

EMC BASICS

Christian Koch
Field Application Engineer

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Agenda

- Grundlagen Kernmaterialien
- Begriffe der EMV
- Entstörung
  - Filtertopologien



Permeabilität

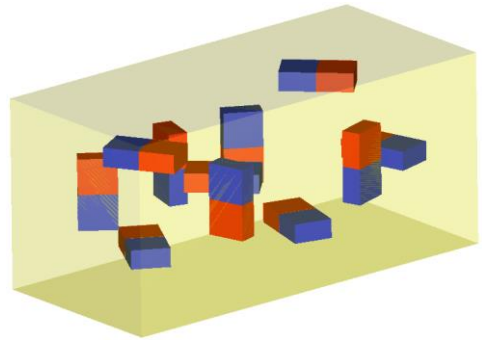
- Die **Permeabilität μ** beschreibt die Fähigkeit eines Materials, den **magnetischen Fluss**, hervorgerufen durch ein magnetisches Feld, zu **konzentrieren**.
- Die **relative Anfangspermeabilität $\mu_{\mathrm{r,i}}$** wird bei sehr kleiner Aussteuerung und bei einer niedrigen Frequenz (typ. 10kHz)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

$$\mu_{\mathrm{r,i}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}H}\bigg|_{H=0}$$

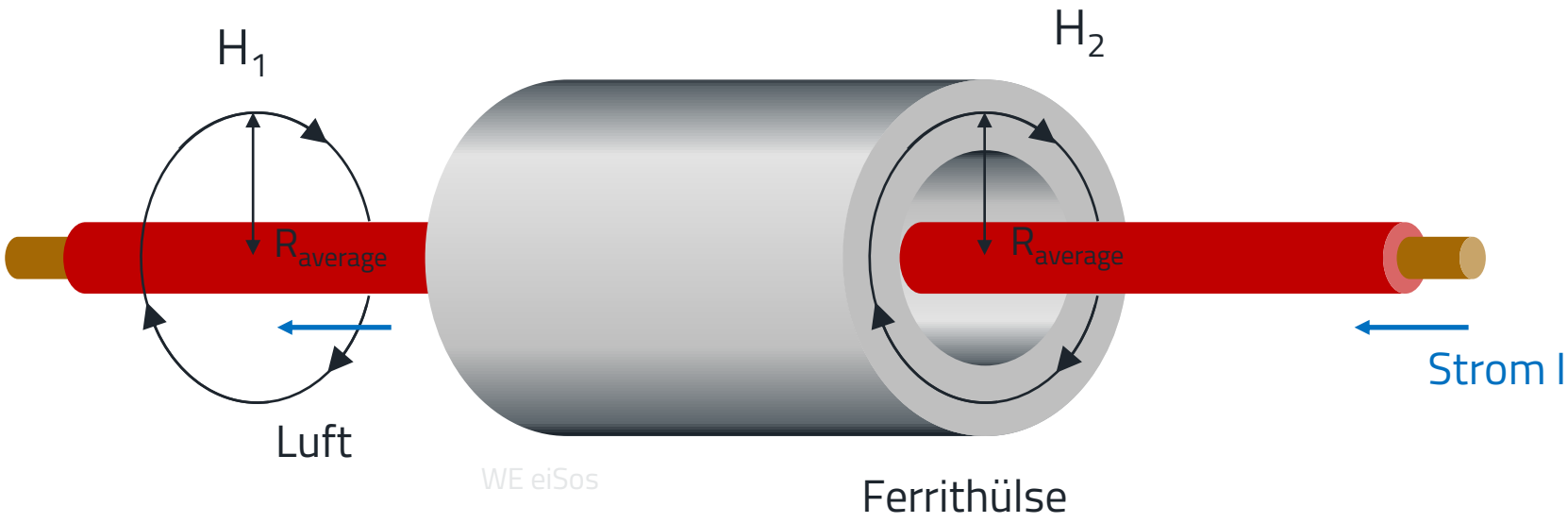
- Typische Wertebereiche für *WE* **Entstörbauteile**:
  - Eisenpulver (Fe): $\mu_{\mathrm{r,i}} = 50 \ldots 150$
  - Nickel-Zink-Ferrit ($\mathrm{Ni}_x\mathrm{Zn}_{1-x}\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_4$): $\mu_{\mathrm{r,i}} = 50 \ldots 1500$
  - Mangan-Zink-Ferrit ($\mathrm{Mn}_x\mathrm{Zn}_{1-x}\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_4$): $\mu_{\mathrm{r,i}} = 2000 \ldots 10000$
  - Nanokristallines Material ($\mathrm{Fe}_{\mathrm{nk}}$): $\mu_{\mathrm{r,i}} = 5000 \ldots 95000$

Ferritmaterial

- ungeordnet
- weichmagnetisch



Das Magnetfeld – magnetische Feldstärke



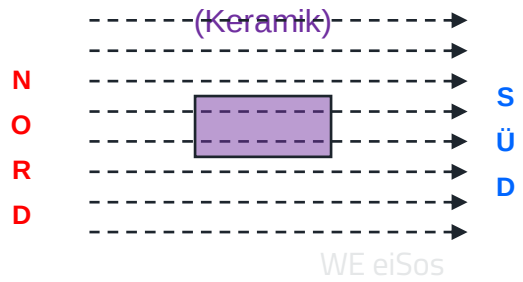
WE eiSos

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

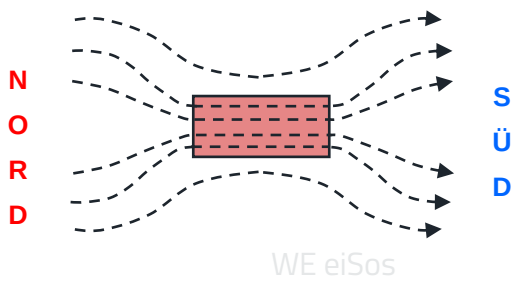
$$B_1 \neq B_2$$

Das Magnetfeld – magnetische Flussdichte

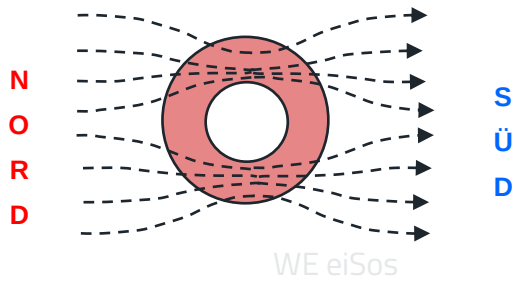
Luft



Stabferrit



Ringkern



Induktion in Luft:

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

lineare Funktion, da μr = 1 = konstant !

