

AUSWAHL VON SPEICHERDROSSELN

Raphael Specht
Field Application Engineer

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Agenda

- Kernmaterialien
- Geometrie und Luftspalt
- Sättigungs- und Nennstrom
- Frequenzverhalten
- Verluste
- Streufeld
- Auswahl einer Speicherdrossel



Begriffsklärung

Was ist eine Induktivität? Was ist eine Spule?

...technisch gesehen:

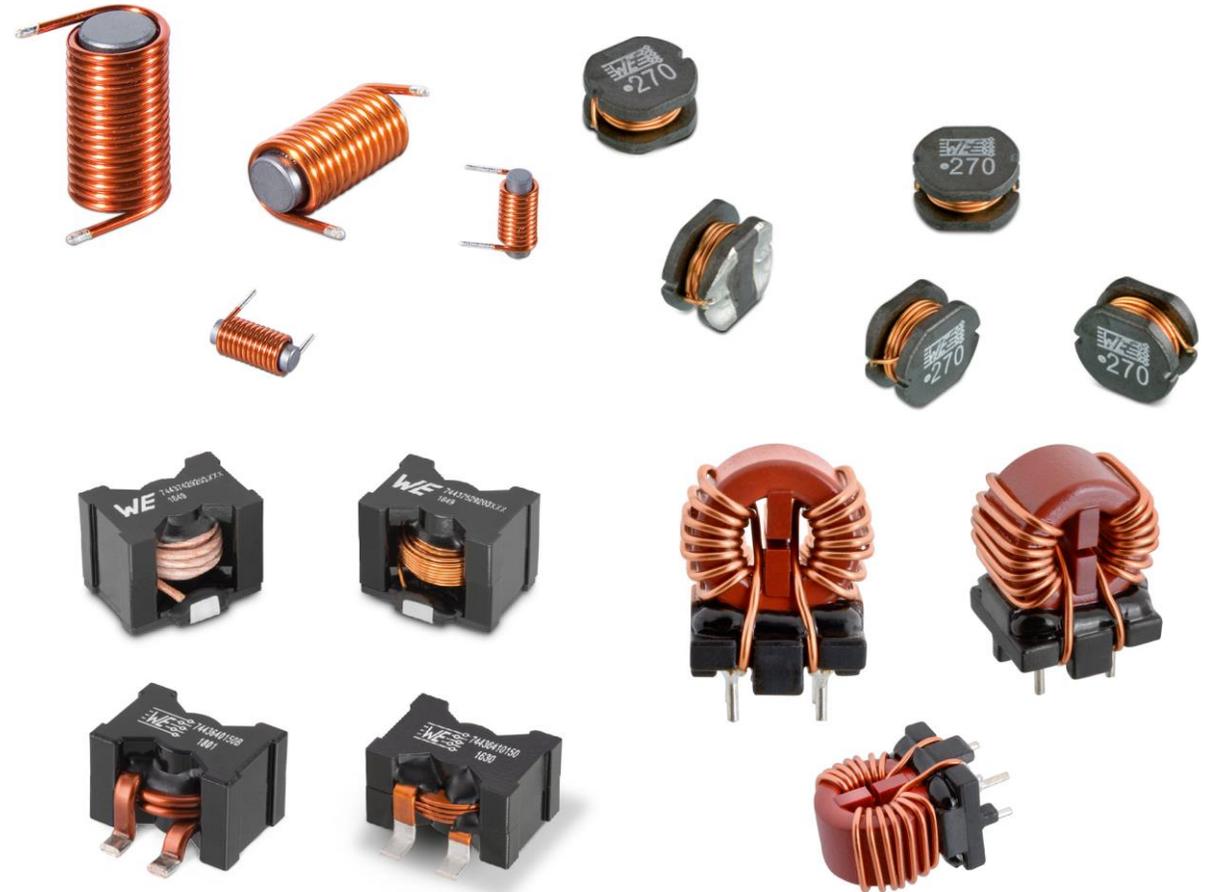
- ein gewickeltes Stück Draht

Anwendung als:

- Filterelement
- (Kurzzeit-)Energiespeicher

Unterschied zwischen Spule und Induktivität?

- Spule -> Bauform
- Induktivität -> physikalische Größe

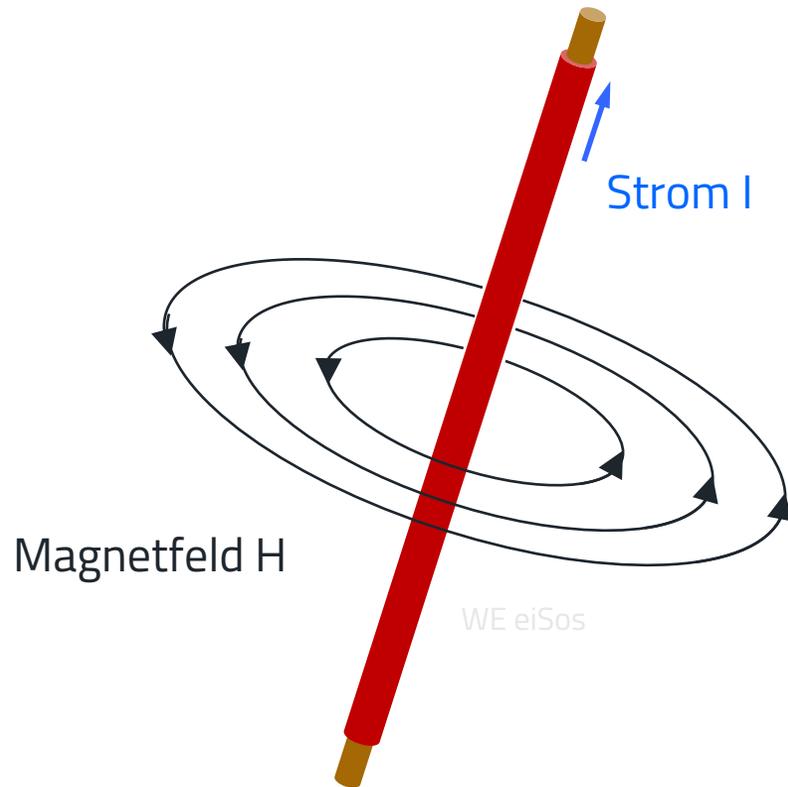


KERNMATERIALIEN

Das Magnetfeld

Magnetische Feldstärke

Rechte-Hand-Regel



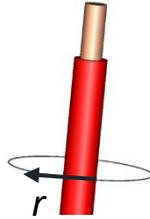
jeder Stromdurchflossene Leiter erzeugt ein Magnetfeld



Magnetisches Feld

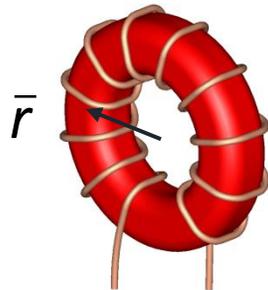
Vergleich verschiedener Geometrien

- Gerader Leiter



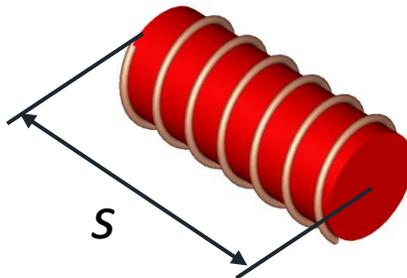
$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

- Ringspule



$$H \approx \frac{N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot \bar{r}}$$

- Zylinderspule



$$H \approx \frac{N \cdot I}{s}$$

Die magnetische Feldstärke ist abhängig von:

- Geometrie,
- Windungszahl,
- Stromstärke,

aber nicht vom Material!

Permeabilität

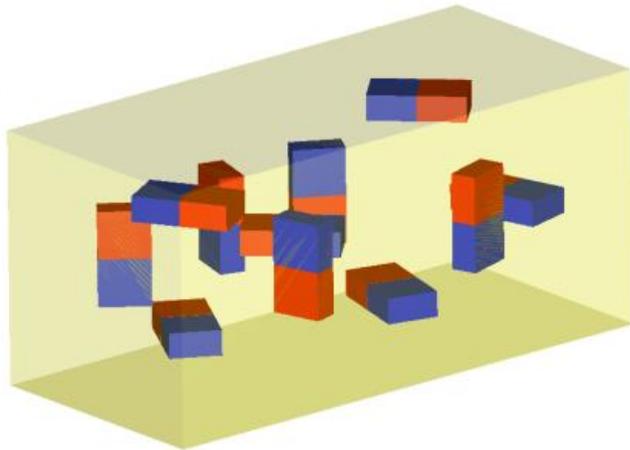
Die relative Permeabilität und Anfangspermeabilität

- lat.: permeare = ‚durchgehen‘, ‚passieren‘
- beschreibt die Fähigkeit, den magnetischen Fluss im Kernmaterial zu konzentrieren bzw.
- ist ein Faktor zur Bestimmung des Energieaufwandes für die Magnetisierung.

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

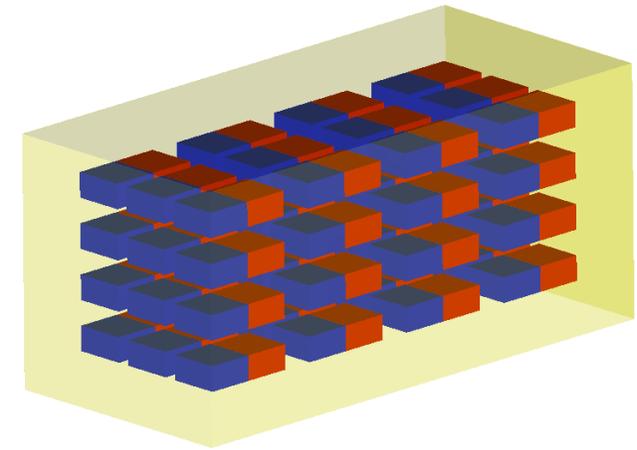
Ferritmaterial

- Ungeordnet
- weichmagnetisch



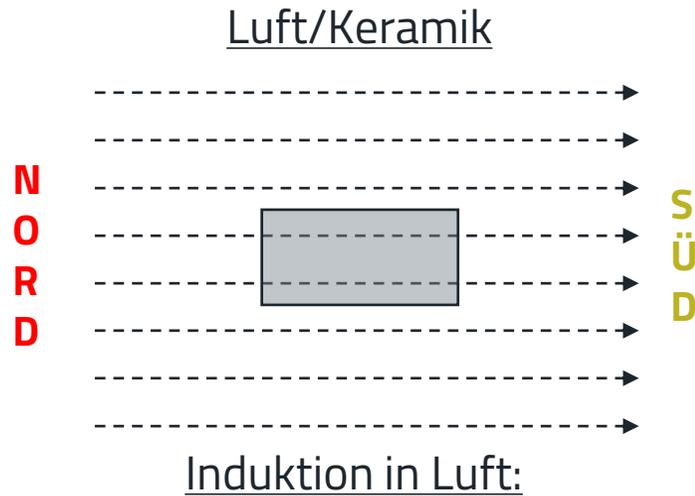
Dauermagnet

- Geordnet
- hartmagnetisch



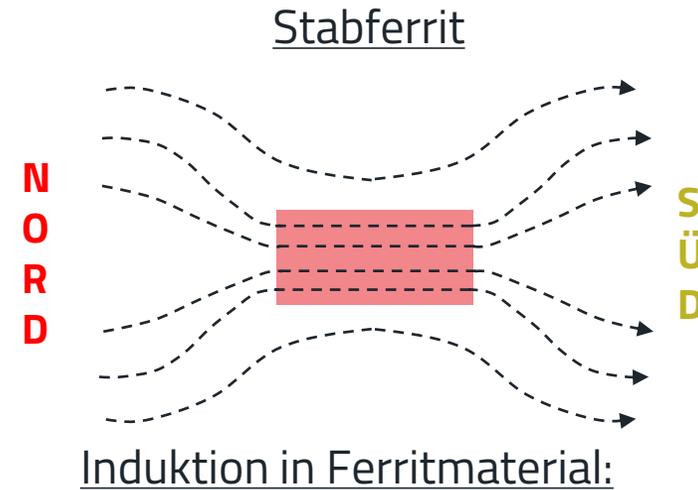
Kernmaterialien

Magnetische Flussdichte



$$B = \mu_0 \cdot H$$

→ lineare Funktion



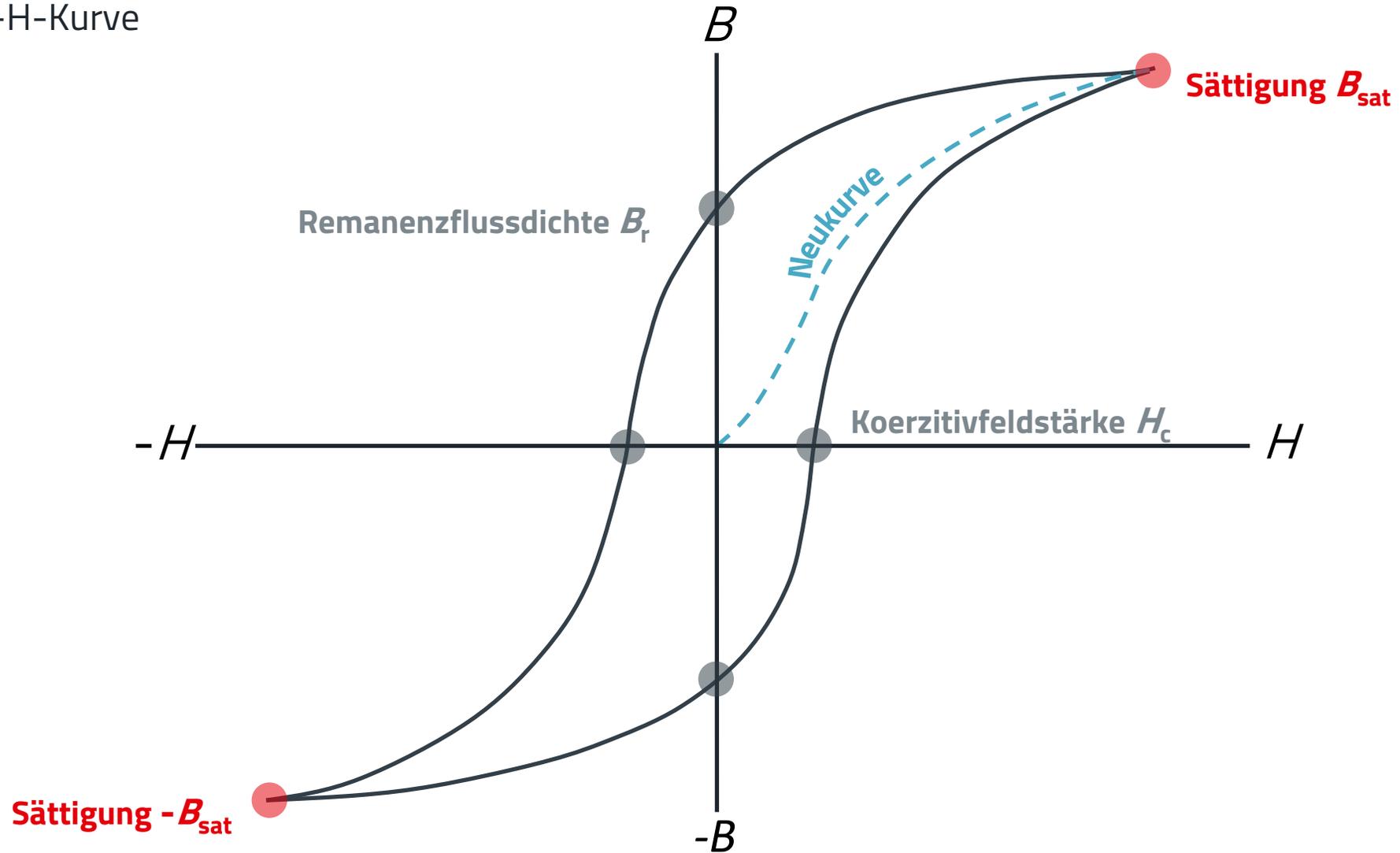
$$B = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot H$$

→ nichtlineare Funktion

→ Abhängig von Material
Frequenz
Temperatur
Druck

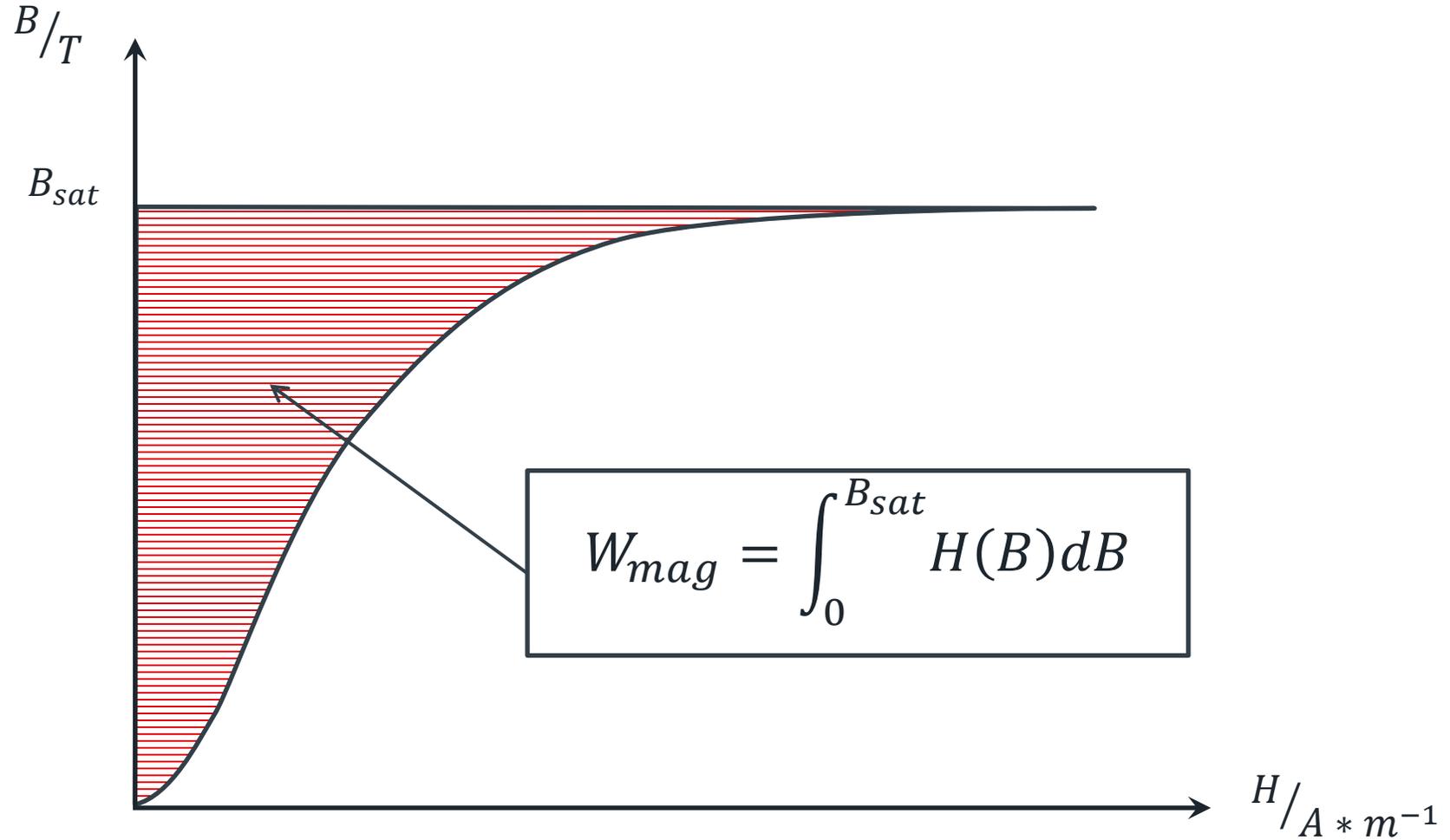
Kernmaterialien

Hysterese, B-H-Kurve

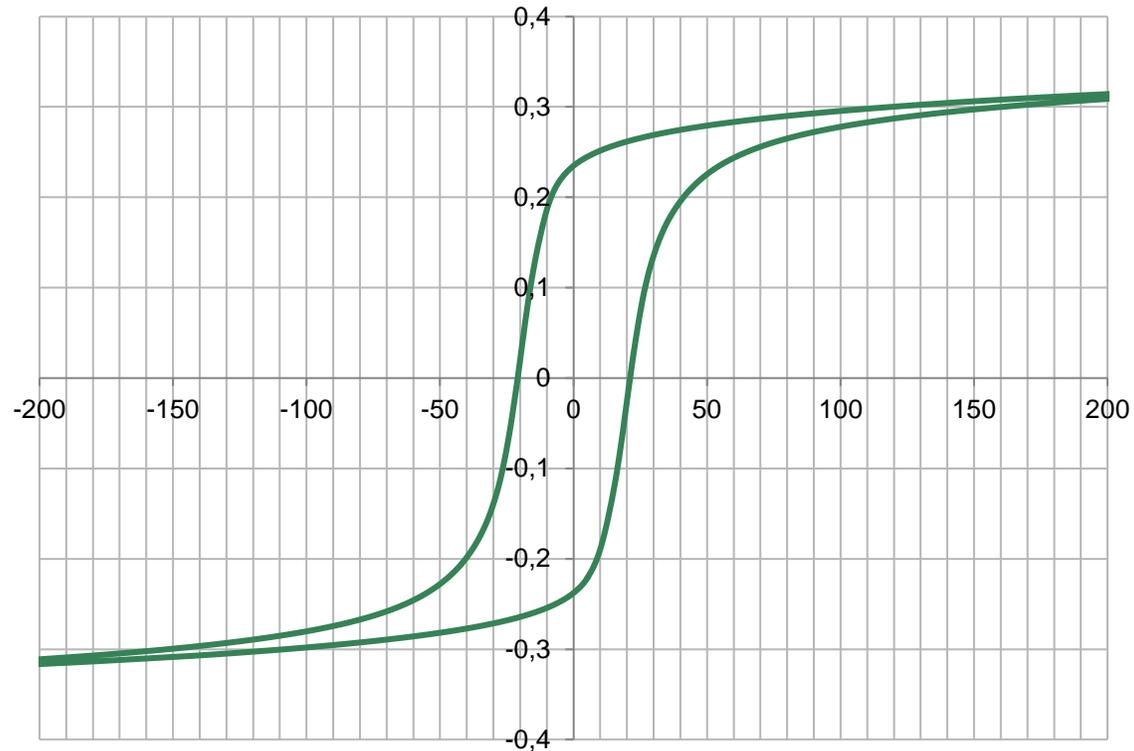


Kernmaterialien

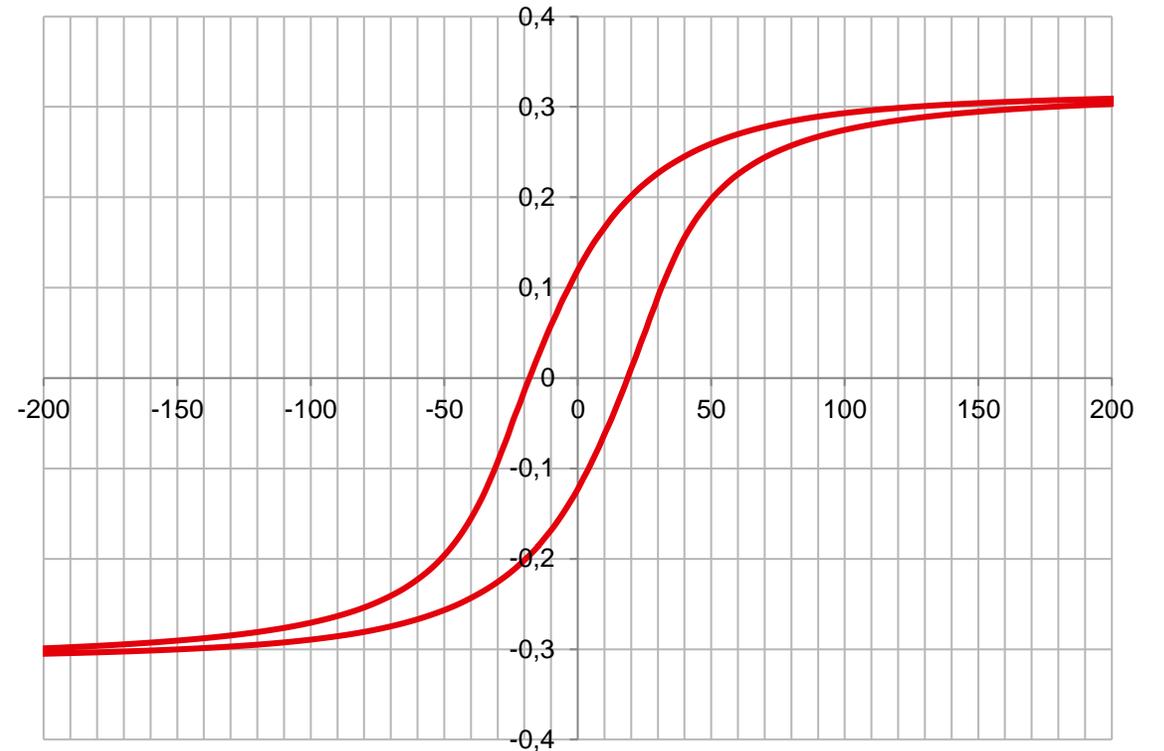
Magnetisierungsenergie



Kernmaterialien – Vergleich der Hysterese-Kurve

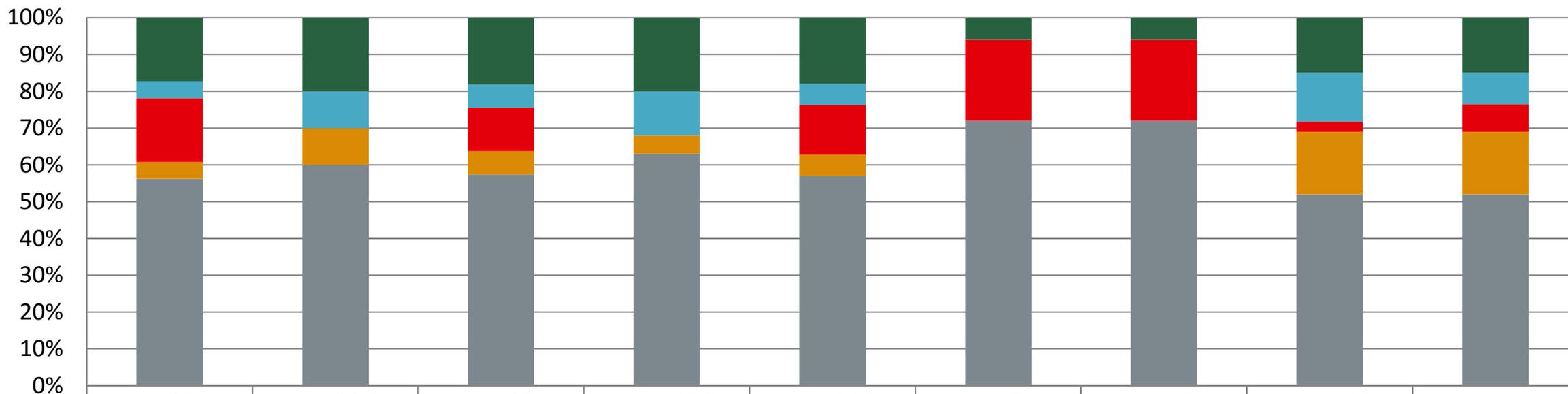


NiZn
Nickel Zink



MnZn
Mangan Zink

Materialzusammensetzung



	WE-PD 1	WE-PD 2	WE-TPC 1	WE-TPC 2	WE-SPC	WE-HCM	WE-HCF	WE-HCC	WE-FAMI
ZnO	17,30%	20%	18,13%	20%	17,95%	6%	6%	15%	15%
NiO	4,59%	10%	6,30%	12%	5,78%	0%	0%	13,28%	8,54%
Mn3O4	0%	0%	0%	0%	0%	22%	22%	0%	0%
MnO	17,32%	0%	11,87%	0%	13,49%	0%	0%	2,72%	7,46%
CuO	4,59%	10%	6,30%	5%	5,78%	0%	0%	17%	17%
Fe2O3	56,20%	60%	57,40%	63%	57%	72%	72%	52%	52%

