

**attempo**

## Magnetische Bauteile und Baugruppen

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

### Attempo

induktive Bauteile,  
Feldbustechnik  
Testhaus

Steinbruchstr. 15  
72108 Rottenburg

Tel.: +49 (0) 7472 9623 90  
Fax: +49 (0) 7472 9623 92

eMail: [info@attempo.com](mailto:info@attempo.com)  
[www.attempo.com](http://www.attempo.com)



- Induktive Bauteile  
Berechnung, Simulation  
und Test
- Kleinserienfertigung
- Filtersysteme
- EMV –Test, Beratung  
und Seminare
- Entwicklungsunter-  
stützung
- Kommunikationstechnik
- Feldbusanalysen  
und Komponententest
- Umweltprüfverfahren
- Information

Version 1.1 25.06.2009

## Induktivitäten

Das Induktionsgesetz beschreibt **nur** den linearen Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung eines Stromes in einer Spule und der dabei an den Anschlüssen erzeugten Spannung. Dieser Proportionalitätsfaktor wird mit dem Symbol **L** definiert und heißt „**Induktivität**“:

$$L = U / (dI/dt) \quad [H, Vs/A, \Omega s]$$

L wird in H = Henry gemessen. 1 H ist diejenige Induktivität, bei der bei einer Stromänderung von 1 A in 1 s an den Spulenklammern eine Spannung von 1V induziert wird.

### Soweit die Theorie!

Besonders wichtig sind bei Induktivitäten ferro- und ferrimagnetische Werkstoffe als Kernmaterialien, da sich hiermit die Induktivität und der Wirkungsgrad von Spulen und Übertragern bei konstantem Volumen drastisch steigern lässt. Bringt man Ferro- oder Ferri-Materie in eine Spule ein, so steigt die Induktivität, und damit der induktive Widerstand  $\omega L$ , um den Faktor  $\mu_r$ .  $\mu_r$  = ist dabei ein variabler, dimensionsloser Multiplikator – dazu später mehr.

### Prinzipieller Zusammenhang:

$$L := \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A_e}{l_e}$$

L = Induktivität	H (Henry), Vs/A, $\Omega s$
N = Windungszahl	
$A_e$ = magnetische Fläche	$m^2, cm^2, mm^2, inch^2$
$l_e$ = Länge der Spule	m, cm, mm, inch
$\mu_0$ = Magnetische Feldkonstante von Luft	$1,257 \times 10^{-6} Vs/Am; 1,257 \times 10^{-4} Vs/Acm$
$\mu_r$ = relative Permeabilität	--

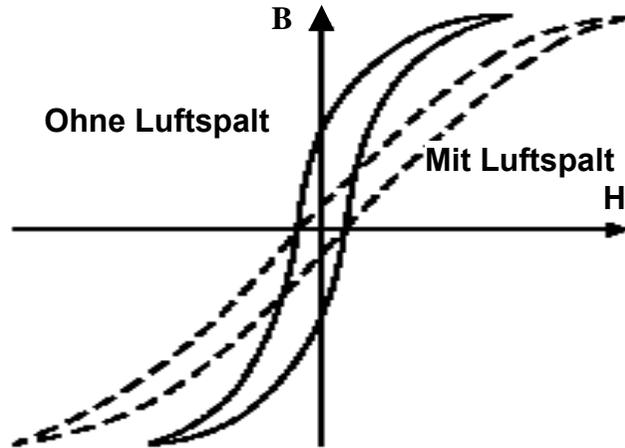
**Achtung:** Nicht immer werden in der Literatur und diversen Unterlagen die internationalen SI-Einheiten verwendet. Wegen eventueller Umrechnungen muss bei magnetischen Produkten sehr genau auf die verwendeten Einheiten und Definitionen geachtet werden!

## Was beeinflusst den Induktivitätswert L hauptsächlich:

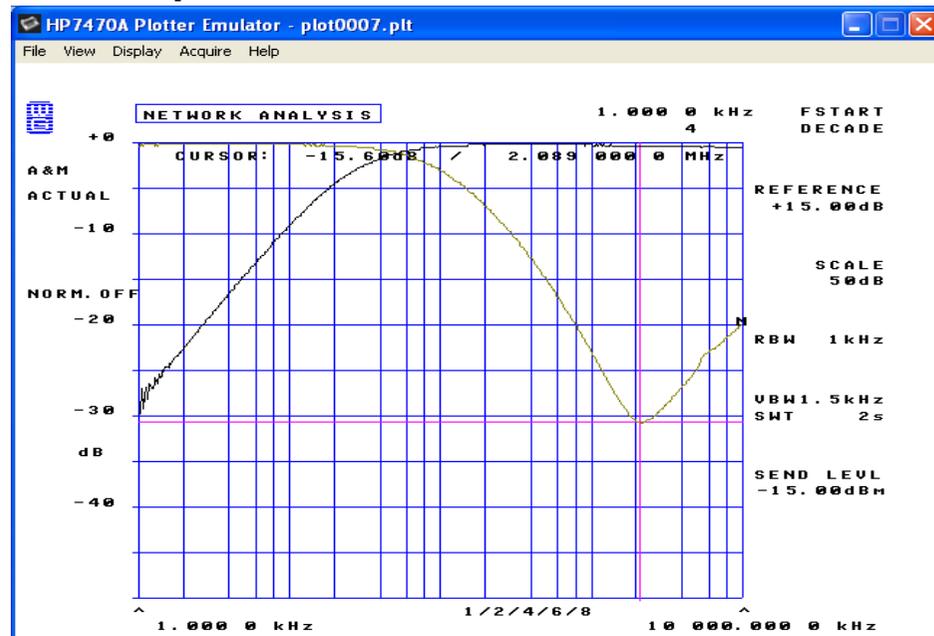
Die Spannung, der Strom, Kernmaterial

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

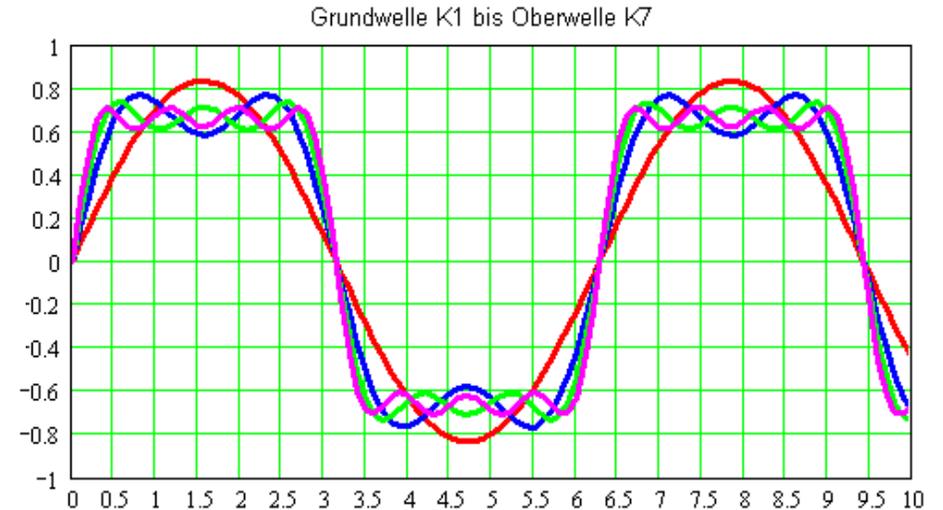
$$H := \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$



## Die Frequenz

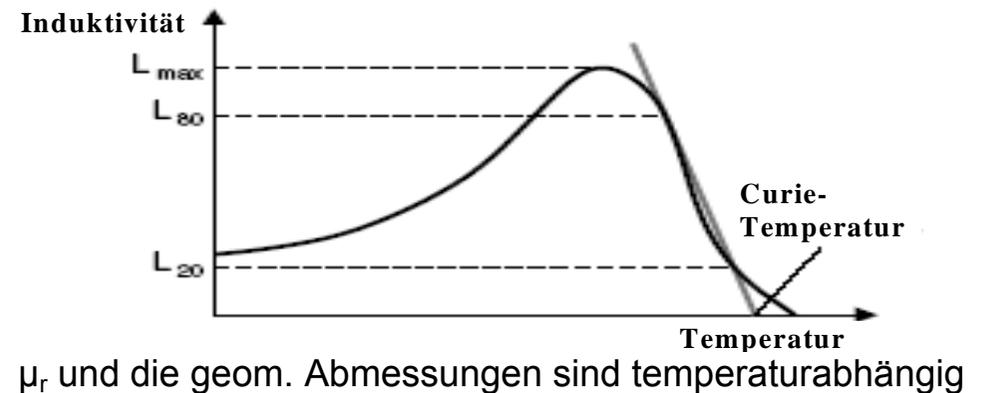


Die Signalform Oberwellen sind hier stärker gedämpft



Synthese eines Rechecksignals aus Grund- und Oberwellen  
 Summierung:  $K1 - K1+K3 - K1+K3+K5 - K1+K3+K5+K7$

## Die Temperatur



$\mu_r$  und die geom. Abmessungen sind temperaturabhängig

Sind **U und f festgelegt**, kann man zwar vergleichbare Messwerte für „L“ unter **gleichen Bedingungen** erhalten. Eine Aussage zu den tatsächlichen Betriebswerten auftreten, ist aber meist nicht möglich.

