



# GRUNDLAGEN FERRITMATERIALIEN FÜR PASSIVE BAUTEILE

Steffen Schulze  
FAE Key Account

# GLIEDERUNG

- Einleitung
- Ferr(o/i)magnetismus
- Parameter magnetischer Materialien
- Impedanz einer Spule
- Nanokristallines Material



# EINLEITUNG



# EINLEITUNG



Einstein O • Ferdinand Schmutzer/Wikimedia

Einstein 1921, Wien

*„Die meisten grundlegenden Ideen der Wissenschaft sind relativ einfach und können, im Prinzip, in einer Sprache ausgedrückt werden, die jeder versteht.“*

**Einstein**

*„Man hat den Eindruck, dass die moderne Physik auf Annahmen beruht, die irgendwie dem Lächeln einer Katze gleichen, die gar nicht da ist.“*

**Einstein**

# EINLEITUNG

- Magnetische Materialien:

Ferrite



Metallische Pulver



Amorphe Metalllegierungen



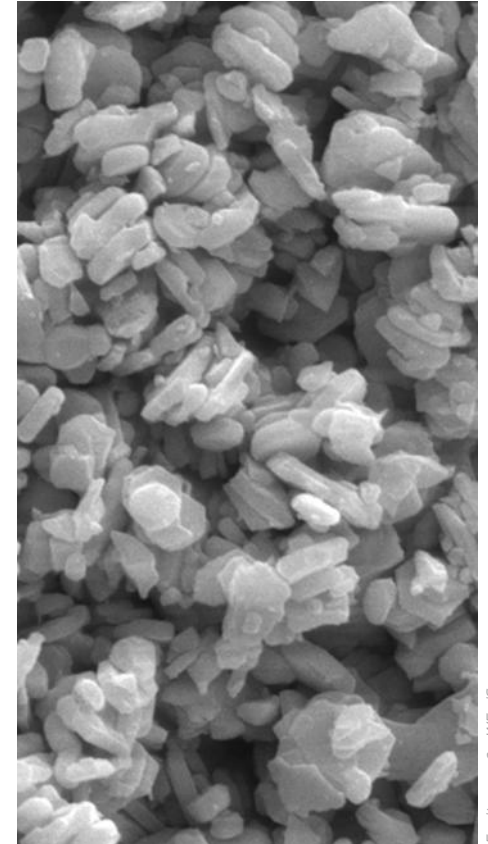
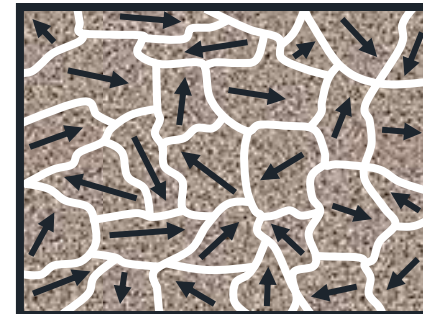
# FERR(O/I)- MAGNETISMUS



# FERR(O/I)MAGNETISMUS

## Ferromagnetismus

- Bekannteste Ausprägungsform des Magnetismus von fester Materie
- Vertreter:
  - Übergangsmetalle: Fe, Ni, Co ( $< \vartheta_C$ )
  - Seltenerdmetalle: Gd ( $< 19,3^\circ\text{C}$ )
- Ferromagnetika zeigen unterhalb der **Curie-Temperatur**  $\vartheta_C$  ohne äußeres Feld eine spontane Magnetisierung. → **Energieminimum** im Kristallgitter
- **Magnetische Momente** sind in größeren Volumenbereichen (**Domänen, Weiß'sche Bezirke**) parallel ausgerichtet. Zwischen den Domänen befinden sich die **Blochwände**.
- Jede Domäne hat eine **beliebige** Richtung des resultierenden magnetischen Moments.

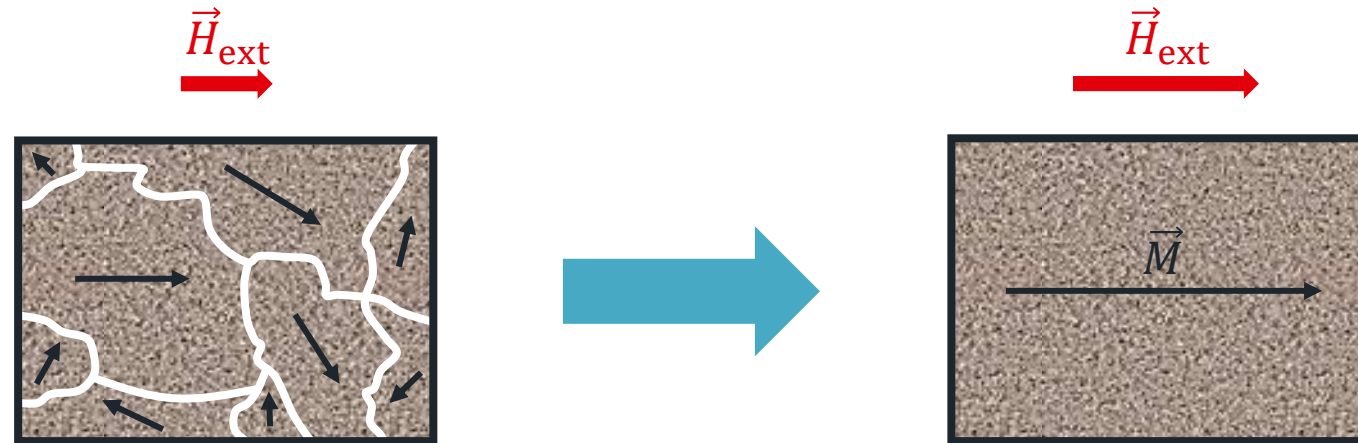


Ferrite\_ssm0 \* WE ei50s

# FERR(O/I)MAGNETISMUS

## Ferromagnetismus

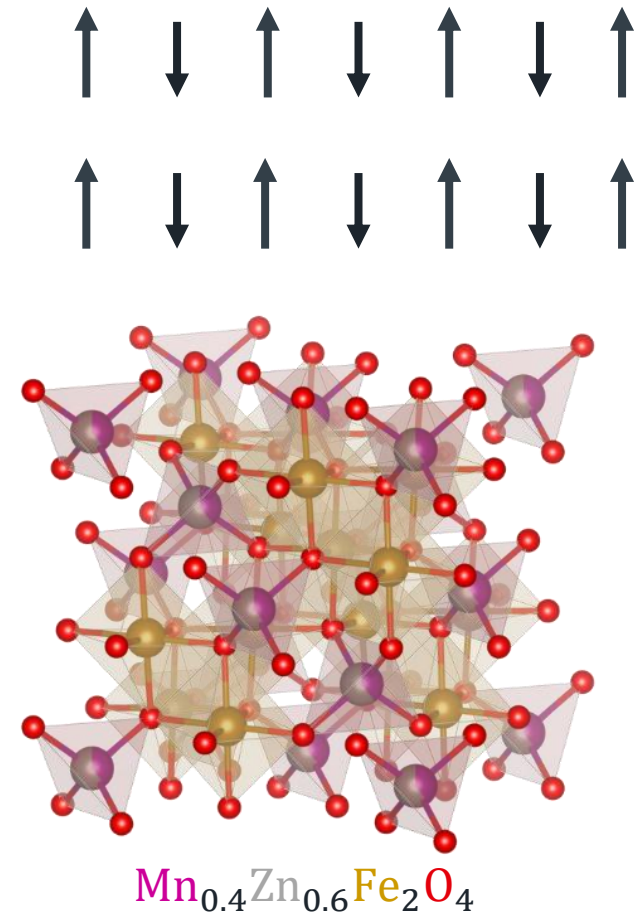
- Durch Einwirkung eines **externen magnetischen Feldes**  $\vec{H}_{\text{ext}}$  kommt es
  - zur Verschiebung der Blochwände zwischen den magnetischen Domänen,
  - zum Wachsen der günstig polarisierten Domänen auf Kosten der ungünstig polarisierten,
  - zur Ausrichtung des **resultierenden Magnetisierungsvektors**  $\vec{M}$  in Richtung des Feldvektors.