Induktion in Ferritmaterial:

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

Die relative Permeabilität ist ein

Material
Temperatur
Frequenz
Strom
Druck

-abhängiger Parameter

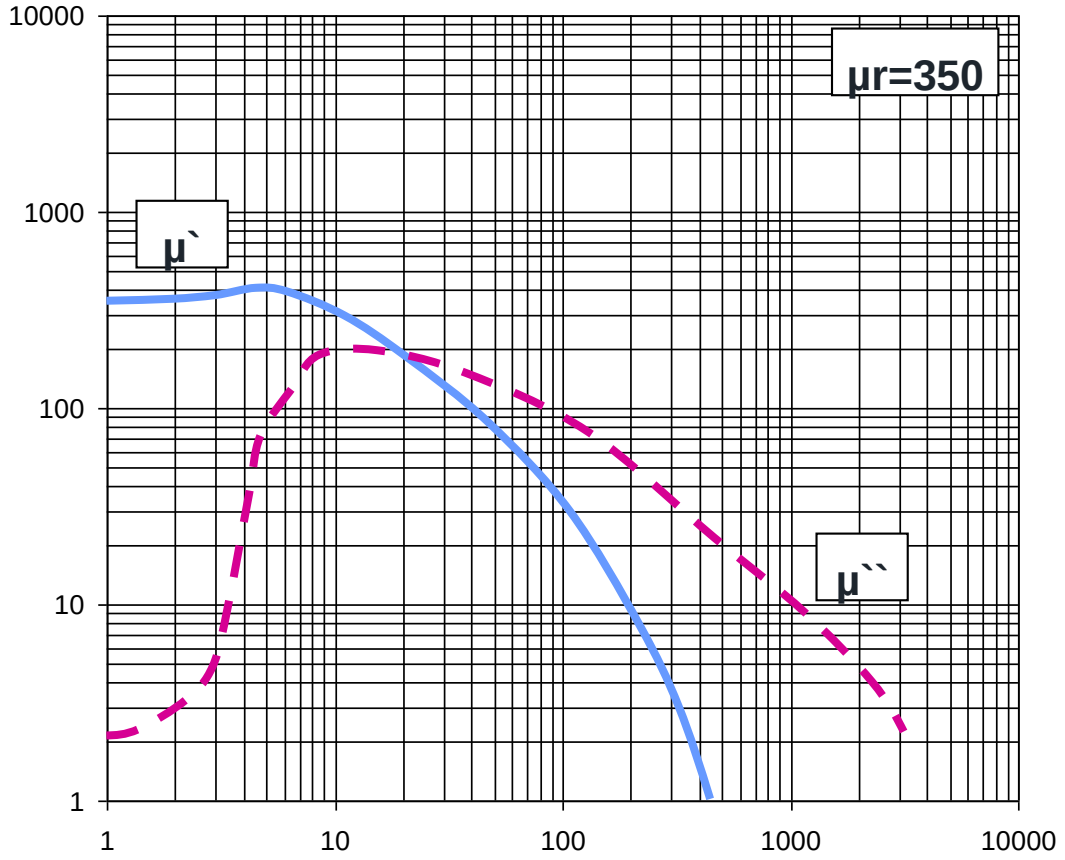
Permeabilität – komplexe Permeabilität

$$\underline{Z} = j\omega L_0\left(\mu^{|} - j\mu^{||}\right) = R + jX$$

$$X_L = j\omega L_0 \mu^{|}$$

frequenzabhängiger Induktivitätsanteil

(Magnetisierbarkeit)



$$R = \omega L_0 \mu^{||}$$

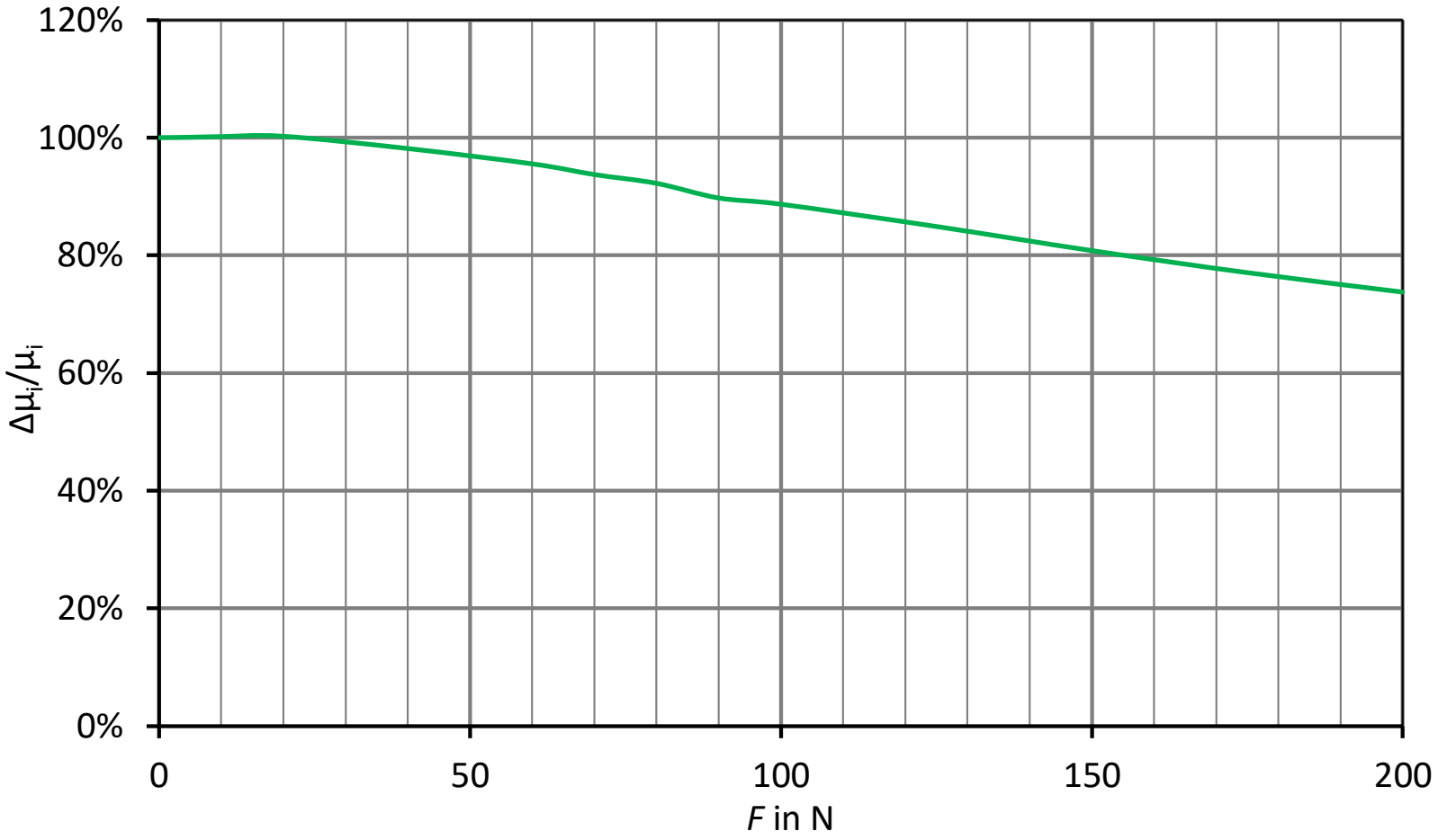
frequenzabhängige Kernverluste

(Ummagnetisierungsverluste)