Induktivitäten werden viel besser durch den Verlauf der Impedanz Z nach Betrag und Phase im z.B. Frequenzbereich 10kHz bis 10MHz gekennzeichnet. Die Spule besitzt bei 1 MHz schon erhebliche Kernverluste und ihr ohmscher Widerstand wird durch den Skin- und Proximityeffekt nicht unerheblich erhöht. Damit sinkt ihre Güte  $Q = \omega L / R_p$  ( $R_p$  = alle Verlustwiderstände in einen Parallelwiderstand umgerechnet ) erheblich, wenn das verwendete Kernmaterial bei 1MHz schon größere Verluste aufweist, als bei 10kHz. Die alleinige Induktivitätsmessung würde dann bei zwei Spulen, deren eine mit Voll Draht und deren andere mit Litze bewickelt wurde, bei 10kHz zwar zum gleichen L-Wert führen, die Spule mit geringerer Güte Q wäre bei 1MHz aber u. U. nicht mehr brauchbar!

Erschwerend kommt noch hinzu, dass eine Spule wegen ihrer Eigenkapazität eine Eigen-Resonanzfrequenz  $f_R$  aufweist. Wird diese im Betrieb überschritten, stellt die Spule nur noch eine (frequenzabhängige!) Kapazität dar. Nur wenn die Eigen-Resonanzfrequenz ca.  $\frac{1}{2}$  bis 1 Dekade höher liegt als die Betriebsfrequenz, wirkt eine Spule noch als Induktivität. Eine sichere Beurteilungsmöglichkeit bietet hier nur die Impedanzmessung nach Betrag und Phase mindestens im Betriebsbereich, möglichst auch darüber hinaus.

Eine elegante Messmöglichkeit bieten Netzwerkanalysatoren, die wenigstens den Betrag der Impedanz auf dem Bildschirm darstellen und wo durch die Steilheit und die Richtung des Impedanzverlaufes (Anstieg mit wachsender Frequenz) der Charakter „Induktivität“ nachweisbar ist. Eine reine Induktivität würde einen Impedanzanstieg von 6dB/ Oktave, oder 20dB/Dekade bewirken. Verluste machen den Anstieg flacher, in der Nähe der Resonanzfrequenz wird der Anstieg steiler. Die Bildschirmdarstellung eignet sich auch für Automatenprüfung. Dabei wird auf den Bildschirm eine Toleranzmaske projiziert, deren Verletzung angezeigt werden kann.

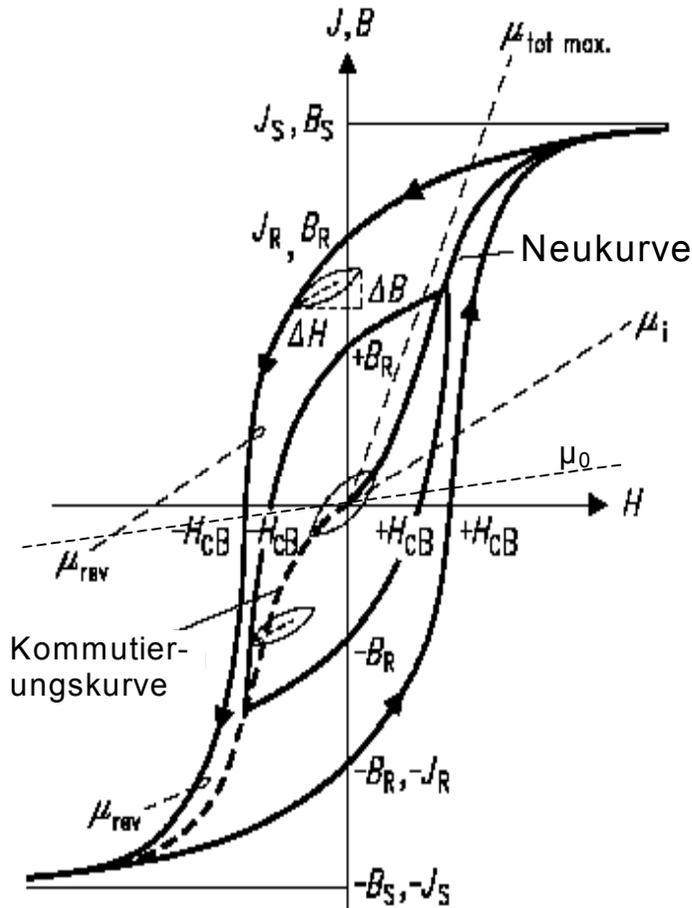
Im Übertragungstechnischen Sinne stellt z.B. ein Rechtecksignal ein Breitbandübertragungssystem mit einer Bandbreite von  $B_a \approx 0.34/t_a$  dar, wobei  $t_a$  die Flankenanstiegszeit ist. Bei einer Anstiegszeit von ca.  $0,5 \mu s$  anzusetzen, was einer Bandbreite von  $B \approx 580$  kHz entspricht.

Beispiel: CAN-Bus mit 500 kBit – Anstiegszeit des Treibers = 200 ns ergibt eine Bandbreite von über 17 MHz. Alle relevanten Harmonischen von 500 kBit werden übertragen.

Profibus mit 12 Mbit – Anstiegszeit des Treibers = 34 ns ergibt eine Bandbreite von über 100 MHz. Dabei werden auch alle relevanten Harmonischen von 12 Mbit übertragen.



## Grundlegende Parameter der Hystereseschleife



Die **Neukurve** beschreibt den Zusammenhang zwischen B und H bei vollständig entmagnetisiertem Kern, mit Berücksichtigung der nichtlinearen Permeabilität,  $B = \mu_0 \mu_r H$ . In  $\mu_r$  ist die Form der Kurve definiert

Die **Kommütierungskurve** ist die Funktion der Neukurve bis zur Sättigung über den gesamten Bereich der Hystereseschleife  $+B_s$  bis  $-B_s$ .

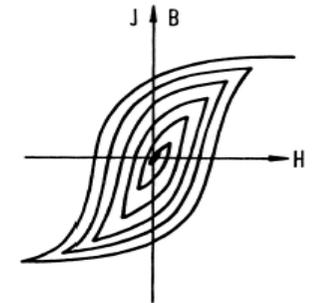
Die **Sättigungsmagnetisierung  $B_s$**  ist die maximal erreichbare Flussdichte B. Alle magn. Momente sind ausgerichtet. Sättigungsinduktion

Die **Remanente Flussdichte  $B_R(H)$** , Restmagnetisierungsdichte (Remanenz). Beim Abschalten des Magnetfeldes  $H = 0$  hat der Kern immer noch eine Restmagnetisierung von  $B_R \neq 0$ . Bei Ferromaterial ist diese Remanenz um Faktoren stärker ausgeprägt, als bei Ferriten. Der Schnittpunkt der Magnetisierungskurve mit der Ordinate wird Remanenz  $B_r$  bezeichnet.

Die **Koerzitivfeldstärke  $H_c$**  ist ein Gegenfeld, wodurch die Flussdicht B wieder auf „Null“ reduziert werden kann. Nur für kleine Geometrien.

$H_c$  ist die Feldstärke, bei der die Magnetisierungsschleife die Abszisse schneidet

Eine totale Entmagnetisierung ist nur durch Erwärmung über die Curietemperatur möglich.



Entmagnetisierungs-Schleife

$$\text{Magnetische Feldstärke } H = \frac{(I * N)}{l} = \frac{\text{Ampere} * \text{Windungen}}{\text{Länge}} \quad \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{Magnetische Flussdichte } B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\text{magnetischer Fluss}}{\text{magnetische Fläche}} \quad \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{Tesla}$$

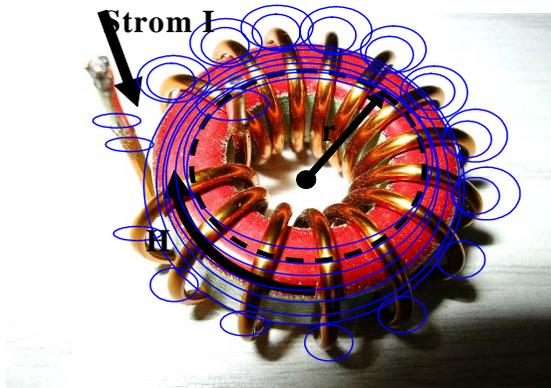
## Die magnetische Feldstärke bzw. Magnetisierung [A/m, Oe]

Elektrische Ströme, d.h. bewegte Ladungen, sind die alleinige Quelle der magnetischen Felder.