# FERR(O/I)MAGNETISMUS

## Ferrimagnetismus

- **Mischform** zwischen Ferro- und Antiferromagnetismus
- Kristallgitter enthält mindestens 2 verschiedene Elemente
- Unterschiedliche Amplituden der magnetischen Momente der einzelnen Elemente
- Schwächeres **Gesamtmoment** als bei ferromagnetischen Stoffen
- Vertreter:
  - Mineralien: Eisengranate ( $A_3^{3+}Fe_5O_{12}$ ), Cobalteisenstein ( $CoFe_2O_4$ )
  - **Ferrite:**  $A^{2+}Fe_2O_4$  ;  $A = Mn, Ni, Mg, Zn, Co$
- Ein gesinterter Ferrit ist eine Eisenoxid-Keramik.
- Kristallform: **Spinell**



# PARAMETER MAGN. MATERIALIEN



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität

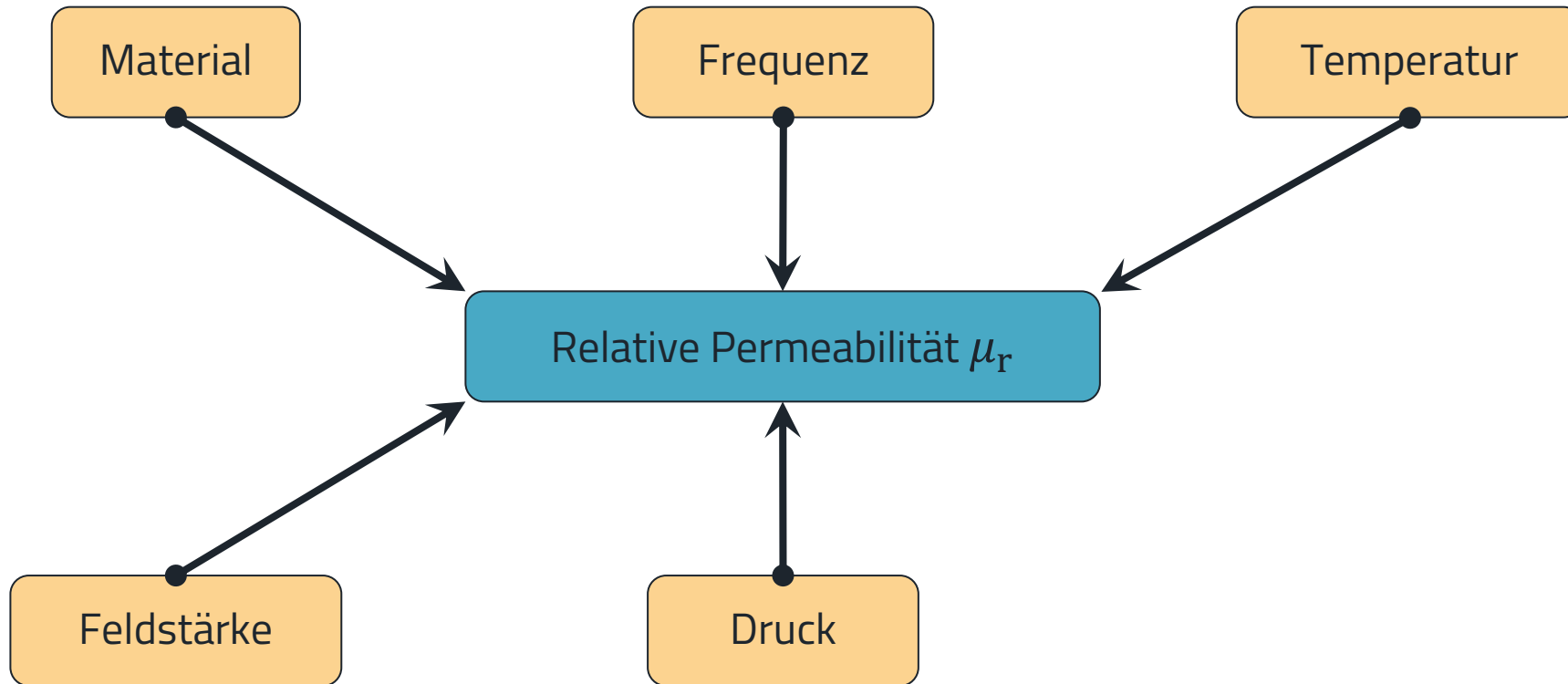
- Die **Permeabilität**  $\mu$  beschreibt die Fähigkeit eines Materials, den **magnetischen Fluss**, hervorgerufen durch ein magnetisches Feld, zu **konzentrieren**.
- Die **relative Anfangspermeabilität**  $\mu_{r,i}$  wird bei sehr kleiner Aussteuerung und bei einer niedrigen Frequenz (typ. 10kHz)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

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

- Typische Wertebereiche für Materialien zur **Entstörung**:
  - 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 ( $\text{Fe}_{nk}$ ):  $\mu_{r,i} = 5000 \dots 95000$

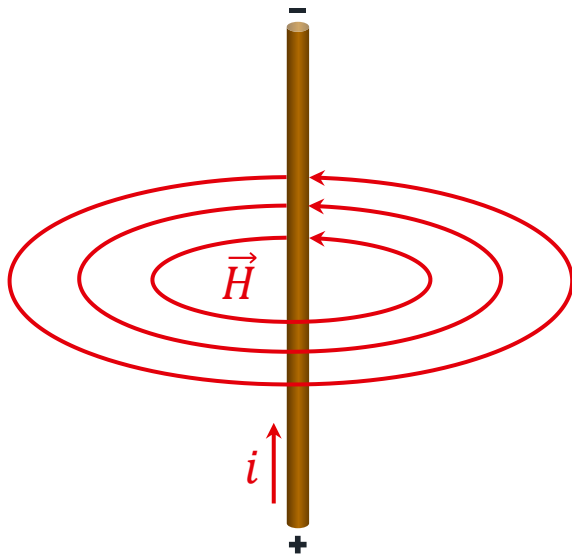
# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Einflussgrößen