Permeabilität - Druckabhängigkeit

- Beispiel:
  - NiZn Ringkern
  - $f_{\mathrm{meas}} = 100\mathrm{kHz}$

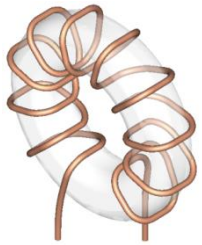




Impedanz einer Spule mit Ferritkern

Luftspule + Ferritkern

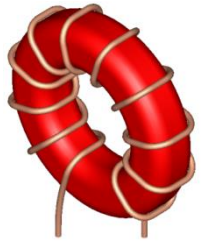
- Modell für die **Impedanz** unterhalb des Eigenresonanzpunktes einer Spule mit Ferritkern:



Impedanz der Luftspule $\underline{Z}_0$



Ferritpermeabilität $\underline{\mu}_\mathrm{r}$

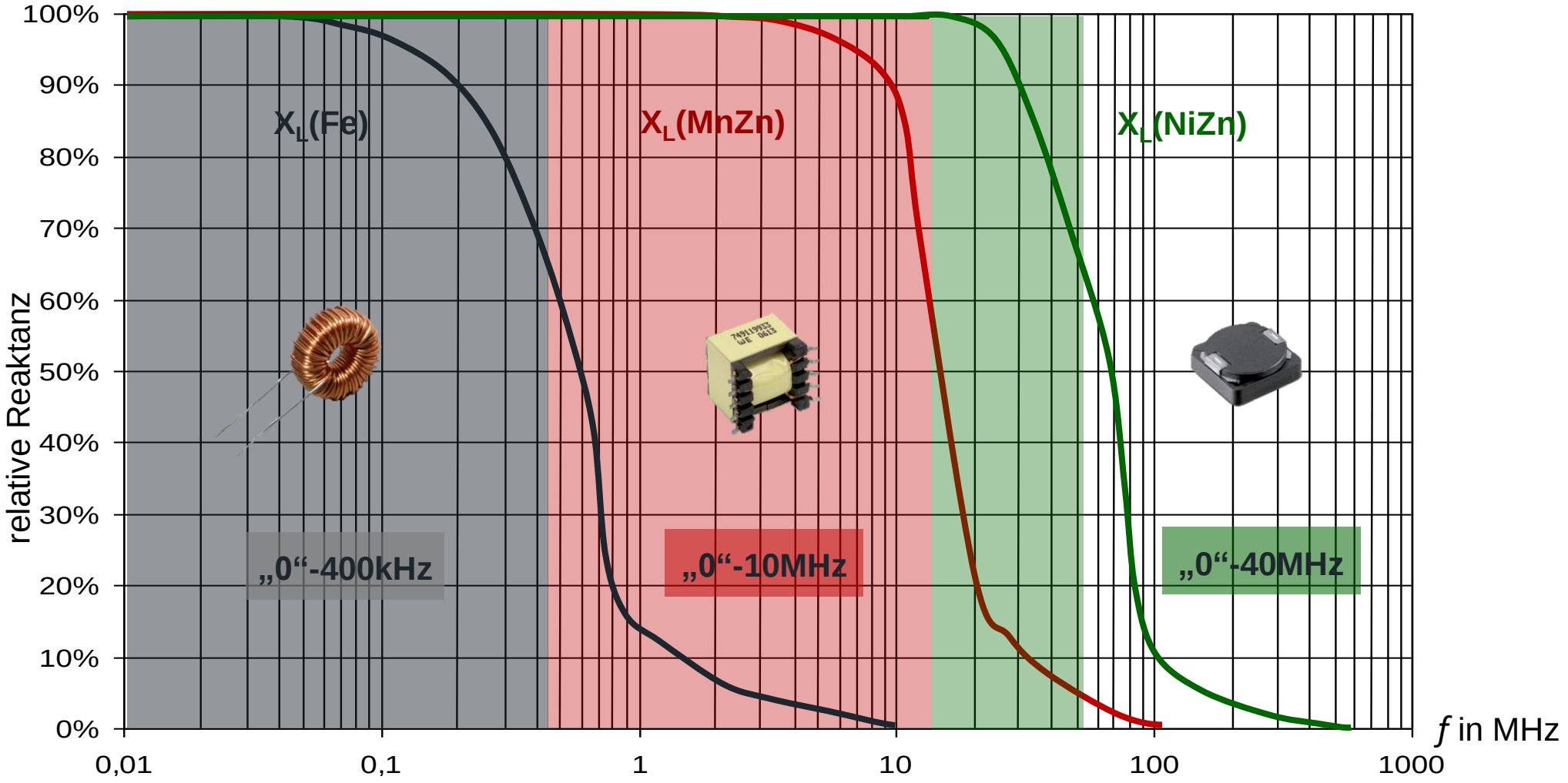


$$\underline{Z}(f) = \underline{Z}_0(f) \cdot \underline{\mu}_\mathrm{r}(f)$$

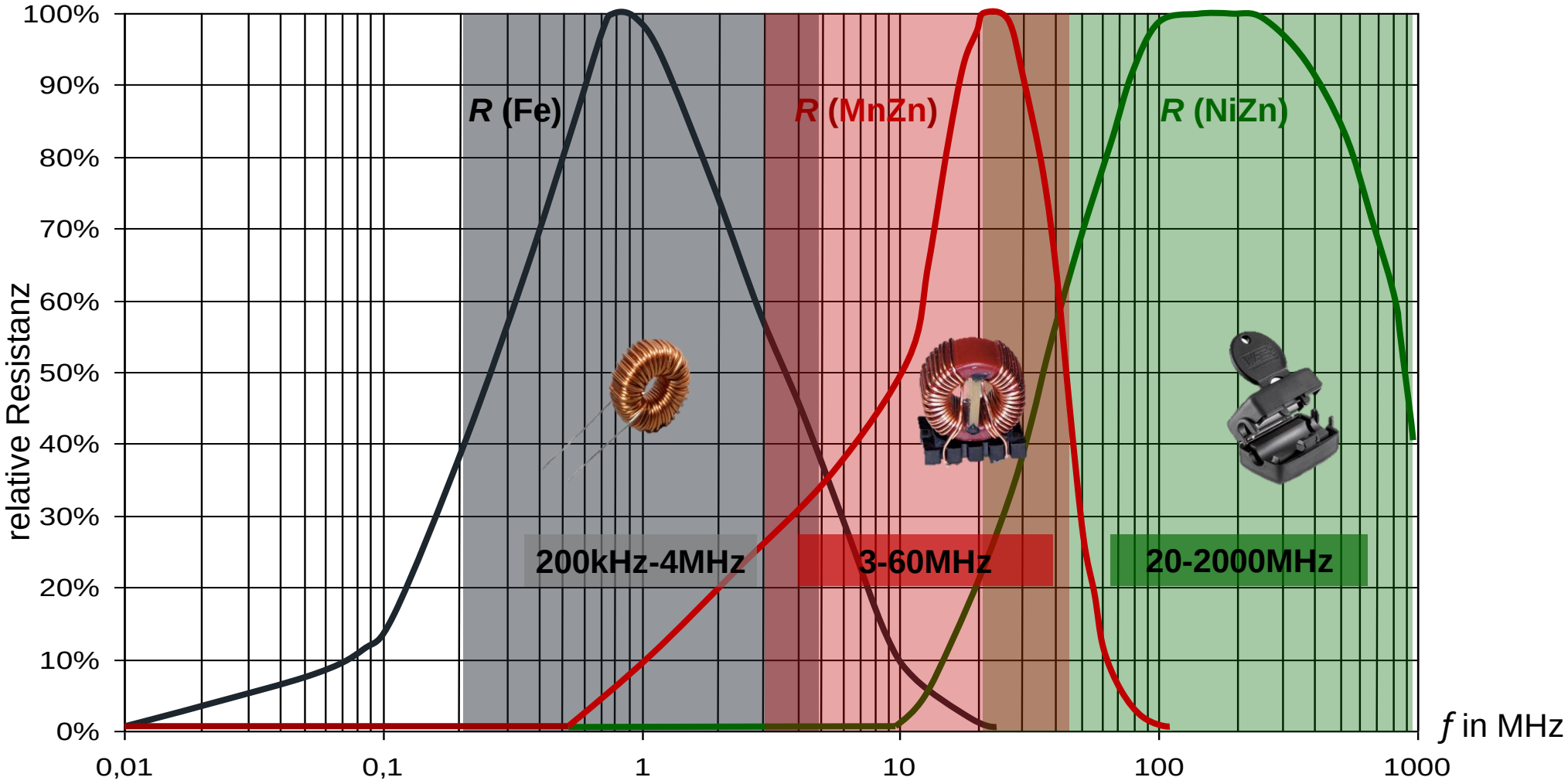
$$= \mathrm{j} \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_0 \cdot [\mu'_\mathrm{r}(f) - \mathrm{j} \cdot \mu''_\mathrm{r}(f)]$$