Der Magnetismus von Permanentmagneten kann auf molekulare Ringströme im Material zurückgeführt werden.

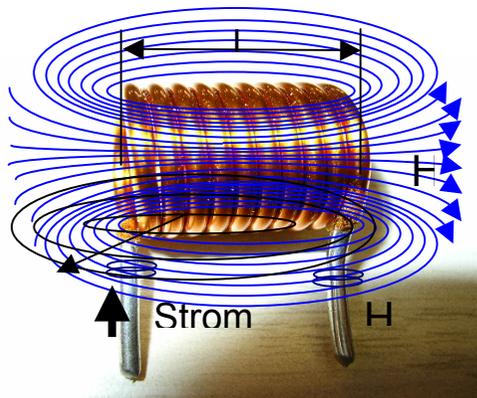
In ferro- bzw. ferrimagnetischer Materie ist die Feldstärke begrenzt durch die Sättigung. Hier müssen die Magnetisierungskurven der Kernmaterialien unbedingt beachtet werden. Luftspulen sind hiervon nicht betroffen – Luft ist paramagnetisch!.

Verlauf der Feldlinien der magnetischen Feldstärke H



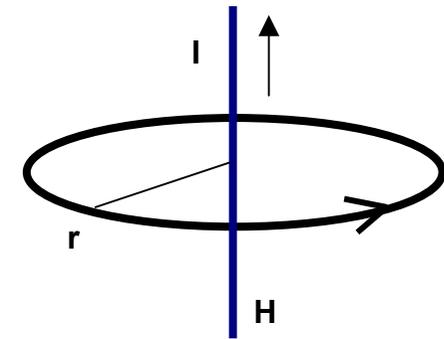
Feldverteilung im Ringkern

$$H := \frac{N \cdot I}{l_e \cdot 10^{-3}} \quad H_{Oe} := \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N \cdot I}{l_e}$$



Feldverteilung in einer Zylinderspule

$$H := \frac{N \cdot I}{l}$$



Feld eines geraden Leiters

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

Die Menge der Feldlinien ist proportional zur Feldstärke

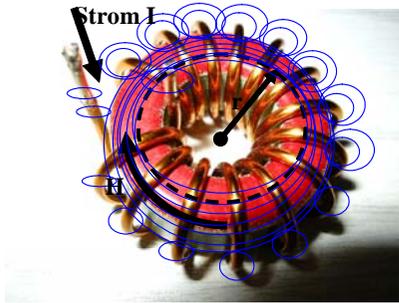
$$H := \frac{N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Feldstärke im  
innern des Ringkerns

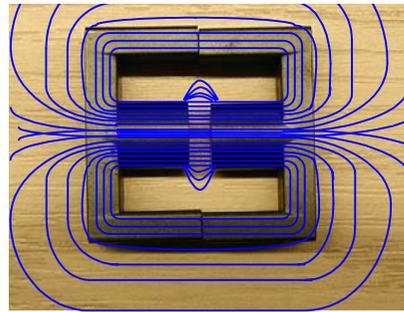
N Anzahl der Windungen  
 $l_e \times 10^{-3}$  Magn. Pfad in mm  
 $l_e$  Magn. Pfad in cm (amerikanische Daten!)  
 Länge des magnetischen Pfades/Weges  
 Genau auf das Einheiten-System achten!

gilt nur für  $r \gg r_{\text{Draht}}$   
 $l_e$  ... Länge der Feldlinie in m  
 $r_a$  ... Radius des Leiters in m  
 $r$  ... Abstand von der Leitermitte in m  
 $I$  .. Stromstärke in A

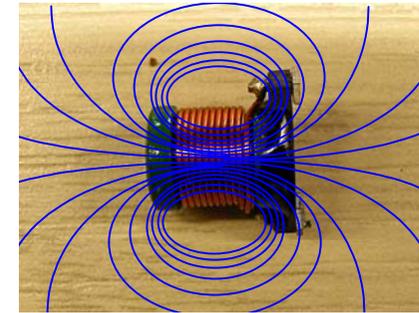
## Feldverteilung bei unterschiedlichen Kernformen



Ringkern



E-Kern



Trommel-, Tonnen- oder Stabkern

### Unterschiede der Feldverteilung:

- Geometrie
- Masse, Größen
- Wickelart

### Kernformen



**Die magnetische Flussdichte, bzw. magn. Induktion [Vs/m<sup>2</sup> bzw. T (Tesla), G (Gauss)]**

Der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke H und magnetische Induktion (Flussdichte) B ist im Vakuum durch **B = μ<sub>0</sub> x H** definiert. Im materiegefülltem Raum ist diese Beziehung nicht mehr erfüllt. Die Atome oder genauer deren Elektronen und der Kern wechselwirken mit dem Magnetfeld und verändern den Einfluss auf die Induktion. Hierbei ist μ<sub>0</sub> eine natürliche magnetische Feldkonstante mit 1,257 x 10<sup>-6</sup> [Vs/Am] oder 4 x π x 10<sup>-7</sup> [Vs/Am, H/m]

Alle anderen μ's sind dimensionslose, material- bzw. materieabhängige Korrekturwerte dieser Feldkonstanten

Die magnetische Permeabilität μ = μ<sub>S</sub>' - jμ<sub>S</sub>'' ist komplex, d.h. μ<sub>S</sub>' = Realteil L<sub>S</sub> ; μ<sub>S</sub>'' = Imaginärteil R<sub>S</sub>(Verluste)  
Zur Definition von Induktivitäten reicht glücklicherweise oft die näherungsweise, lineare Betrachtung aus.

In Materie sind **B** (Flussdichte bzw. Induktion) und **H** (Feldstärke) nicht mehr proportional.

- B = μ<sub>0</sub> x μ<sub>r</sub> x H** Hier ist dieser Korrekturwert μ<sub>r</sub> zur Anpassung erforderlich
  - B = μ<sub>0</sub> x H + J** B: Magnetische Flussdichte [Vs/m<sup>2</sup> bzw. T (Tesla), G (Gauss)]  
1T (Tesla) = 1 Vs/m<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> G (Gauss)
  - B = μ<sub>0</sub> x (H + M)** H: magnetische Feldstärke [A/m, Oe] (freie Elektronen)  
M: Magnetisierung [A/m] (gebundene Elektronen)  
J: Polarisation [Vs/m<sup>2</sup> bzw. T (Tesla)]
- Das Produkt B x H ist das Produkt für die gespeicherte Energie pro Volumeneinheit

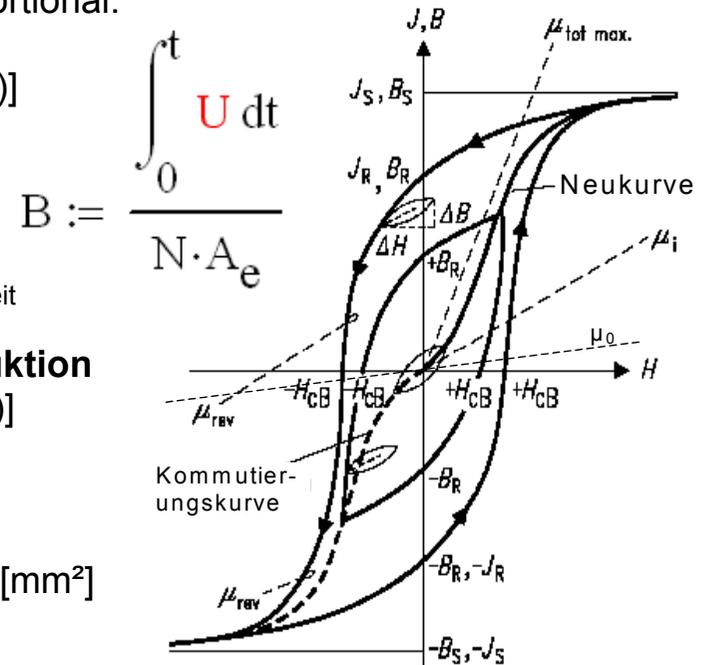
$$B_s := \frac{0.25 \cdot U_s \cdot 10^9}{f \cdot N \cdot A_e}$$

$$B_s := \frac{0.225 \cdot U_s \cdot 10^9}{f \cdot N \cdot A_e}$$

$$B_{Gauss} := \frac{U_{eff} \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot N \cdot A_e \cdot 10^{-2}}$$