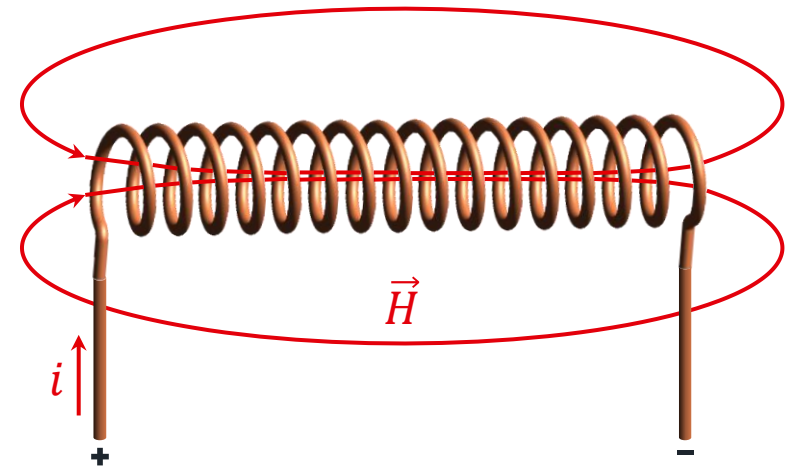


# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Magnetisches Feld



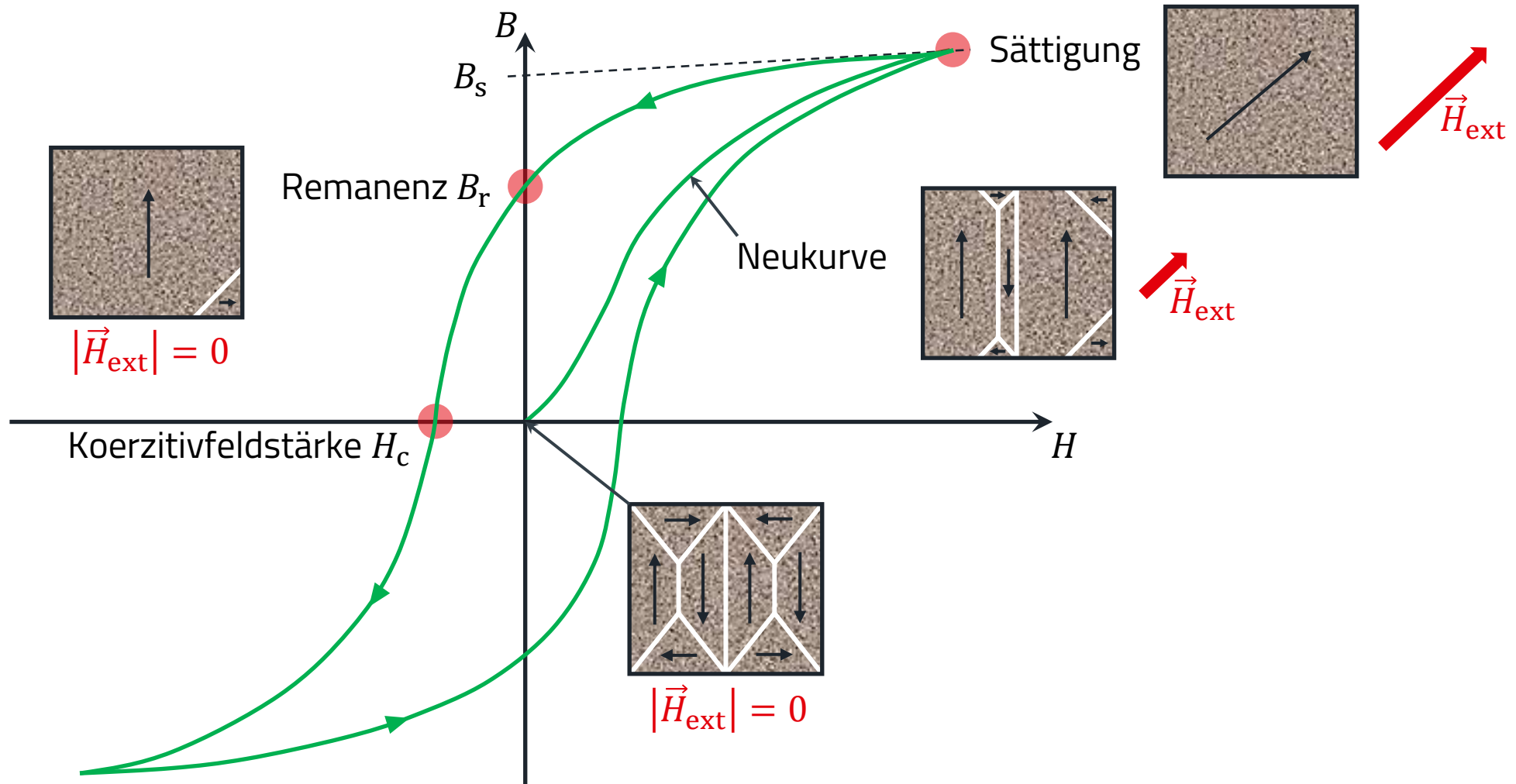
Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter



Feldlinien um eine stromdurchflossene Spule

# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

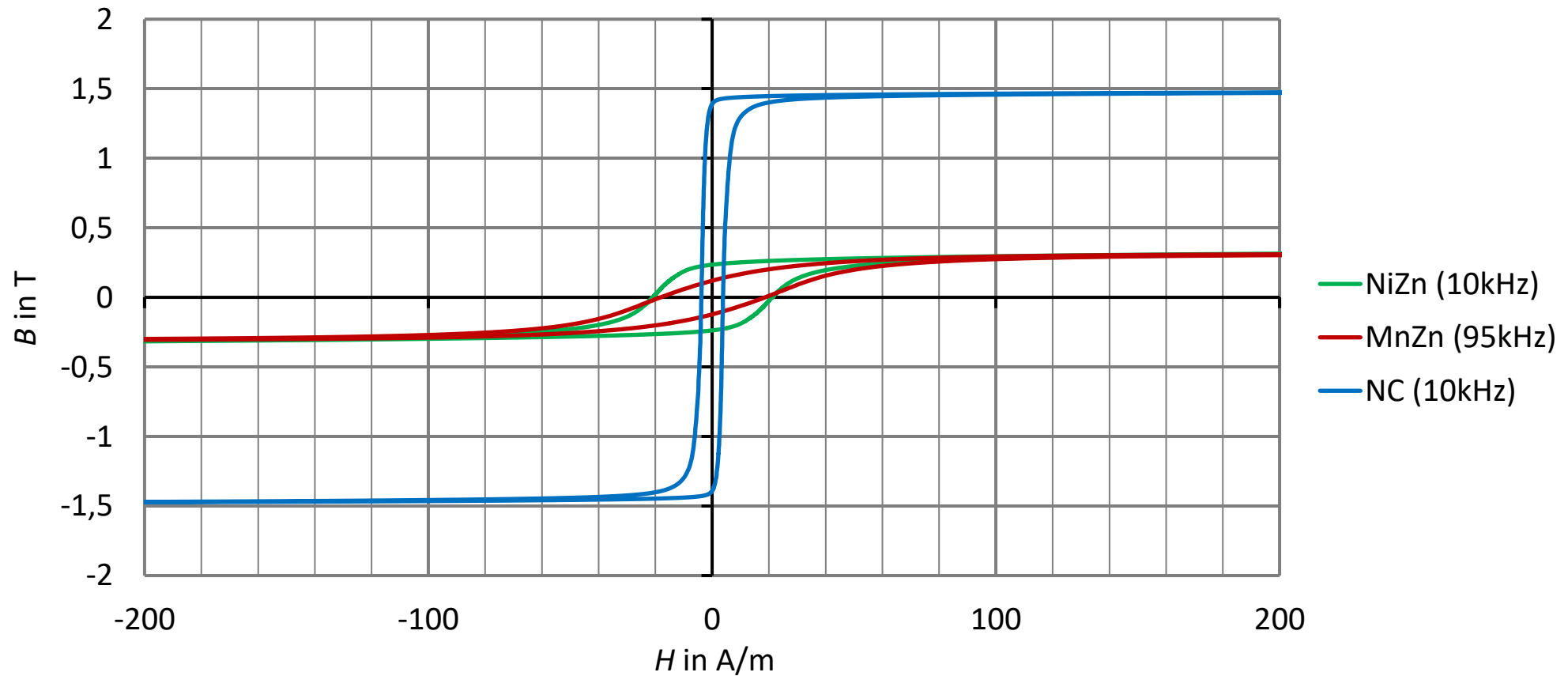
## Hysterese



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Hysterese

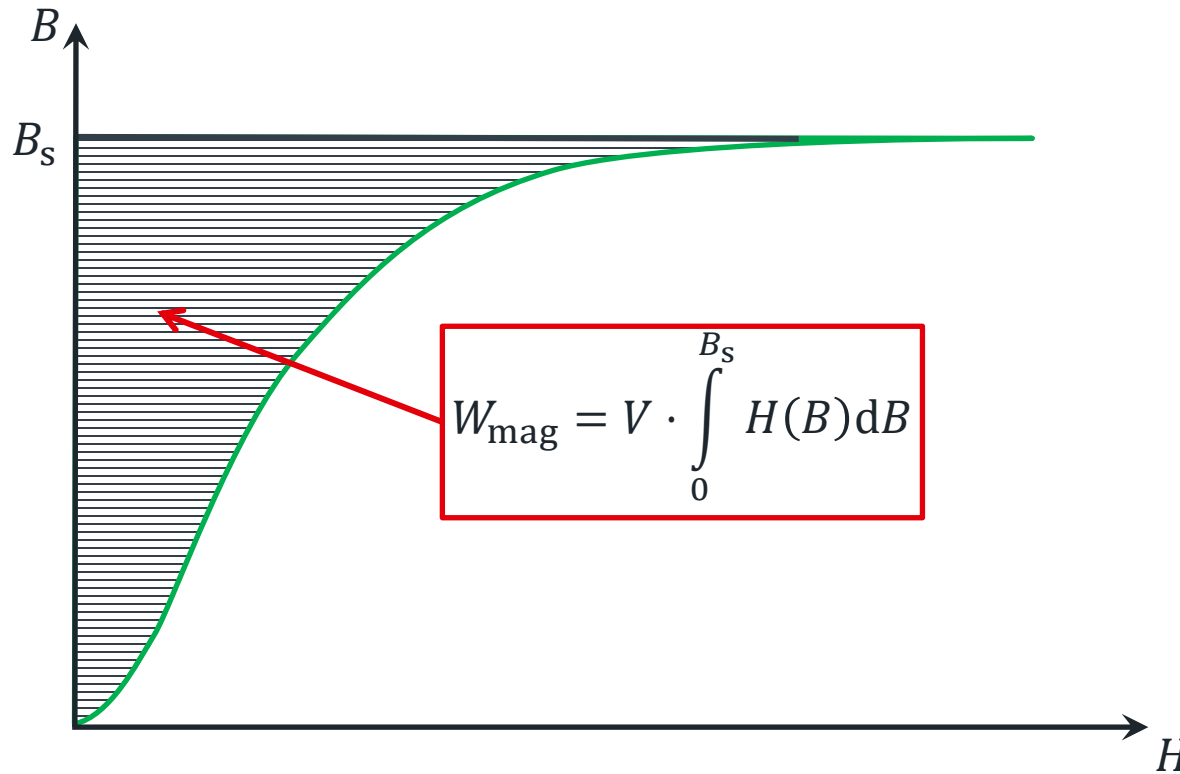
- Vergleich der Hysterese von 3 verschiedenen Ferritmaterialien:



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Magnetisierungsenergie

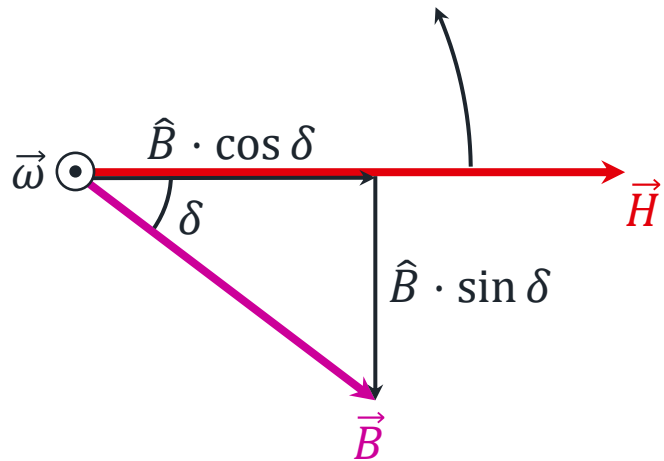
- Energieaufwand für die vollständige Aufmagnetisierung eines Volumens  $V$ :



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

Verlustwinkel, komplexe Permeabilität

- Die Magnetisierung  $B$  hängt bei **harmonischer Anregung** zeitlich der Feldstärke  $H$  um den Winkel  $\delta$  nach:



$$\underline{H}(t) = \hat{H} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\underline{B}(t) = \hat{B} \cdot e^{j(\omega t - \delta)}$$

- Definition der **komplexen Permeabilität**: 
$$\underline{\mu} = \frac{\hat{B} \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{\hat{H} \cdot e^{j\omega t}} = \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \cdot e^{-j\delta} = \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \cdot [\cos(-\delta) + j \cdot \sin(-\delta)]$$
$$= \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \cdot \cos \delta - j \cdot \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \cdot \sin \delta = \mu' - j \cdot \mu''$$

# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Verlustfaktor, Güte

- Der Verlustwinkel  $\delta$  ist frequenzabhängig.

- Verlustfaktor:**

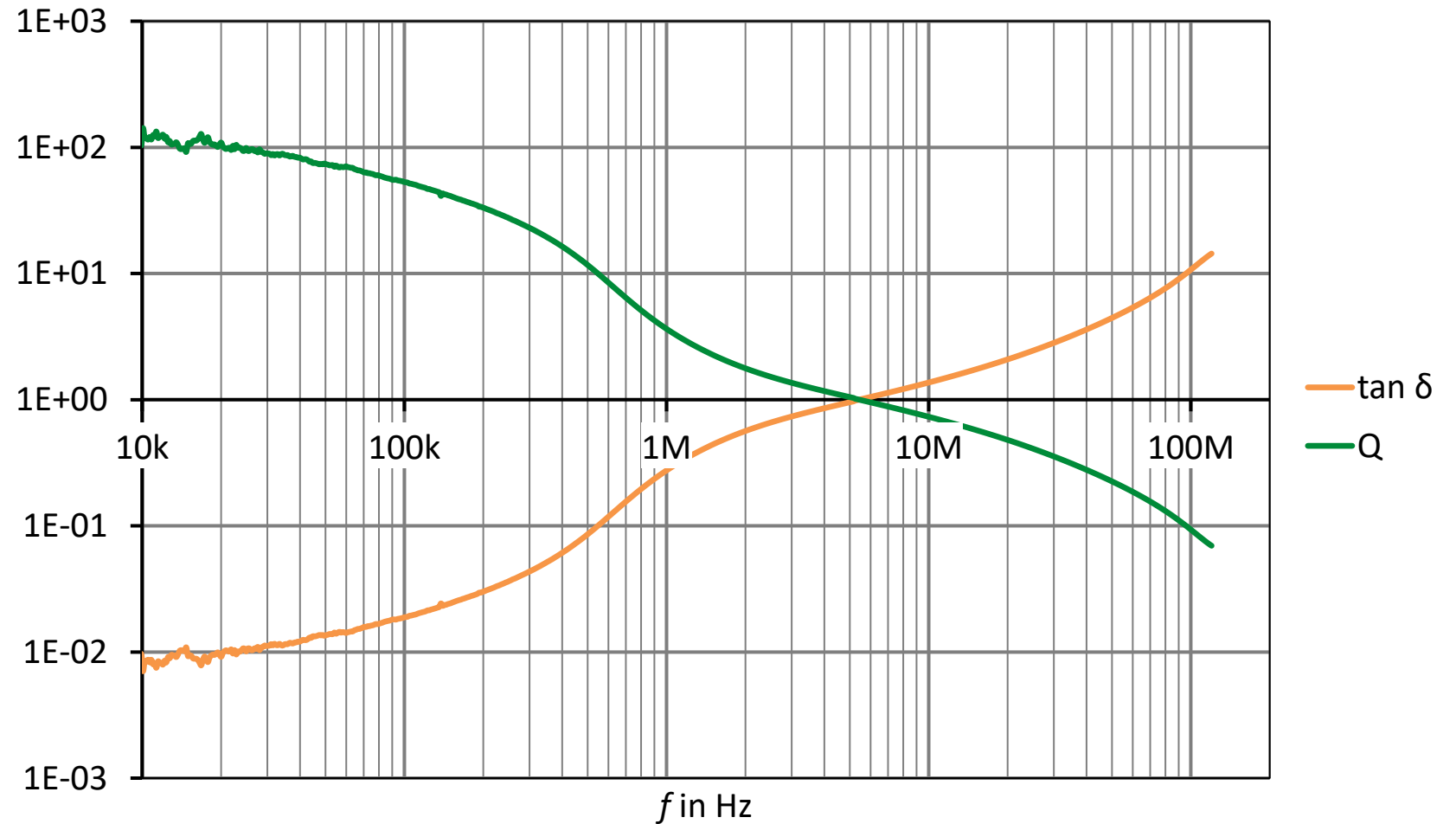
$$\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{\mu''}{\mu'}$$

