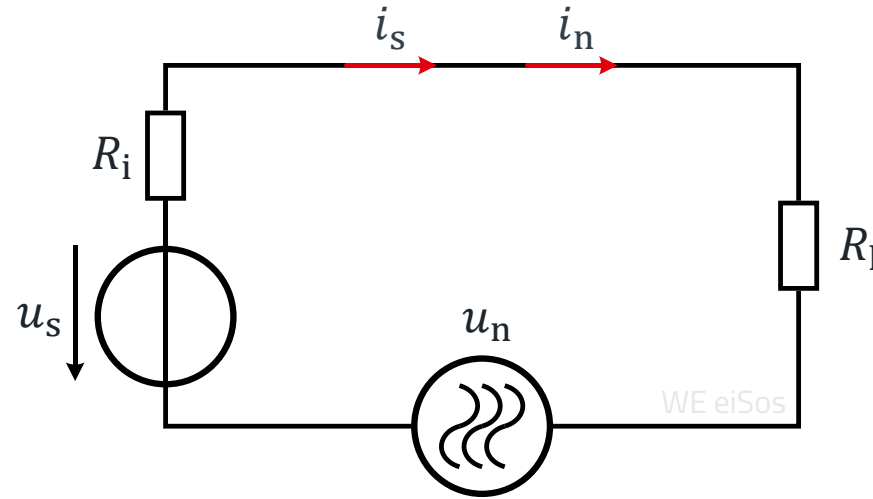
1) FM-Radio @ 100MHz

- $\lambda_0 = 3 \text{ m}$

2) WiFi @ 2,45GHz

- $\lambda_0 = 12,5 \text{ cm}$

Störabstand

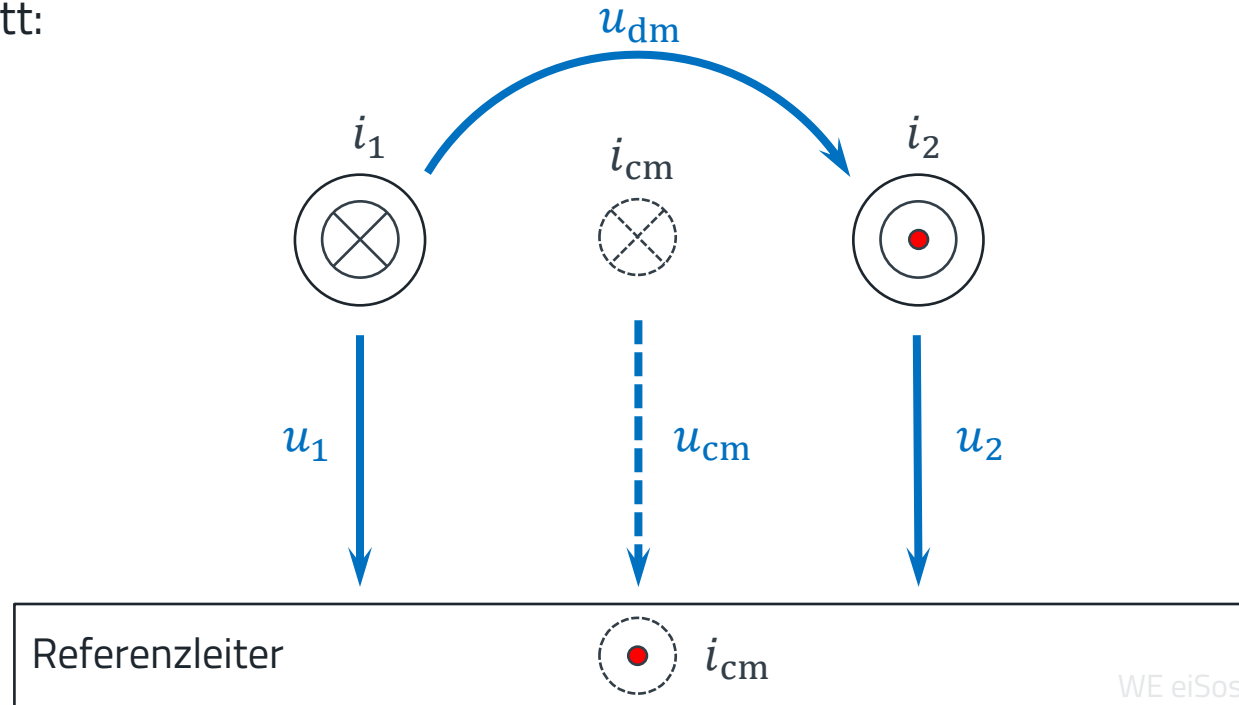


- **Störabstand** (*signal-to-noise ratio, SNR*) zwischen Störgröße und Nutzsignalgröße:

- Spannungsübertragung: $\text{SNR} = 20 \cdot \log \left| \frac{u_s}{u_n} \right| \text{ dB}$
- Stromübertragung: $\text{SNR} = 20 \cdot \log \left| \frac{i_s}{i_n} \right| \text{ dB} = 20 \cdot \log \left| \frac{i_s \cdot R_i}{u_n} \right| \text{ dB}$

Gleichtakt, Gegentakt

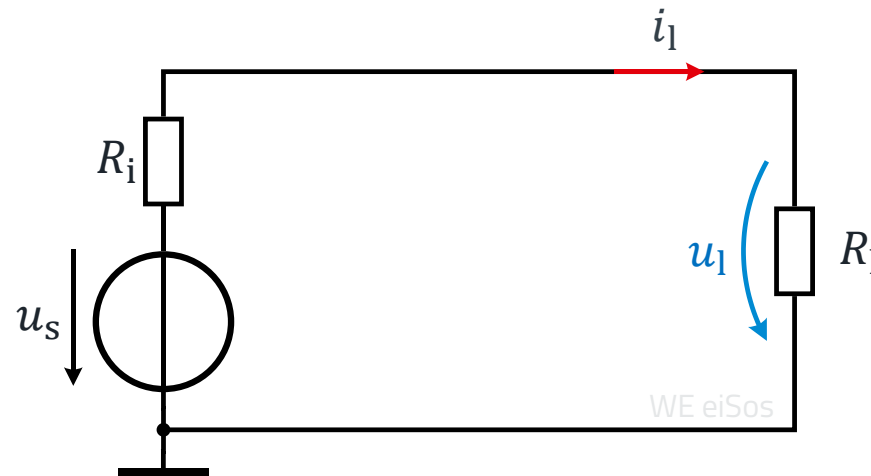
- Leiteranordnung im Schnitt:



- Gegentakt = symmetrische/r Spannung/Strom: $u_{dm} = u_1 - u_2$ $i_{dm} = \frac{u_{dm}}{Z_1}$
- Gleichtakt = asymmetrische/r Spannung/Strom: $u_{cm} = \frac{u_1 + u_2}{2}$ $i_{cm} = \frac{u_{cm}}{Z_{cm}}$