**Für Elektroniker interessante Interpretationen der Induktion**

- B<sub>S</sub> = Spitzenwert der Induktion [Vs/m<sup>2</sup> bzw. T (Tesla)]
- U<sub>S</sub> = Spitzenwert der Spannung [V]
- f = Arbeitsfrequenz [Hz]
- N = Windungszahl
- A<sub>e</sub> = effektiver magnetischer Querschnitt des Kerns [mm<sup>2</sup>]
- 0,225 = Korrekturwert für Sinusspannung
- 0,25 = Korrekturwert für Rechteckspannung



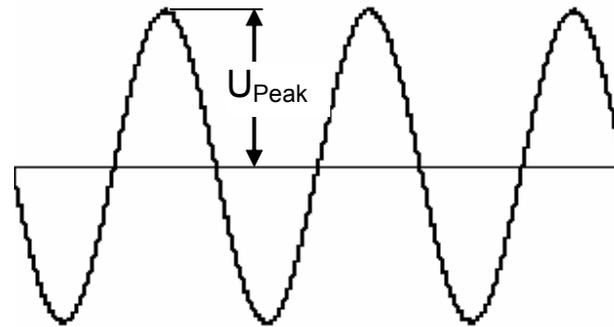
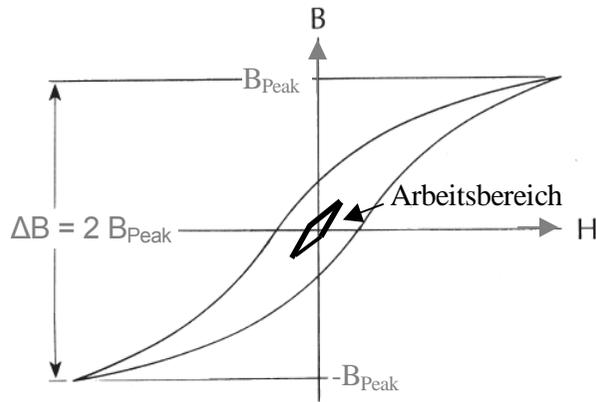
Alternativ zu μ wird die Materialgröße χ (kappa) **Suszeptibilität χ = μ<sub>r</sub> - 1** bei naturwissenschaftlicher Betrachtung verwendet. Bei Ferriten sind Werte > 50 gebräuchlich, somit kann χ oder μ<sub>r</sub> praktisch direkt verwendet werden.

Magnetische Bauteile von G.Schindler

Bei der Induktion muss unterschieden werden zwischen **unipolarer Induktion** (nur im positiven oder negativen Bereich der B/H-Kurve) und **bipolarer Induktion** (symmetrisch im positiven und negativen Teil der B/H-Kurve).

Bei **unsymmetrischer** Ansteuerung, wie bei einigen Schaltnetzteilen (Fly back), wird durch die Induktion, die Polarisation, bzw. Magnetisierung nicht mehr auf den Ausgangspunkt abgebaut ( der magn. Fluss wird nicht abgebaut), sondern durch den nächsten Impuls bis zu einem Maximum hochgeschaukelt. Die Unsymmetrie führt also zu einer Verschiebung von Bx um das schwankende ΔB. Ein zu großes ΔB führt zur Sättigung und die Induktivität bricht zusammen.

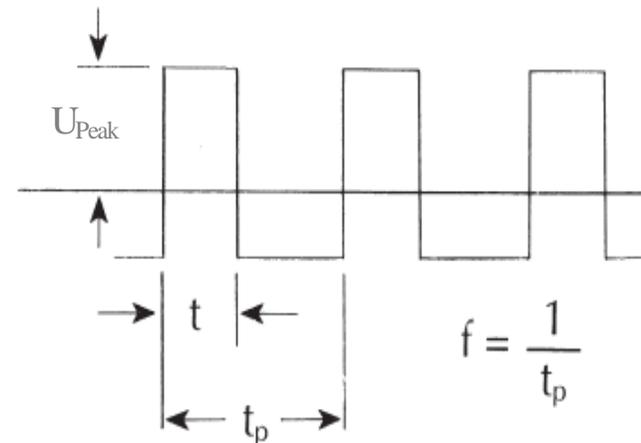
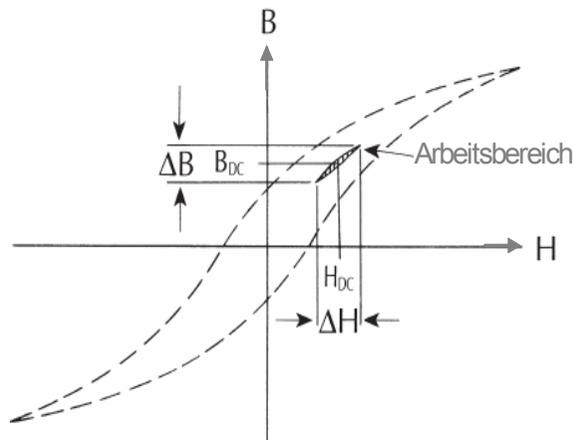
Unter Hysterese versteht man den physikalischer Effekt, der zwei verschiedene Werte annehmen kann, die von der Vorgeschichte abhängen. Ferro-bzw. Ferrimagnetische Werkstoffe zeigen die Erscheinung der magnetischen Hysterese.



$$B := \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} \cdot 10^9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot A_e} \quad B_{\text{Gauss}} := \frac{U_{\text{eff}} \cdot 10^8}{4.44 \cdot A_p \cdot 10^{-2} \cdot f \cdot N}$$

$$B := \frac{0.225 \cdot U_s \cdot 10^9}{f \cdot N \cdot A_e}$$

B = Flussdichte in Tesla (mT, Vs/m<sup>2</sup>)  
 B<sub>Gauss</sub> = Flussdichte in Gauss, 1T = 10<sup>4</sup>G  
 bei Effektiv- Sinusspannung



$$B := \frac{0.25 \cdot U \cdot 10^9}{f \cdot N \cdot A_e} \quad B_{\text{Gauss}} := \frac{U_{\text{Peak}} \cdot t \cdot 10^8}{2 A_e \cdot 10^{-2} \cdot N}$$