$$= \mathrm{j} \cdot X_L(f) + R(f)$$

Kernmaterial - Magnetisierungsanteil



Kernmaterial - Verlustanteil



Begriffe in Zusammenhang mit EMV

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

Frequenz, Wellenlänge



- Vakuum

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

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

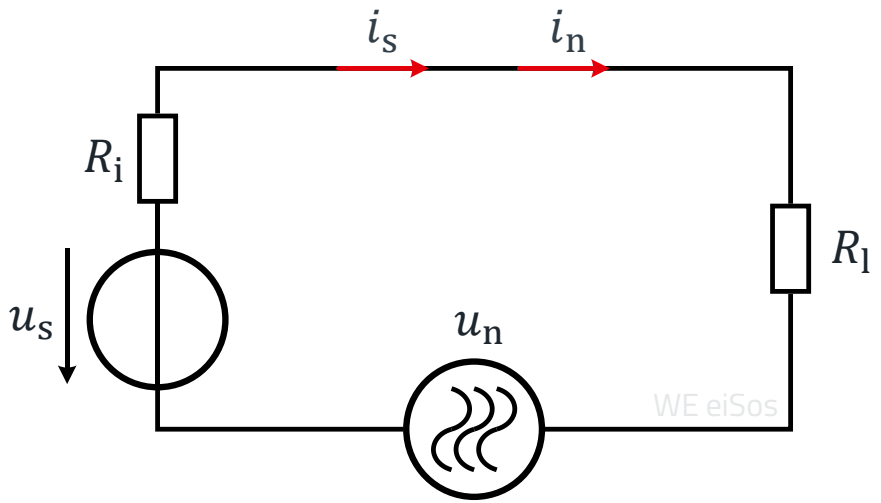
- Medium

$$\lambda = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$$

1) FM-Radio @ 100MHz
   - $\lambda_0 = 3\mathrm{m}$

2) WiFi @ 2,45GHz
   - $\lambda_0 = 12{,}5\mathrm{cm}$

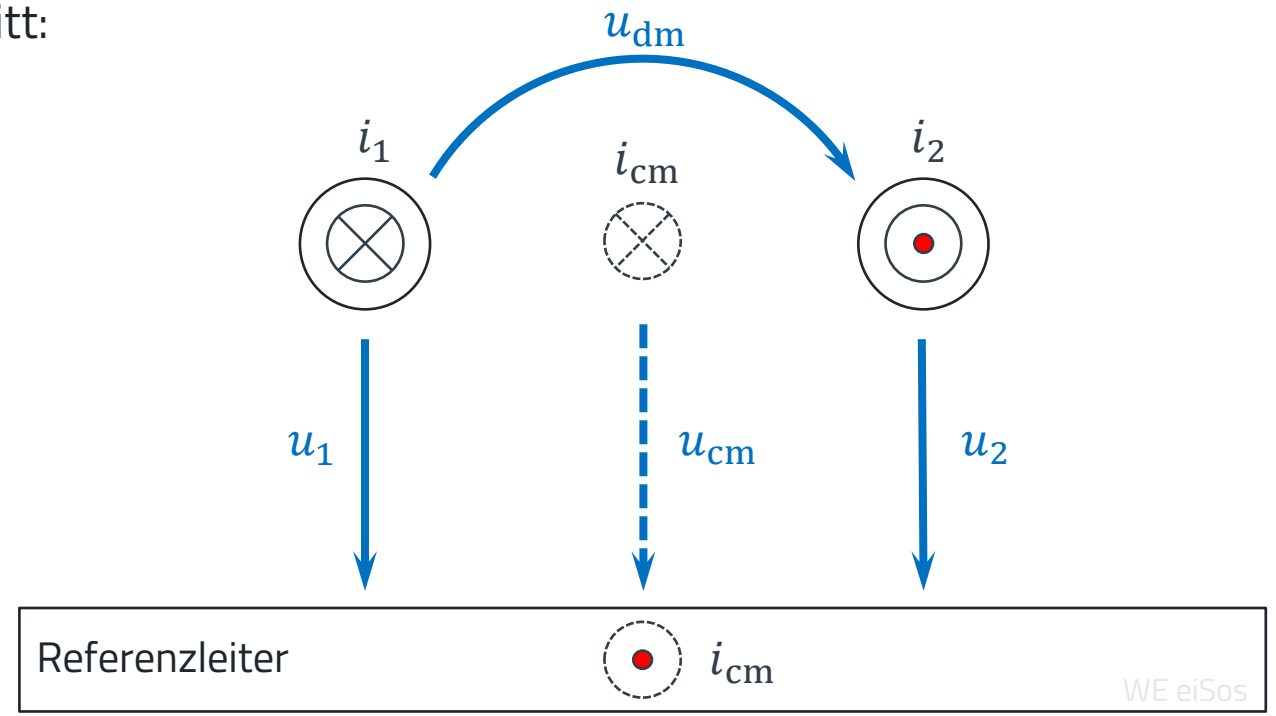
Störabstand



- **Störabstand** *(signal-to-noise ratio, SNR)* zwischen Störgröße und Nutzsignalgröße:
  - Spannungsübertragung: $\mathrm{SNR} = 20 \cdot \log \left| \frac{u_s}{u_n} \right| \mathrm{dB}$
  - Stromübertragung: $\mathrm{SNR} = 20 \cdot \log \left| \frac{i_s}{i_n} \right| \mathrm{dB} = 20 \cdot \log \left| \frac{i_s \cdot R_i}{u_n} \right| \mathrm{dB}$