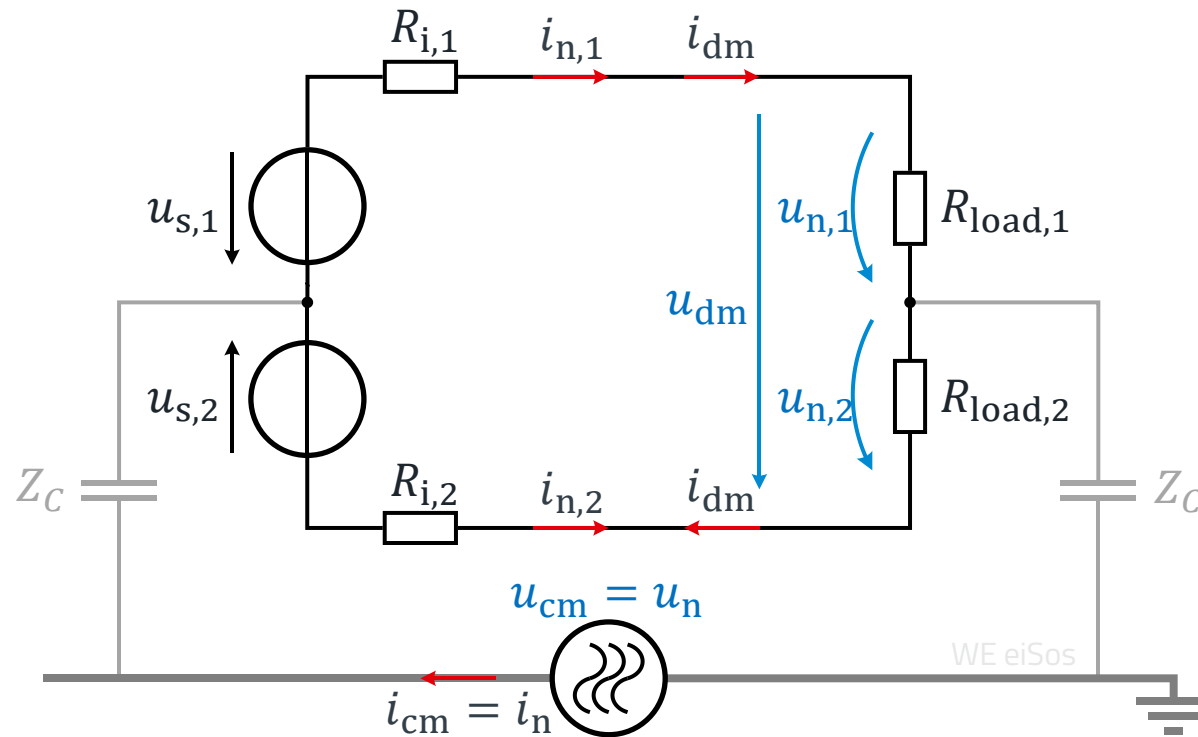
Unsymmetrische Übertragung

- Bei **unsymmetrischer** Übertragung liegt ein Leiter auf Masse (**Bezugspotential** für alle Spannungen).
- Die Quelle ist entweder eine Spannungsquelle mit seriellem Innenwiderstand R_i oder eine Stromquelle mit parallelem Innenwiderstand.
- Unsymmetrische Übertragung ist am anfälligsten gegen **Störeinkopplung**.

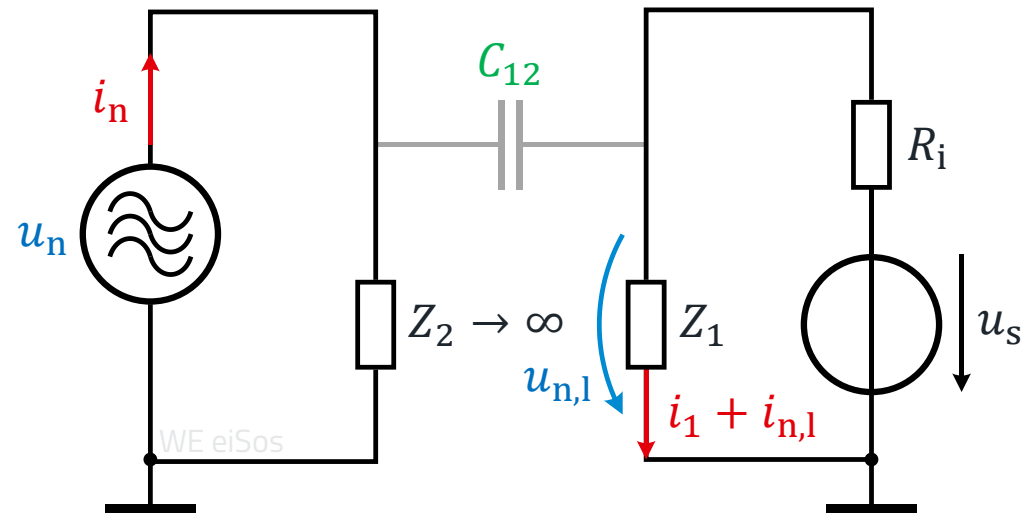


Symmetrische Übertragung

- Bei **ideal symmetrischer** Übertragung hat ein Gleichtaktstörsignal an der Last keine Auswirkung.
- Sind die **Koppelimpedanzen Z_C** zu den einzelnen Strompfaden nicht identisch, enthält die Spannung an der Last u_{dm} auch einen Anteil von u_{cm} . Die **Unsymmetriedämpfung** ist dann nicht unendlich.



Kapazitive Kopplung



- Störspannung an der Last:

$$u_{n,l} = i_n \cdot \frac{R_i \cdot Z_{\text{load},1}}{R_i + Z_{\text{load},1}} = C_{12} \cdot \frac{du_n}{dt} \cdot \frac{R_i \cdot Z_1}{R_i + Z_1}$$

Kapazitive Kopplung

- Beispiel:

- 2 parallele Mikrostreifenleitungen mit 2mm Breite, 50mm Länge und einem Abstand von 2mm ($\epsilon_r = 2,4$)
 $\rightarrow C_{12} = 1,7\text{pF}$

- Schaltflanke eines MOSFET: $\frac{du_n}{dt} = 1 \frac{\text{V}}{\text{ns}}$

- $R_i = 10\text{m}\Omega$, $Z_1 = 5\Omega$

- $U_1 = 5\text{V} \rightarrow U_{Z,1} = 4,99\text{V}$

- Störspannung:

$$u_{n,l} = C_{12} \cdot \frac{du_n}{dt} \cdot \frac{R_i \cdot Z_{\text{load},1}}{R_i + Z_{\text{load},1}} = 17\mu\text{V}$$

- Signal-Rausch-Abstand:

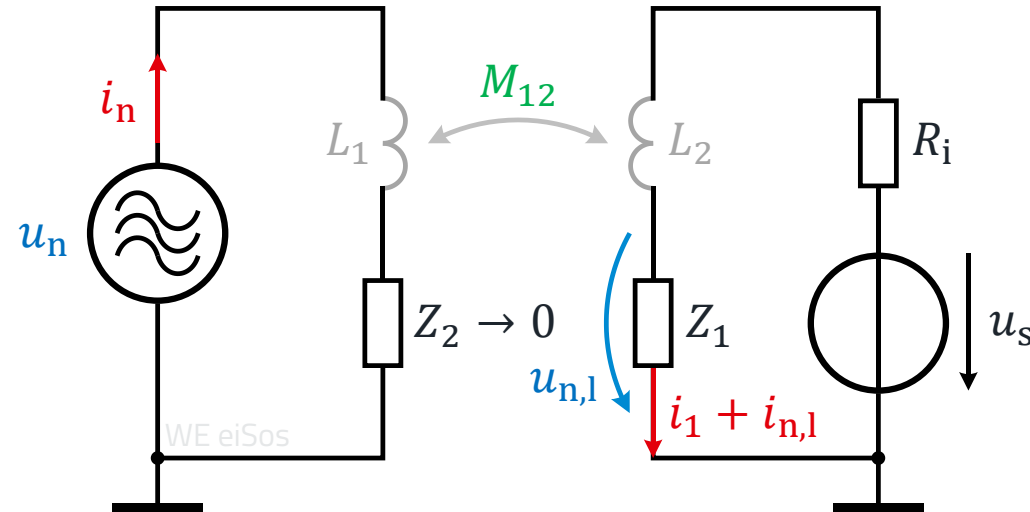
$$\text{SNR} = 20 \cdot \log\left(\frac{4,99\text{V}}{17\mu\text{V}}\right) = 109,4\text{dB}$$

Kapazitive Kopplung

- Möglichkeiten zur Verringerung der Kopplung:
 - Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit der Störspannung durch „langsames“ Schalten oder durch Tiefpassfilter
 - Verringerung der Koppelkapazität durch
 - Verkürzen der Länge der verkoppelnden Leitungen
 - Vergrößern des Abstandes zwischen Leitern verschiedener Stromkreise
 - Vermeidung von paralleler Leitungsführung
 - Elektrische Schirmung (Kabel, Leiterplatte, Gehäuse)



Induktive Kopplung



- Störspannung an der Last:

$$u_{n,l} = u(i_n) \cdot \frac{Z_1}{R_i + Z_1} = M_{12} \cdot \frac{di_n}{dt} \cdot \frac{Z_1}{R_i + Z_1}$$

Induktive Kopplung

- Beispiel:

- 2 parallele Kabel ($\emptyset$ 5mm), 10cm über einer leitfähigen Ebene, mit einem Abstand von 10cm über eine Länge von 10m $\rightarrow M_{12} = 1,61\mu\text{H}$
- Änderungsrate des Stromes durch die induktive Last $Z_{\text{load},2}$: $\frac{di_n}{dt} = 2 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$
- $R_i = 10\text{m}\Omega$, $Z_1 = 1\Omega$
- $U_1 = 24\text{V} \rightarrow U_{Z,1} = 23,76\text{V}$

- Störspannung:

$$u_{n,l} = M_{12} \cdot \frac{di_n}{dt} \cdot \frac{Z_1}{R_i + Z_1} = 3,19\text{V}$$

- Signal-Rausch-Abstand:

$$\text{SNR} = 20 \cdot \log\left(\frac{23,76\text{V}}{3,19\text{V}}\right) = 17,44\text{dB}$$

Induktive Kopplung

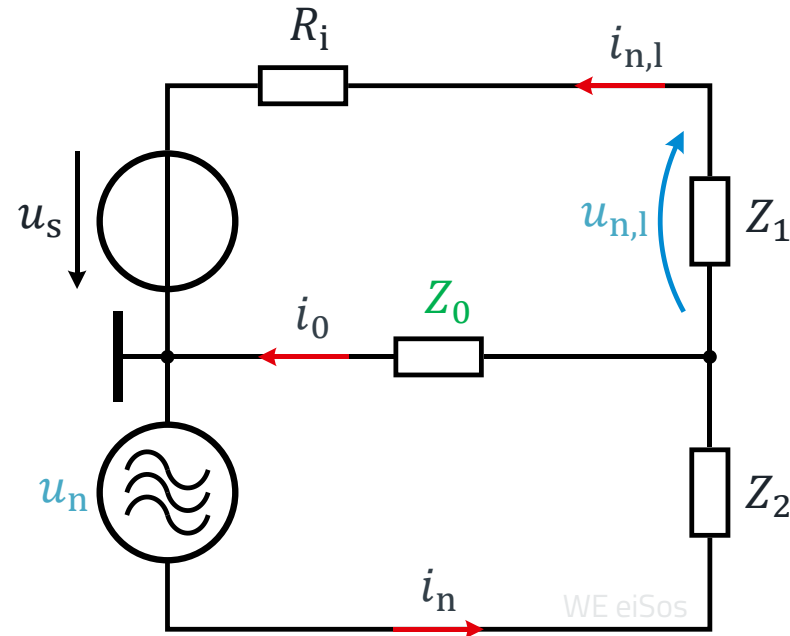
- Möglichkeiten zur Verringerung der Kopplung:
 - Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit des Störstromes durch „langsames“ Schalten oder durch Tiefpassfilter
 - Verringerung der Koppelinduktivität durch
 - Verkleinern der Schleifenfläche der verkoppelnden Stromkreise
 - Vergrößern des Abstandes zwischen Leitern verschiedener Stromkreise
 - Verdrillung von Hin- und Rückleiter (Kabel)
 - Magnetische Schirmung mit Ferritmaterialien (weichmagnetisch, großes μ_r)