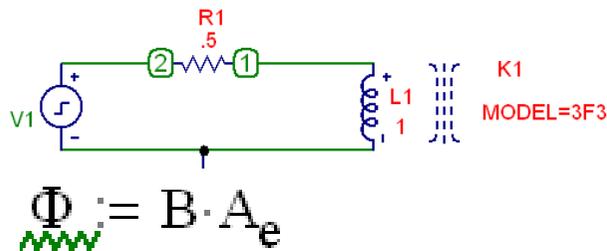
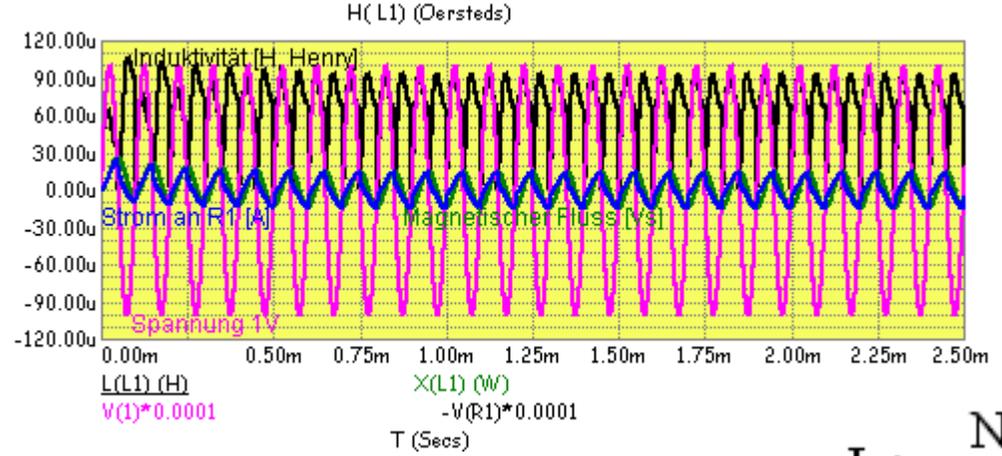
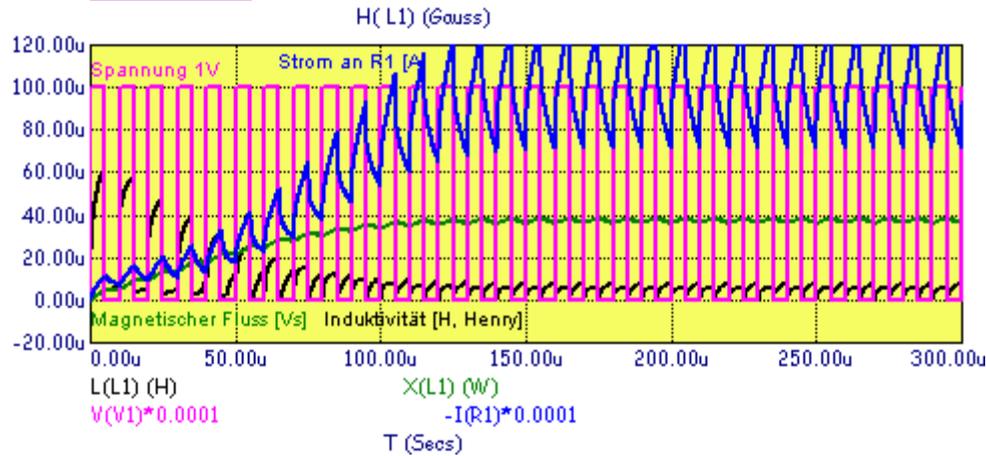
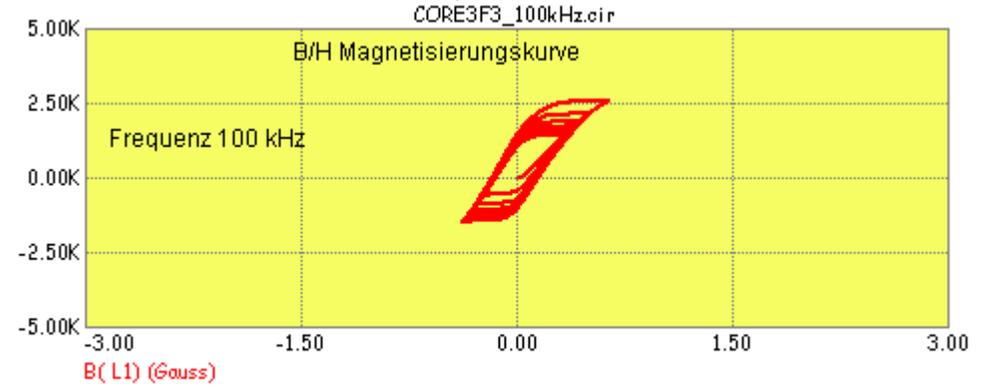
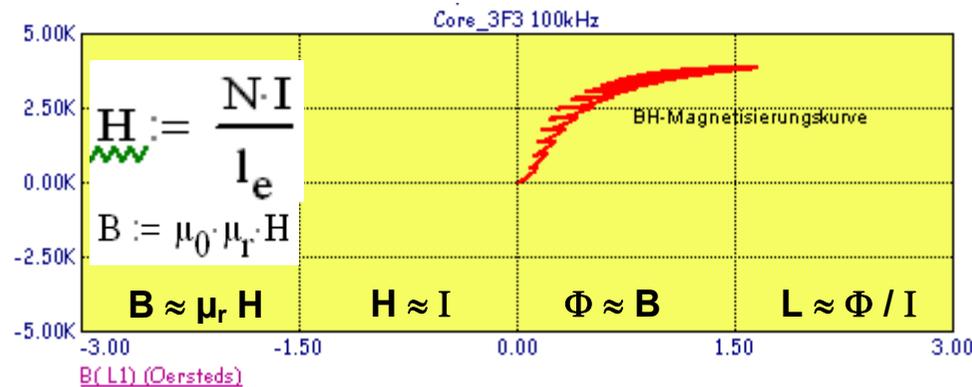
ΔB = Flussdichte in G (Gauss)  
 U<sub>peak</sub> = Spannung an Drossel (V)  
 t = Zeit pro Impuls  
 f = Frequenz  
 A<sub>e</sub> = Querschnitt des Kerns in mm<sup>2</sup>  
 N = Anzahl der Windungen

[Berechnungsbeispiel:](#)

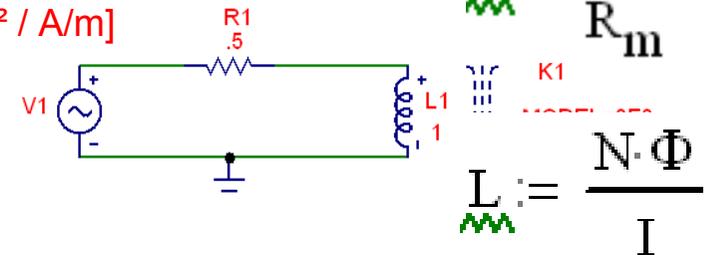
Magnetische Bauteile von G.Schindler

Vergleich 1V-Rechteckspannung mit 1V-Sinusspannung bei 100 kHz

Simulation mit Jiles-Atherton-Model zu proportionalen Betrachtung (U und I mit Faktor 10<sup>-4</sup> belegt)



- Rot: B/H-Magnetisierungskurve [Vs/m<sup>2</sup> / A/m]
- Schwarz: L Induktivität [H, Vs/A]
- Grün: Φ magnetischer Fluss [W, Vs]
- Blau: I Strom über R1 [A]
- Magenta: U Spannung des Generators [V]

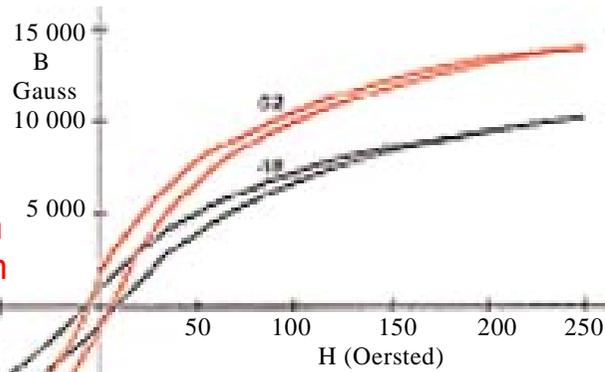


Magnetisierungskurven von Industrie-Kernmaterialien ( MicroMetals, FerroxCube, Epcos, VAC )

Micrometals

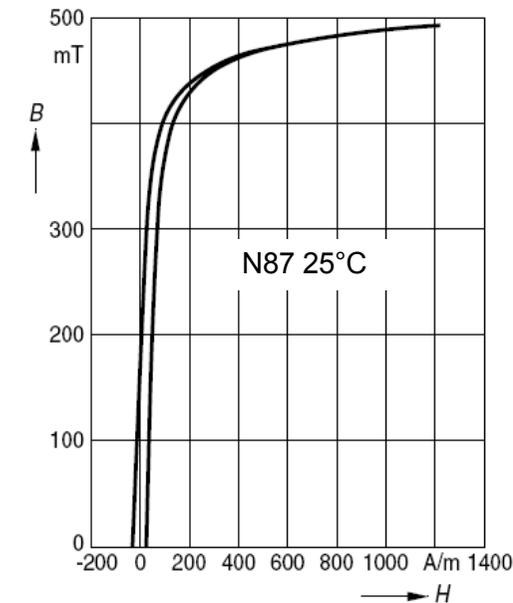
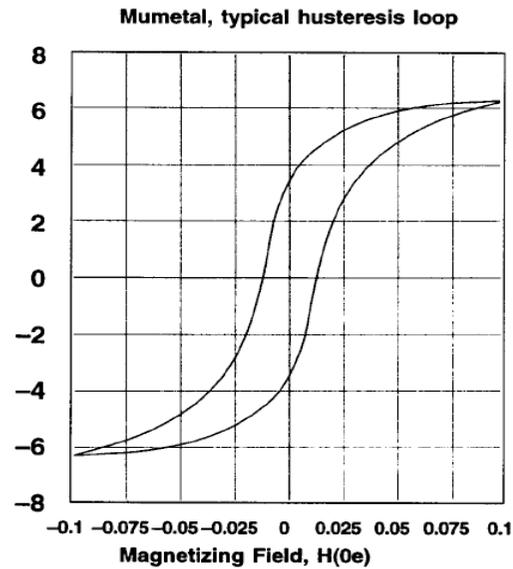
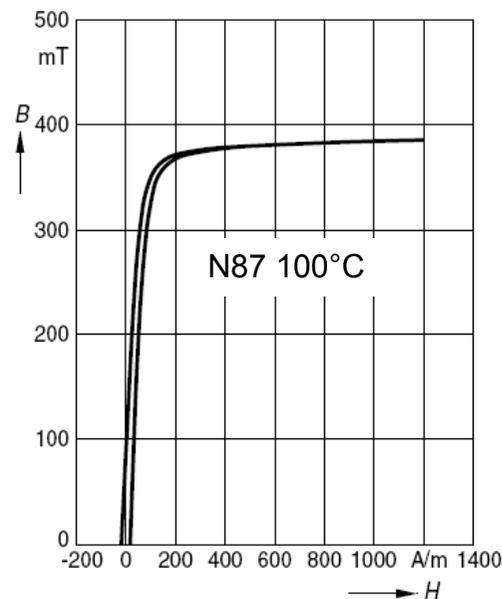
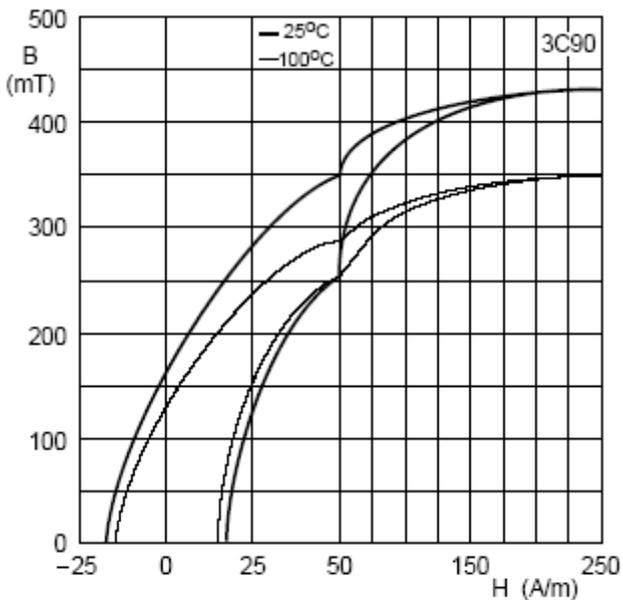
Material 52