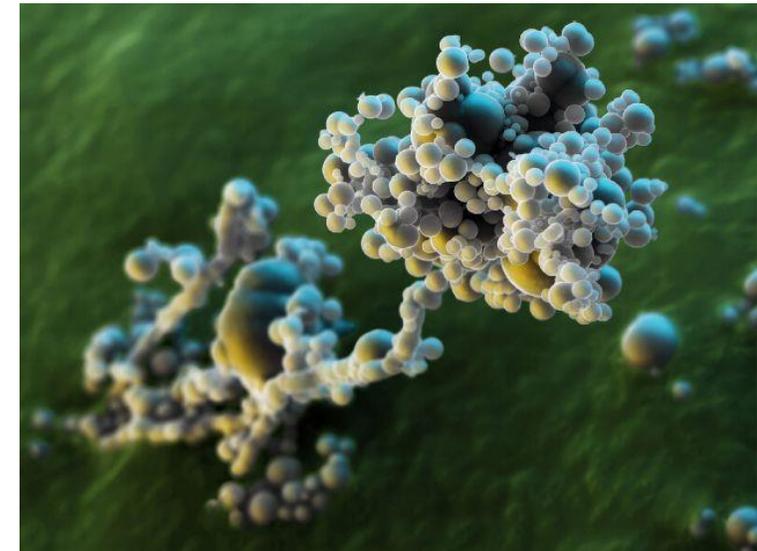
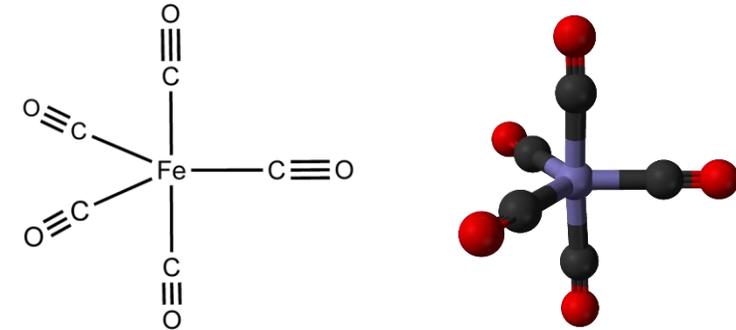
Vergleich Eisen / Ferrit

	Ferritmaterial	Eisenpulver
Material	Fe ₂ O ₃ , Zn, Ni / Mn	Fe (99%), Si, Al
μ	NiZn: 40 ~ 1500 MnZn: 300~ 20k	20 ~ 150
B_{sat}	NiZn: 0,1 – 0,3 T MnZn: 0,2 – 0,5 T	<1,5T
R	NiZn: mehrere M Ω /cm MnZn: mehrere k Ω /cm	5-10 Ω /cm
T_{Curie}	100...460°C	768°C

Carbonyleisenpulver (CIP)

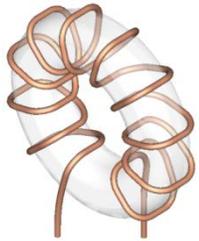
- Ausgangsmaterial: **Eisenpentacarbonyl** $\text{Fe}(\text{CO})_5$
- Nach Reduktion entsteht reines Eisen mit **sphärischer Partikelform** (einige μm im Durchmesser).
- Großtechnische Produktion durch BASF seit 1924
- Sphärische Partikelform erlaubt **hohe Packungsdichte**
- Isolationsschicht (FePO_4 , SiO_2) auf den Partikeln wirkt als **Wirbelstrombarriere** → Sehr geringe Kernverluste
- Bindemittel für den Zusammenhalt

- Konstante Permeabilität bis zu einigen MHz
- Sättigungsflussdichte: $>1\text{T}$



Quelle: BASF – The Chemical Company, 2012

Impedanz einer Ringspule mit Ferritkern



Air-coil impedance \underline{Z}_0



Ferrite permeability $\underline{\mu}_r$



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

Impedanz einer Ringspule mit Ferritkern

- Induktivität einer Ringspule mit rechteckförmigem Querschnitt

$$L_0 = \mu_0 * N^2 * \frac{h}{2\pi} * \ln\left(\frac{r_{au\beta en}}{r_{innen}}\right)$$

- Resistiver Anteil der Impedanz

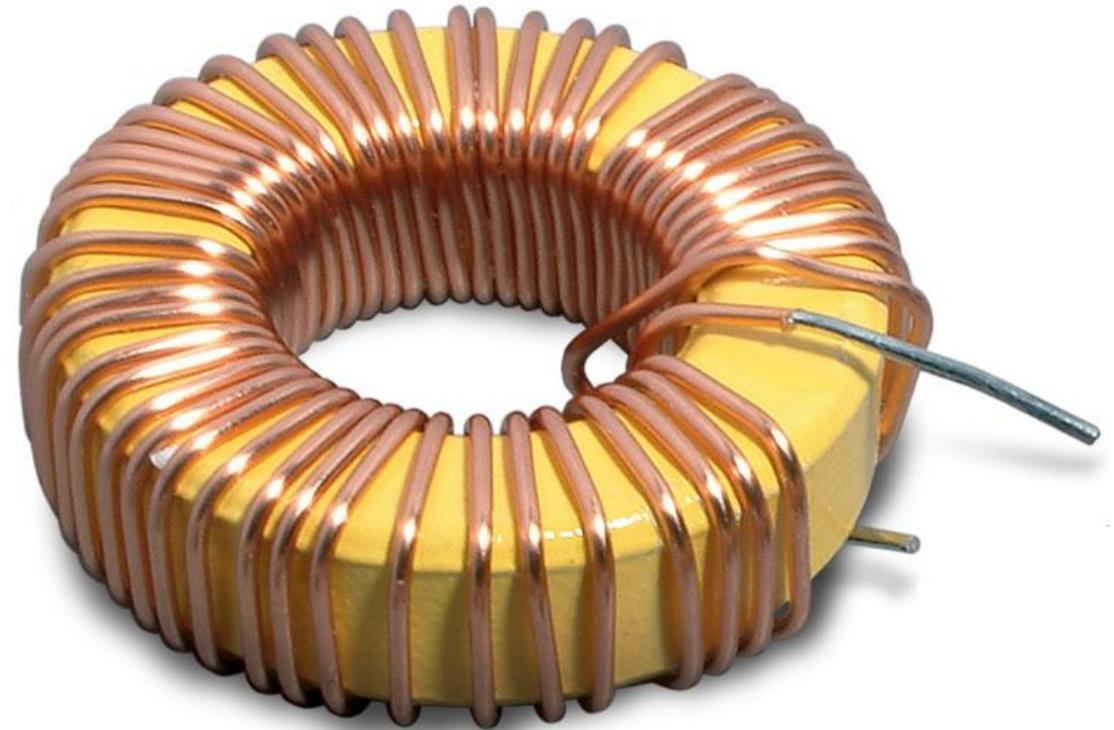
$$R(f) = 2\pi * f * \mu''(f) * L_0$$

- Induktiver Anteil der Impedanz

$$X_L(f) = 2\pi * f * \mu'(f) * L_0$$

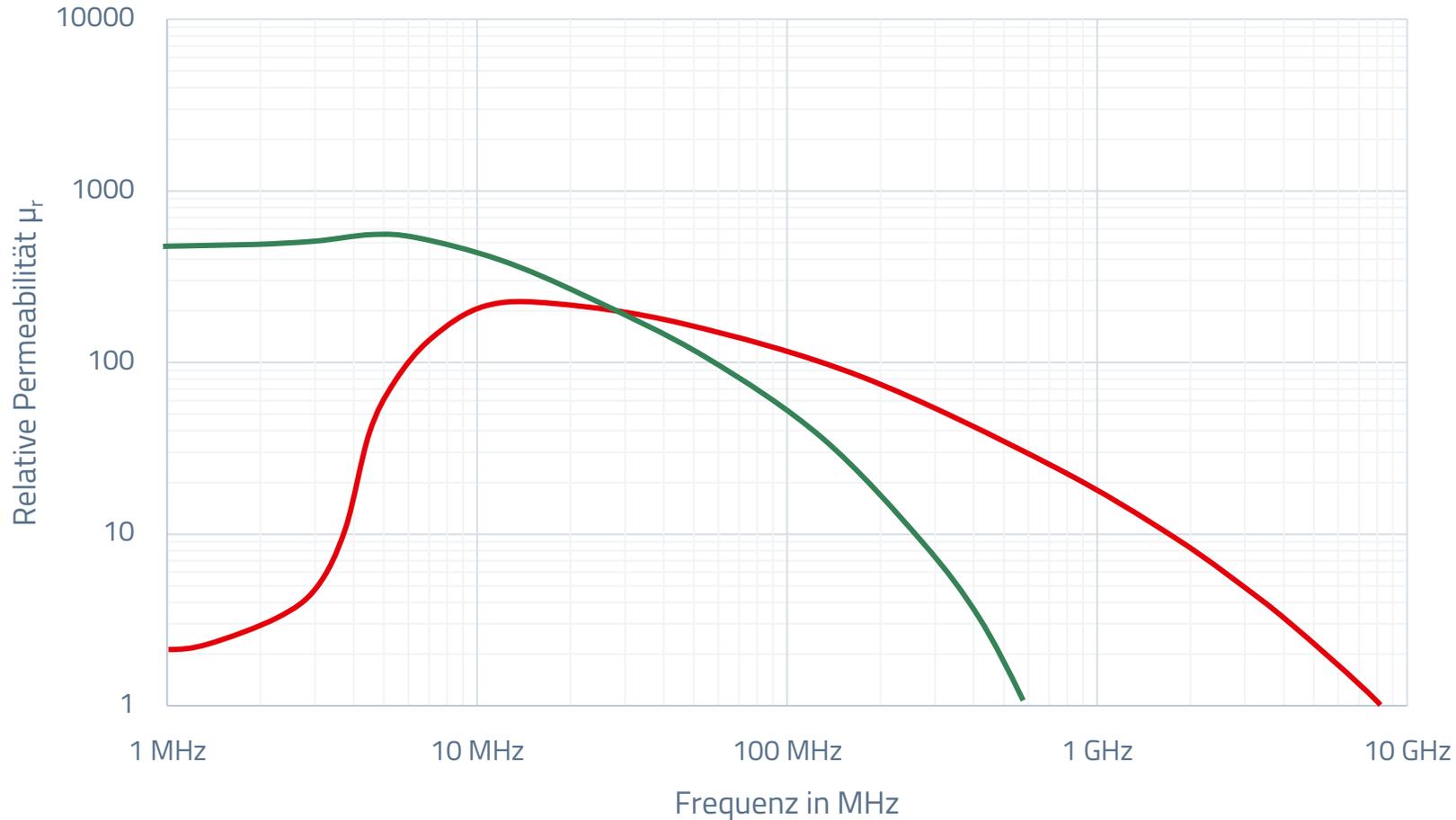
- **Kapazitiver Anteil der Impedanz**

Abnahme der Impedanz oberhalb des Resonanzmaximums



Permeabilität

Frequenzabhängigkeit



$$\bar{\mu} = \mu' - j \mu''$$

$$\bar{Z} = j \omega L_0 * (\mu' - j \mu'')$$

$$\bar{Z} = R + j X_L$$

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

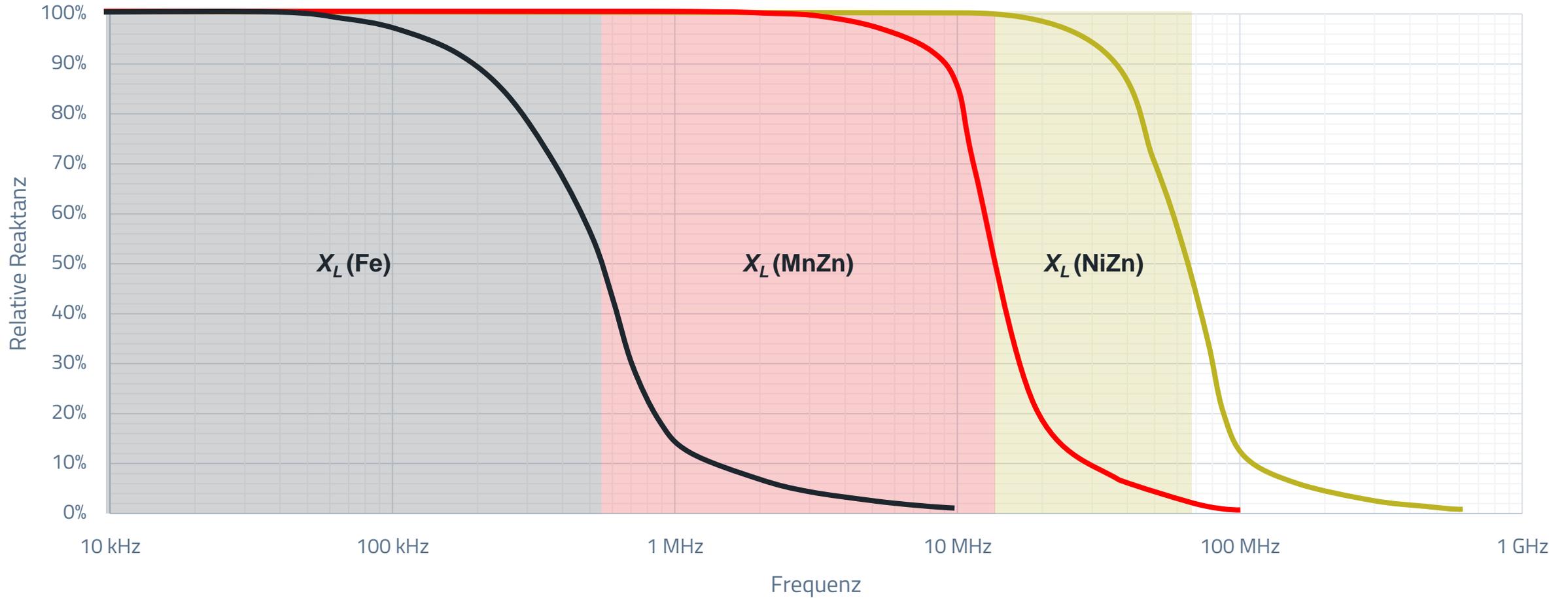
Frequenzabhängiger
Magnetisierungsanteil

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

Frequenzabhängiger Verlustanteil

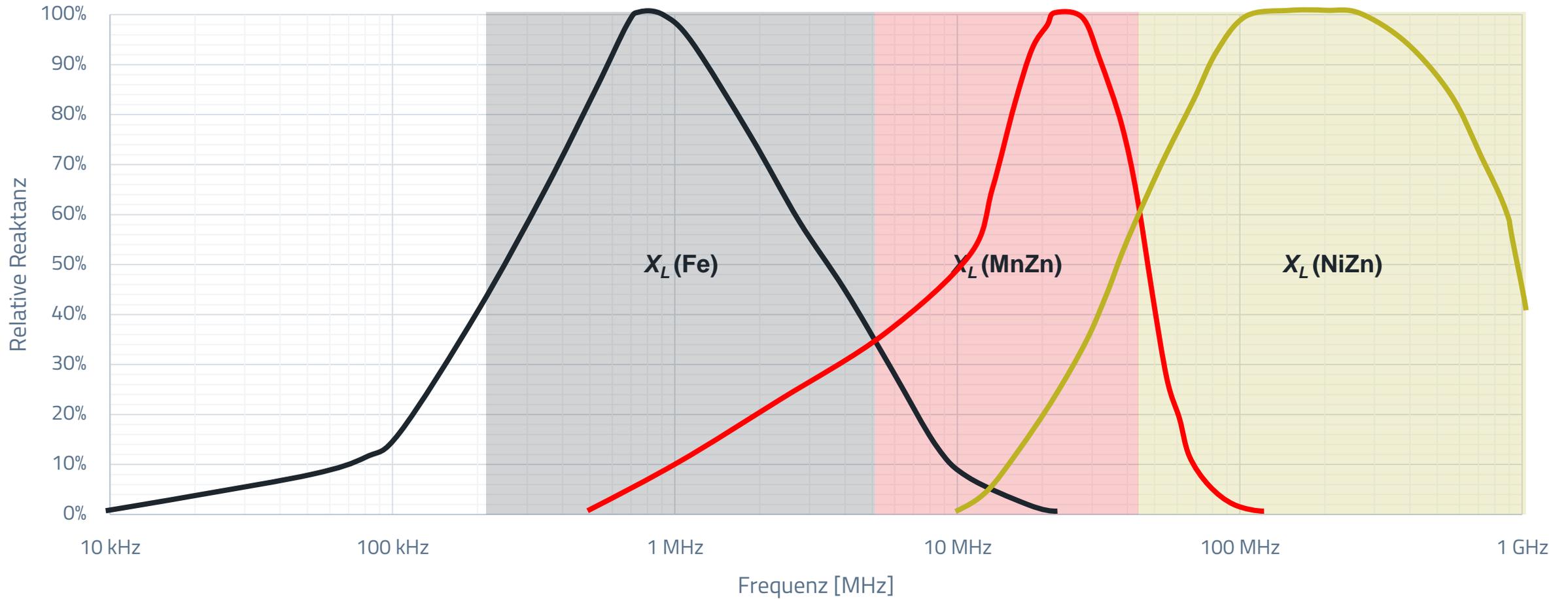
Permeabilität

Magnetisierungsanteil



Permeabilität

Verlustanteil



GEOMETRIE UND LUFTSPALT

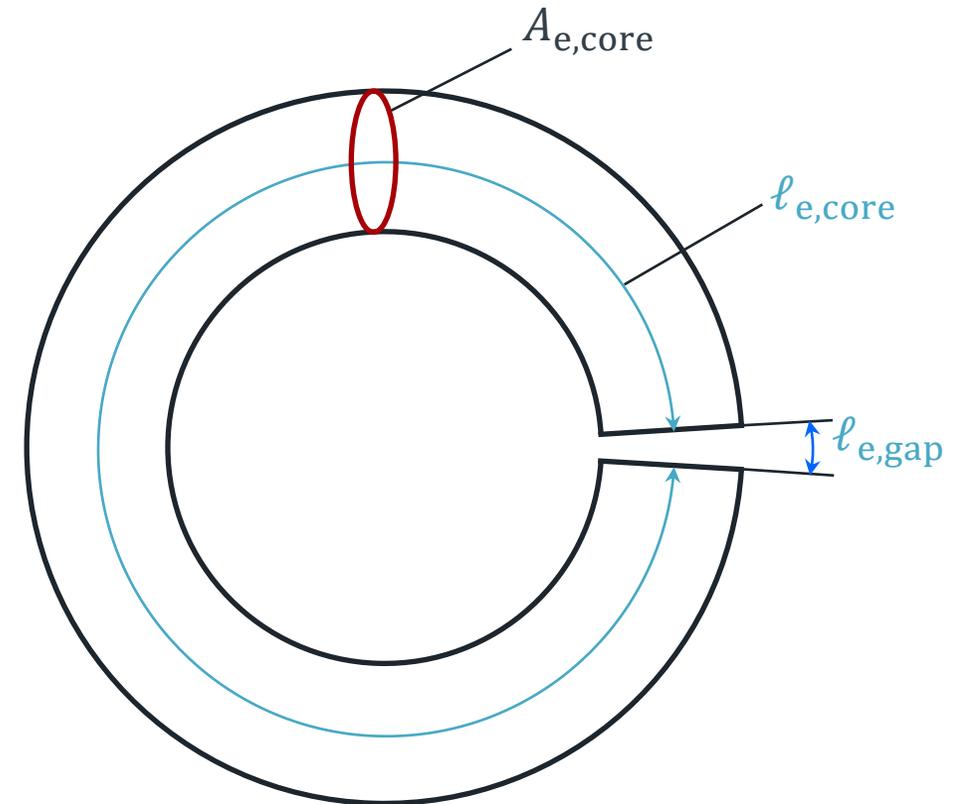
Effekt des Luftspaltes auf die Induktivität

- Mit einem größeren Luftspalt sinkt die effektive relative Permeabilität des Kerns...