Impedanzkopplung

- Koppelimpedanz: $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$
- Störspannung an der Last:

$$u_{n,l} = \frac{u_n}{Z_2 + (R_i + Z_1) \parallel Z_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_0}{R_i + Z_1 + Z_0}$$



Impedanzkopplung

- Verringerung der Koppelimpedanz durch
 - Flächige niederimpedante Struktur der gemeinsam genutzten Masse zur **Minimierung der Induktivität**
→ Breite:Länge in Stromrichtung >3:1
 - Auftrennung der Massefläche in Teilbereiche je nach Aufgabe:
 - Leistungsschaltkreise → PGND
 - Gegentaktfiler, Regelschleifen → AGND
 - Logikschaltkreise → DGND
- Verbindung der Teilmassen an einem **ruhigen Punkt** der Leiterplatte zwecks Potentialausgleich → **Sternpunkt**

Entstörung

- Identifikation der Koppelpfade
- Filtertopologien

Identifikation der Koppelpfade

- Vorgehen beim Störfeldstärketest:

Klappferrit an einer Leitung anbringen
(alle Adern einschließen)

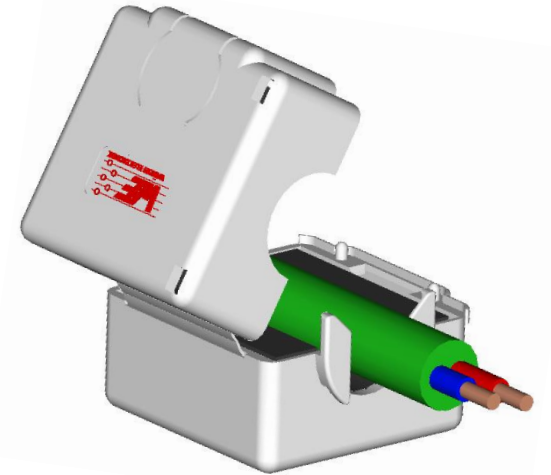
Reduzierter Störpegel?
Erhöhte Störfestigkeit?

Ja

Nein

Leitung wirkt als Antenne
(Gleichtaktstörsignal)

Wiederholung der Prozedur,
bis alle Leitungen identifiziert



WE eiSos

Dimensionierung einer Filterdrossel

- Eine Filterdrossel in Serienschaltung bildet einen **Tiefpass 1. Ordnung**.

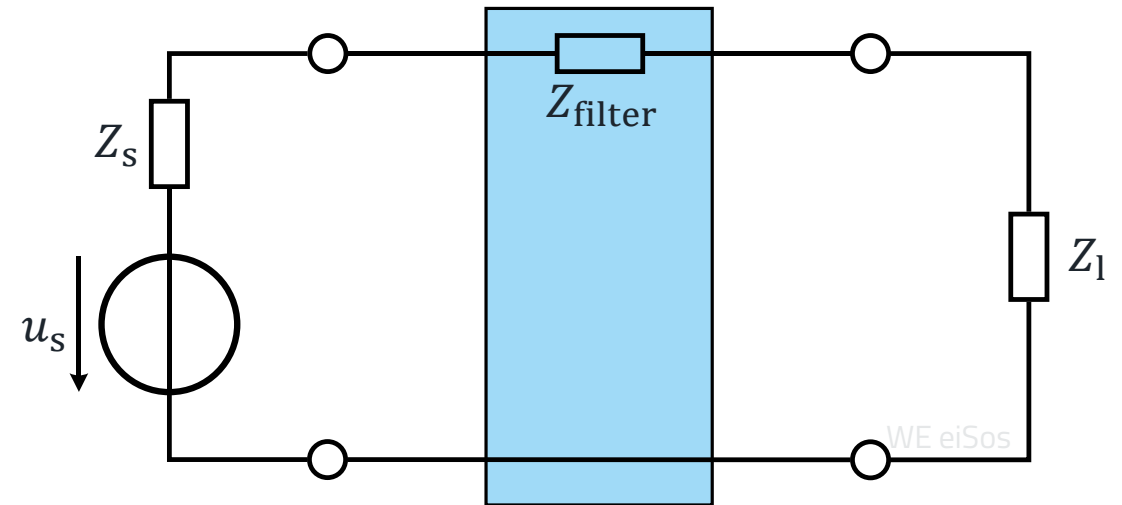
- **Gegentakt-Einfügedämpfung** in Dezibel:

$$A_{\text{dm}} = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{Z_{\text{filter}}}{Z_s + Z_l} \right| \text{ dB}$$