$B_m = 14\ 000\ \text{G} / 1,4\ \text{T}$   
 $B_r = 1\ 450\ \text{G} / 145\ \text{mT}$   
 $H_m = 250\ \text{Oe} / 20\ \text{kA/m}$   
 $H_c = 6.3\ \text{Oe} / 500\ \text{A/m}$



Material 18

$B_m = 10\ 300\ \text{G} / 1,03\ \text{T}$   
 $B_r = 940\ \text{G} / 94\ \text{mT}$   
 $H_m = 250\ \text{Oe} / 20\ \text{kA/m}$   
 $H_c = 8,1\ \text{Oe} / 640\ \text{A/m}$



## Die Permeabilität $\mu$

Die Permeabilität  $\mu$  oder Suszeptibilität  $\chi$  ( $\chi = \mu - 1$ ) ist ein Maß für die Veränderung einer Induktivität durch das Einbringen von Materie in ein homogenes Magnetfeld. Werden Para-, Ferri- oder Ferromagnetische Materialien in eine Spule eingebracht, so steigt die Induktivität und damit der induktive Widerstand  $\omega L$  um den Faktor  $\mu_r$ .

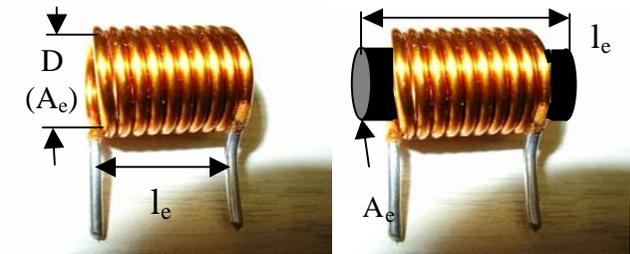
Bei Magnetics ist die Bezeichnung Permeabilität  $\mu$  gebräuchlich, in der Physik wird der Begriff Suszeptibilität  $\chi$  verwendet.

- $\mu < 1$     $\chi < 0$    Diamagnetismus – werden vom Magnetfeld abgestoßen
- $\mu > 1$     $\chi > 0$    Paramagnetismus z.B: Luft  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6}$  [H/m; Vs/Am]
- $\mu \gg 1$     $\chi \gg 0$    Ferri- und Ferromagnetismus

$$L := \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A_e}{l_e}$$

Beispiel Drossel:       $L =$  Induktivität H (Henry), Vs/A,  $\Omega s$   
 $N =$  Windungszahl  
 $A_e =$  magnetische Fläche       $m^2, cm^2, mm^2$   
 $l_e =$  Länge der Spule/Kern       $m, cm, mm$   
 $\mu_0 =$  magnetische Feldkonstante       $1,257 \times 10^{-6} = 4\pi \times 10^{-7} Vs/Am$   
 $\mu_r =$  relative Permeabilität

Beispiel:  
 Luftspule       $\Leftrightarrow$       mit Kern       $L := \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 95 \cdot 10^2 \cdot 0,009^2 \cdot \frac{\pi}{4}}{0,015}$



Luftspule

mit Kern

Die Flussdichte B (Induktion) im innern einer Spule mit Kern setzt sich zusammen Aus der magnetischen Flussdichte des Vakuums  $\mu_0$ [Vs/Am] x Feldstärke H[A/m] und der magnetischen Polarisation J[V/m] des Kerns.

$L = 500$  nH  
Faktor 100

$L = 50$   $\mu$ H

$B = \mu_0 \times H + J$        $B[V/m^2]$        $J[V/m^2]$        $\mu_0[Vs/Am]$        $H[A/m]$

Die Veränderung(Zuwachs) der Induktion  $J$  bei gleich bleibender Feldstärke  $H$  lässt ein Ausklammern des Faktors „ $\mu_0 \times H$ “ ( $\chi + 1$ ) zu. Dieser Ausdruck wird mit  $\mu_r$  bezeichnet und heißt „relativen Permeabilität“ oder Permeabilitätszahl .

$B = \mu_0 \times \mu_r \times H$        $B[V/m^2]$        $\mu_0[Vs/Am]$        $\mu_r =$  Multiplikator       $H[A/m]$

## Angaben der Permeabilität in Datenblättern

Die Permeabilität für unterschiedliche elektromagnetische Anwendungsfälle anders, wie die Hysereseschleife zeigt. In den Datenblättern, wenn als Wert angegeben, ist die Permeabilität nur eingeschränkt brauchbar und auch nur in engen Grenzen gültig. Die Angaben sind zumeist linearisiert oder nur für sehr kleine Wechselfelder und Bereiche ausgelegt. Das Jiles-Atherton-Model ist ein brauchbares Model zur Simulation, das die gesamte Hysterese-Kurve berücksichtigt.

Die Permeabilität ist eine komplexe Funktion, von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig:

Induktion B	Feldstärke H	Material	Wickelart	Geometrie	Luftspalt
		Frequenz	Kurvenform		

### Vergleiche unterschiedlicher Materialien sind nur unter gleichen Bedingungen zuverlässig.

Alle  $\mu$ 's sind dimensionslos, ausgenommen  $\mu_0$  ist eine magnetische Feldkonstante ( $1,257 \times 10^{-6}$  Vs/Am) für Luft.

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi = 12,57 \text{ [nH/cm]}$$

### Effektive Permeabilität $\mu_e$ (effective permeability)

In den Datenblättern der Ferrite ist  $\mu_e$  angegeben und als magnetische Formkenngröße oder Formfaktor berücksichtigt. Wird ein Kern mit einem Luftspalt versehen, so stellt sich eine geringere Permeabilität  $\mu_e$  ein. Dies wird durch den erhöhten magnetischen Widerstand im Luftspalt verursacht.

Hier ist nicht nur der Werkstoff, sondern auch die Form, Größe bzw. Abmessungen, sowie der Luftspalt berücksichtigt.

$$L := \mu_0 \cdot \mu_e \cdot N^2 \cdot \sum \frac{1}{A}$$

$\sum \frac{1}{A}$   
L  
N  
 $\mu_0$

Kernformfaktor aus Datenbuch [1/m, 1/mm]

Induktivität [H, Vs/A,  $\Omega$ s]

Windungszahl

magnetische Feldkonstante [Vs/Am]

$\mu_e$  effektive Permeabilität

**Für Ringkerne ohne Luftspalt gilt:**

**Der AL-Wert [nH] ist allerdings**

**effektiver anwendbar.**

$$L := \frac{1}{2\pi} \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot N^2 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)$$

L Induktivität [H, Vs/A,  $\Omega$ s]  
N Windungszahl  
H Höhe des Kerns [m]  
 $d_a$  Außendurchmesser [m]  
 $d_i$  Innendurchmesser [m]  
 $\mu_i$  Anfangspermeabilität

$$L = A_L \times N^2 \text{ [nH]}$$

# Magnetische Bauteile von G.Schindler

- In accordance with IEC 1246
- E cores are supplied as pieces

## Magnetic characteristics (per set)

$$\begin{aligned} \Sigma/A &= 1,44 \text{ mm}^{-1} \\ l_e &= 46,3 \text{ mm} \\ A_e &= 32,1 \text{ mm}^2 \\ A_{\min} &= 31,9 \text{ mm}^2 \\ V_e &= 1490 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