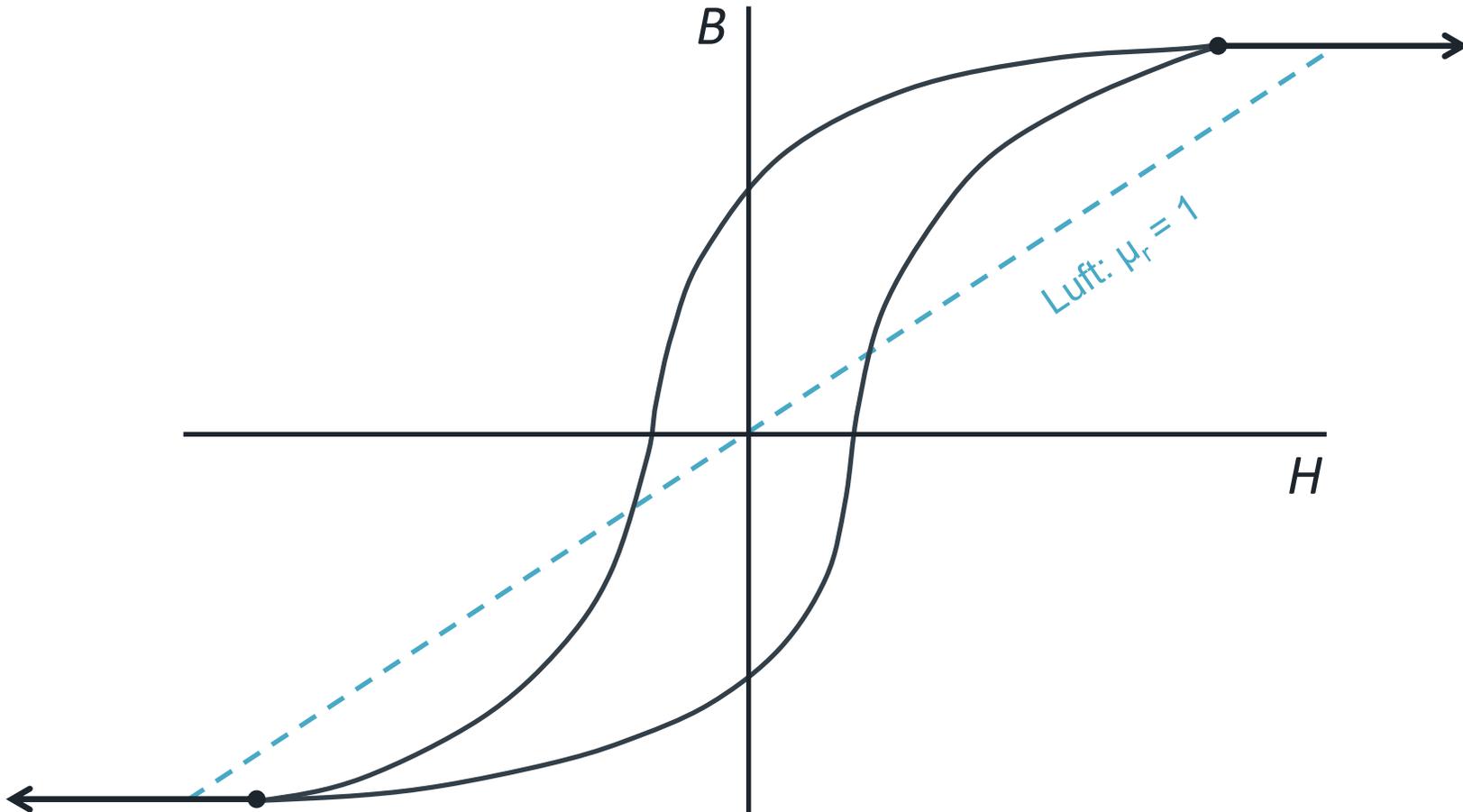
$$\mu_{r,e} = \frac{1}{\frac{\ell_{e,gap}}{\ell_{e,core}} + \frac{1}{\mu_{r,core}}}$$

- ... und damit auch die Induktivität der Spule

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_{r,e} \cdot A_{e,core}}{\ell_{e,core}}$$



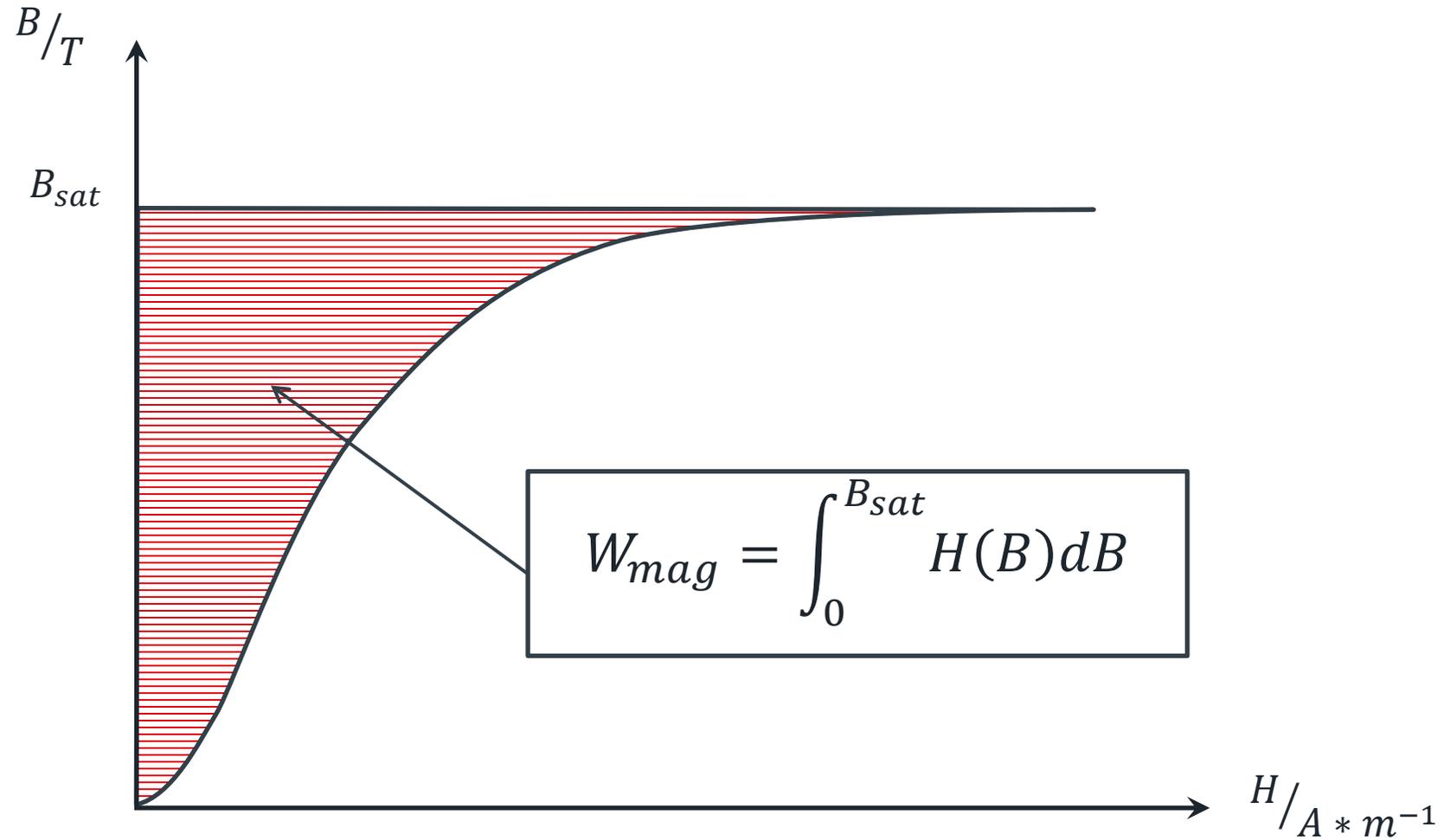
Effekt des Luftspaltes auf die Induktivität



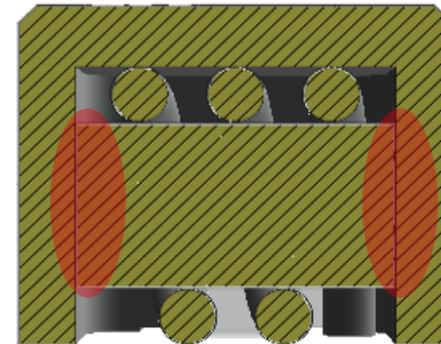
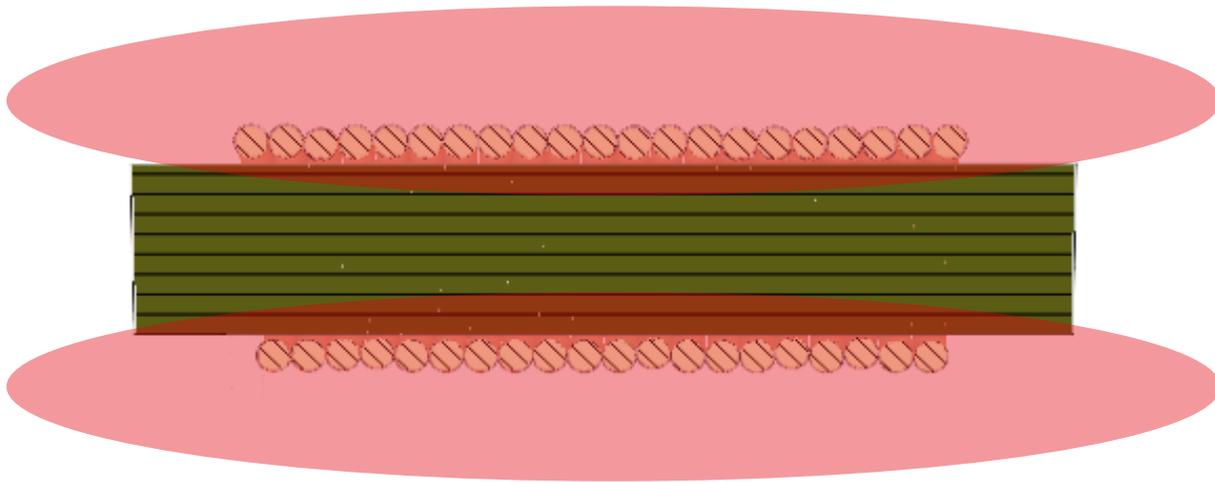
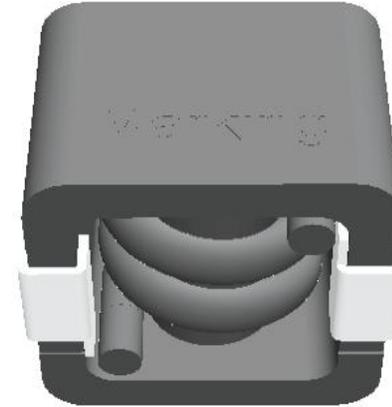
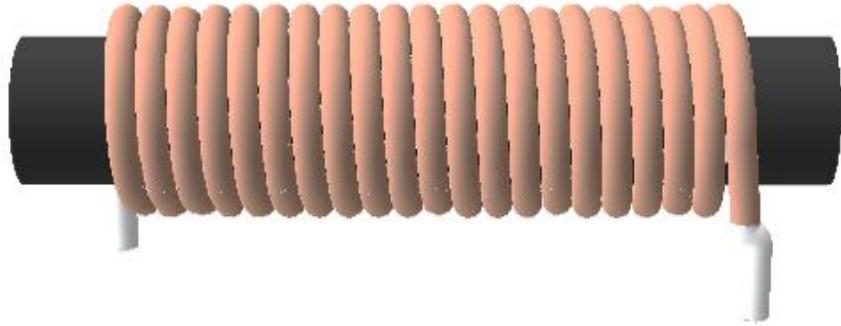
Der Luftspalt

- verringert die effektive Permeabilität des Kerns
- senkt Induktivität
- erlaubt eine Sättigung erst bei höheren Feldstärken
- erhöht das Speichervermögen von magnetischer Energie
- reduziert die Empfindlichkeit gegen DC-Vormagnetisierung

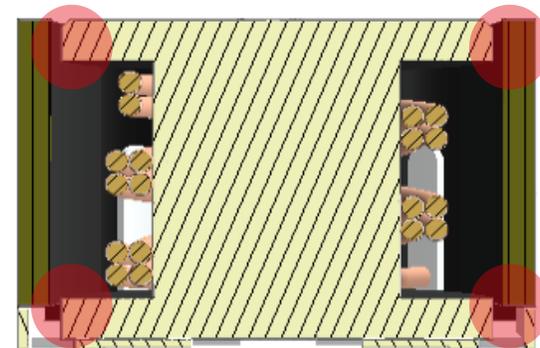
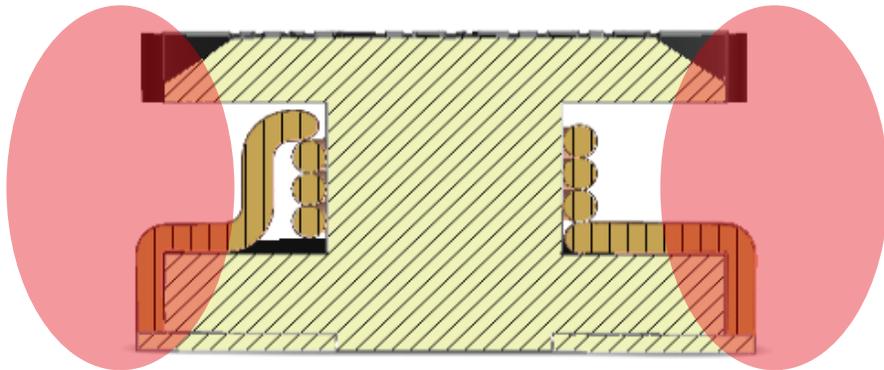
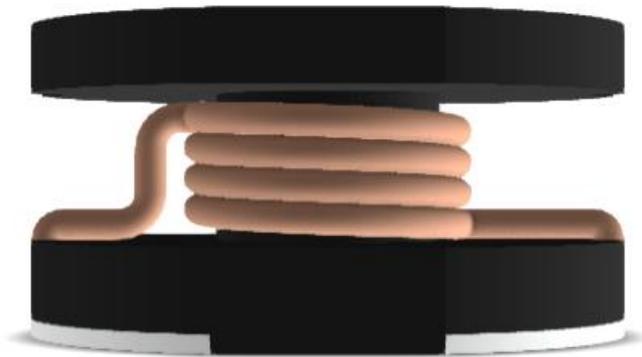
Kernmaterialien – Magnetisierungsenergie



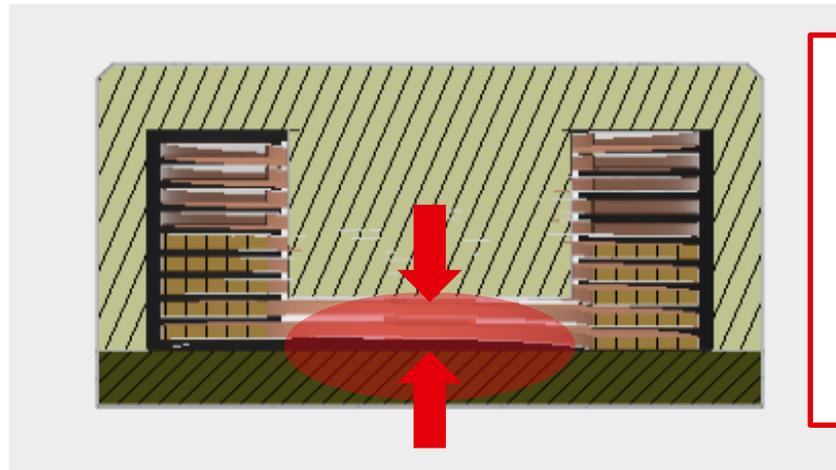
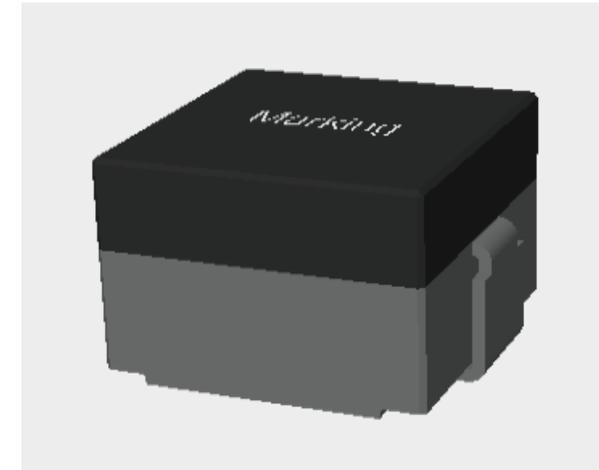
Kerne mit diskretem Luftspalt



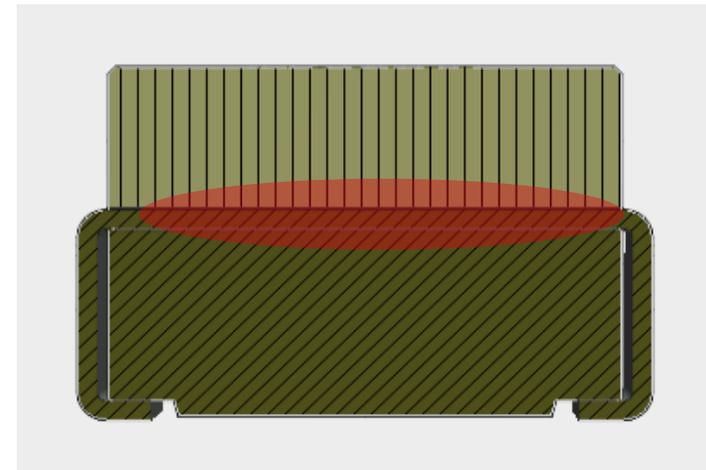
Kerne mit diskretem Luftspalt



Kerne mit diskretem Luftspalt



Einstellen der Induktivität durch Veränderung des Luftspalts



Kerne mit verteiltem Luftspalt



SÄTTIGUNGSSTROM

Wie ist der Sättigungsstrom definiert?



Kein Standard!

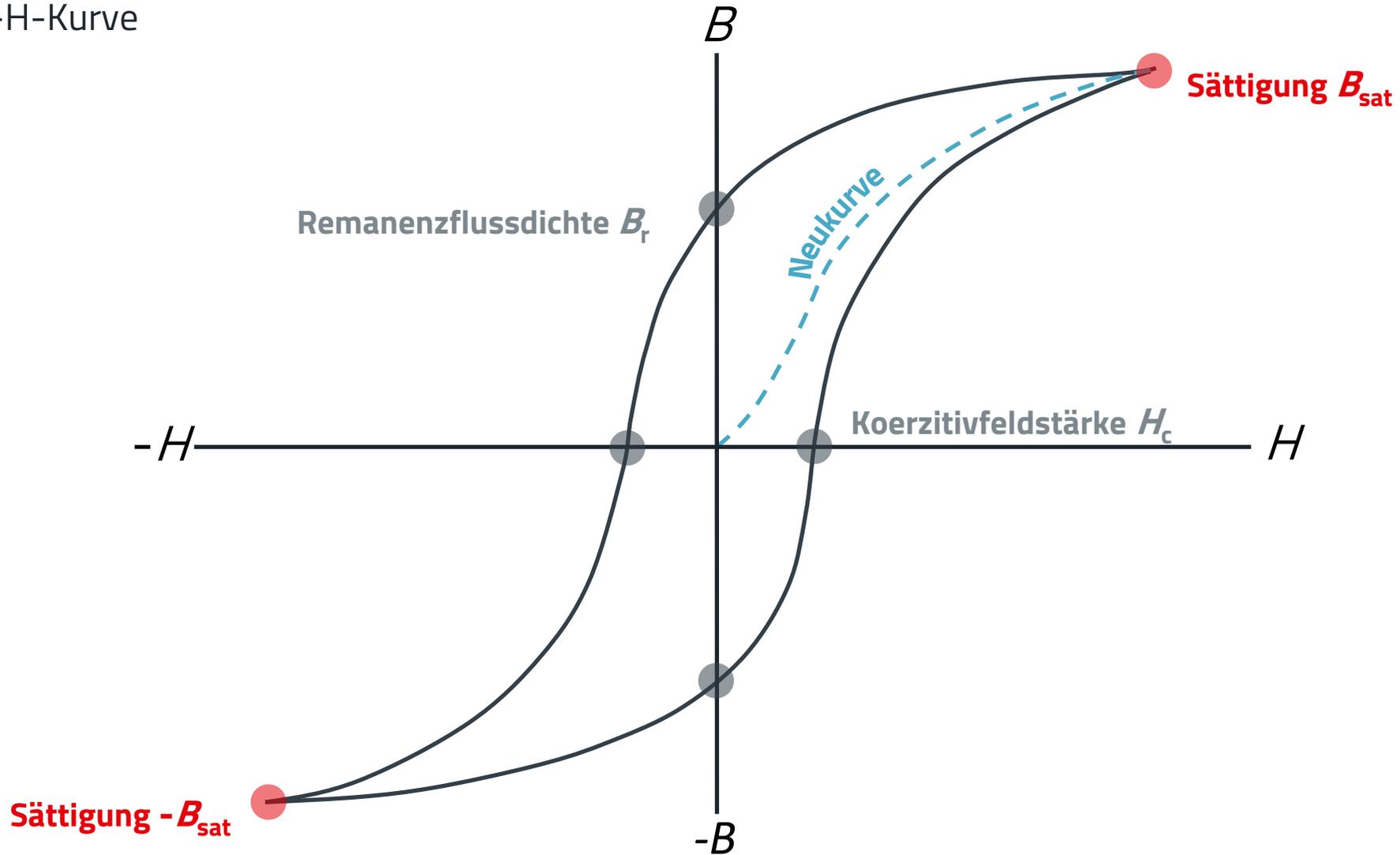
Sättigungsstrom

- Der Sättigungsstrom ist ein Gleichstrom, der zu einer bestimmten Reduktion der Induktivität führt

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	1 kHz/ 250 mV	33	μH	$\pm 20\%$
Rated Current	I_R	$\Delta T = 40 \text{ K}$	1.13	A	max.
Saturation Current	I_{SAT}	$ \Delta L / L < 10 \%$	1.4	A	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	140	m Ω	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	170	m Ω	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		13	MHz	typ.
Operating Voltage	V		120	V	max.

Kernmaterialien

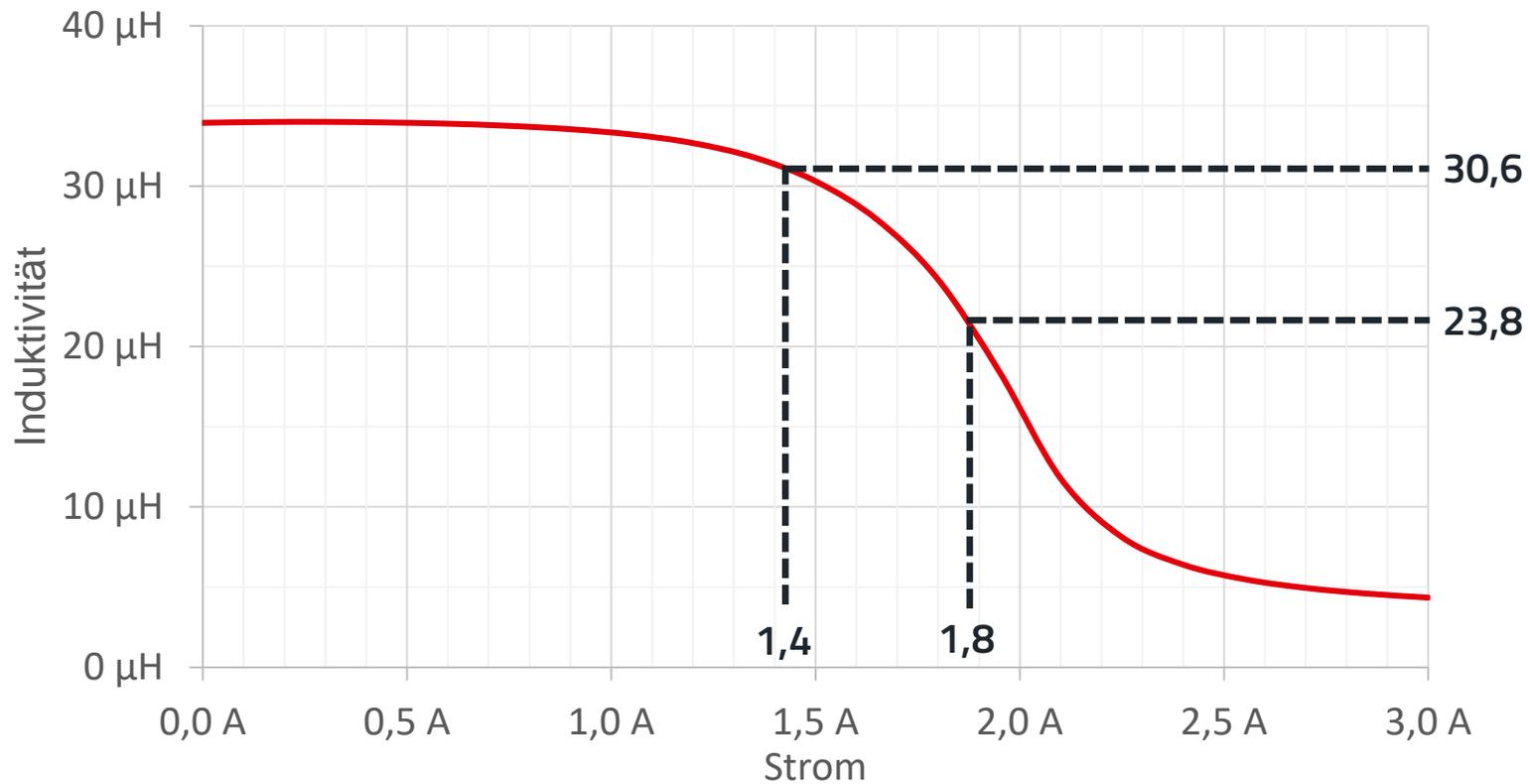
Hysterese, B-H-Kurve



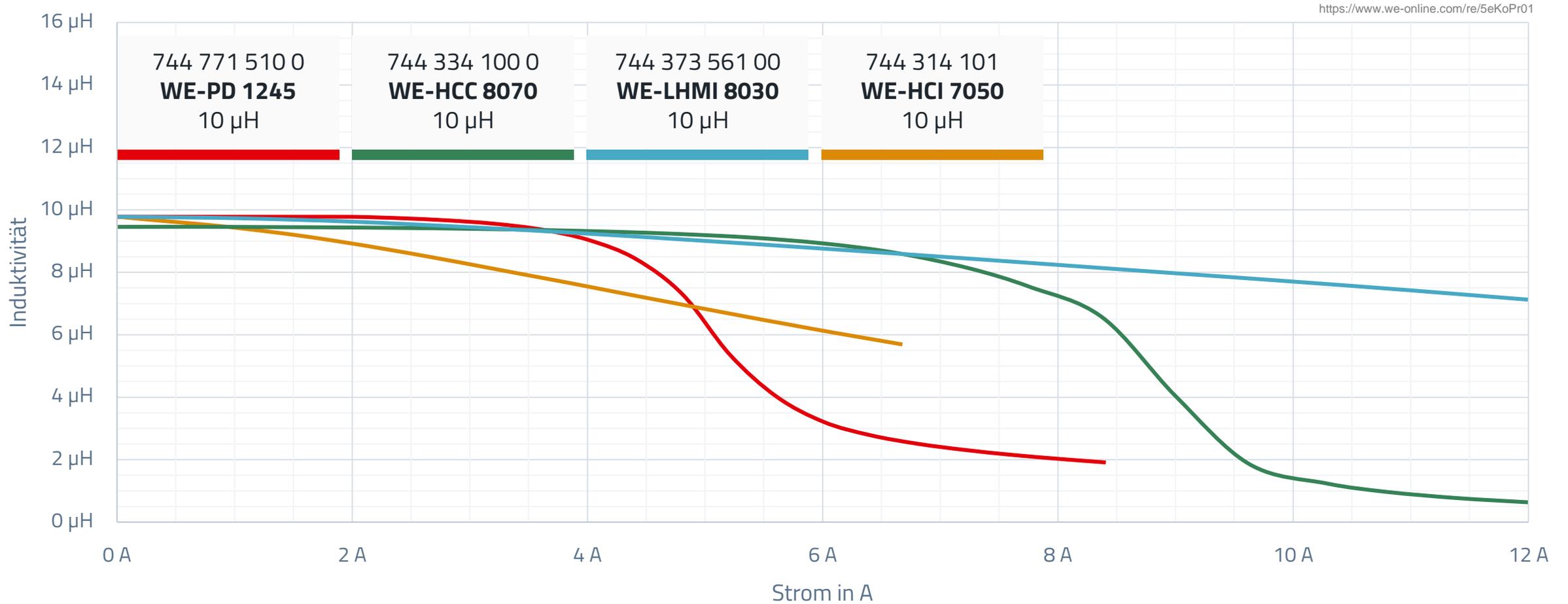
Sättigungsstrom

Beispiel

WE-PD 7345, $L_{nom} = 33\mu H$, $I_{sat} = 1,4A$, $\vartheta_a = 25^\circ C$:



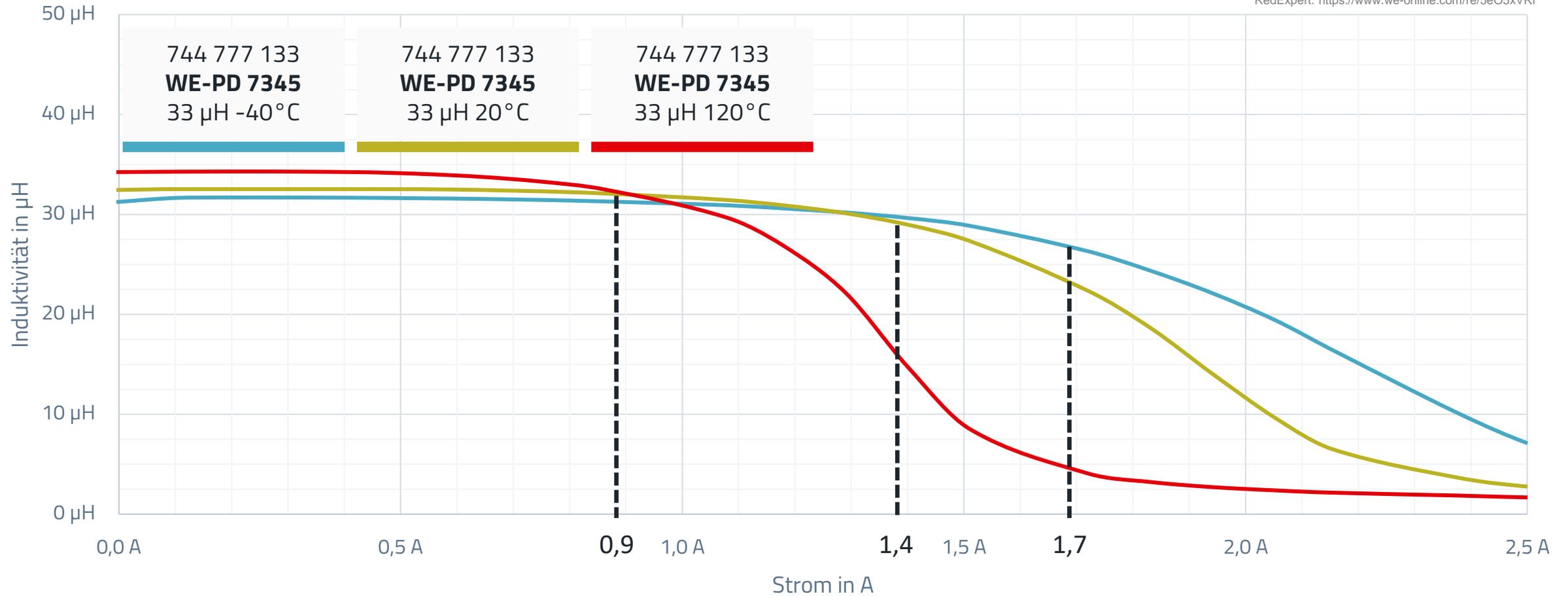
Harte und weiche Sättigung, Luftspalt



Temperaturverhalten der Sättigung

WE-PD – NiZn

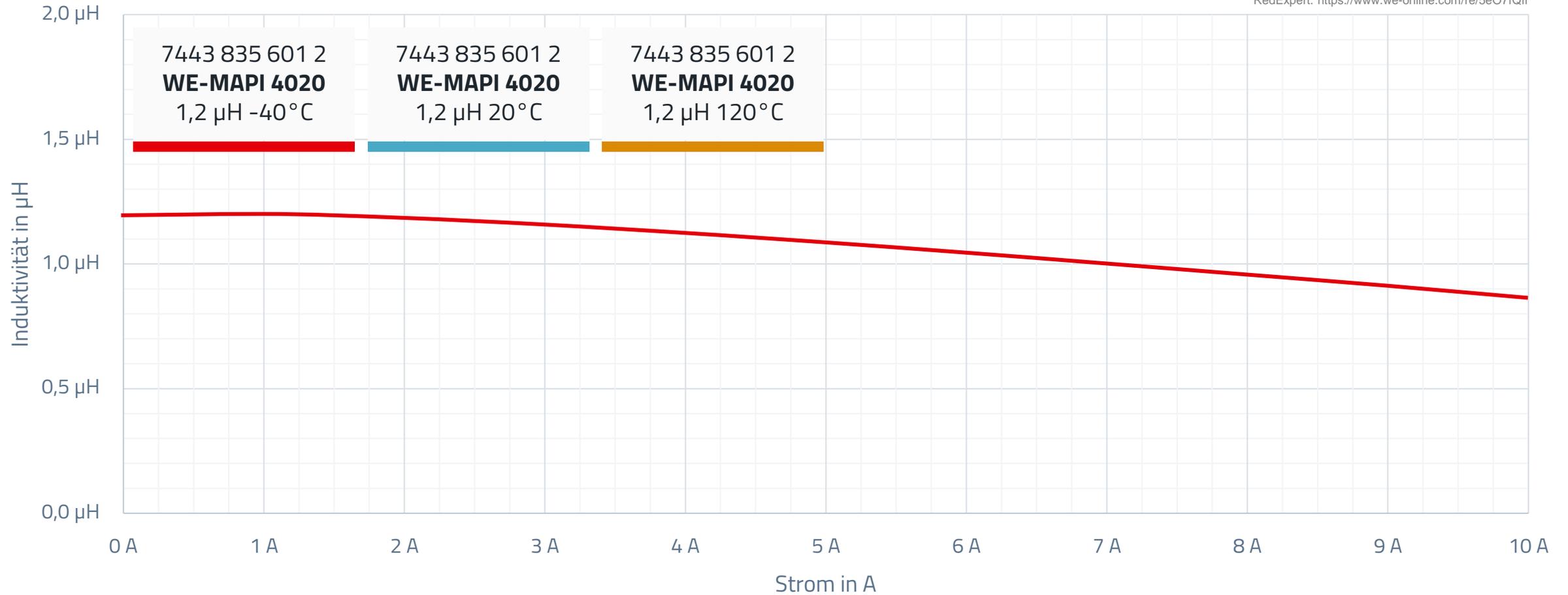
RedExpert: <https://www.we-online.com/re/5e05xVRr>



Temperaturverhalten der Sättigung

WE-MAPI - CIP

RedExpert: <https://www.we-online.com/re/5e07fQfI>



NENNSTROM

Wie ist der Nennstrom definiert?



Kein Standard!
(...bisher)

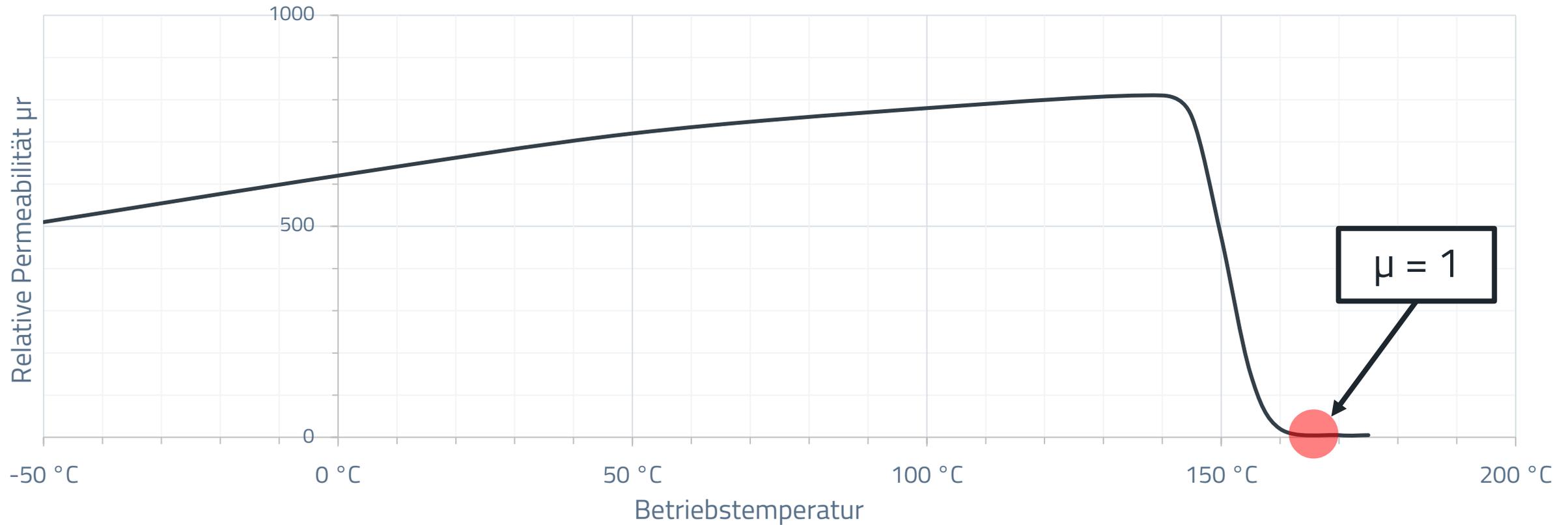
Nennstrom

- Der Nennstrom ist ein Gleichstrom, der die Spule zu einer bestimmten Eigenerwärmung treibt

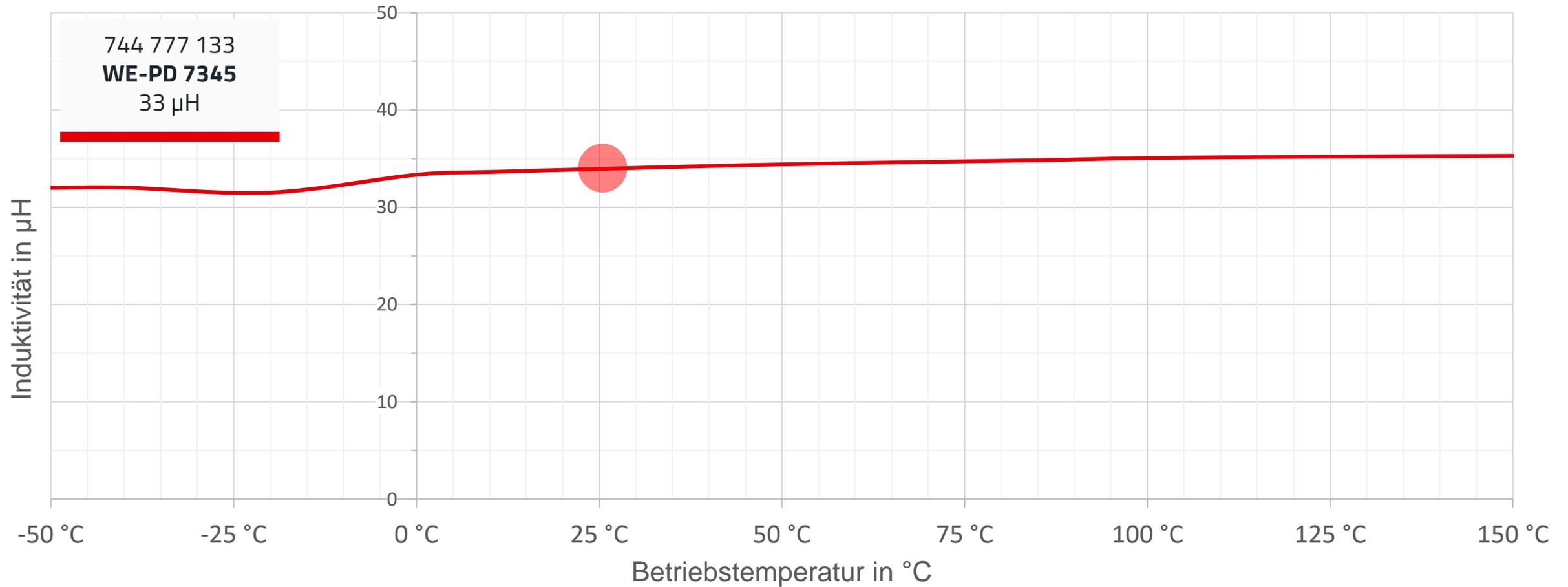
Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	1 kHz/ 250 mV	33	μH	$\pm 20\%$
Rated Current	I_R	$\Delta T = 40 \text{ K}$	1.13	A	max.
Saturation Current	I_{SAT}	$ dL/dI < 10 \%$	1.4	A	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	140	m Ω	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	170	m Ω	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		13	MHz	typ.
Operating Voltage	V		120	V	max.

Temperaturverhalten der Permeabilität

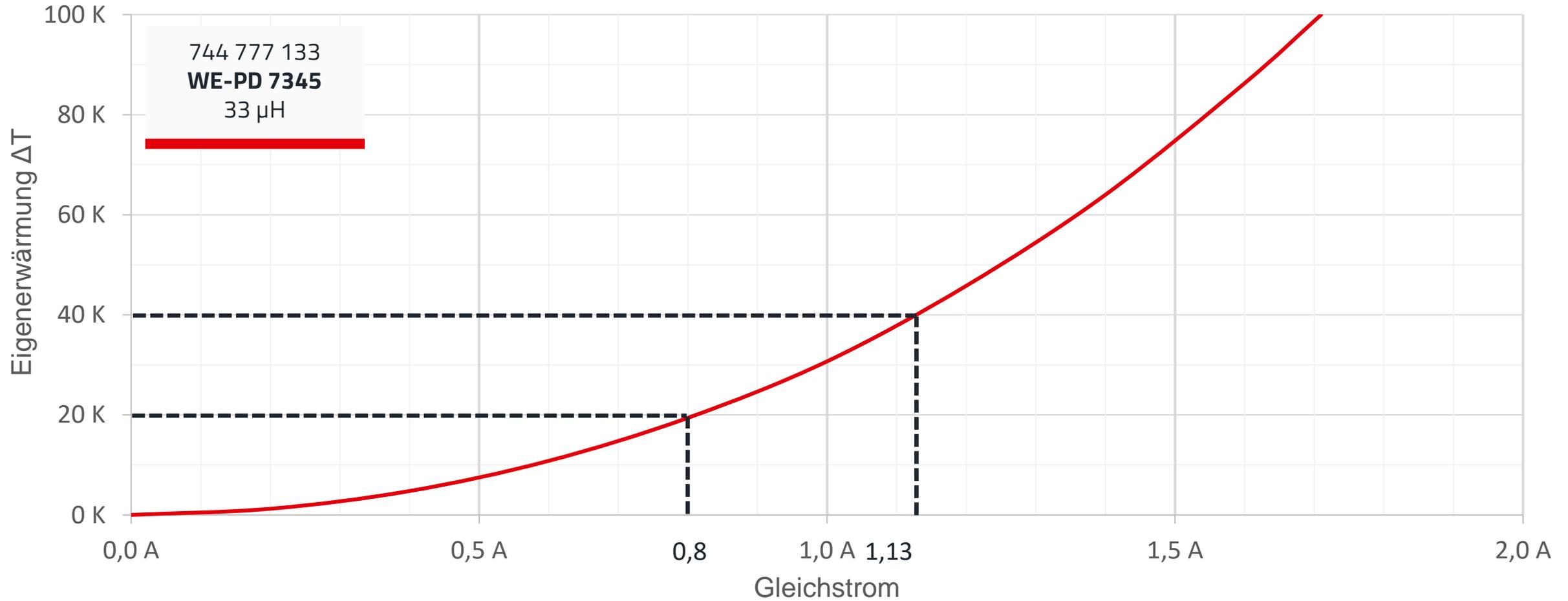
Bei Erreichen der Curie-Temperatur verliert der Ferrit seine ferromagnetischen Eigenschaften



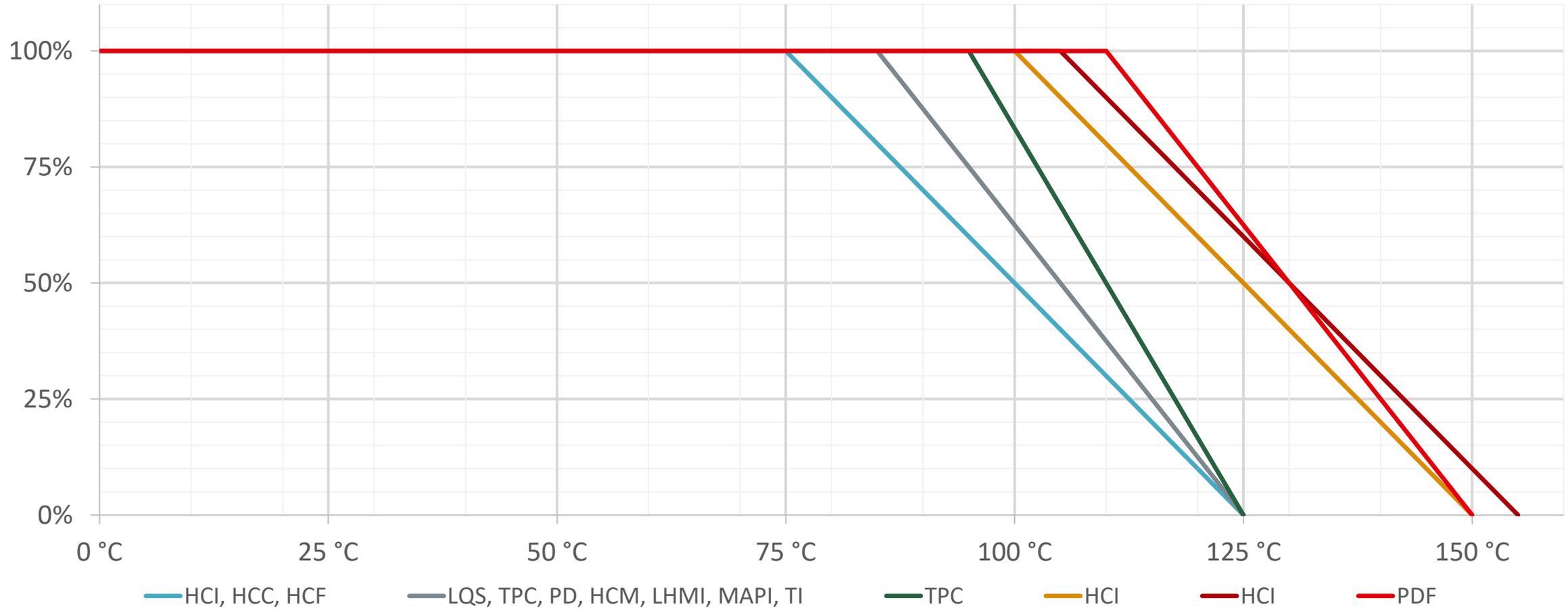
Temperaturverhalten der Induktivität



Nennstrom – Beispiel



Nennstrom – Derating



Vergleich von Datenblättern

Electrical Specifications

Inductance		Q (Typ.)	Test Freq. (MHz)	SRF Typ. (MHz)	RDC Max. (mΩ)	I rms Max. (A)	I sat Typ. (A)	**K- Factor
(μH)	Tol. (%)							
47.0	± 20	22	2.52	7.63	86.0	2.60	2.50	20

SRR1260-2R4Y	2.4	± 30	18	7.96	63.80	11.5	7.80	8.00	100
SRR1260-3R3Y	3.3	± 30	20	7.96	40.00	12.0	7.60	7.80	74
SRR1260-3R5Y	3.5	± 30	22	7.96	37.60	13.0	7.50	7.60	74
SRR1260-4R7Y	4.7	± 30	19	7.96	36.70	15.5	6.80	7.00	65
SRR1260-5R6Y	5.6	± 30	19	7.96	33.00	16.2	6.70	6.90	58
SRR1260-6R1Y	6.1	± 30	21	7.96	29.80	17.0	6.60	6.80	58
SRR1260-6R8Y	6.8	± 30	20	7.96	28.20	18.0	6.30	6.50	53
SRR1260-7R6Y	7.6	± 30	16	7.96	27.90	19.0	6.00	6.20	53
SRR1260-8R2Y	8.2	± 30	18	7.96	24.00	19.5	5.70	5.80	48
SRR1260-100M	10.0	± 20	32	2.52	21.00	20.0	5.50	5.50	44
SRR1260-120M	12.0	± 20	27	2.52	19.40	23.0	5.20	5.00	41
SRR1260-150M	15.0	± 20	25	2.52	17.60	27.0	5.00	4.60	36
SRR1260-180M	18.0	± 20	28	2.52	15.50	36.0	4.20	3.90	32
SRR1260-220M	22.0	± 20	29	2.52	13.40	43.0	4.00	3.70	30
SRR1260-270M	27.0	± 20	26	2.52	12.70	45.0	3.60	3.30	28
SRR1260-330M	33.0	± 20	27	2.52	9.97	60.0	3.00	2.80	24
SRR1260-390M	39.0	± 20	23	2.52	10.40	70.0	2.80	2.70	22
SRR1260-470M	47.0	± 20	22	2.52	7.63	86.0	2.60	2.50	20
SRR1260-560M	56.0	± 20	24	2.52	7.92	100.0	2.30	2.20	18
SRR1260-680M	68.0	± 20	22	2.52	7.43	110.0	2.10	2.10	17

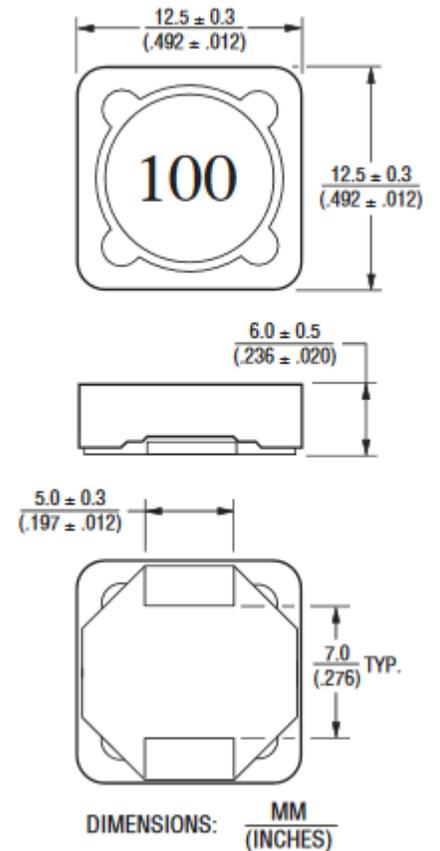
General Specifications

Resistance to Soldering Heat
..... 260 °C for 10 sec.
Temperature Rise
..... 40 °C max. at rated I rms
Inductance Drop 25 % typ. at I sat
Moisture Sensitivity Level 1
ESD Classification (HBM) N/A

Materials

Core Ferrite DR and RI
Wire Enameled copper wire
Terminal Cu/Ni/Sn
Packaging 600 pcs. per reel

Product Dimensions



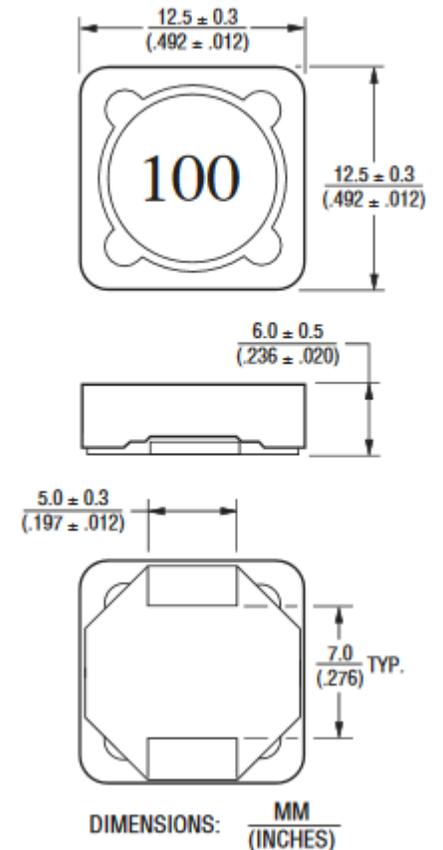
Vergleich von Datenblättern

Inductance		Q (Typ.)	Test Freq. (MHz)	SRF Typ. (MHz)	RDC Max. (mΩ)	I _{rms} Max. (A)	I _{sat} Typ. (A)	**K- Factor
(μH)	Tol. (%)							
47.0	± 20	22	2.52	7.63	86.0	2.60	2.50	20

Electrical Properties:

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	1 kHz/ 250 mV	47	μH	±20%
Rated Current	I _R	ΔT = 40 K	2.21	A	max.
Saturation Current	I _{SAT}	ΔL/L < 10 %	2.6	A	typ.
DC Resistance	R _{DC}	@ 20 °C	72	mΩ	typ.
DC Resistance	R _{DC}	@ 20 °C	75	mΩ	max.
Self Resonant Frequency	f _{res}		9.2	MHz	typ.
Operating Voltage	V		120	V	max.

Product Dimensions



Greatest Hits

I rated current indicates the current when inductivity drop of 25% max related to the unloaded inductivity or when temperature raise $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ($T_a=20^{\circ}\text{C}$) whichever is lower

- (1) Open Circuit Inductance Test Parameters:
100KHz, 0.25Vrms, 0.0Adc.
- (2) RMS current for an approximate ΔT of 40°C without core loss. It is recommended that the temperature of the part not exceed 125°C .
- (3) Peak current for approximate 30% roll off at 20°C .
- (4) DCR limits @ 20°C .
- (5) Applied Volt-Time product (V- μS) across the inductor. This value represent the applied V- μS at 100KHz necessary to generate a core loss equal to 10% of the total losses for 40°C .

Irms Testing

Irms testing was performed on 0.75 inch wide \times 0.25 inch thick copper traces in still air.

Temperature rise is highly dependent on many factors including pcb land pattern, trace size, and proximity to other components. Therefore temperature rise should be verified in application conditions.