Gleichtakt, Gegentakt

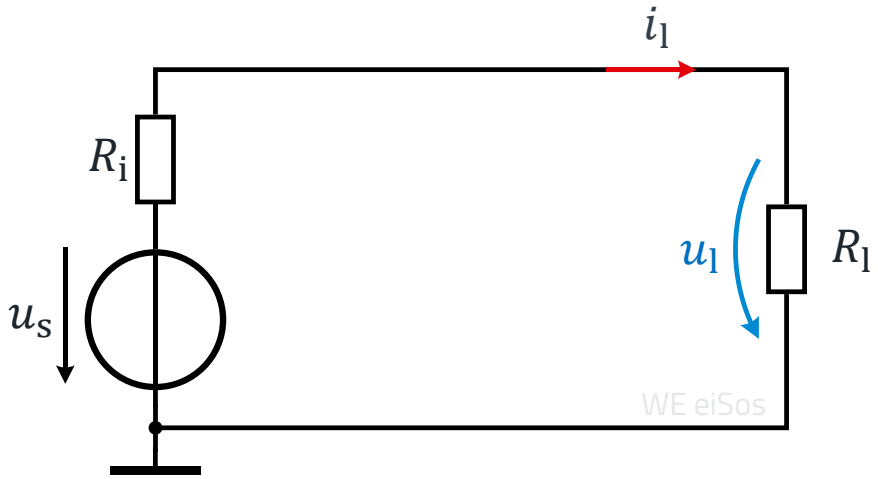
- Leiteranordnung im Schnitt:



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

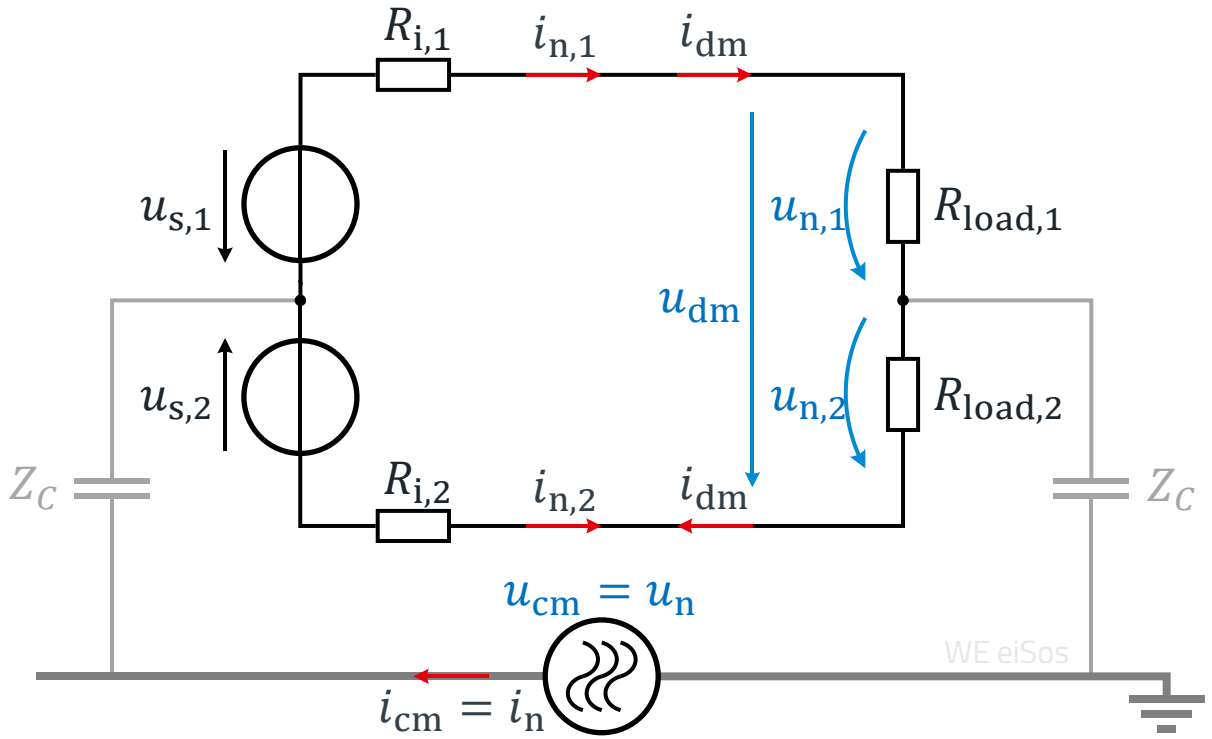
Unsymmetrische Übertragung

- 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**.

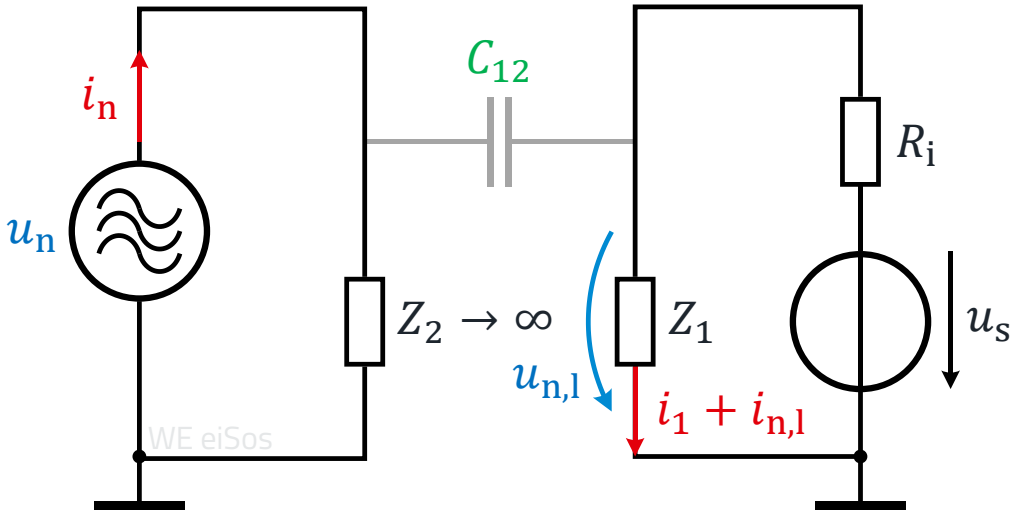


Symmetrische Übertragung

- 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:

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

Kapazitive Kopplung

- Beispiel:
  - 2 parallele Mikrostreifenleitungen mit 2mm Breite, 50mm Länge und einem Abstand von 2mm ($\varepsilon_\mathrm{r} = 2{,}4$)
    → $C_{12} = 1{,}7\mathrm{pF}$
  - Schaltflanke eines MOSFET: $\frac{\mathrm{d}u_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{ns}}$
  - $R_\mathrm{i} = 10\mathrm{m\Omega}$, $Z_1 = 5\Omega$
  - $U_1 = 5\mathrm{V}$ → $U_{\mathrm{Z},1} = 4{,}99\mathrm{V}$
  - Störspannung:

$$u_{\mathrm{n,l}} = C_{12} \cdot \frac{\mathrm{d}u_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{R_\mathrm{i} \cdot Z_{\mathrm{load},1}}{R_\mathrm{i} + Z_{\mathrm{load},1}} = 17\mu\mathrm{V}$$

  - Signal-Rausch-Abstand:

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

Kapazitive Kopplung

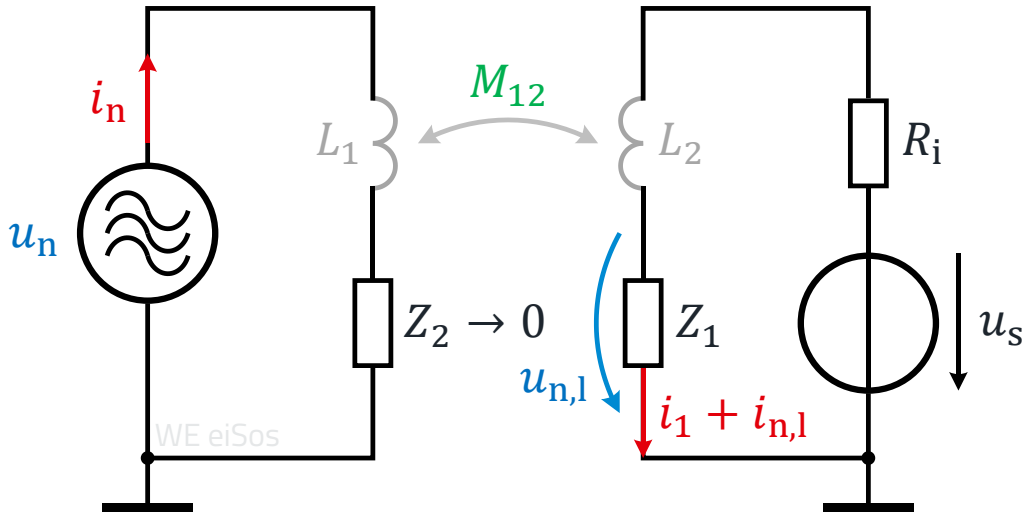
- Möglichkeiten zur Verringerung der Kopplung:
  - Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit der Störspannung durch „langsameres“ Schalten oder durch Tiefpassfilter
  - Verringerung der Koppelkapazität durch
    - Verkürzen der Länge der verkoppelnden Leitungen
    - Vergrößern des Abstandes zwischen 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 (Ø 5mm), 10cm über einer leitfähigen Ebene, mit einem Abstand von 10cm über eine Länge von 10m → $M_{12} = 1{,}61\mu\mathrm{H}$
  - Änderungsrate des Stromes durch die induktive Last $Z_{\mathrm{load},2}$: $\frac{\mathrm{d}i_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t} = 2\,\frac{\mathrm{A}}{\mu\mathrm{s}}$
  - $R_\mathrm{i} = 10\mathrm{m}\Omega,\ Z_1 = 1\Omega$
  - $U_1 = 24\mathrm{V} \rightarrow U_{\mathrm{Z},1} = 23{,}76\mathrm{V}$

  - Störspannung:

$$u_{\mathrm{n,l}} = M_{12} \cdot \frac{\mathrm{d}i_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{Z_1}{R_\mathrm{i} + Z_1} = 3{,}19\mathrm{V}$$

  - Signal-Rausch-Abstand:

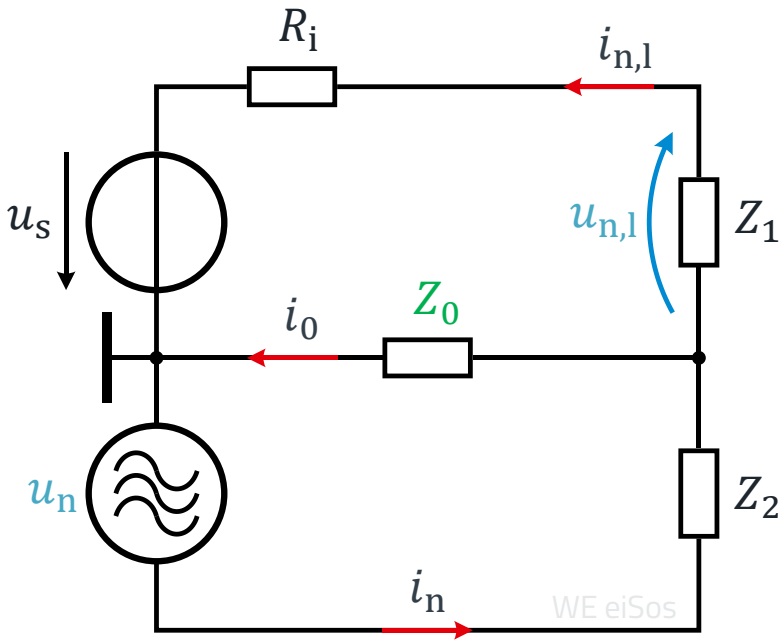
$$\mathrm{SNR} = 20 \cdot \log\left(\frac{23{,}76\mathrm{V}}{3{,}19\mathrm{V}}\right) = 17{,}44\mathrm{dB}$$

Induktive Kopplung

- Möglichkeiten zur Verringerung der Kopplung:
  - Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit des Störstromes durch „langsameres“ 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: $\underline{Z_0} = R_0 + \mathrm{j}\omega L_0$
- Störspannung an der Last:

$$u_{\mathrm{n,l}} = \frac{u_\mathrm{n}}{Z_2 + (R_\mathrm{i} + Z_1) \| Z_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_0}{R_\mathrm{i} + Z_1 + Z_0}$$

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
    - Gegentaktfilter, Regelschleifen → AGND
    - Logikschaltkreise → DGND

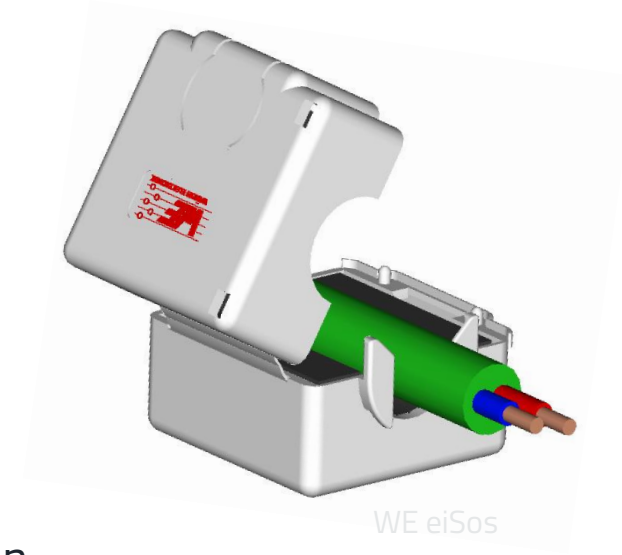
- Verbindung der Teilmassen an einem **ruhigen Punkt** der Leiterplatte zwecks Potentialausgleich → **Sternpunkt**

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**)