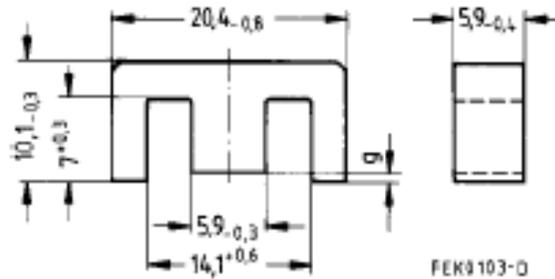
Approx. weight 7,3 g/set

## Ungapped

Material	$A_L$ value nH	$\mu_e$	$A_{L\min}$ nH	$P_V$ W/set	Ordering code	PU Pcs
N30	2150 + 30/- 20 %	2460			B66311-G-X130	1470
N27	1300 + 30/- 20 %	1490	1090	0,27 (200 mT, 25 kHz, 100 °C)	B66311-G-X127	
N67	1350 + 30/- 20 %	1540	1090	0,92 (200 mT, 100 kHz, 100 °C)	B66311-G-X167	

## Gapped

Material	$g$ mm	$A_L$ value approx. nH	$\mu_e$	Ordering code ** = 27 (N27) = 67 (N67)	PU Pcs
N27,	0,09 ± 0,01	329	415	B66311-G90-X1**	1470
N67	0,17 ± 0,02	227	259	B66311-G170-X1**	
	0,25 ± 0,02	171	195	B66311-G250-X1**	
	0,50 ± 0,05	103	118	B66311-G500-X1**	



## Datenblattauszug

EPCOS E20/10/6 EF20

Angabe von  $\mu_e$  zur Bestimmung der Induktivität

$$L := \mu_0 \cdot \mu_e \cdot N^2 \cdot \sum \frac{1}{A}$$

Praktischer ist allerdings die Verwendung des  $A_L$ -Wertes. für die Bestimmung der **Induktivität** und die **Windungszahl**

$$L = A_L \times N^2$$

## Weitere Angaben im Datenblatt:

Masse des Kerns in mm

Gewicht pro Set

Magnetische Formkenngrößen im Set

- $\sum \frac{1}{A}$  Kernformfaktor [1/m, 1/mm]
- $A_e$  magnetische Fläche [m<sup>2</sup>, cm<sup>2</sup>, mm<sup>2</sup>]
- $A_{\min}$  min magn. Fläche [m<sup>2</sup>, cm<sup>2</sup>, mm<sup>2</sup>]
- $l_e$  eff. magn. Länge [m, cm, mm]
- $V_e$  eff. magn. Volumen [m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, mm<sup>3</sup>]
- $\mu_e$  rel. effektive Permeabilität
- $A_L$  Induktivitätsfaktor [nH, Vs/A x 10<sup>-9</sup>]
- $P_V$  Kernverlustleistung [W/Set, mW/cm<sup>3</sup>]

Ungapped ohne Luftspalt

Gapped mit Luftspalt  $g$  [mm]

N30/N27/N87 Ferritmaterialien

**Anfangspermeabilität  $\mu_i$  (initial permeability)**

Das Verhältnis der Induktionsänderung  $\Delta B$  zur Feldstärkeänderung  $\Delta H$  bei sehr kleinen Wechselfeldern wird als Anfangspermeabilität bezeichnet. In diesem kleinen Bereich wird  $\mu_i$  linear betrachtet. Sie wird an einem magnetisch geschlossenen Ringkern gemessen. Sehr kleine Wechselfelder  $< 1$  mT kommen bei dynamischen Mikrofonen, Tonköpfen, NF-Trafos oder Messsonden vor.

**In amerikanischen Unterlagen ist  $\mu_i$  auch als  $\mu_0$  angegeben!**

**Reversible Permeabilität  $\mu_{rev}$**

Wenn ein schwaches Wechselfeld einen Gleichfeld überlagert ist, so wird eine kleine Magnetisierungsschleife erzeugt. Bei abnehmender Wechselfeldamplitude wird die Schleife zur Geraden. Diese Gerade wird als reversible Permeabilität bezeichnet. Die Reversible Permeabilität  $\mu_{rev}$  ist von der Gleichstrommagnetisierung abhängig.

**Bei  $B_{-} = 0$  ist  $\mu_{rev} = \mu_i$**

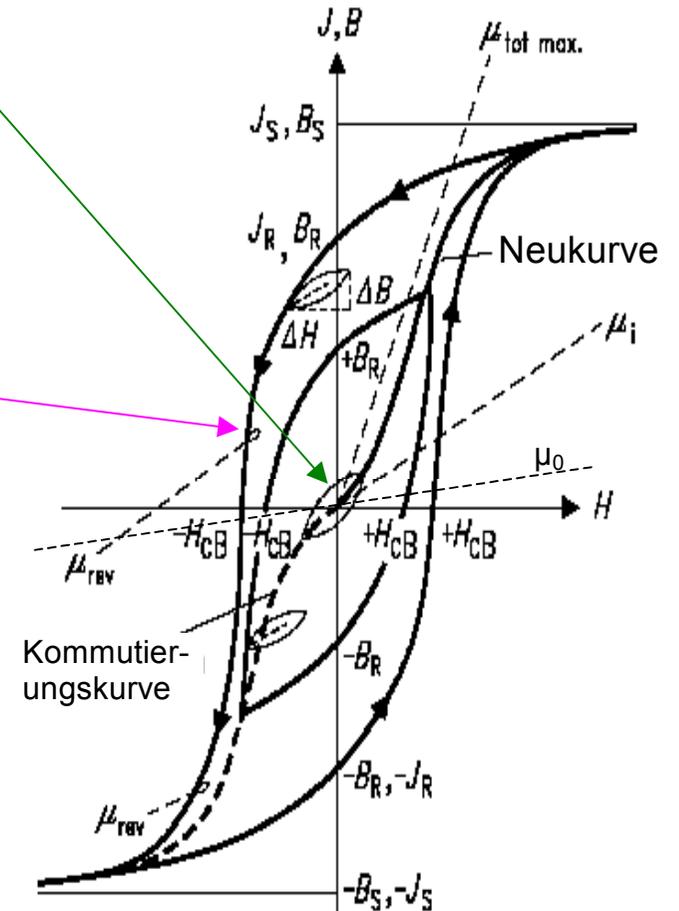
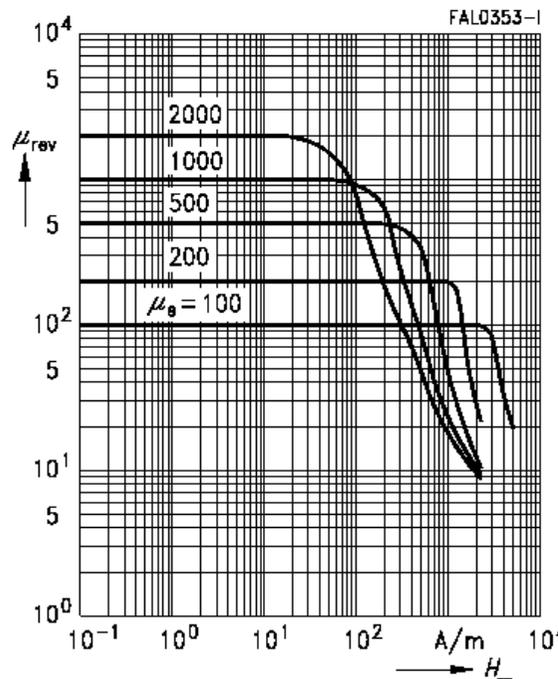
Diese Grafiken sind stark abhängig von:

- Kernmaterialien
- Geometrie
- Größe

Ein Übertragen von z.B. Ringkern auf E-Kern ist nicht möglich.

Auch ist zu beachten, dass ein Gleichfeld die Spulengüte beeinträchtigt.

$$Q = \omega L / R_s$$



Bei Gleichfeldapplikationen sollten grundsätzlich mit Luftspalt oder Eisenpulverkern ausgeführt werden.

**Wirksame Permeabilität  $\mu_{app}$**

Wird für eine Applikation die wirkliche Permeabilität benötigt, wegen:

Sicherheit, Toleranzfestlegung, Temperaturverhältnisse, Güte usw.

bleibt nur der Vergleich, die Induktivität mit und ohne Kernmaterial zu testen

Hier wird die Induktivität **mit** und **ohne** Kern in einem applikationsähnlichem Aufbau getestet.

**Achtung: Ihre Schaltung macht das unter Umständen nicht mit!**

Dieser Test wird hauptsächlich bei undefinierbaren Streuinduktivitäten oder Wirbelstromverlusten angewandt, wo keine eindeutige Zuordnung der Anfangs- bzw. effektiven Permeabilität möglich ist (Zylinder-, Rohr, Schraubkerne...).