- Minimal benötigte Filterimpedanz Z_{filter} bei einer Störfrequenz f_n :

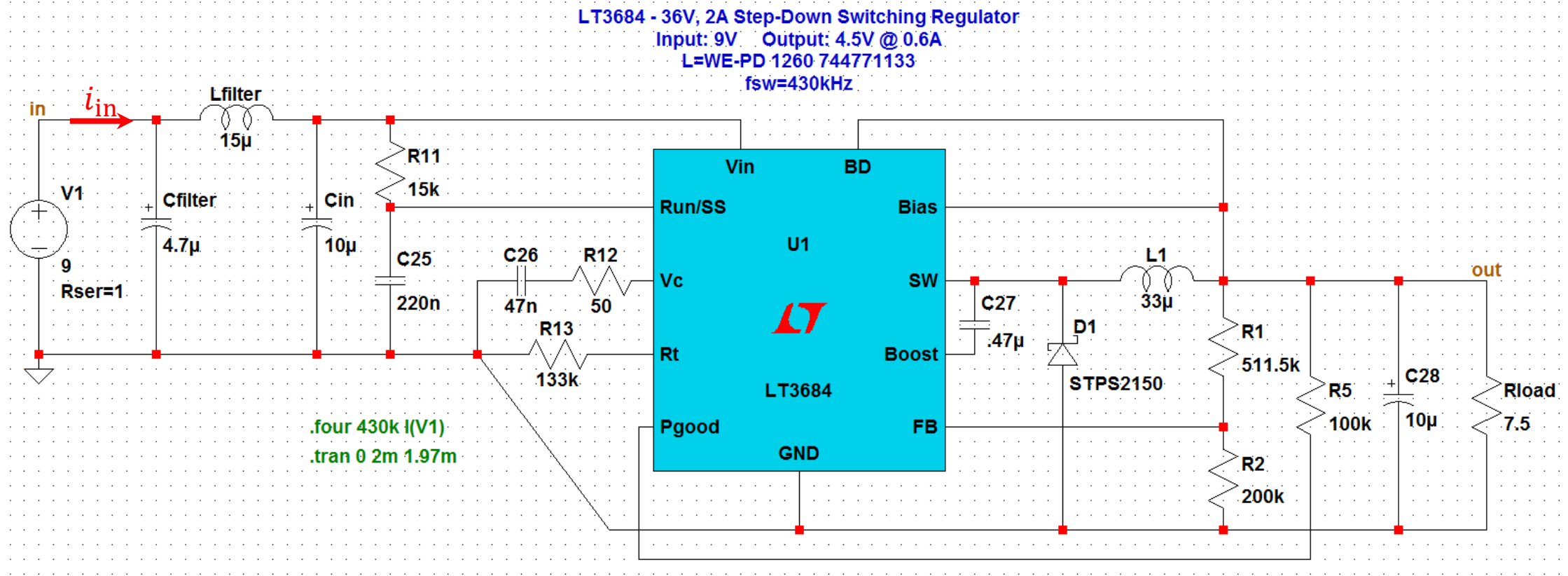
$$|Z_{\text{filter}}|_{f_n} \geq |Z_s + Z_l|_{f_n} \cdot \left(10^{\frac{A_{\text{dm}}(f_n)}{20}} - 1 \right)$$

- Für eine exakte Berechnung müssten Quell- und Lastimpedanz bei jeder Störfrequenz bekannt sein.