- Güte:**

$$Q = \frac{1}{\tan \delta}$$

- Beispiel:

- NiZn Ringkern



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

Permeabilität – Frequenzabhängigkeit

- Messgerät: **Impedanzanalysator**
- Messadapter für Ferritringkerne definierter Größe
- Induktivität des leeren coaxialen Messadapters:

$$L_{\text{fixture}} = \mu_0 \cdot \frac{h_{\text{fixture}}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{o,fixture}}}{r_{\text{i,fixture}}}\right)$$

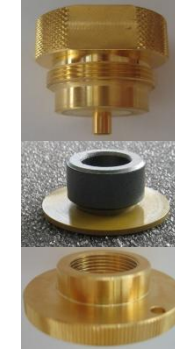
- Kombination von 2 Einzelmessungen ( $Z_{\text{MUT}}, Z_{\text{cal}}$ ) für den betrachteten Frequenzbereich:

$$\underline{\mu}_r(f) = \frac{Z_{\text{MUT}}(f) - Z_{\text{cal}}(f)}{Z_{\text{fixture}}(f)} + 1 = \frac{R_{\text{MUT}}(f)}{j\omega \cdot L_{\text{fixture}}} + \frac{L_{\text{MUT}}(f)}{L_{\text{fixture}}} = -j \cdot \mu_r''(f) + \mu_r'(f)$$

MUT: Material Under Test



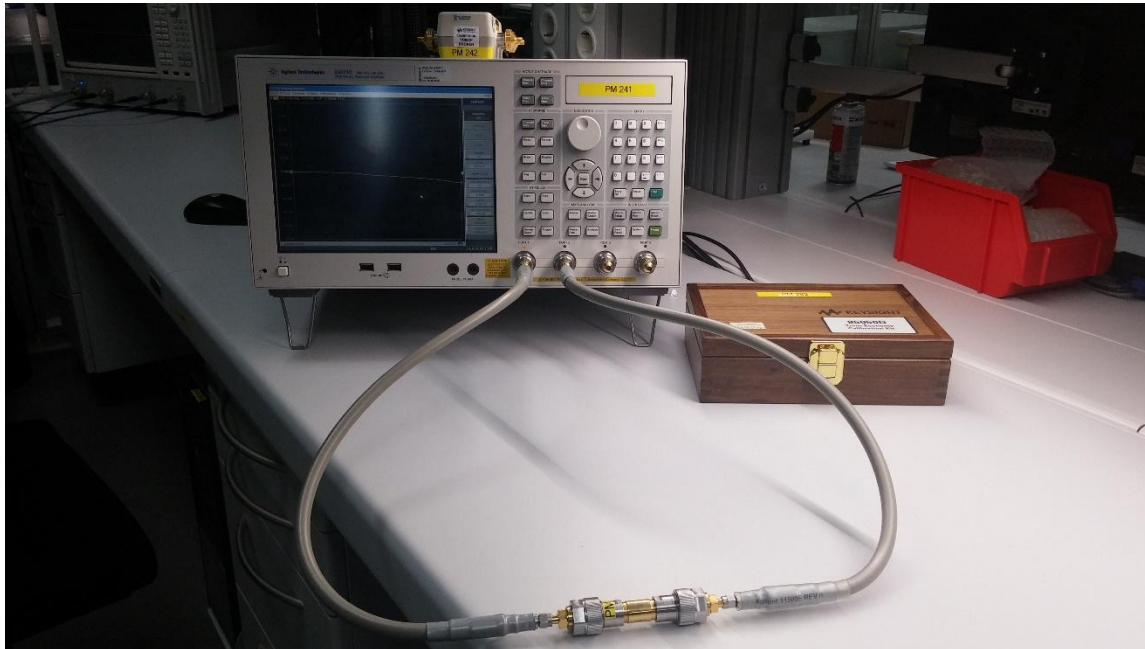
E4991A • Copyright 2021 Keysight Technologies, Inc.  
Reproduced with permission



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Frequenzabhängigkeit

- Erweiterte Materialanalyse mit Hilfe einer **Präzisions-Luftleitung** für den Frequenzbereich 300kHz...20GHz
- Test-Ringkern füllt den Raum zwischen Innen- und Außenleiter
- Anwendung der **Nicolson-Ross-Weir Methode** zur Ermittlung der komplexen Permeabilität und Permittivität



CoaxialAirline0\_0 • WE ei50s

Agilent E5071C + Maury Microwave 7mm Luftleitung



CoaxialAirline0\_1 • WE ei50s

Luftleitung mit Ferritring auf Innenleiter

# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

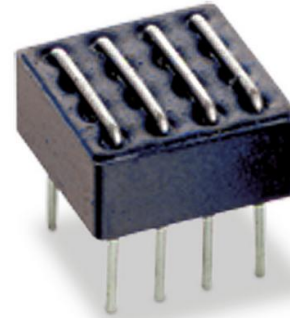
## Permeabilität – Frequenzabhängigkeit

- Aussteuerung während der Messung:  $B < 0,25\text{mT}$
- Es wird die Anfangspermeabilität  $\mu_i$  gemessen.
- Beispiele ( $f = 10\text{kHz}$ ,  $\vartheta_a = 25^\circ\text{C}$ , Verläufe auf der nächsten Folie):