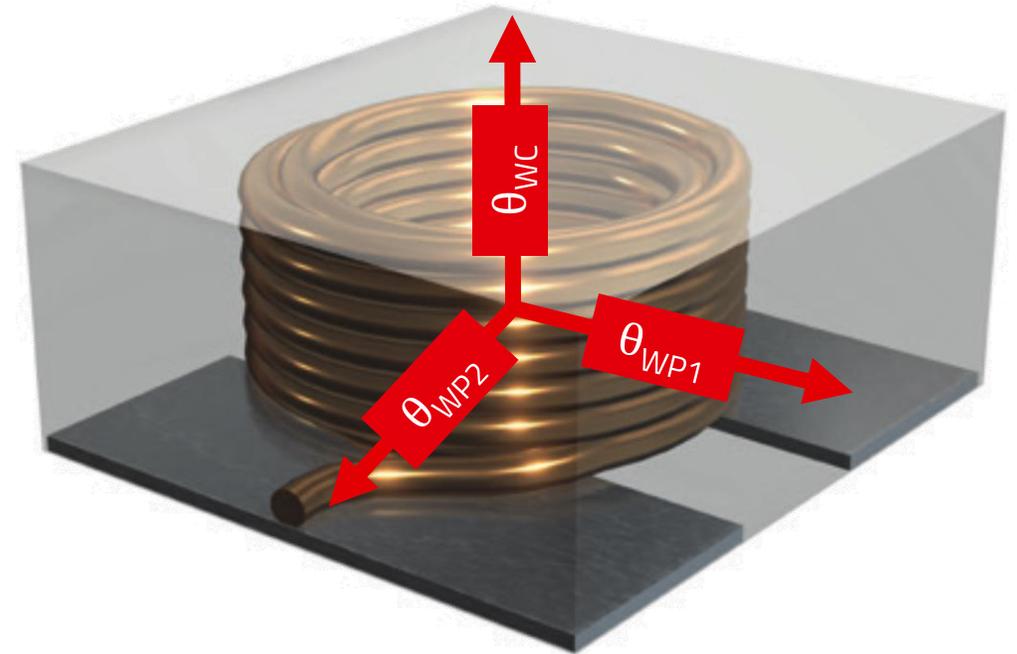
MESSUNG DES NENNSTROMS

Application Note ANP096

Bisherige Situation

Kein Standard

- Unterschiedliche Messmethoden liefern verschiedene Ergebnisse
- Thermische Widerstände beeinflussen das Ergebnis:
 - θ_{WC} – Winding to Core
 - Wärmestrahlung
 - Konvektion
 - θ_{WP} – Winding to Pad
 - Wärmeleitung
- Die Folge: Die Nennstromwerte verschiedener Hersteller sind nicht vergleichbar



Einfluss der Messmethoden auf die Ergebnisse

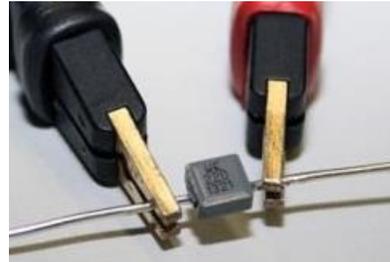
Beispiel: WE-LHMI 744 373 460 68 in unterschiedlichen Messaufbauten

Große Messklemmen



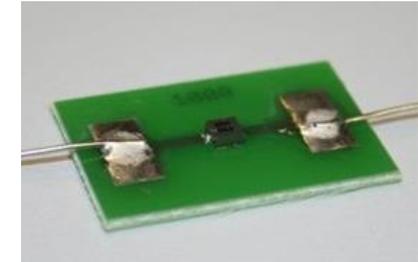
- Draht an Induktivität gelötet
 - Große Wärmestrahlung und Konvektion in alle Richtungen
 - Wärmeleitung an die Klemmen,
 - Kühlförperfunktion
- 30,9 K @ 3,4 A

Kleine Messklemmen



- Draht an Induktivität gelötet
 - Große Wärmestrahlung und Konvektion in alle Richtungen
 - Weniger Wärmeleitung an die Klemmen
- 35,8 K @ 3,4 A

Würth Elektronik Methode

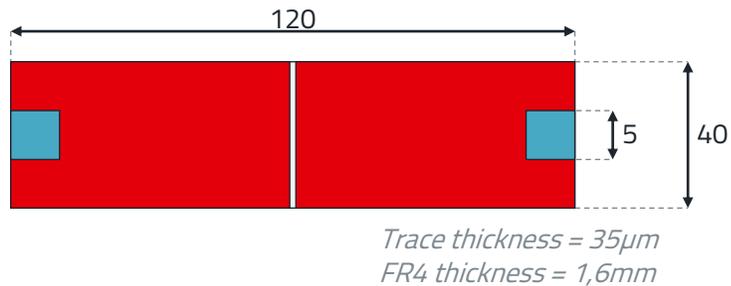


- Induktivität auf Platine gelötet
 - Praxisnahe Platinenstärke und Kupferbahnen
 - Realistische Wärmeübertragung, vergleichbar mit Standard Layouts
- 40,0 K @ 3,4 A

Bisheriges Messverfahren

Messanordnung in Anlehnung an EN 60512-5-2 (Steckverbinder)

- Induktivität auf standardisierte Testplatine gelötet

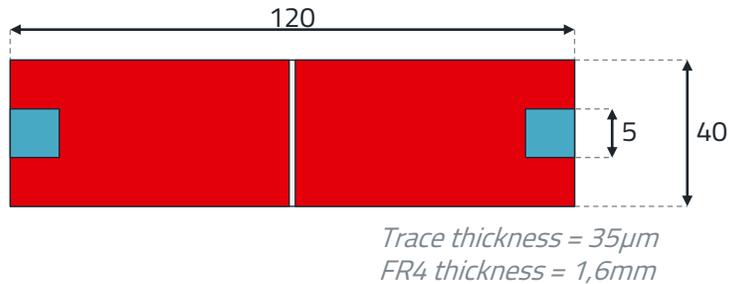


- Abgeschlossenes Gehäuse, um Konvektion zu vermeiden
- Aufprägen des Gleichstroms
- Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera
- Loggen des Messpunkts bei stabiler Temperatur (Schwankung < 1 K /min)
- Schrittweise Erhöhung bis zur Temperaturgrenze

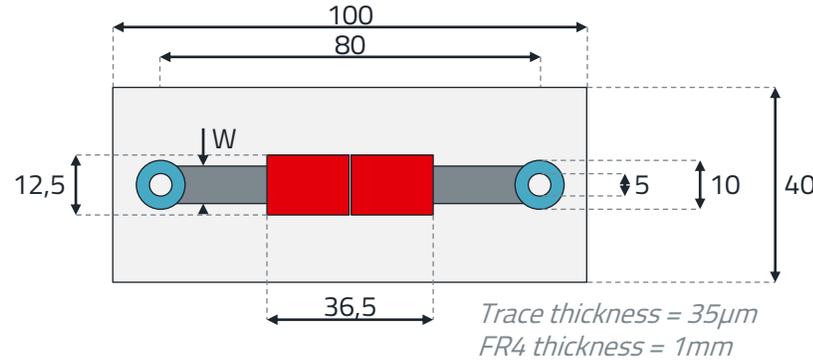


Neues Verfahren nach IEC 62024-2:2020

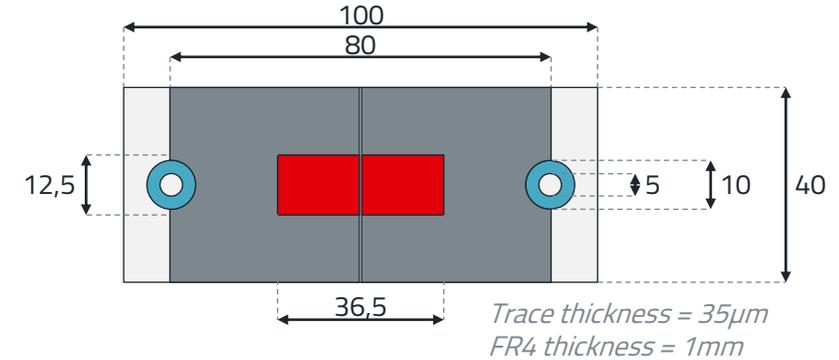
Vergleich der alten und neuen Messmethode



WE Legacy PCB

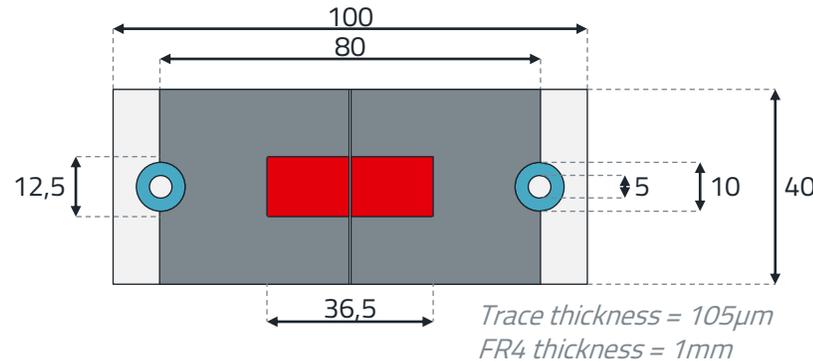


PCB Class A

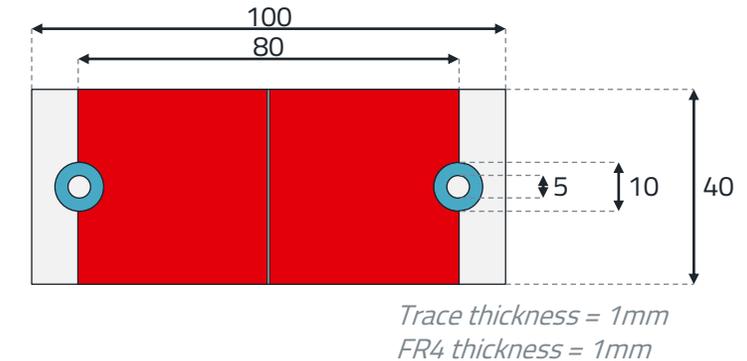


PCB Class B

- Lötbarer Fläche
- Nicht-lötbarer Fläche
- FR 4
- Terminal Pad



PCB Class C

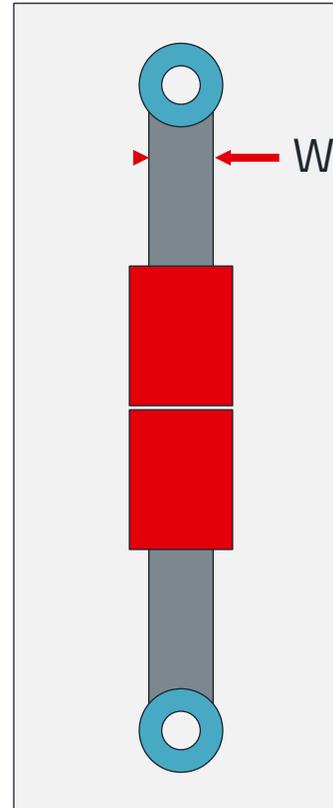


PCB Class D

Standard PCBs nach IEC 62024-2:2020

Besonderheit PCB Class A

- PCB Class A ist die kleinste Testplatine
- Die Breite des Leiterzugs wird je nach erwartetem Nennstrom angepasst
- Je größer der Strom desto breiter wird auch der Leiterzug in der realen Applikation sein

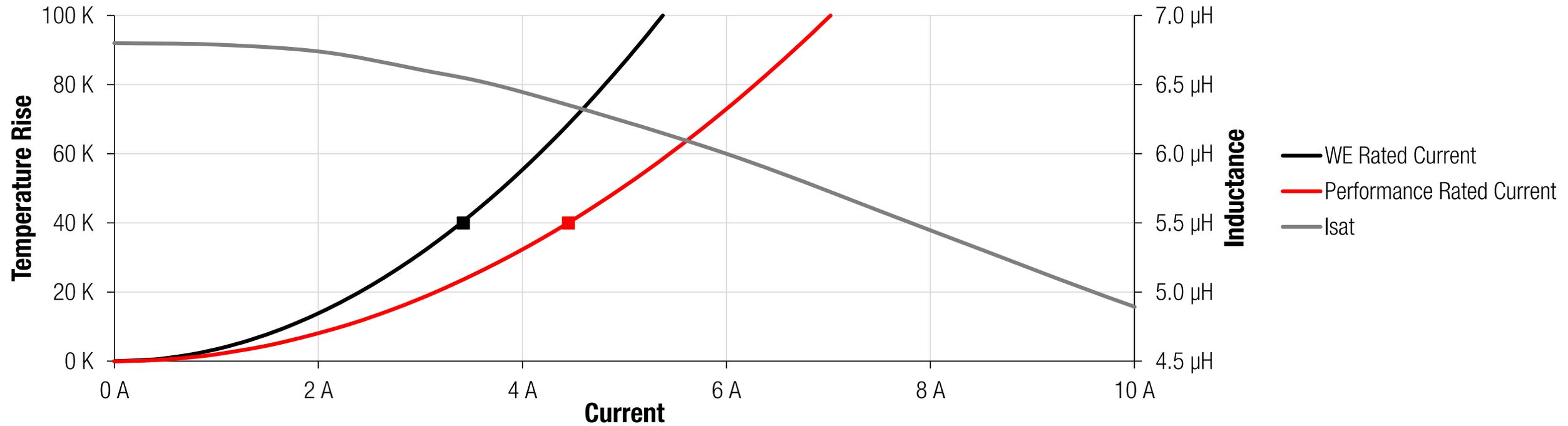


PCB Class A

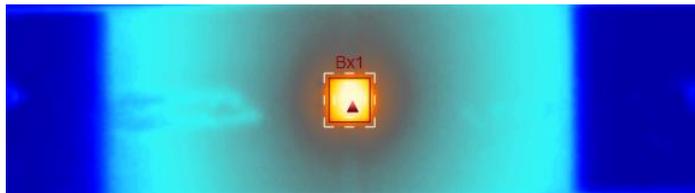
Nennstrom	W
$I_r \leq 1 \text{ A}$	1 mm
1...2 A	2 mm
2...3 A	3 mm
3...5 A	5 mm
5...7 A	7 mm
7...11 A	11 mm
11...16 A	16 mm
16...22 A	22 mm

Vergleich der alten und neuen Messmethode

Beispiel: WE-LHMI 744 373 460 68 auf unterschiedlichen Test PCBs



WE Legacy PCB



PCB Class C



Wie finde ich die Information im Datenblatt?

Beispiel: WE-LHMI 744 373 460 68

Electrical Properties:

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	100 kHz/ 10 mA	6.8	µH	±20%
Rated Current	$I_{R,40K}$	$\Delta T = 40 \text{ K}$	3.4	A	max.
Performance Rated Current ¹⁾	$I_{RP,40K}$	$\Delta T = 40 \text{ K}$	4.45	A	max.
Saturation Current @ 10%	$I_{SAT,10\%}$	$ ΔI /I < 10 \%$	5.45	A	typ.
Saturation Current @ 30%	$I_{SAT,30\%}$	$ ΔI /I < 30 \%$	10.6	A	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	54	mΩ	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	60	mΩ	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		18	MHz	typ.

¹⁾ refer to IEC 62024-2:2020

General Properties:

Ambient Temperature (referring to I_R)	-40 up to +85 °C
Operating Temperature	-40 up to +125 °C
Storage Conditions (in original packaging)	< 40 °C ; < 75 % RH
Moisture Sensitivity Level (MSL)	1
Test conditions of Electrical Properties: +20 °C, 33 % RH if not specified differently	
Test conditions of Performance Rated Current: refer to IEC 62024-2, Class C (PCB Copper Width: 40 mm; PCB Copper Thickness: 105 µm)	
Temperature rise is highly dependent on many factors including PCB land pattern, trace size, and proximity to other components. Therefore, temperature rise should be verified in application conditions.	

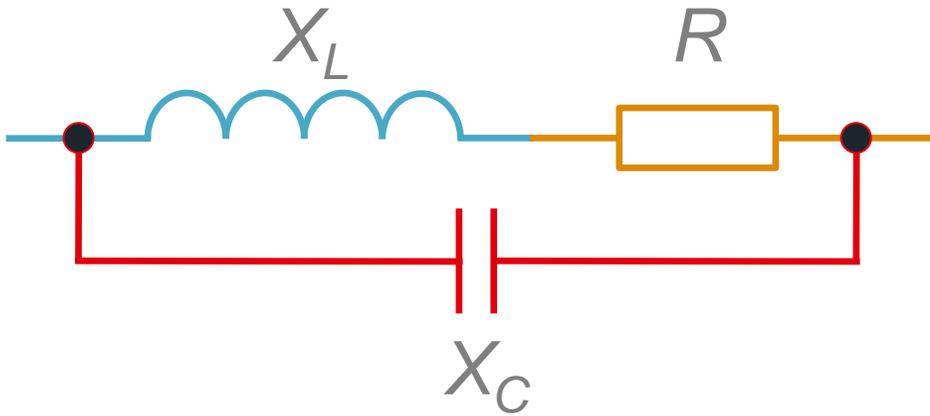
- Alte und neue Methode im Datenblatt
 - „Rated Current“ mit bisherigem WE Verfahren
 - „Performance RC“ nach IEC 62024-2:2020
- Testumgebung und entsprechendes PCB werden unter „Test Conditions“ vermerkt

Hinweis

- Keines der beiden Verfahren kann die Gegebenheiten in der Applikation 1:1 wiedergeben
- Umliegende Bauteile, tatsächliche Stärke des PCB sowie die Beschaffenheit der Leiterzüge und das Layout sind ausschlaggebend
- Nennstromwerte dienen nur als Anhaltspunkt für die Auswahl der Speicherinduktivität

FREQUENZ- VERHALTEN

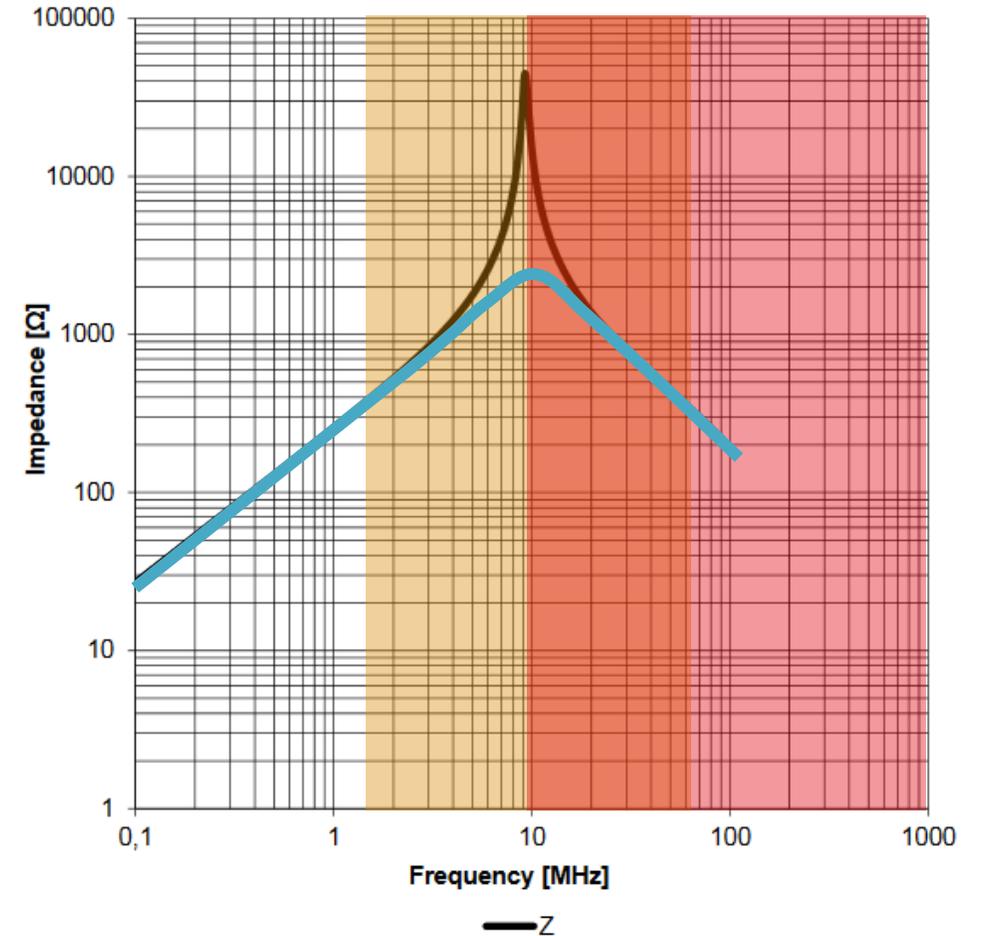
Eigenresonanzfrequenz



Electrical Properties:

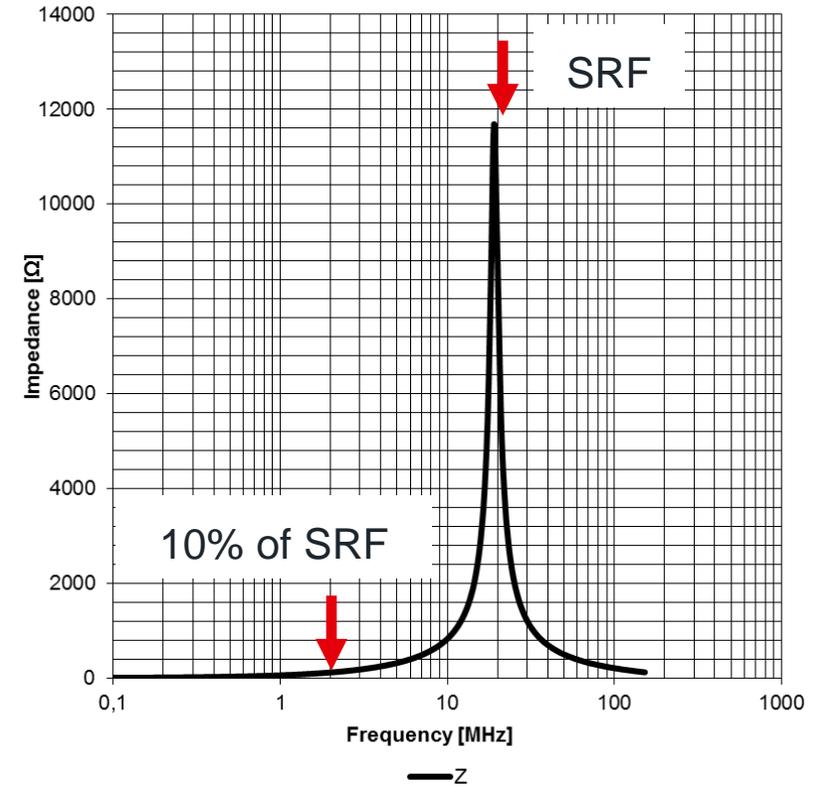
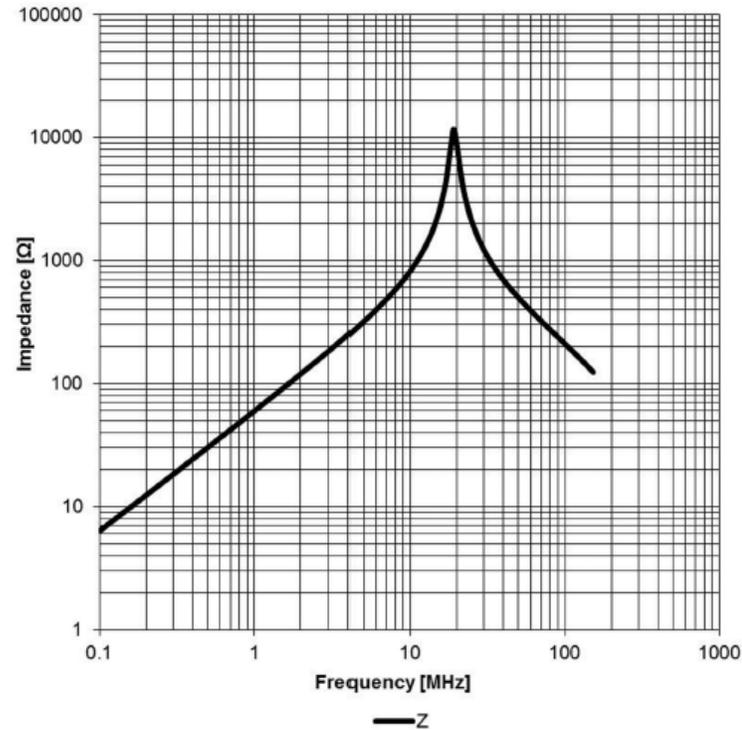
Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	1 kHz/ 250 mV	47	μH	$\pm 20\%$
Rated Current	I_R	$\Delta T = 40 \text{ K}$	2.21	A	max.
Saturation Current	I_{SAT}	$ dL/dI < 10 \%$	2.6	A	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	72	m Ω	typ.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	75	m Ω	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		9.2	MHz	typ.
Operating Voltage	V		120	V	max.

Typical Impedance Characteristics:



Eigenresonanzfrequenz

F2 Typical Impedance Characteristics:



Die SRF sollte 10x größer sein als die Schaltfrequenz
Ist das nicht möglich -> Verluste beachten

VERLUSTE

Gesamtverluste

Gleichstromwiderstand bei gleicher Baugröße

- Größere Induktivität → größerer R_{DC}
- Gleiche Induktivität bei geschirmter Drossel → weniger Windungen → kleinerer R_{DC}
- Der Gleichstromwiderstand bestimmt die Drahtwärmeverluste.