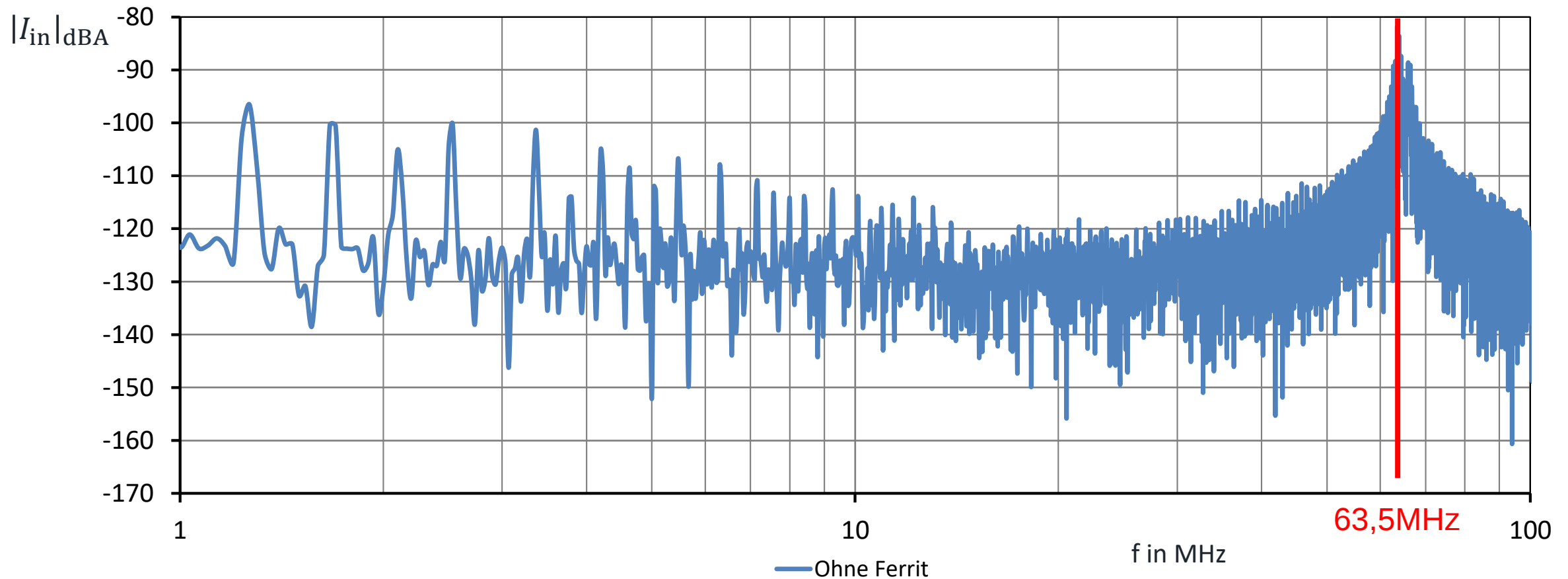
Dimensionierung einer Filterdrossel

- Reduzierung der Amplitude einer parasitären Resonanz, sichtbar im Eingangskreis eines Abwärtswandlers
- $U_{in} = 9V$, $U_{out} = 4,5V$, $I_{out} = 600mA$, $f_{sw} = 430kHz$



Dimensionierung einer Filterdrossel

- Spektrum des Eingangsstromes mit einem CLC Eingangsfiler:



Dimensionierung einer Filterdrossel

- Parameter für die Auswahl der Filterdrossel:
 - Benötigte Dämpfung: $A = 30\text{dB @ } 63,5\text{MHz}$
 - Quellimpedanz: $Z_s = 1\Omega$
 - Lastimpedanz (Schaltreglereingang): $Z_{\text{load}} = 3,7\Omega @ 63,5\text{MHz}$
 - Mittlerer Eingangsstrom: $\bar{I}_{\text{in}} = 360\text{mA} \rightarrow \text{Auswahl: } I_{\text{bias}} = 400\text{mA}$



$$Z_{\text{filter}} \geq 144\Omega$$



WE-CBF 74279252 ($Z_{\text{filter}} = 219\Omega @ 63,5\text{MHz}$)

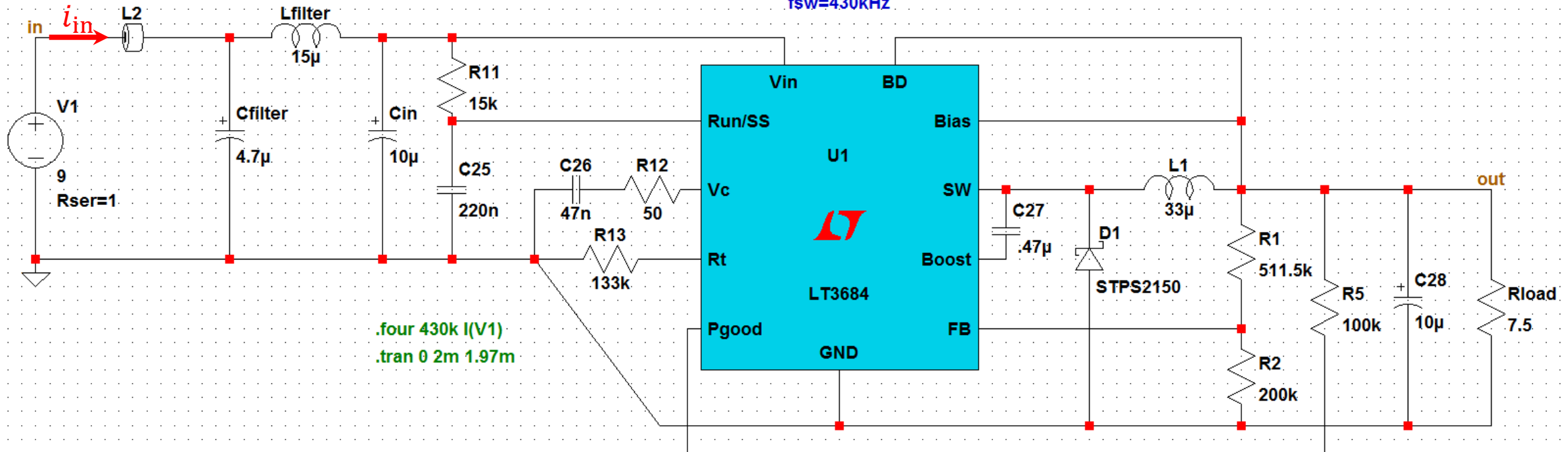
- RedExpert Link: <https://we-online.com/re/5dJNuPpD>