Picture WE e50s 14763

**MnZn (WE-CMB)**  
 $\mu_{r,i} = 5500 \pm 20\%$

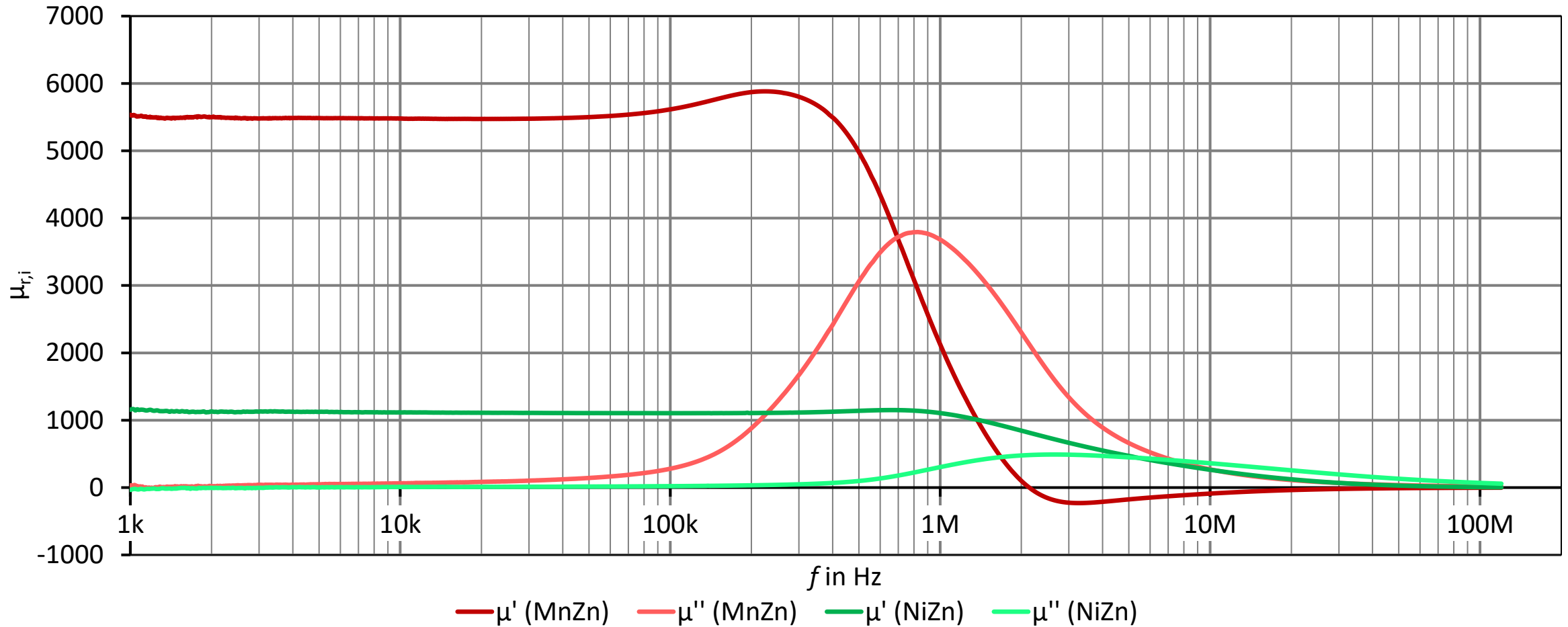


Picture WE e50s 14821

**NiZn (WE-MLS)**  
 $\mu_{r,i} = 1500 \pm 20\%$

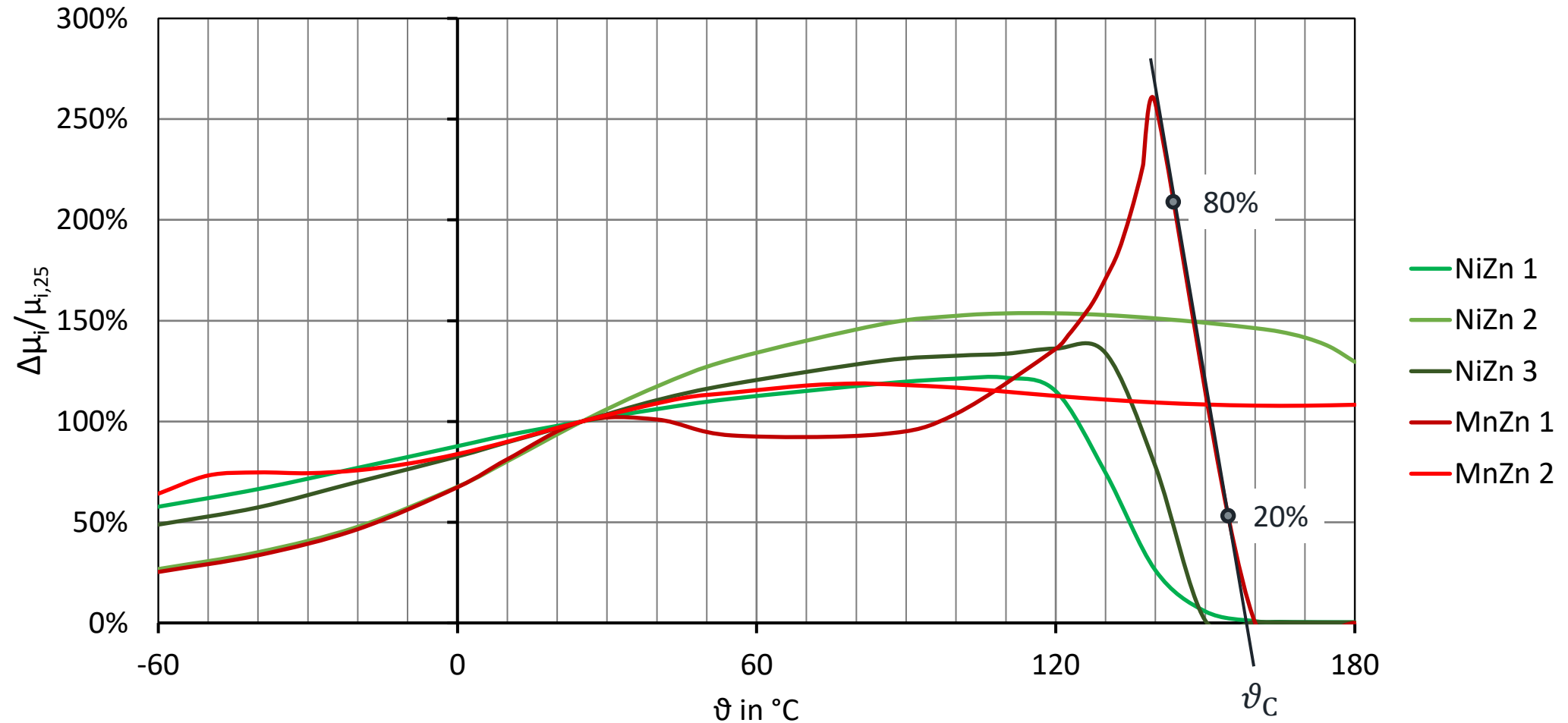
# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Frequenzabhängigkeit



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Temperaturabhängigkeit



# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Druckabhängigkeit

- Ein ferromagnetisches Material erfährt bei Ausrichtung der Domänen eine **Deformation**.
- Der Effekt wird **Magnetostriktion** genannt.
- Längenänderung bei gesinterten Ferriten: ca. 10...30µm/m
- Wenn die Anregung eines Ferritkernes mit einem **alternierenden Feld** erfolgt, kann er **Schallwellen** aussenden. Bei Leistungsinduktivitäten oder Leistungsübertragern kann dieser Effekt störend sein.
- Der inverse (Villari) Effekt muss beim **Verguss von Platinen** mit Ferritkernspulen beachtet werden. Die Permeabilität/Induktivität verringert sich bei **Druckspannung** auf das Bauteil (siehe nächste Folie).

# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

## Permeabilität – Druckabhängigkeit

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

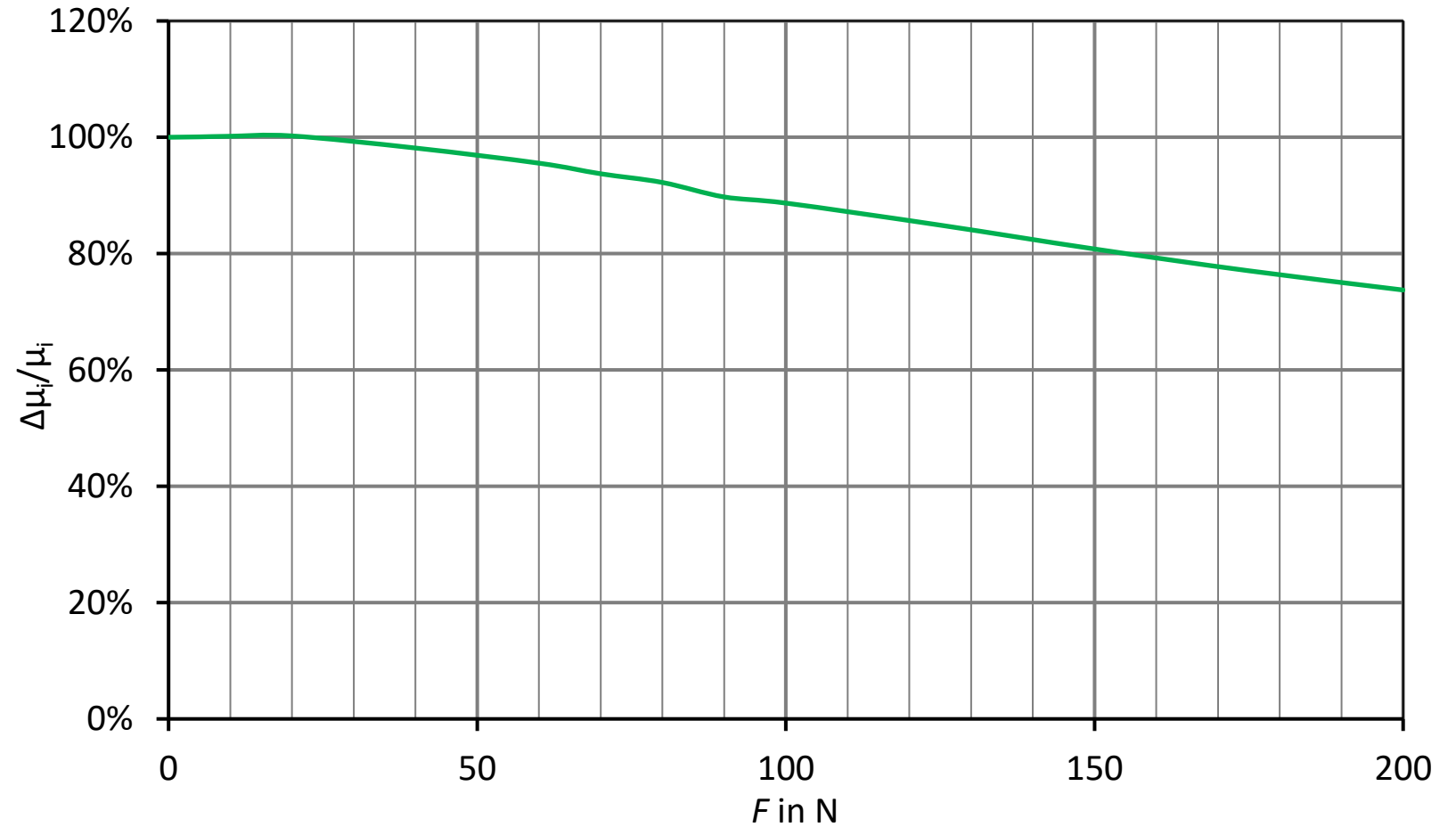


Bild: WE eiSos

# PARAMETER MAGNETISCHER MATERIALIEN

Elektrische Leitfähigkeit



ToF\_mw0 • WE eSos/Steffen Schulze

**WE-TOF** Ferritring nach Bestrahlung mit 800W



ToF\_mw1 • WE eSos/Steffen Schulze

Testmuster

# IMPEDANZ EINER SPULE



# IMPEDANZ EINER SPULE

## Luftspule

- Induktivität einer **Ringspule** mit rechteckförmigem Querschnitt:

$$L_0 = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

$h$  = Höhe

$r_o$  = Außenradius

$r_i$  = Innenradius

$N$  = Windungszahl



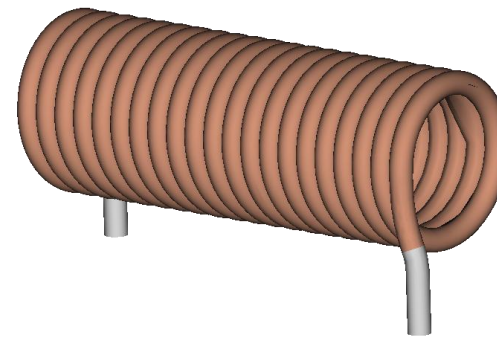
- Induktivität einer langen dünnen **Zylinderspule**:

$$L_0 = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A}{\ell}$$

$A$  = Querschnittsfläche

$\ell$  = Länge

$N$  = Windungszahl

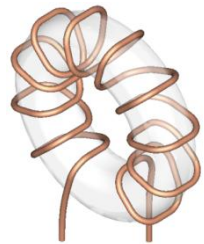


Bilder: WE eiSos

# IMPEDANZ EINER SPULE

## Ferritkernspule

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



Impedanz der Luftspule  $\underline{Z}_0$



Ferritpermeabilität  $\underline{\mu}_r$



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

$$R(f) = \omega \cdot L_0 \cdot \mu_r''(f)$$

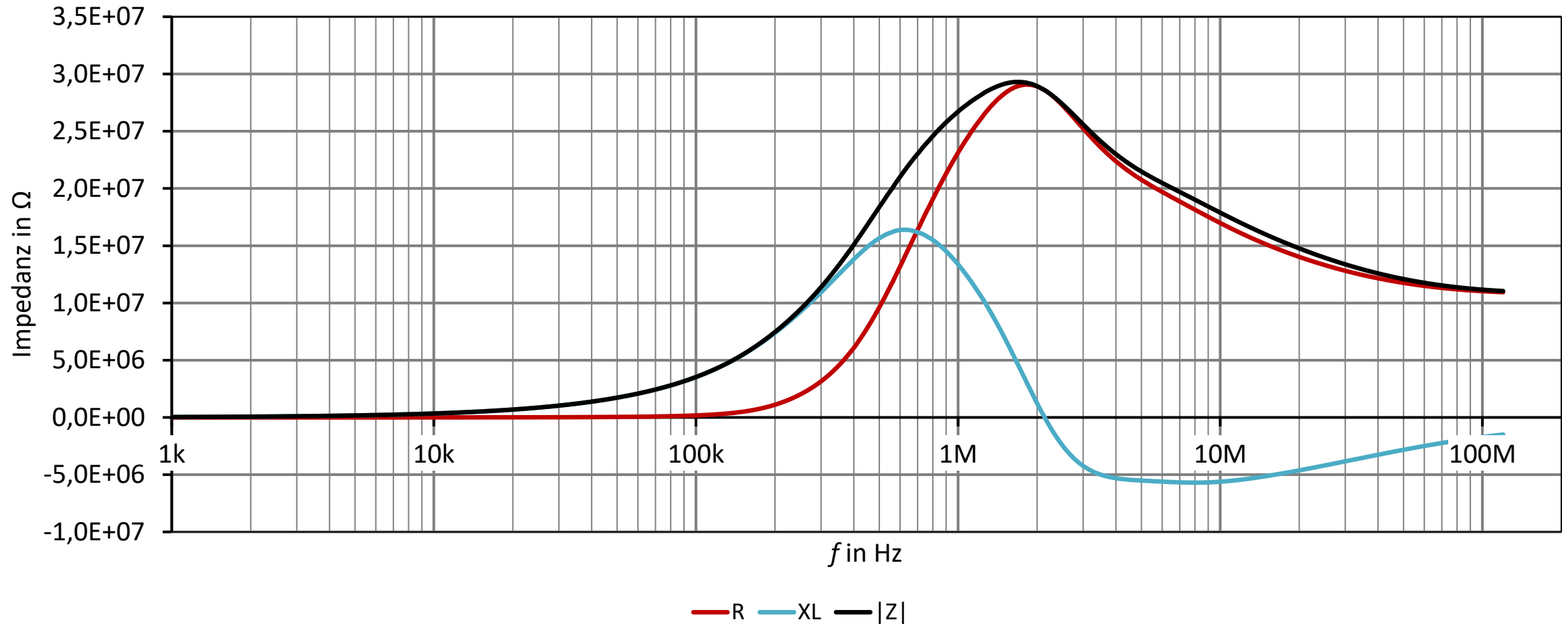
$$X_L(f) = \omega \cdot L_0 \cdot \mu_r'(f)$$

- Eine **reale** Spule hat zusätzlich eine **parasitäre Wicklungskapazität**.