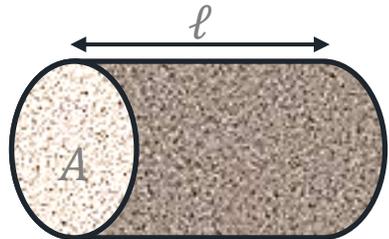
$$P_{\text{total}} = P_{\text{winding}} + P_{\text{core}}$$

P_{winding} → Gleich- & Wechselstromverluste

P_{core} → Wirbelstrom- & Hystereseverluste

Wicklungsverluste (DC)

- Ohm'scher Widerstand eines geraden Leiters



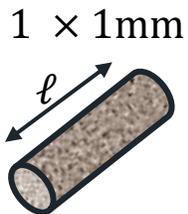
$$R_{dc} = \frac{\rho \cdot \ell}{A} = \frac{\ell}{\kappa \cdot A}$$

ρ = spezifischer Widerstand ($\rho_{Cu} = 1,786 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)

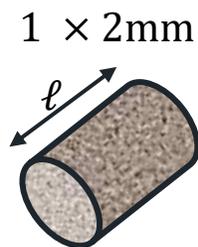
κ = spezifischer Leitwert ($\kappa_{Cu} = 5,6 \cdot 10^7 S \cdot m^{-1}$)

- Reale Verluste: $P_{dc} = R_{dc} \cdot I_{dc}^2$

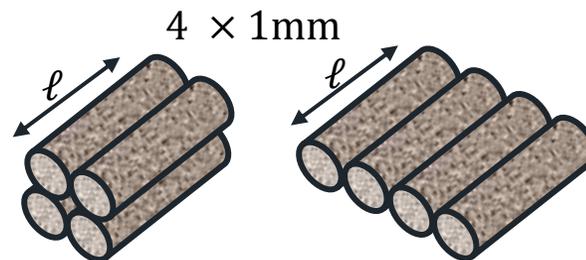
- Leitergeometrie ($\ell = 1m$):



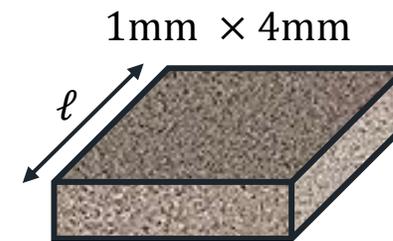
$A = 0,785mm^2$
 $R_{dc} = 22,75m\Omega$



$A = 3,142mm^2$
 $R_{dc} = 5,68m\Omega$



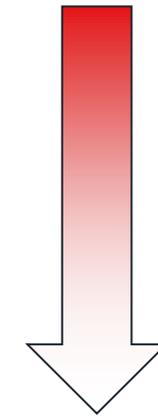
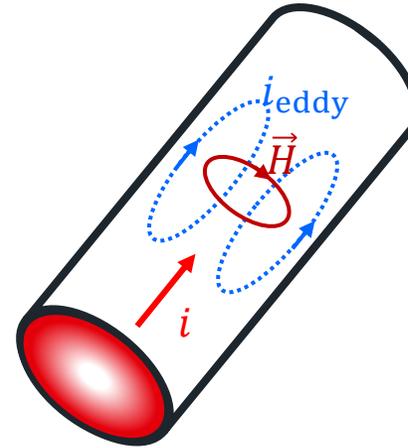
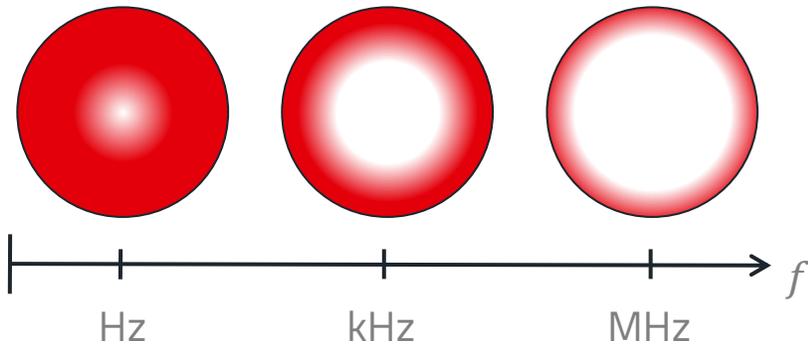
$A = 3,142mm^2$
 $R_{dc} = 5,68m\Omega$



$A = 4mm^2$
 $R_{dc} = 4,47m\Omega$

Wicklungsverluste (AC)

- Skin-Effekt:



$$J(d) = J_s \cdot e^{-\frac{d}{\delta}}$$

- Eindringtiefe:

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

$$\delta_{\text{Cu}}(f = 50\text{Hz}) = 9,51\text{mm}$$

$$\delta_{\text{Cu}}(f = 1\text{kHz}) = 2,13\text{mm}$$

$$\delta_{\text{Cu}}(f = 1\text{MHz}) = 67,25\mu\text{m}$$

- Die Stromdichte J im Leiter in der Tiefe $d = \delta$ hat sich auf $J_s/e = 0,368 \cdot J_s$ reduziert.

Wicklungsverluste (AC)

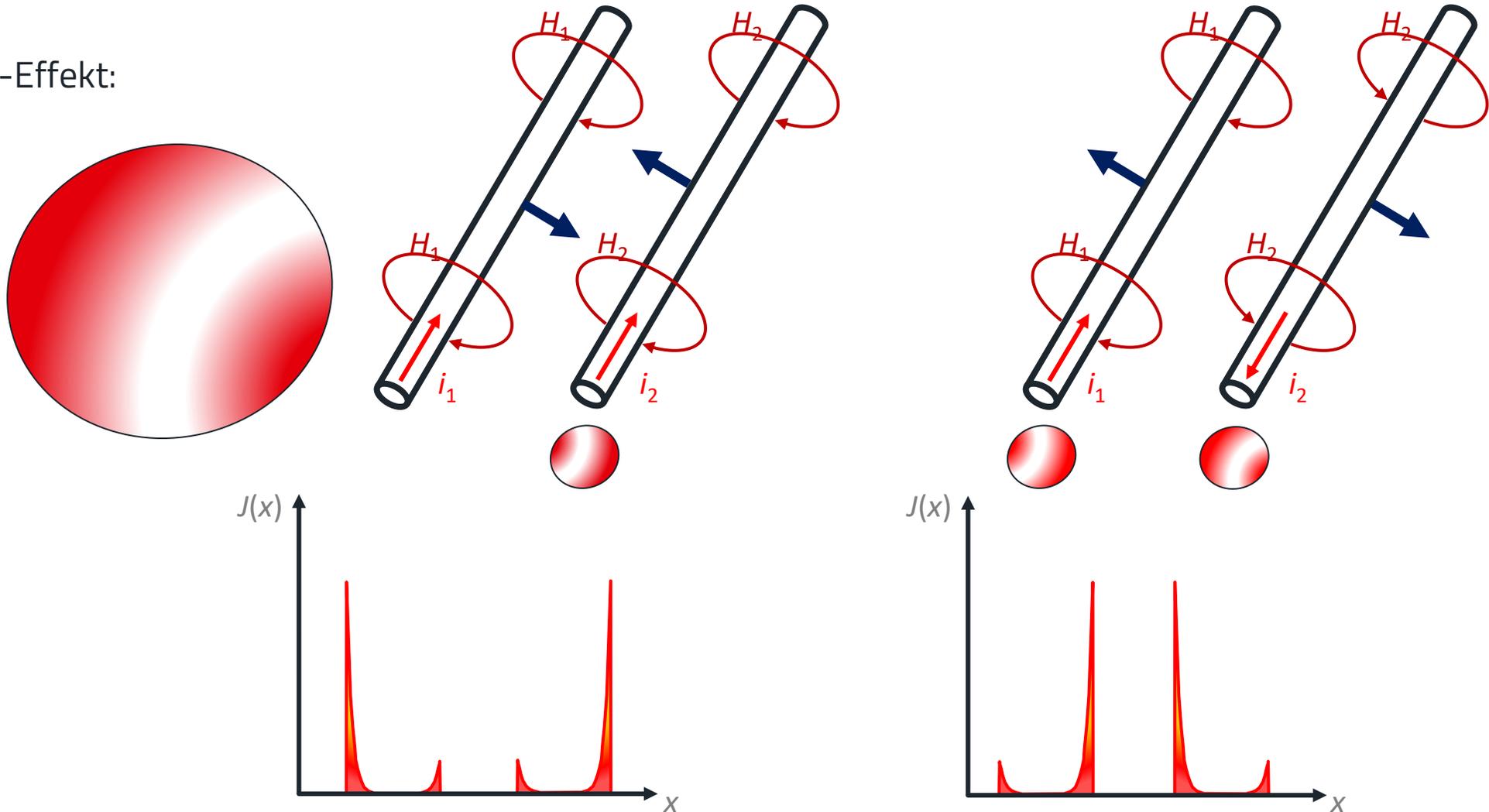
Proximity-Effekt

- Magnetfelder benachbarter stromdurchflossener Leiter überlagern sich
- Induktion von Wirbelströmen führt zu ungleichförmiger Stromdichteverteilung im Leiter
- Wicklungsverluste steigen mit der Frequenz und der Anzahl der benachbarten Leiter



Wicklungsverluste (AC)

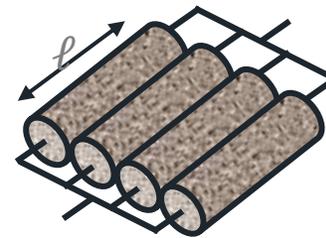
- Proximity-Effekt:



Wicklungsverluste (AC)

- Wie lassen sich die AC Kupferverluste reduzieren?

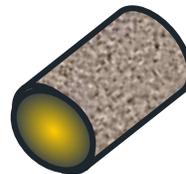
1. Litzendraht



$$R_{AC,eff} \approx \frac{R_{AC,single}}{n}$$

2. Flachdraht

3,56mm \varnothing



1mm x 10mm

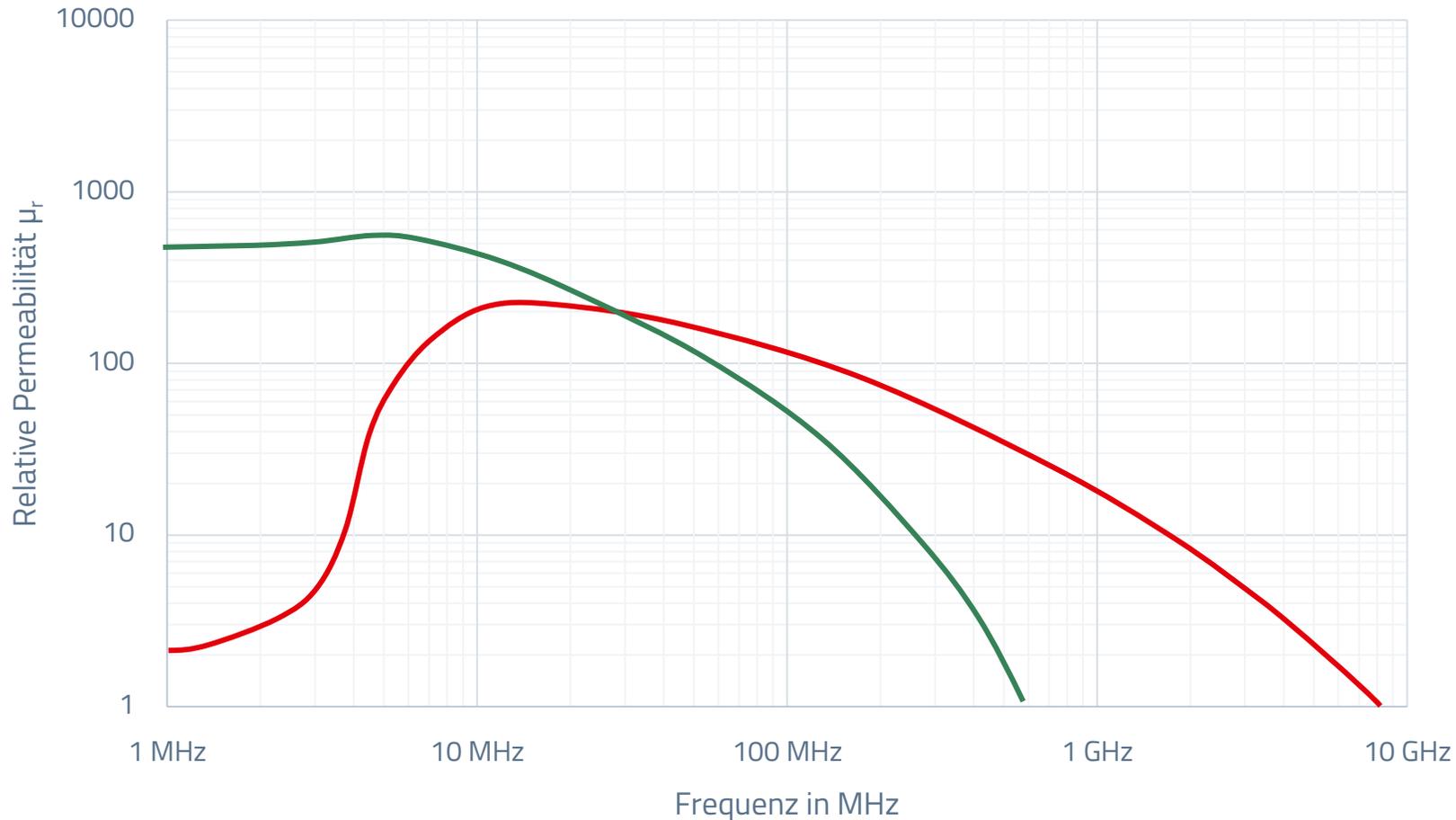


$$A = 10\text{mm}^2$$

$$u_{flat} \approx 2 \cdot u_{round}$$

Kernverluste (AC)

Frequenzabhängigkeit



$$\bar{\mu} = \mu' - j \mu''$$

$$\bar{Z} = j \omega L_0 * (\mu' - j \mu'')$$

$$\bar{Z} = R + j X_L$$

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

Frequenzabhängiger
Magnetisierungsanteil

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

Frequenzabhängiger Verlustanteil

Kernverluste (AC)

Ansatz von Steinmetz

- Die Steinmetz-Beziehung gibt die Kernverluste an und wird empirisch mit Ringkernen ermittelt.

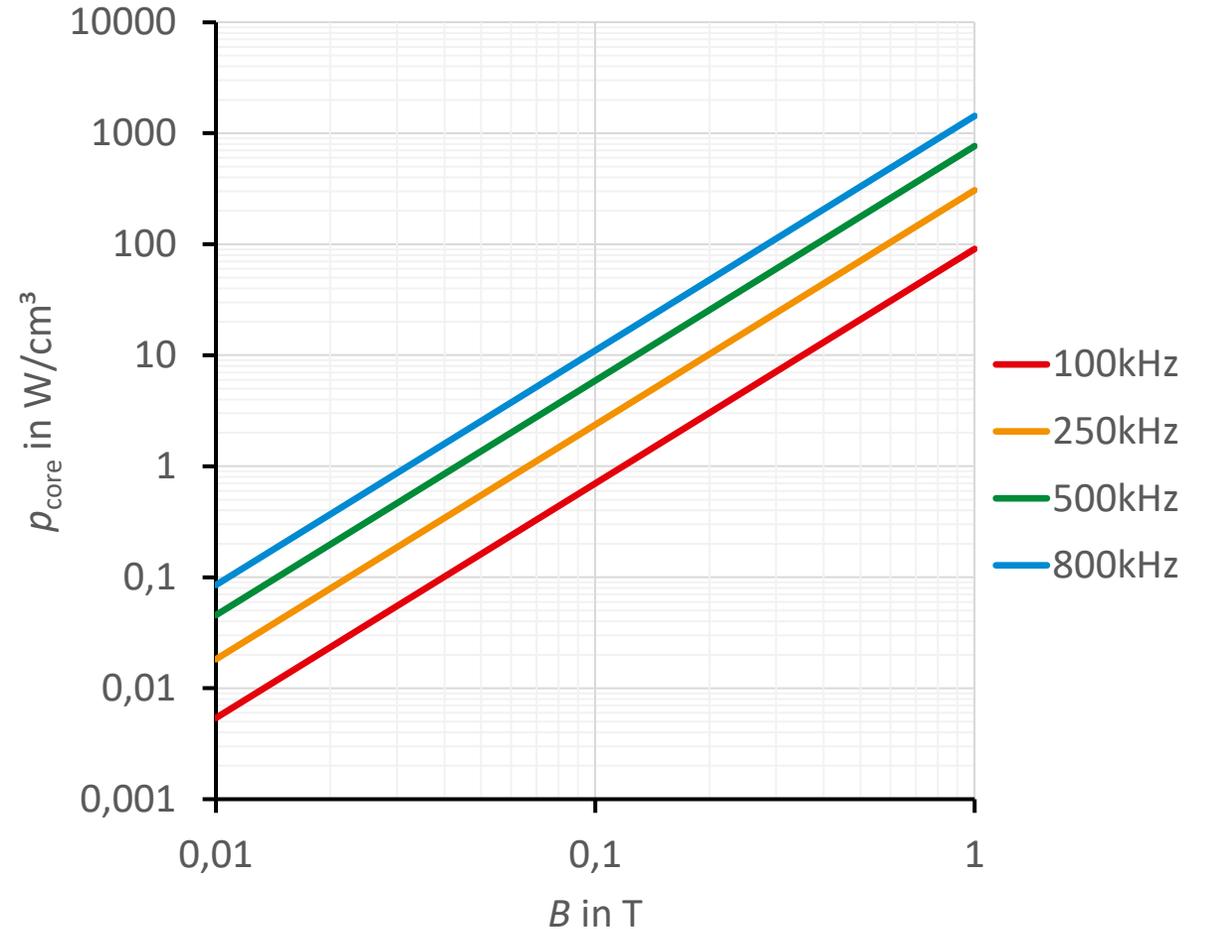
- $p_{core} = k * f^a * \hat{B}^b$



$$k = 7,62 \cdot 10^{-14}$$

$$a = 1,325$$

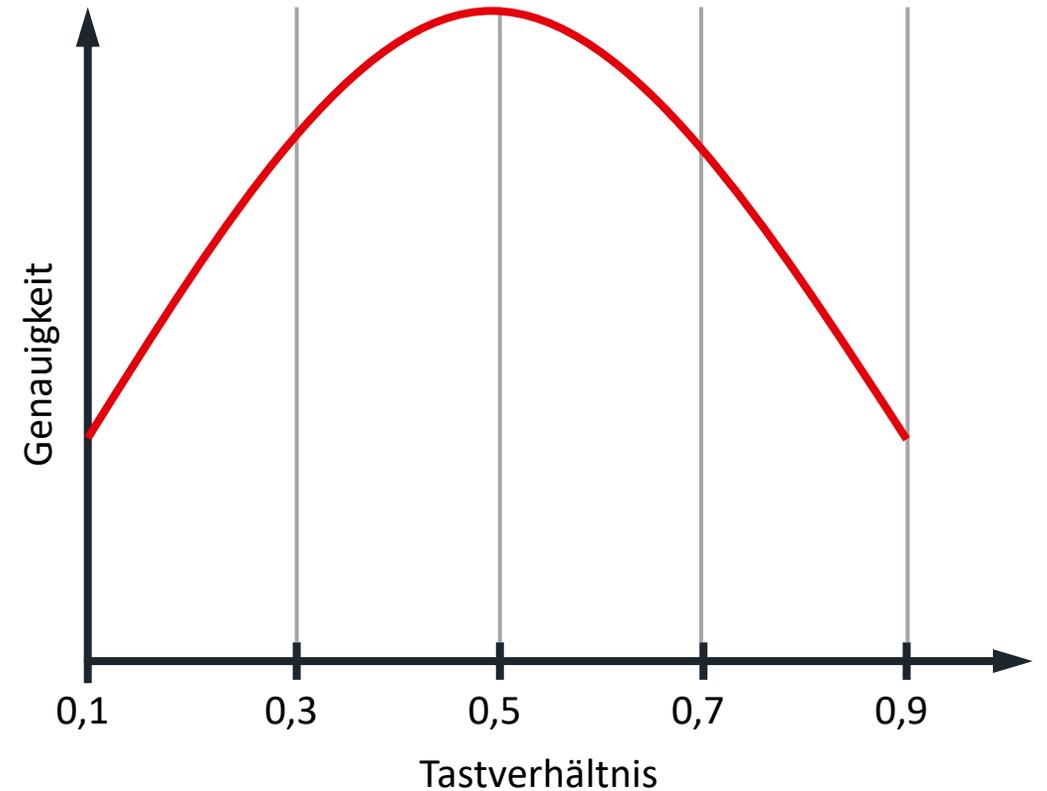
$$b = 2,113$$



Kernverluste (AC)

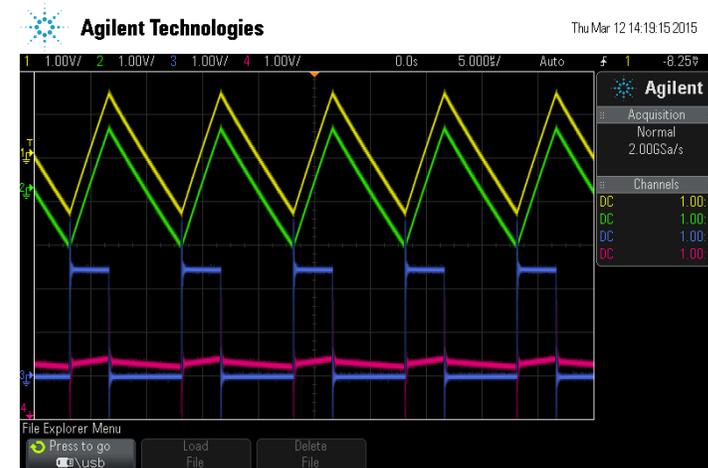
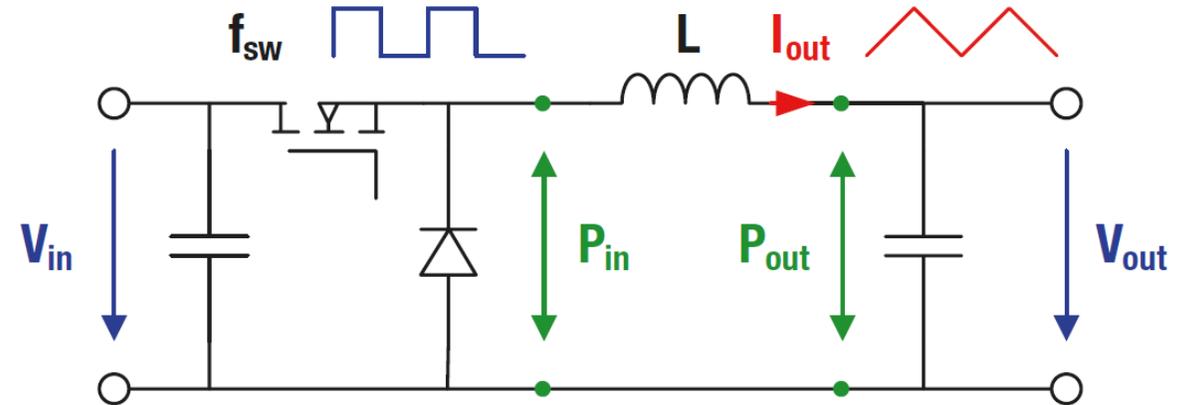
Ansatz von Steinmetz

- Steinmetz-Parameter sind nur eingeschränkt für reale Speicherinduktivitäten nutzbar.
- Die Genauigkeit ist bei 50% Tastverhältnis am höchsten.
- Eine modifizierte Steinmetz-Beziehung berücksichtigt nichtsinusförmige Anregung:
 - $p_{core} = k * f_{eq}^{a-1} * \hat{B}^b * f$
- Von verschiedenen Kernherstellern gibt es eigene bzw. angepasste Modelle.