Dimensionierung einer Filterdrossel

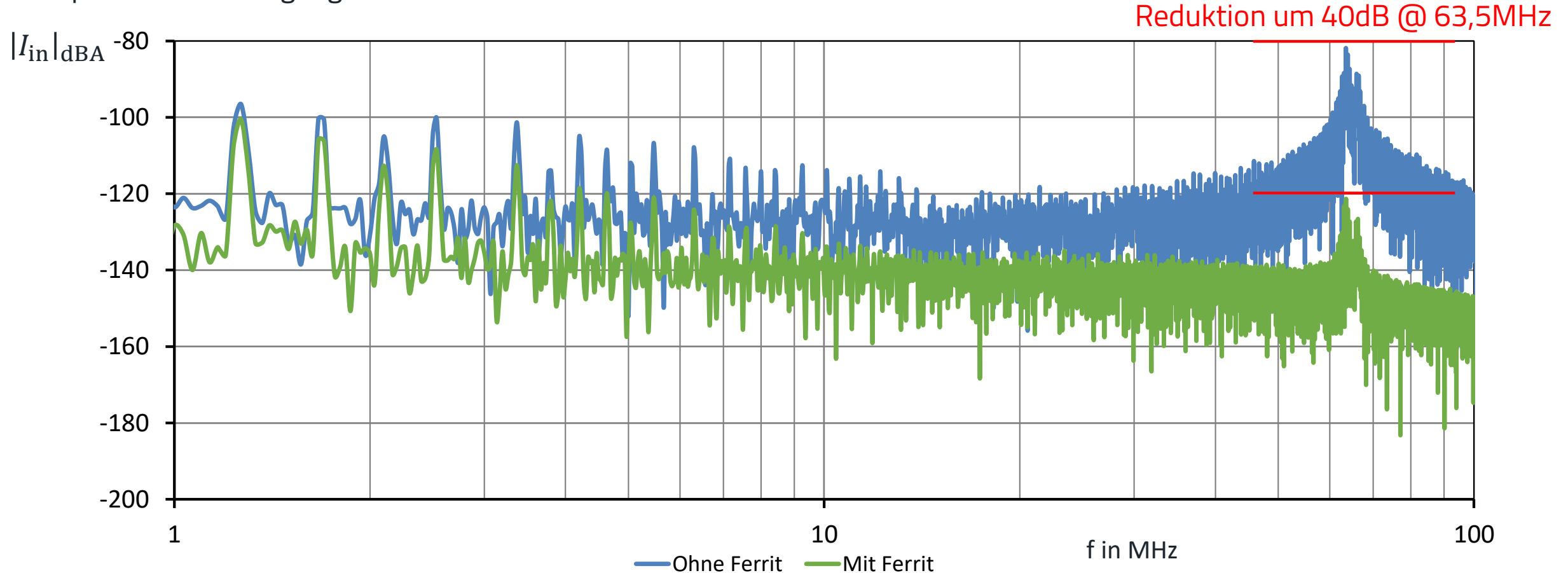
- Schaltung mit zusätzlichem Breitbandferrit (L2) am Eingang:

LT3684 - 36V, 2A Step-Down Switching Regulator
Input: 9V Output: 4.5V @ 0.6A
L=WE-PD 1260 744771133
fsw=430kHz



Dimensionierung einer Filterdrossel

- Spektrum des Eingangsstromes mit zusätzlichem Breitbandferrit:





DANKE FÜR IHRE WERTVOLLE ZEIT!
THANKS FOR YOUR VALUABLE TIME!