Bilder: WE eiSos

# IMPEDANZ EINER SPULE

Ferritkernspule (MnZn,  $L_0 = 1\text{mH}$ )



# NANOKRISTALLINES MATERIAL



# NANOKRISTALLINES MATERIAL

## Herstellung

- Ausgangsmaterial ist eine Mischung aus Fe (>70%), Cu, Nb, Zr, Si, B
- Silizium und Bor für eine **reißfeste glasartige Struktur** (metallisches Glas)
- **Rascherstarrung** der Schmelze ( $\dot{T} = -10^6 \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- Tempern: Wachstum **nanokristalliner** Körner (7...40nm), eingebettet in eine amorphe Phase
- Größe der Kristallite bestimmt die Permeabilität
- Metallisch → Hohe Curie-Temperatur
- Ferromagnetisch, weichmagnetisch

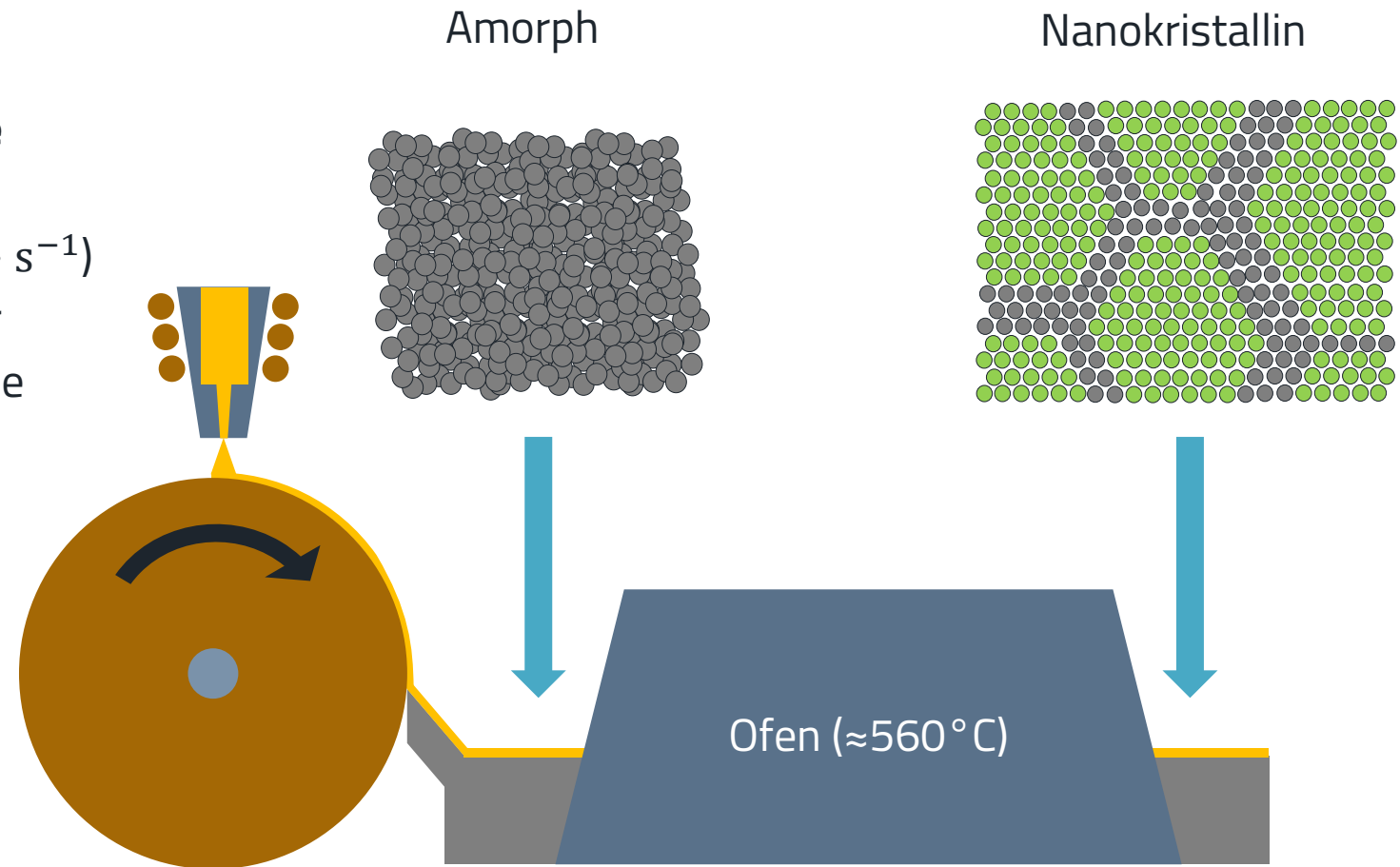


Bild: WE eisos / StS

# NANOKRISTALLINES MATERIAL

Vergleich

	NiZn-Ferrit	MnZn-Ferrit	NK
Anfangspermeabilität $\mu_i$	10...2500	500...20000	4000...150000
Sättigungsflussdichte $B_s$	210...350mT	360...510mT	1,2...1,5T
Remanenz $B_r$	105...275mT	65...170mT	–
Curie-Temperatur $\vartheta_C$	100...400°C	100...300°C	350...600°C
Koerzitivfeldstärke $H_c$	16...1945A/m	4...16A/m	1...3A/m
Spez. el. Widerstand $\rho$	$10^4 \dots 10^7 \Omega\text{m}$	0,1...10 $\Omega\text{m}$	0,4...1,2 $\mu\Omega\text{m}$
Kernverluste $P_{\text{core}}$ (20kHz, 200mT, 20°C)	60mW/cm <sup>3</sup>	12W/kg	5W/kg

# NANOKRISTALLINES MATERIAL

## Vorteile

- Hohe Anfangspermeabilität  $\mu_{r,i}$ :
  - **Hohe Induktivität/Impedanz** bei Frequenzen  $< 100\text{kHz}$
  - Reduktion der Drahtwindungen bei bewickelten Kernen → **Kleine Bauform, geringe Kupferverluste**, kleine verteilte Kapazität, hohe Eigenresonanzfrequenz
  - **Geringes Streufeld**
- Weniger steiler Abfall der Permeabilität oberhalb der Übergangsfrequenz im Vergleich zu gesinterten Ferriten
- Hohe Sättigungsinduktion  $B_s$ :
  - Bei Kernen **ohne Luftspalt** und mit **moderater Permeabilität** weniger Anfälligkeit, bei **größeren Stromstärken** in Sättigung zu gehen
- Permeabilität und Sättigungsinduktion sind nur wenig von der **Temperatur** abhängig
- Hohe **Linearität** der Magnetisierungskurve → **Konstante Impedanz** bei variierender Stromamplitude
- Sehr kleiner magnetostriktiver Effekt → Schwingung bei Wechselfeldanregung führt nicht zu Schallaussendung