Spulenverluste

- Würth Elektronik nutzt ein spezielles Messgerät (Tiefsetzsteller + Class-D-Verstärker)
 - großer Raum variabler Parameter
- Ermittlung der Spulenverluste durch Messung
 - $P_L = P_{in} - P_{out}$
- Arbeitspunkt → **dreieckförmiger Stromverlauf**

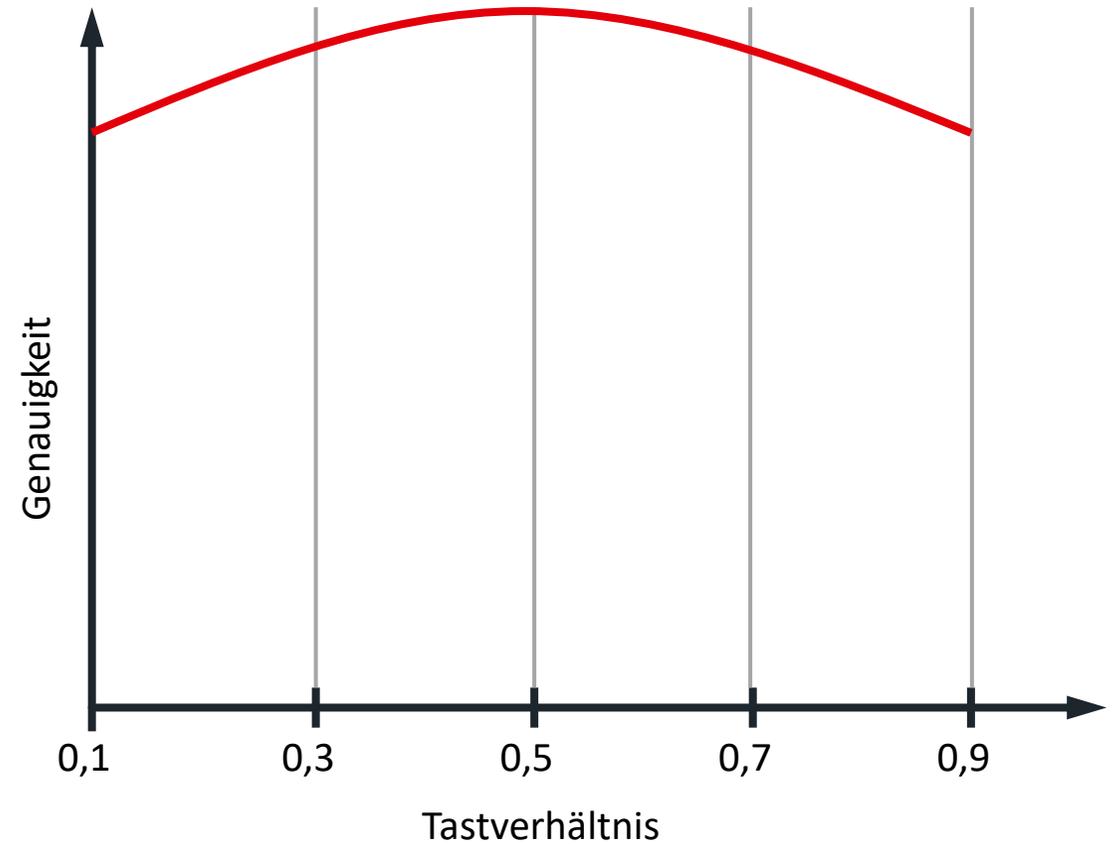
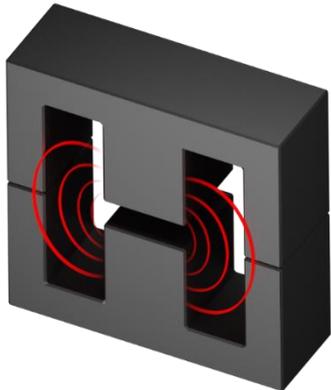


Spulenverluste

Ansatz von Würth Elektronik

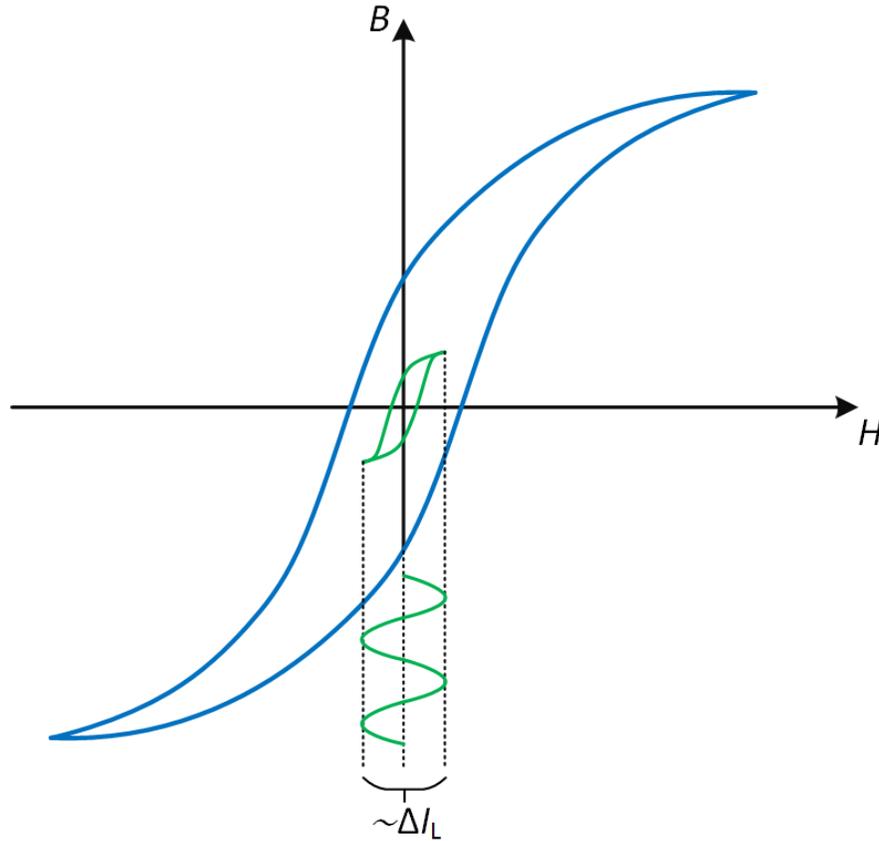
Berücksichtigung von

- realer Kerengeometrie,
- Streufeldefekten am Luftspalt,
- Wicklungsstruktur,
- Materialmischungen,
- Wechselstromverluste im Draht



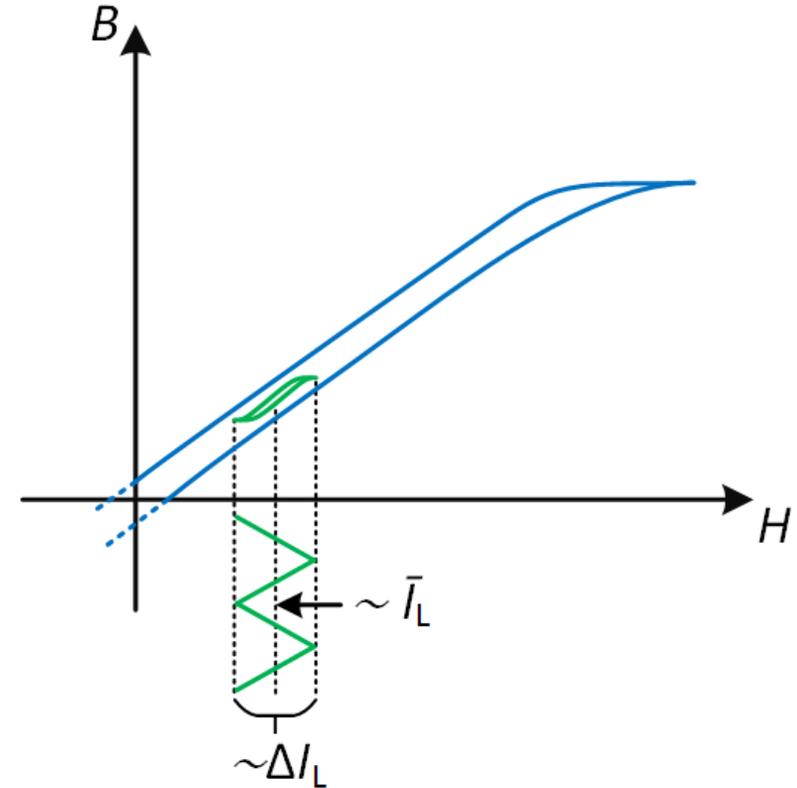
Spulenverluste

Vergleich



Steinmetz

Sinusförmige Anregung, nur Kernverluste



WE-Modell

Berücksichtigung des Arbeitspunkts, Gesamtverluste

Spulenverluste

REDEXPERT

REDEXPERT® SPEICHERINDUKTIVITÄTEN | ANWENDUNG | ANLEITUNG | TEILEN

ITEMS MARIO

Abwärtswandler

PARAMETER BEARBEITEN

Eingang	Ausgang	Schaltregler	Induktor	Diode
10,0 V 10,0-10,0 V	5,00 V 2,00 A	500 kHz	40 % Single	0,30 V

DETAILS

$I_{rms} \geq 2,00$ A $I_{max} \geq 2,40$ A $L_{opt} 6,44$ μ H

WE-PD - 744777004

t_{on}	DC	ΔI_L	I_{peak}
1,03 μ s	0,52	1,10 A	2,55 A

AC Verluste	DC Verluste	Σ Verluste	ΔT_{TOT}
102 mW	100 mW	202 mW	19,2 K

P vs. V_{ein}

P vs. f_{sw}

Filter: Typ = Single $I_R \geq 2,00$ A $I_{sat} \geq 2,40$ A $4,51 \mu$ H $\leq L_0 \leq 8,37 \mu$ H

Artikel-Nr.	Serie	Bauform	Spez	Typ	L_0	$R_{DC,typ}$	I_R	I_{sat}	P_{AC}	P_{DC}	P_{TOT}
74438356047	WE-MAPI	4020		Single	4,70 μ H	63,0 m Ω	2,90 A	4,70 A	66,8 mW	252 mW	319 mW
74438357047	WE-MAPI	4030		Single	4,70 μ H	39,9 m Ω	3,90 A	6,40 A	69,6 mW	160 mW	230 mW
744071047	WE-TPC	8043		Single	4,70 μ H	17,0 m Ω	4,80 A	4,30 A	87,5 mW	68,0 mW	155 mW
7440650047	WE-TPC	1028		Single	4,70 μ H	16,5 m Ω	4,60 A	4,20 A	112 mW	66,0 mW	178 mW
74408943047	WE-SPC	4838		Single	4,70 μ H	45,0 m Ω	2,20 A	3,20 A	75,3 mW	180 mW	255 mW
744778004	WE-PD	7332		Single	4,70 μ H	42,0 m Ω	2,32 A	4,20 A	95,5 mW	168 mW	264 mW

74438357047

WE-MAPI - 4030
4,70 μ H · 39,9 m Ω

7440650047

WE-TPC - 1028
4,70 μ H · 16,5 m Ω

744777004

WE-PD - 7345
4,70 μ H · 25,0 m Ω

Artikel-Nr. hier hin ziehen
oder hier eingeben

Zum Warenkorb

Mehr...

Ein- / Ausblenden: L vs. I(T) K vs. I(T)

Induktivität / DC-Strom (Umgebungstemperatur)

T = 20°C

Erwärmung / DC-Strom (Umgebungstemperatur)

T = 20°C

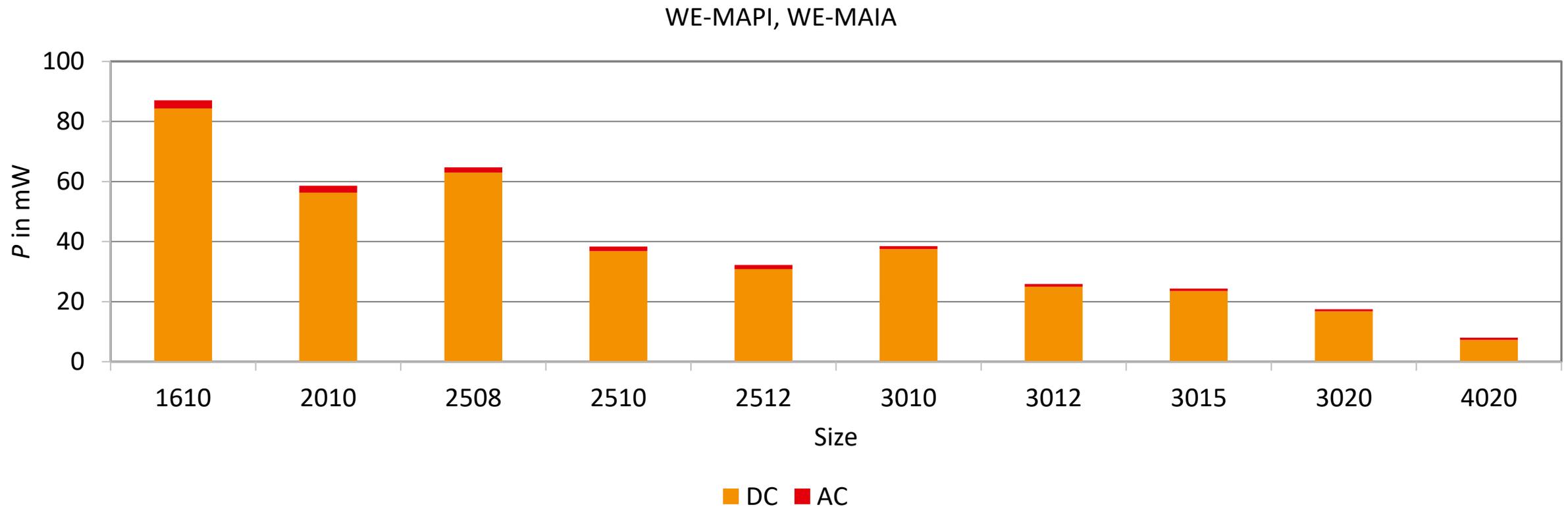
ÜBER WÜRTH ELEKTRONIK | SITEMAP | KONTAKT | IMPRESSUM | COPYRIGHT © 2018 WÜRTH ELEKTRONIK GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

? Haben Sie Fragen?

Spulenverluste

Baugröße

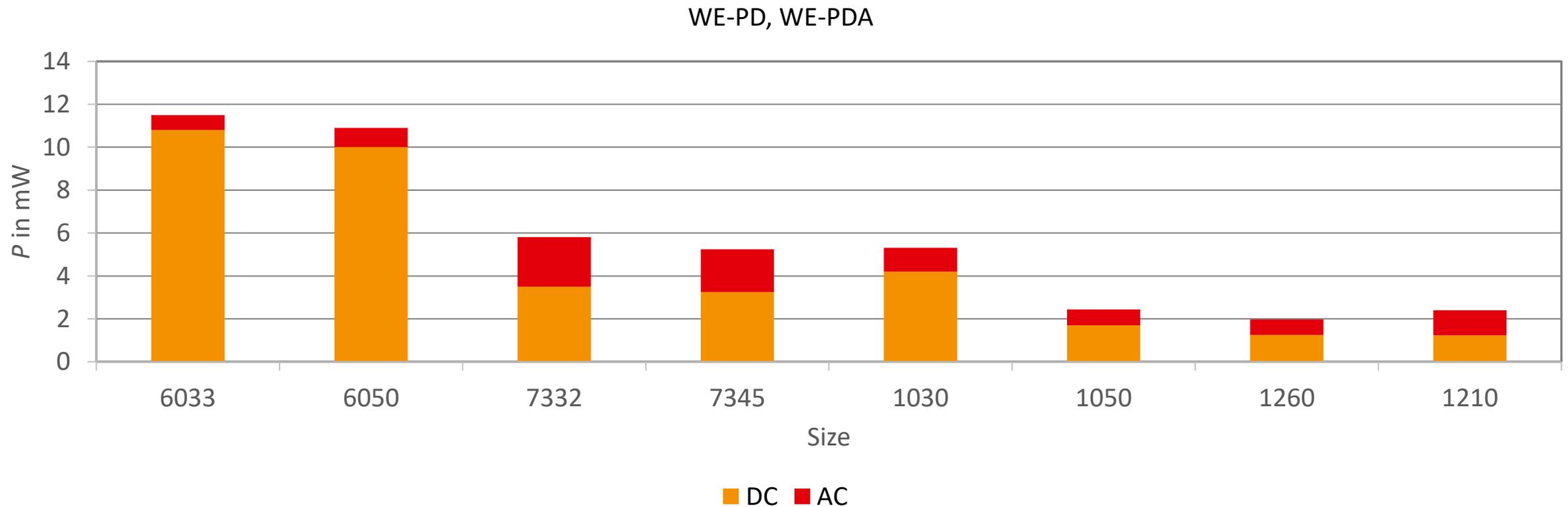
Feste Parameter: $L = 2,2\mu\text{H}$; $\bar{I}_L = 0,5\text{A}$; $\Delta I_L = 0,2\text{A}$; $f_{sw} = 500\text{kHz}$; $D = 50\%$



Spulenverluste

Baugröße

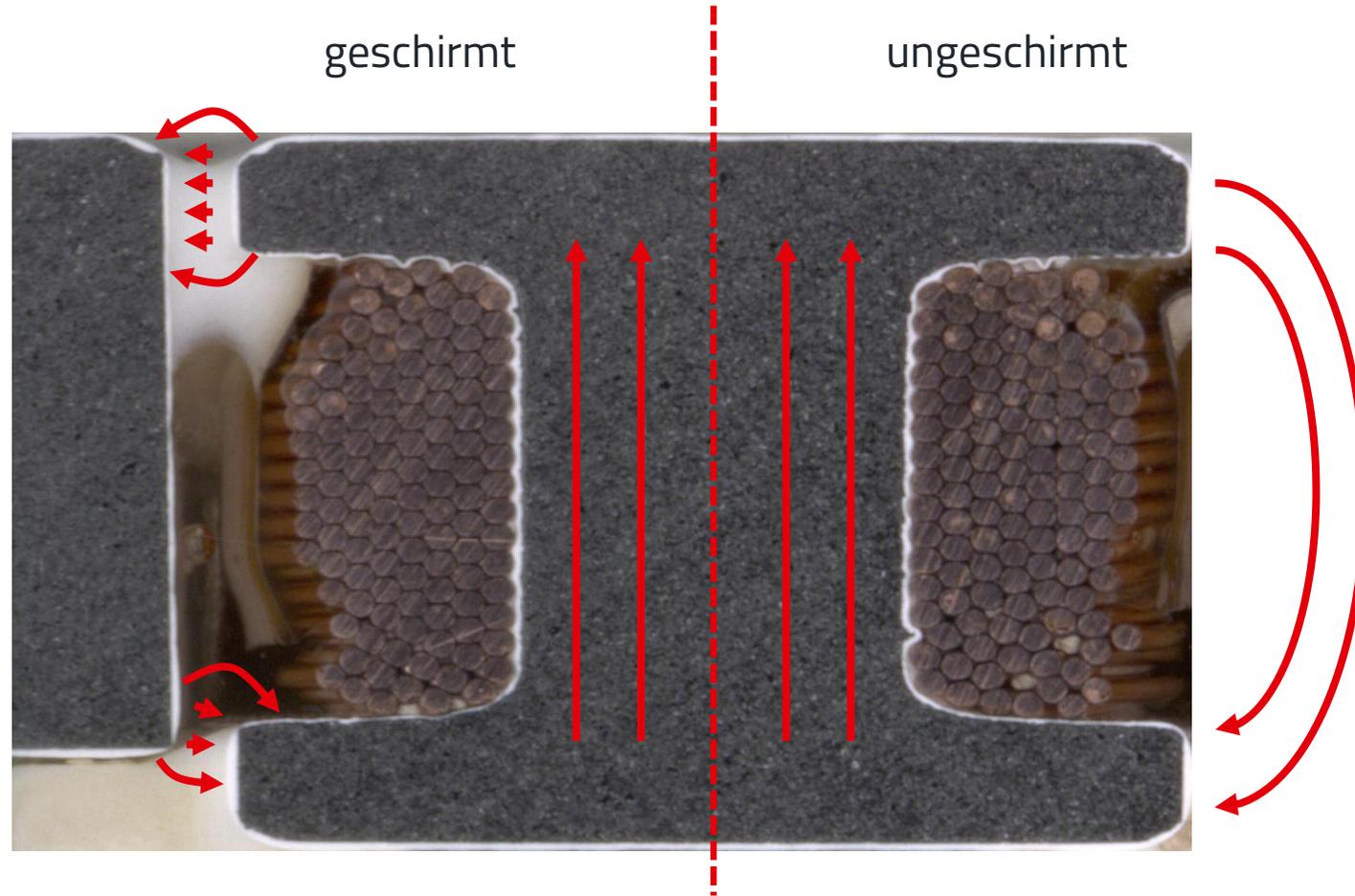
Feste Parameter: $L = 2,2\mu\text{H}$; $\bar{I}_L = 0,5\text{A}$; $\Delta I_L = 0,2\text{A}$; $f_{\text{sw}} = 500\text{kHz}$; $D = 50\%$