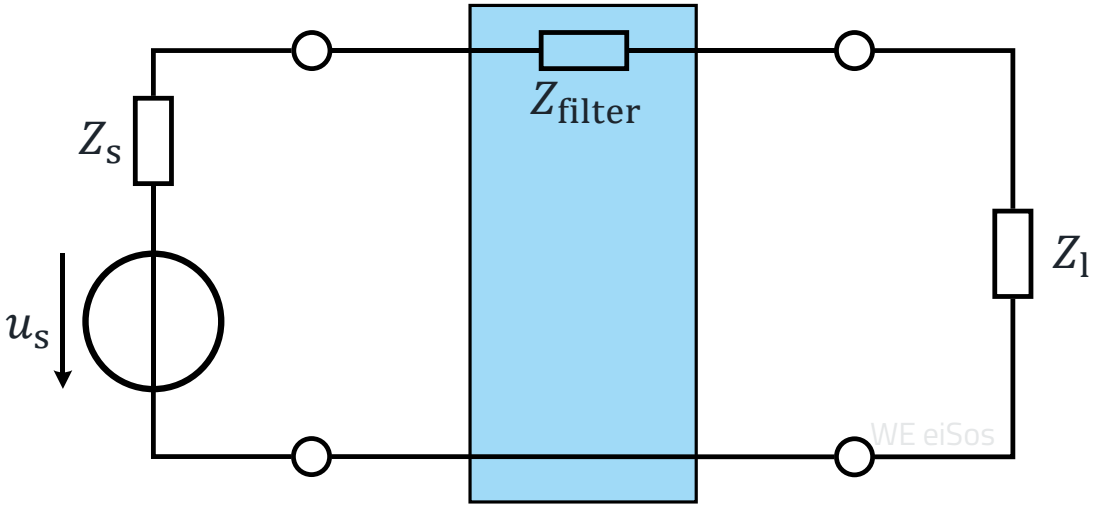
Wiederholung der Prozedur,
bis alle Leitungen identifiziert

Dimensionierung einer Filterdrossel

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

- **Gegentakt-Einfügedämpfung** in Dezibel:

$$A_{\mathrm{dm}} = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{Z_{\mathrm{filter}}}{Z_{\mathrm{s}} + Z_{\mathrm{l}}} \right| \mathrm{dB}$$



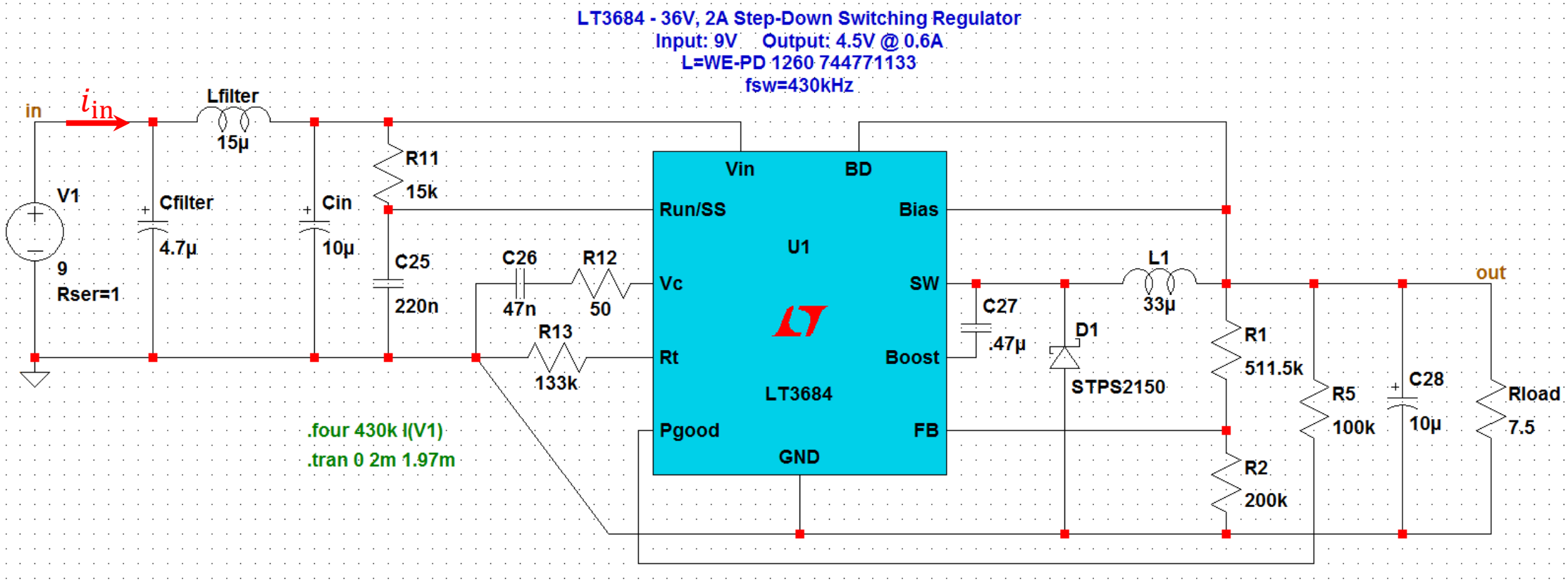
- Minimal benötigte Filterimpedanz Z_{filter} bei einer Störfrequenz f_{n}:

$$|Z_{\mathrm{filter}}|_{f_{\mathrm{n}}} \geq |Z_{\mathrm{s}} + Z_{\mathrm{l}}|_{f_{\mathrm{n}}} \cdot \left(10^{\frac{A_{\mathrm{dm}}(f_{\mathrm{n}})}{20}} - 1 \right)$$

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

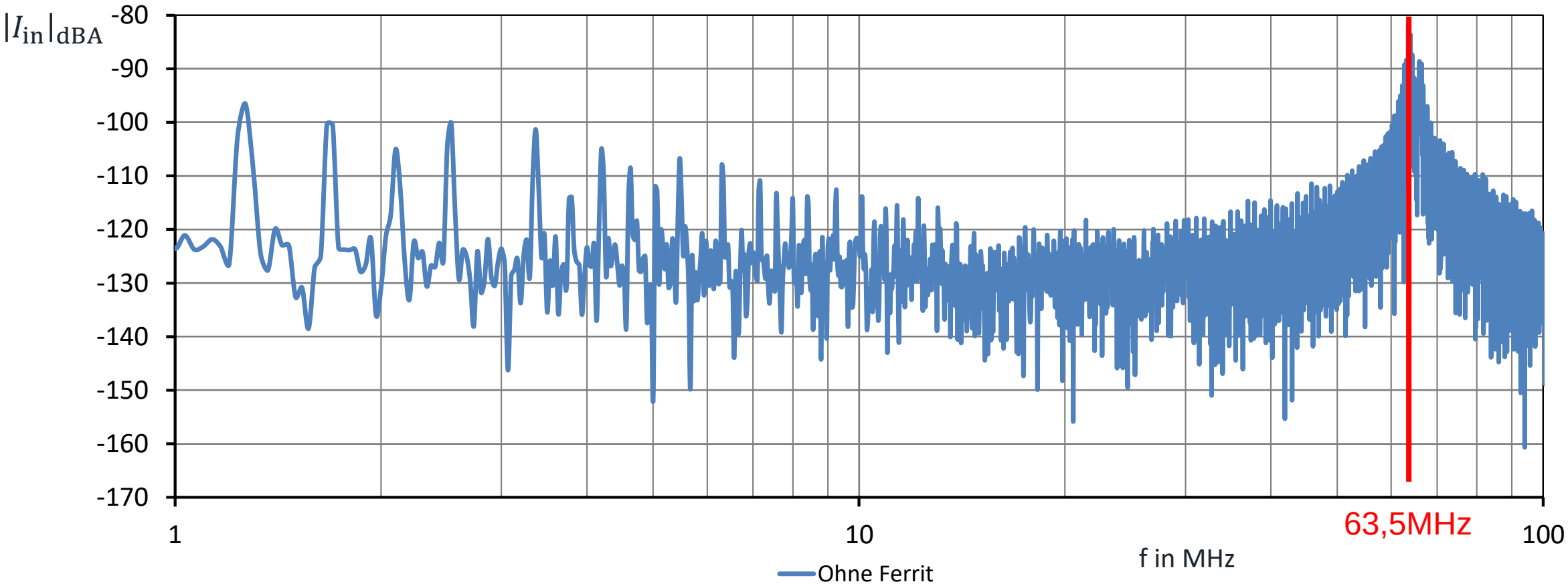
Dimensionierung einer Filterdrossel

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



Dimensionierung einer Filterdrossel

- Spektrum des Eingangsstromes mit einem CLC Eingangsfilter:



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: $\bar{I}_{\text{in}} = 360\text{mA}$ → Auswahl: $I_{\text{bias}} = 400\text{mA}$

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

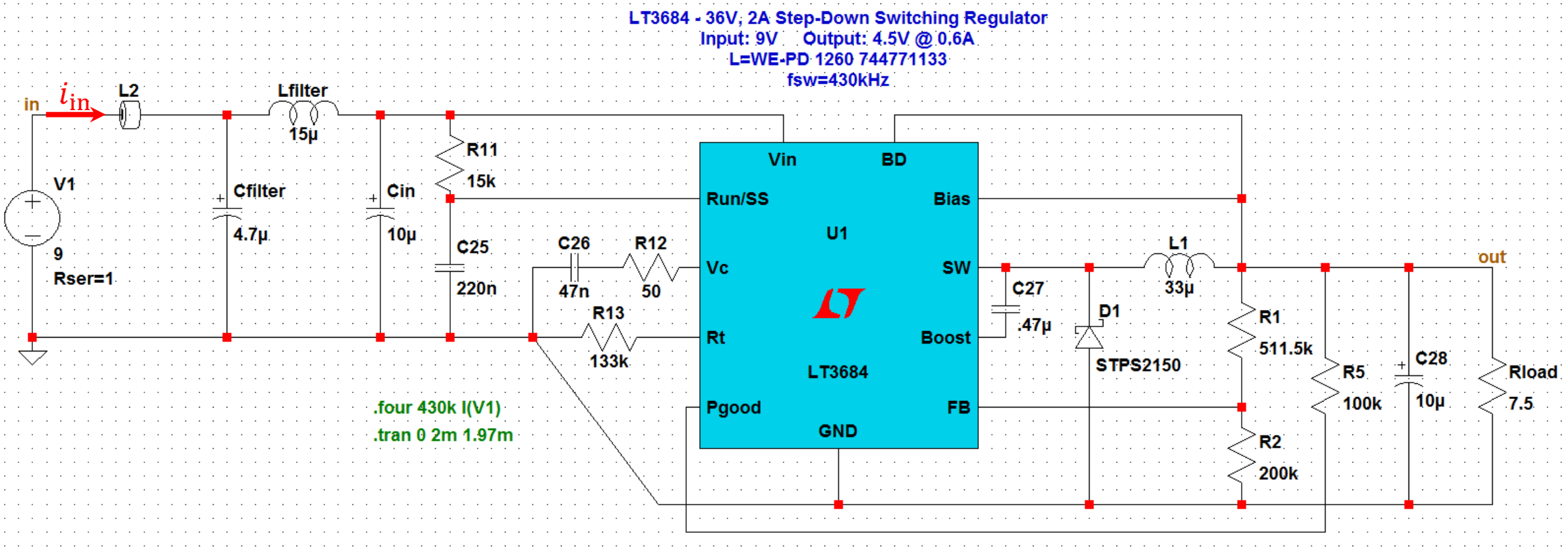
WE-CBF 74279252 ($Z_{\text{filter}} = 219\Omega$ @ $63{,}5\text{MHz}$)



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

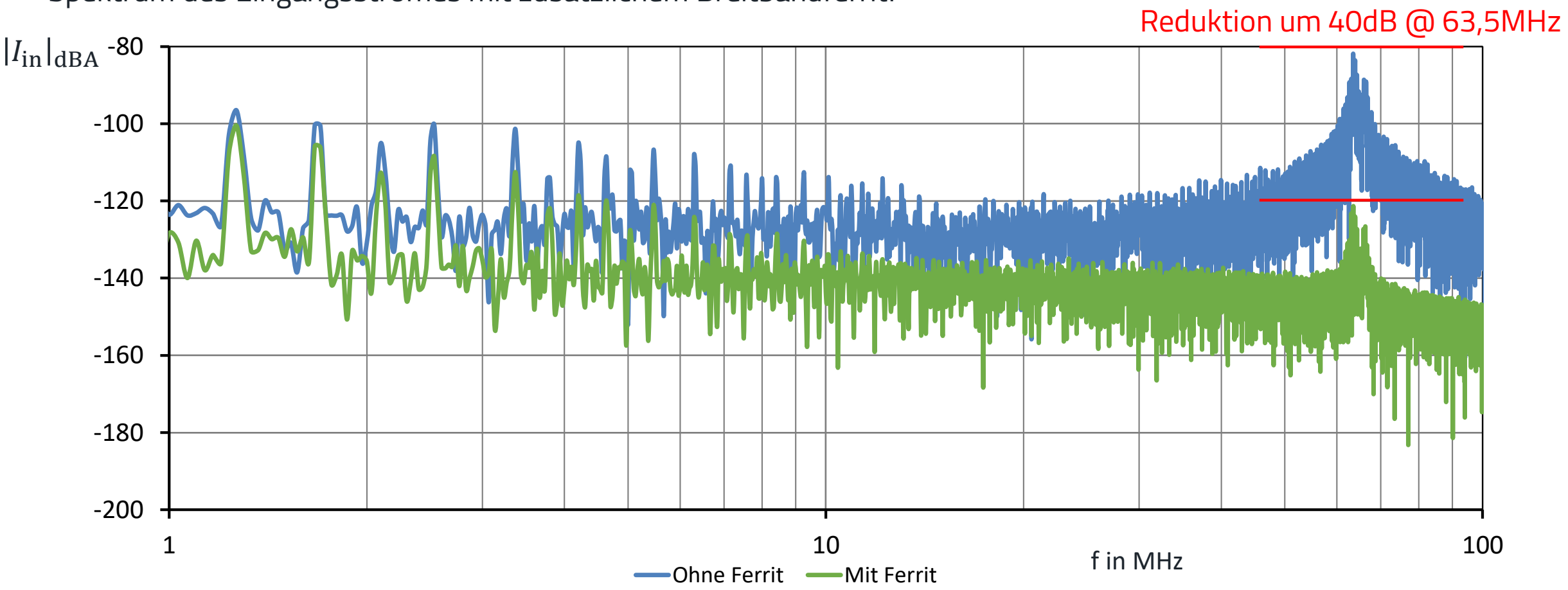
Dimensionierung einer Filterdrossel

- Schaltung mit zusätzlichem Breitbandferrit (L2) am Eingang:



Dimensionierung einer Filterdrossel

- Spektrum des Eingangsstromes mit zusätzlichem Breitbandferrit:





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