STREUFELD

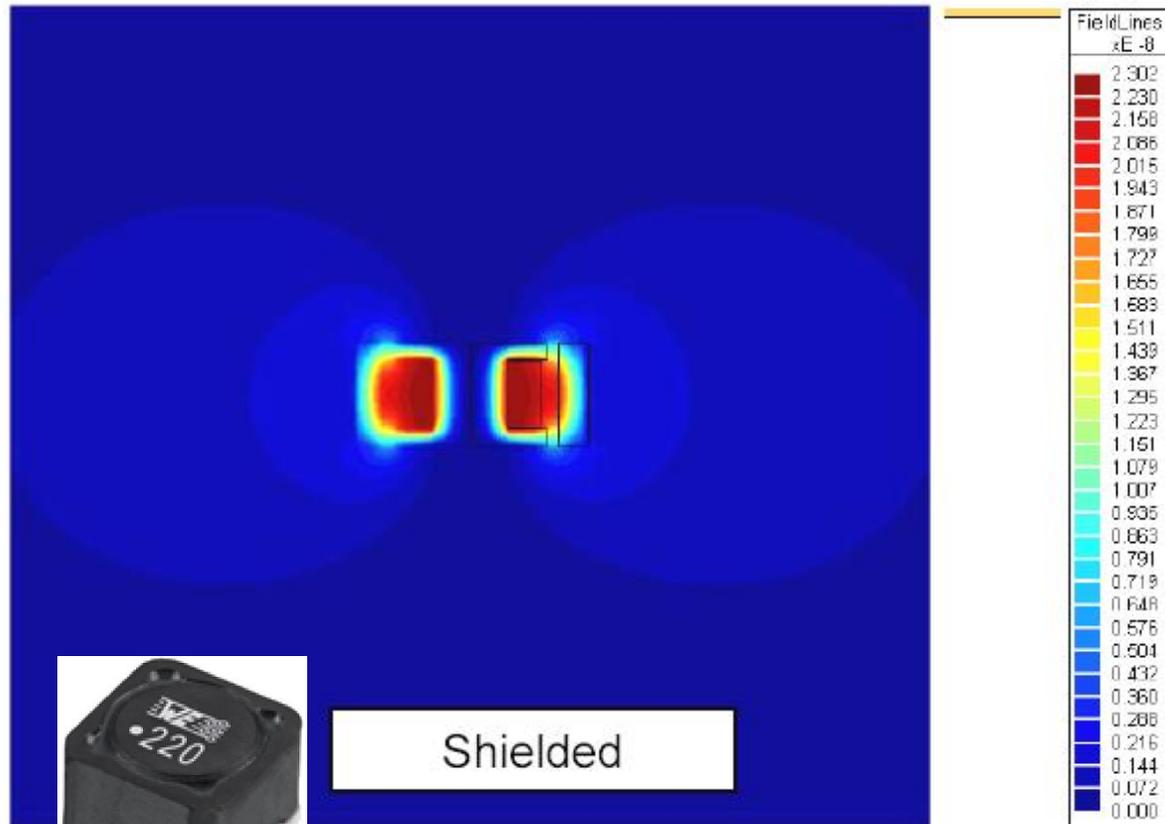
Streifeld

geschirmt/ ungeschirmt

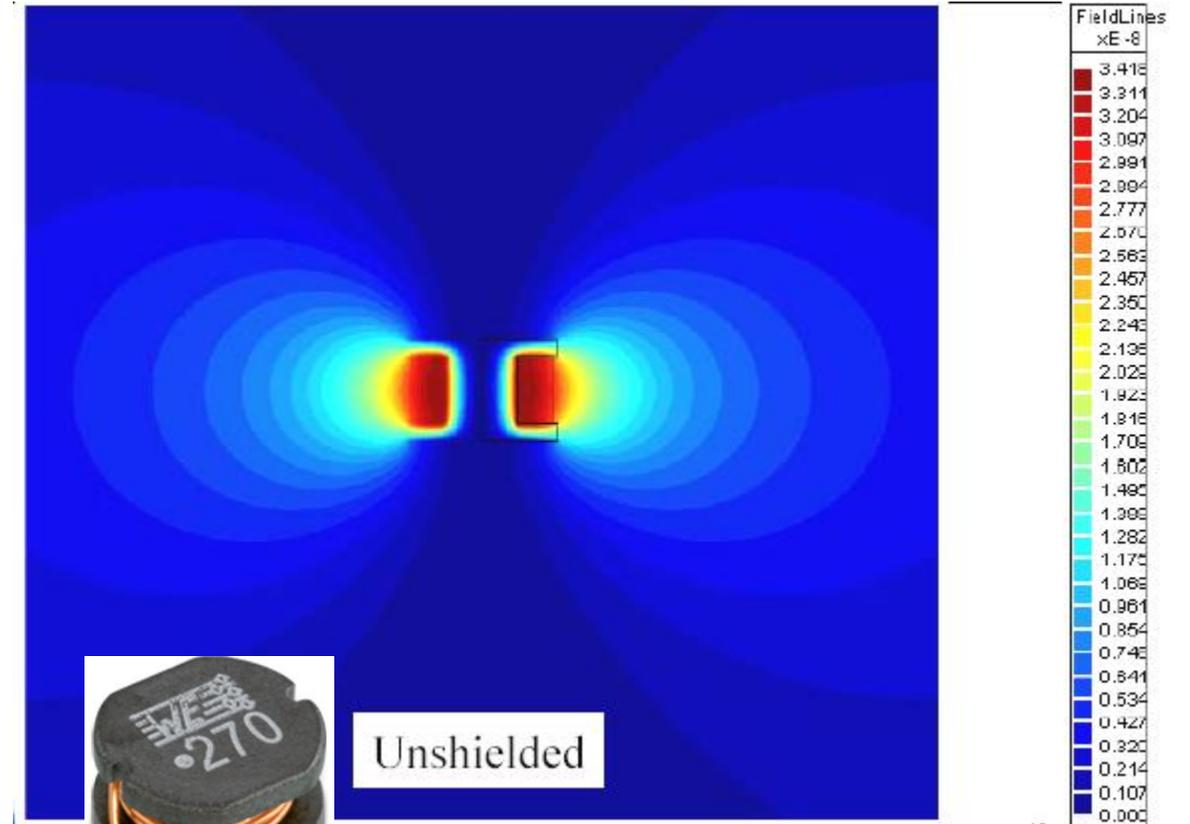


Streufeld

Simulation



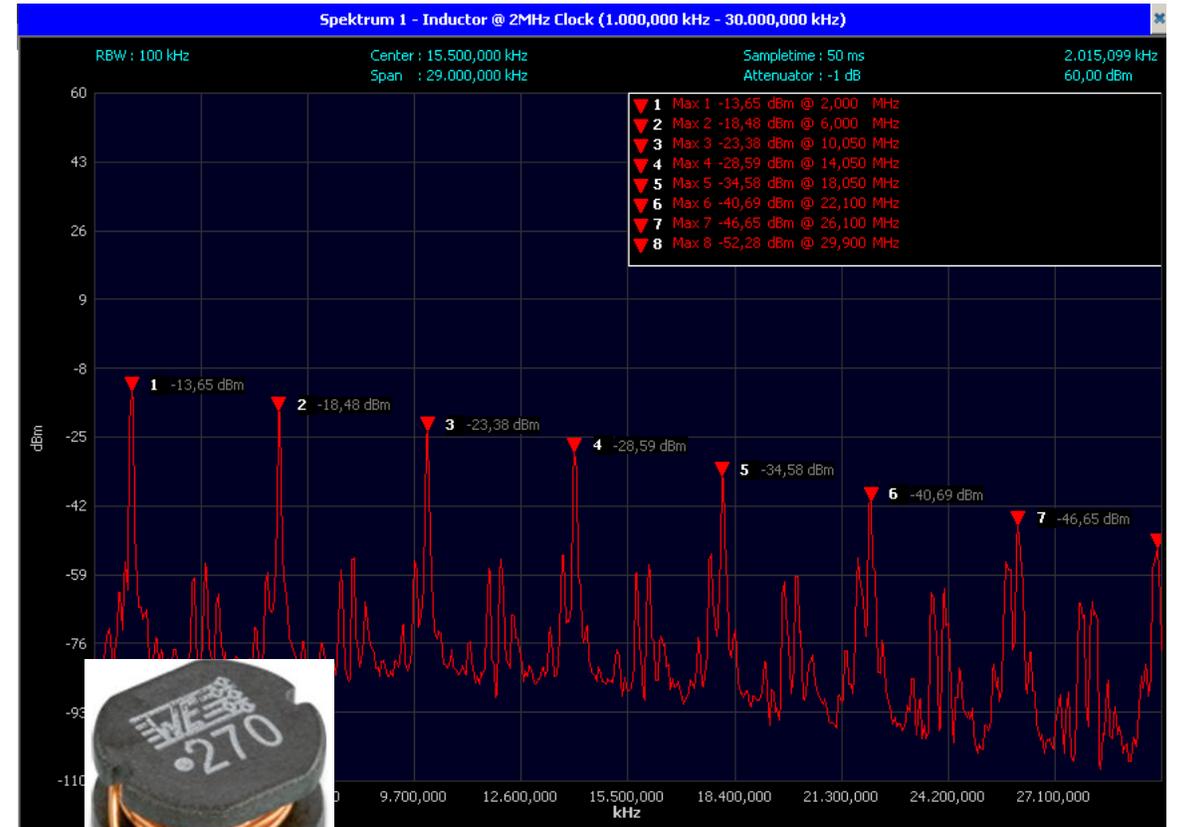
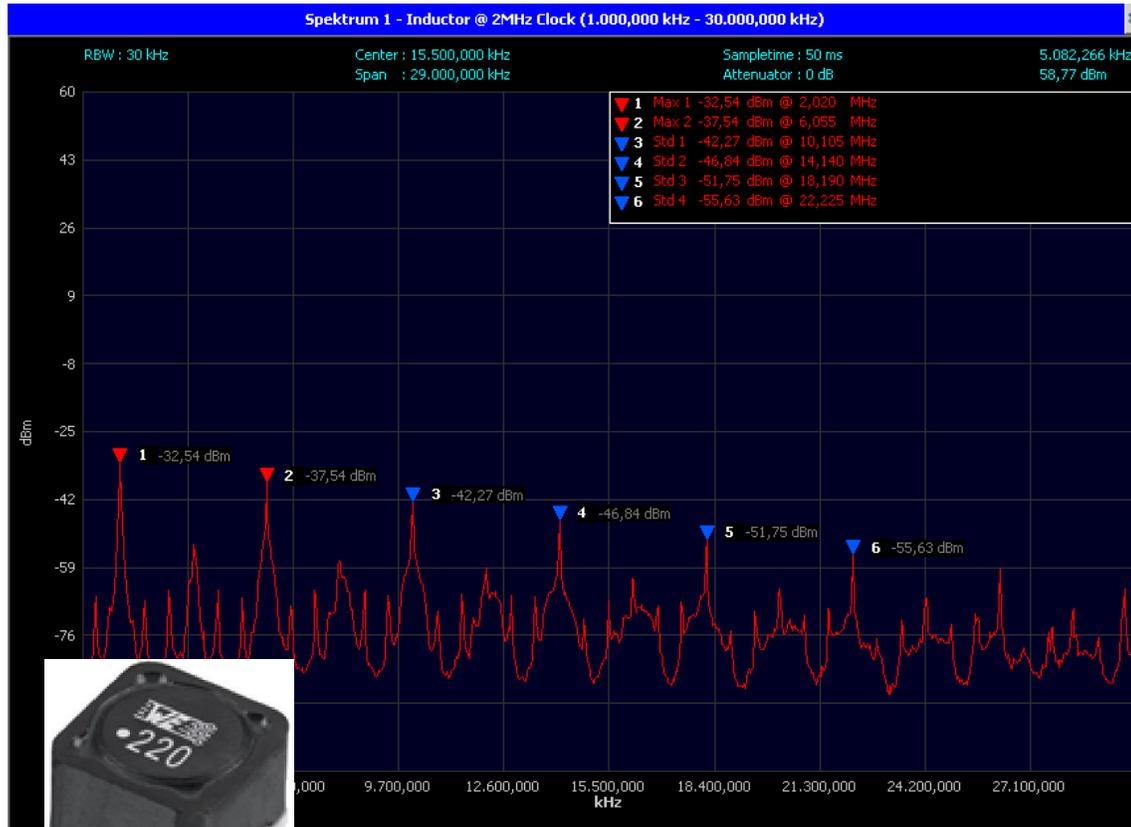
Geschirmte Drossel



Ungeschirmte Drossel

Streufeld

Störspektrum



Geschirmte Drossel



Ungeschirmte Drossel

AUSWAHL EINER SPEICHERDROSSEL

Abwärtsregler

Auswahl der Speicherdrossel mit RED EXPERT

Wandler

Buck

Boost

SEPIC

Verluste

100 / 2546 Produkte

Artikel-Nr.	Serie	L_0	I_R	I_{sat}	Bauform	Spez	$R_{DC,typ}$	Typ	L	W	H_{Max}	T_{Op}	Geschirmt	$Q^* / AEC-Q$	Material
744383130033	WE-MAPI	330 nH	1,90 A	4,90 A	1610	PDF	65,0 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy
744383130047	WE-MAPI	470 nH	1,70 A	4,50 A	1610	PDF	77,0 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy
744383130056	WE-MAPI	560 nH	1,65 A	4,00 A	1610	PDF	90,0 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy
744383130068	WE-MAPI	680 nH	1,55 A	3,80 A	1610	PDF	101 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy
744383130082	WE-MAPI	820 nH	1,45 A	3,60 A	1610	PDF	115 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy
74438313010	WE-MAPI	1,00 μ H	1,40 A	3,40 A	1610	PDF	127 m Ω	Single	1,60 mm	1,60 mm	1,00 mm	125°C	Shielded		Metal Alloy

744066220 WE-TPC - 1038 22,0 μ H - 55,8 m Ω

Artikel-Nr. hier hin ziehen oder hier eingeben

Zum Warenkorb

Mehr...

Ein- / Ausblenden: L vs. I(T) K vs. I(T)

Induktivität / DC-Strom (Umgebungstemperatur) T = 20°C

Erwärmung / DC-Strom (Umgebungstemperatur) T = 20°C

ÜBER WÜRTH ELEKTRONIK SITEMAP KONTAKT IMPRESSUM COPYRIGHT © 2018 WÜRTH ELEKTRONIK GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Haben Sie Fragen?

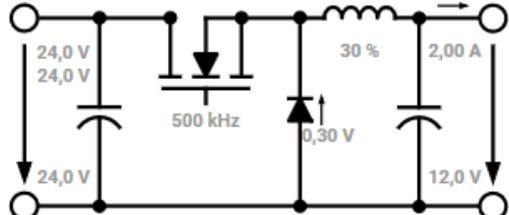
Abwärtsregler

Auswahl der Speicherdrossel mit RED EXPERT

- Buck Non Sync
- Buck Sync
- Boost Asynchron
- Boost Sync
- SEPIC

Buck Non-Sync Converter

PARAMETER BEARBEITEN



Eingang
 $V_{in,min}$ 24 V $V_{in,nom}$ 24 V $V_{in,max}$ 24 V

Ausgang
 V_{out} 12 V I_{out} 2 A

Schaltregler
 f_{sw} 500 kHz

Induktor
 ΔI_L 30 %

Diode
 V_f 0,3 V

Details Anzeigen

Buck Non-Sync Converter

PARAMETER BEARBEITEN

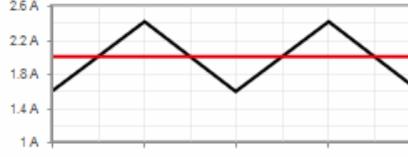
Eingang	Ausgang	Schaltregler	Induktor	Diode
24,0-24,0 V	12,0 V 2,00 A	500 kHz	30 %	0,30 V

DETAILS

$I_{L,max,opt} \geq 2,30 \text{ A}$
 L_{opt} 20,2 μH
 $I_{L,rms} \geq 2,01 \text{ A}$

WE-TPC - 744066150

DC	ΔI_L	$I_{L,max}$	T_{on}
0,51	810 mA	$\geq 2,41 \text{ A}$	1,01 μs

Verluste

AC	DC	Total	ΔT_{tot}
162 mW	148 mW	310 mW	25,4 K

Artikel-Nr.	Serie	Bauform	L_0	I_{sat}	I_R	$\Delta I \%$	Spez
744071150	WE-TPC	8043	15,0 μH	2,30 A	2,80 A	40,5 %	
744066150	WE-TPC	1038	15,0 μH	3,25 A	3,20 A	40,5 %	
744066180	WE-TPC	1038	18,0 μH	3,00 A	2,80 A	33,8 %	
744066220	WE-TPC	1038	22,0 μH	2,30 A	2,50 A	27,6 %	
7447713150	WE-PD	1030	15,0 μH	3,40 A	2,20 A	40,5 %	
7447714150	WE-PD	1050	15,0 μH	4,10 A	3,50 A	40,5 %	
7447714220	WE-PD	1050	22,0 μH	3,60 A	3,00 A	27,6 %	

Electrical Properties:

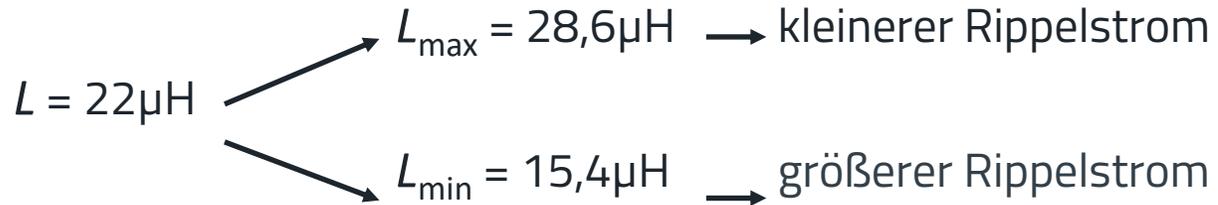
Properties	Test conditions		Value	Unit	Tol.
Inductance	100 kHz/ 1 V	L	22	μH	$\pm 30\%$
Rated Current	$\Delta T = 30 \text{ K}$	I_R	2.5	A	max.
Saturation Current	$ \Delta L/L < 35 \%$	I_{SAT}	2.3	A	typ.
DC R_e					typ.
DC R_e					max.
Self Resonant Frequency		f_{res}	12	MHz	typ.

Sind diese Werte ausreichend?

Abwärtsregler

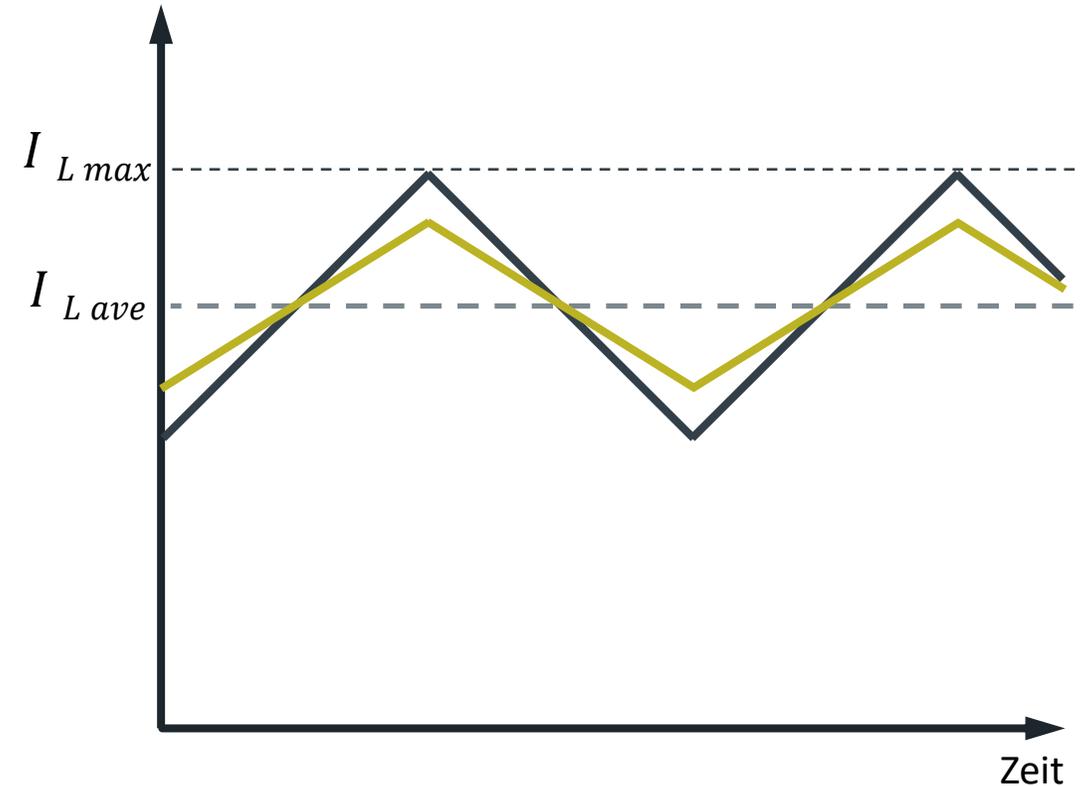
Bauteiltoleranzen beachten!

- Bauteiltoleranz bei der WE-TPC 1038: $\pm 30\%$



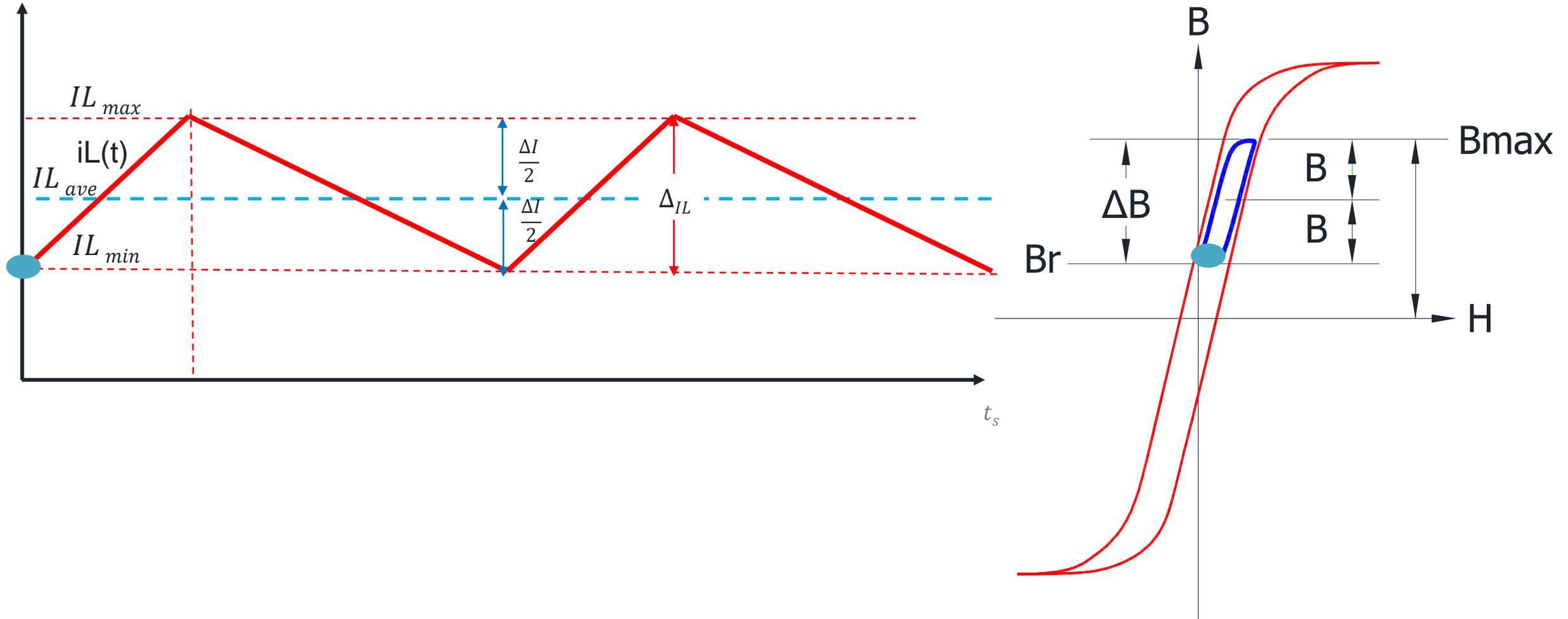
- Auswirkung auf den Ripplestrom:

$$\Delta I = r * I_{out} = \frac{(U_{in,max} - U_{out}) * D}{f_{sw} * L_{min}} = 0,79A$$



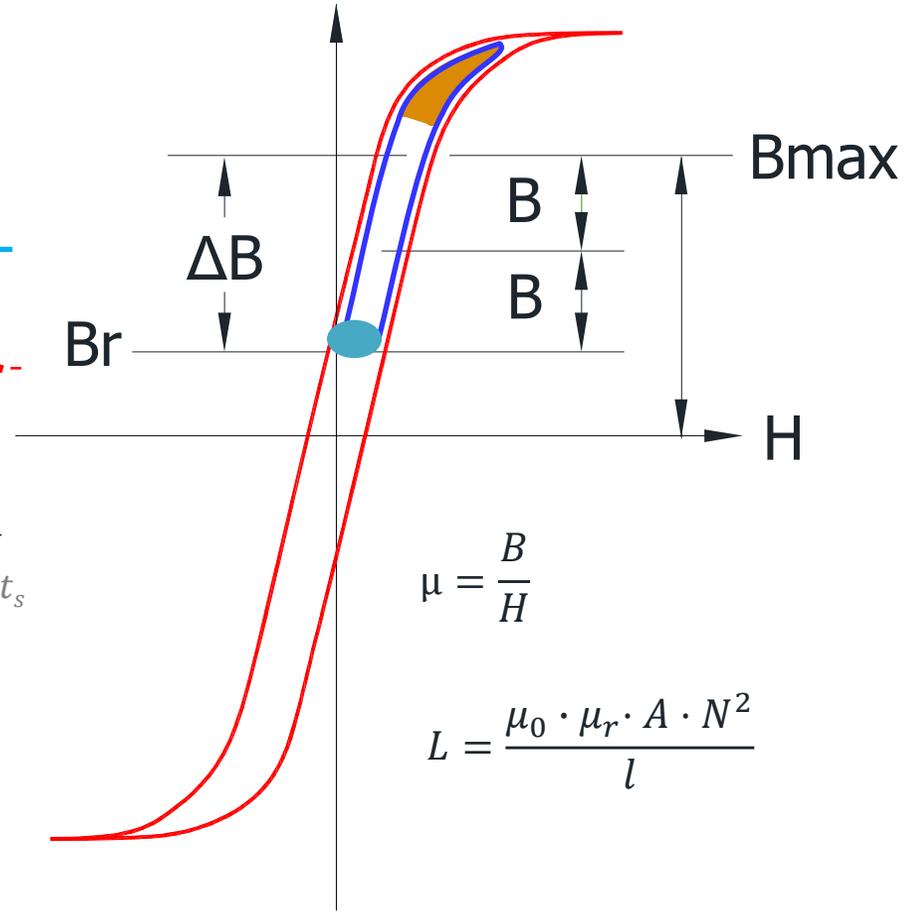
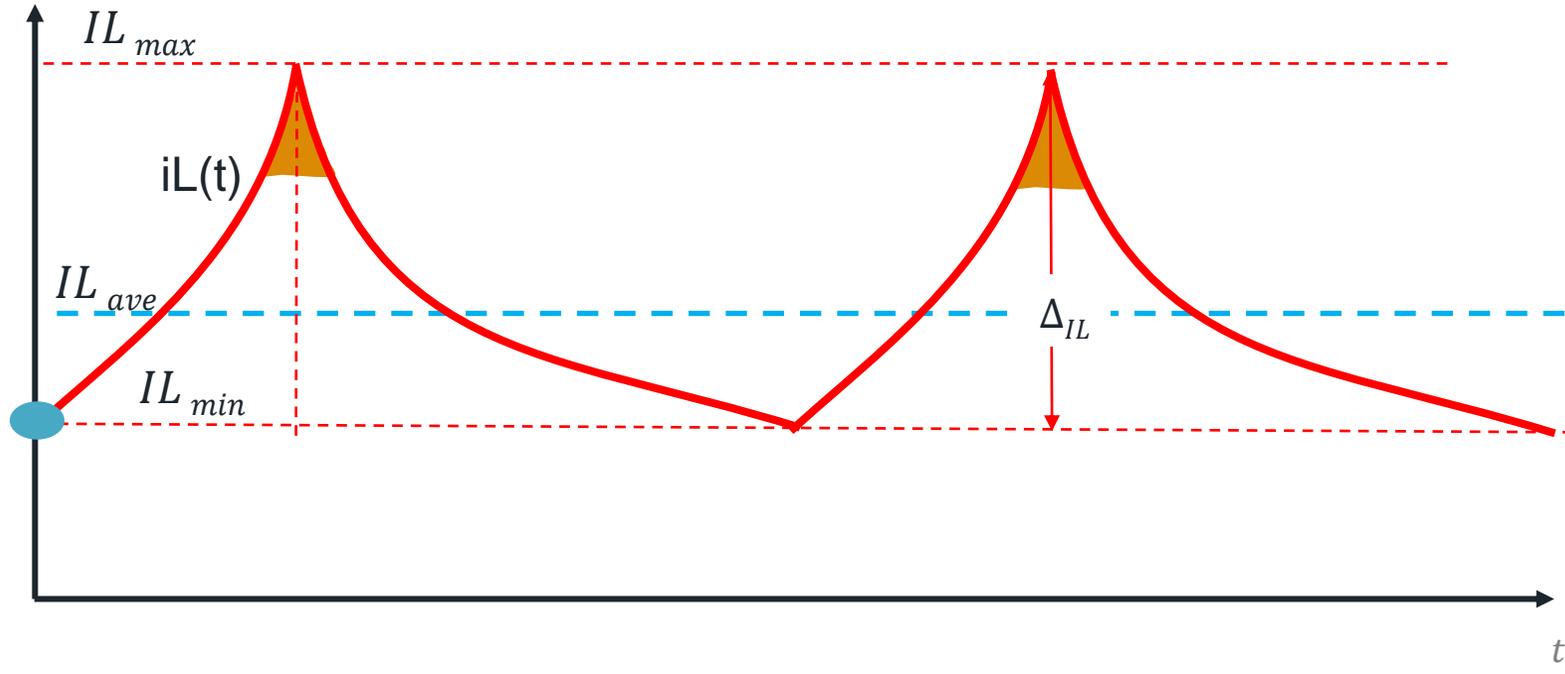
Magnetisierung der Induktivität im Betrieb

Drossel nicht gesättigt, lineares Verhalten



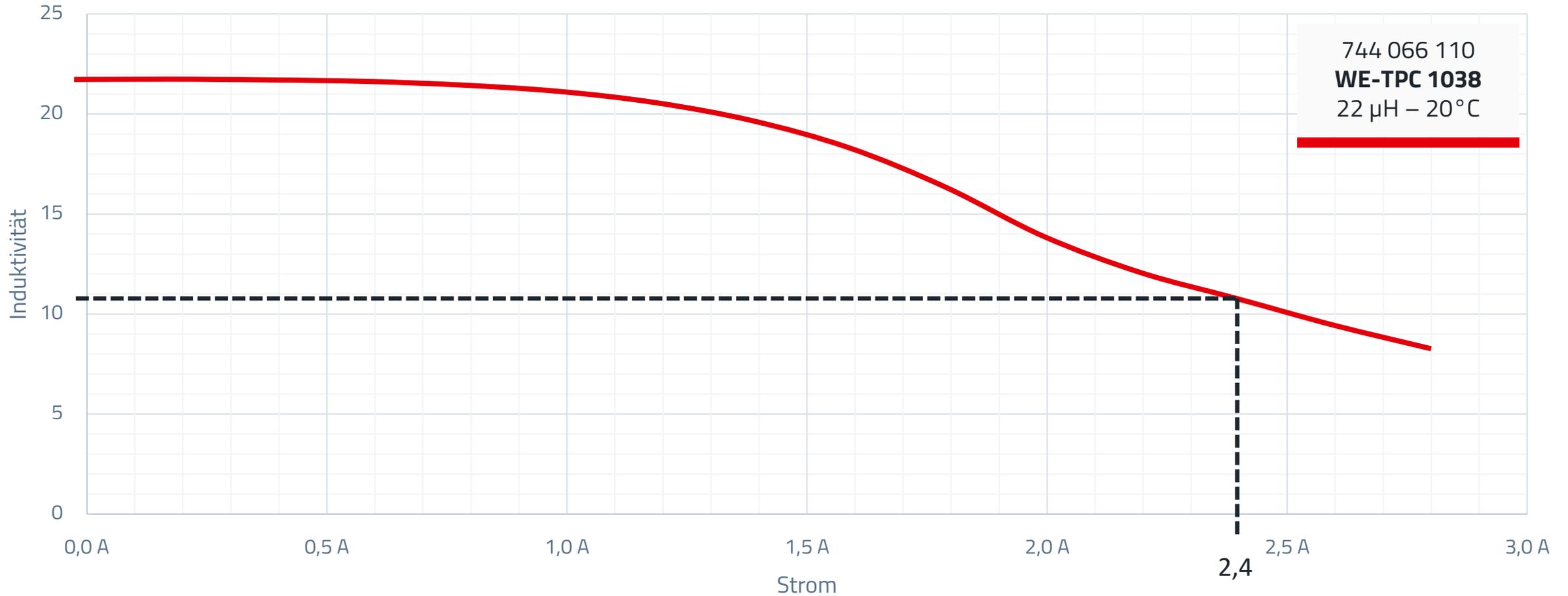
Magnetisierung der Induktivität im Betrieb

Drossel gesättigt, nichtlineares Verhalten



Abwärtsregler

Spitzenstrom



Arbeitsbereich der Induktivität