Abhängigkeiten:

Geometrie Luftspalt Wicklung Umgebung Temperatur Frequenz Signalform

$$\mu_{app} = \frac{L}{L_0} = \frac{L \text{ mit Kern}}{L \text{ ohne Kern}}$$

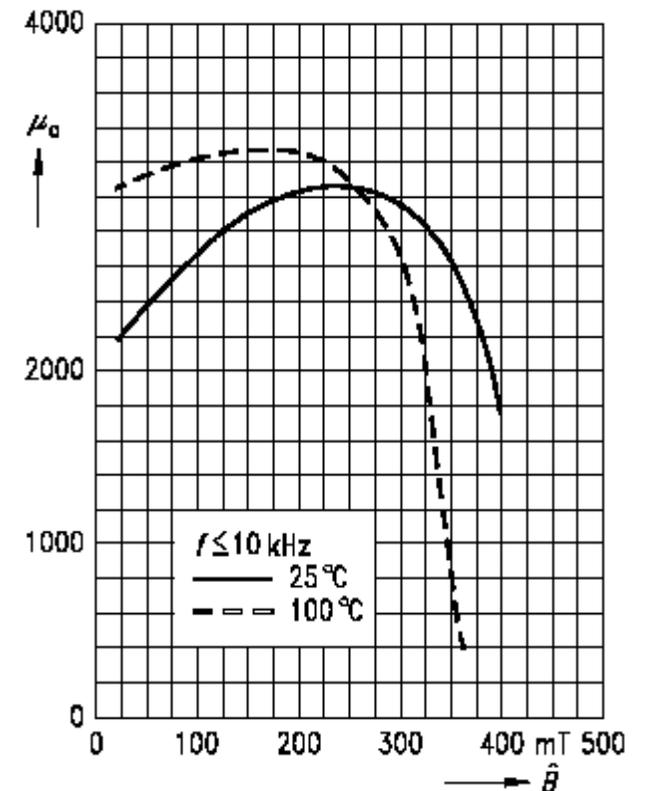
**Amplitudenpermeabilität  $\mu_a$**

Angaben der Permeabilität bei hoher Aussteuerung, um das Temperaturverhalten von Kernmaterialien zu bestimmen. Leider ist die Messfrequenz vom Hersteller viel zu niedrig angesetzt (realitätsfern). Bei heutigen Applikationen, z.B. Schaltregler liegen wir bei einer Schaltfrequenz zwischen 100 und 500 kHz – das wäre interessant.

$$\mu_a = \frac{B_s}{\mu_0 H_s} \quad \begin{array}{l} B_s \text{ Spitzenwert der Flussdichte [Vs/m}^2, \text{T, Gauss]} \\ H_s \text{ Spitzenwert der Feldstärke [A/m, Oe]} \end{array}$$

Bis zu einer Dek. unterhalb der Grenzfrequenz kann diese Grafik verwendet werden.

Amplitudenpermeabilität bei Wechselfeldinduktion



### Komplexe Permeabilität $\mu'$ , $\mu''$

Definition im Kleinsignalbereich  $B \leq 0,25$  mT bei kleinen Ringkernen

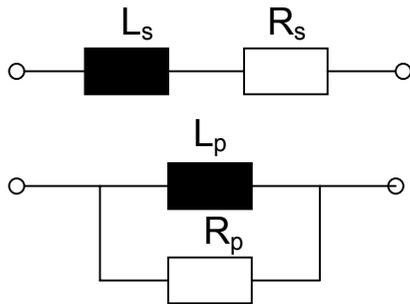
Eine Induktivität, bestehend aus Windungen und Kern, ist niemals ideal mit einem Phasenwinkel von  $90^\circ$ . Eine Induktivität hat immer diverse Verluste.

Die Kernverluste können als Serien- oder Parallelkreis betrachtet werden.

Hierbei ist  $\mu_s'$  der relative Real-(induktivitäts-) Anteil

und  $\mu_s''$  der relative imaginär-(Verlust)Anteil, frequenzabhängig ohm'sch nach folgender Beziehung:

Der Schnittpunkt von  $\mu_s'$  und  $\mu_s''$  ( $\mu = \mu_s' - j\mu_s''$ ) wird in der Praxis als Grenzfrequenz betrachtet. Eine Parallelschaltung ist in eine Serienschaltung für eine Frequenz umrechenbar. Eine Umrechnung ist nach unten angegebenen Funktionen möglich.



Serielle Betrachtung, siehe Diagramm:

$$\underline{Z} = j \omega L_s + R_{KS}$$

Parallele Betrachtung:

$$\underline{Z} := \frac{1}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_p} + \frac{1}{R_{Kp}}}$$

Hier bietet sich an, die Kernverluste in seiner Permeabilität  $\mu$  anzugeben:

$$\text{oder } \frac{1}{\underline{\mu}} = \frac{1}{\mu_p'} - \frac{j}{\mu_p''}$$

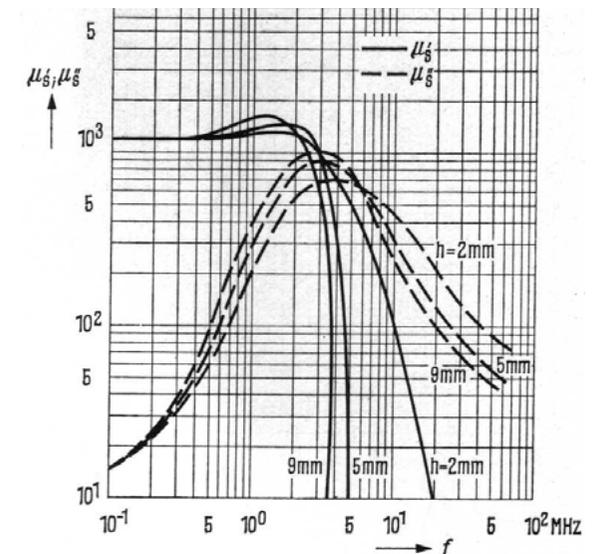
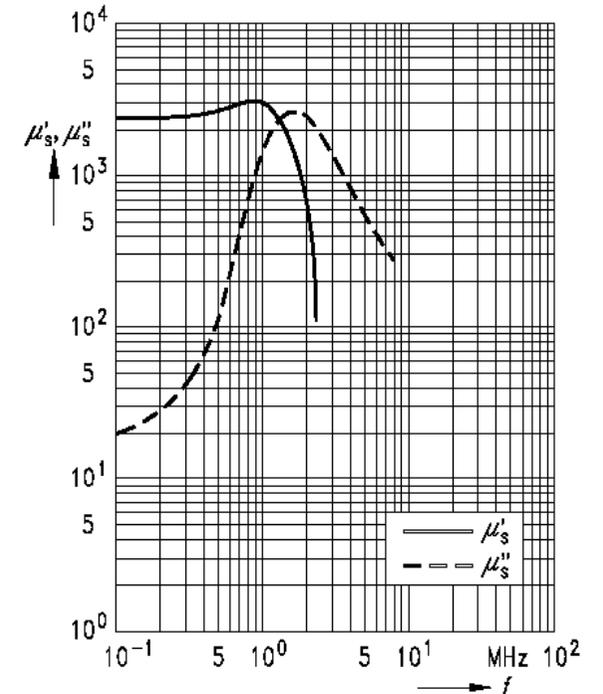
Die komplexen Permeabilität wird mit kleinen Ringkernen erfasst. Hier ist der Einfluss der Kernabmessungen auf die Messdaten ersichtlich. N22

Der Wert der Permeabilität, auch bei gleichem Ferritwerkstoff ist nicht direkt auf unterschiedliche Geometrien übertragbar.

$D_a = 10$  mm

$D_i = 6$  mm

$H = 2, 5, 9$  mm



## Magnetische Bauteile von G.Schindler

Zwischen den Windungen und Lagen einer Spule fließen Verschiebungsströme. Ihre Wirkung lässt sich näherungsweise durch eine Kapazität zwischen den Wicklungsenden, die Wicklungskapazität, modellieren. Diese Kapazität bildet zusammen mit der Spuleninduktivität einen Schwingkreis, der mit den ohm'schen Verlusten der Spule bedämpft ist.

Die Impedanz der Spule beträgt :

$$Z = \frac{R + j \omega}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}$$

Trennt man Z in Real- und Imaginärteil, entsteht eine Reihenschaltung  $R_e$  und  $jX_e$  mit der jeweiligen Frequenzabhängigkeit.

$$R_e = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}$$



$$jX_e = \frac{j \omega \{ L(1 - \omega^2 LC) - R^2 C \}}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}$$

Durch  $jX_e$  wird eine Induktivität repräsentiert, die frequenzabhängig ist:

$$L_e = |X_e| / \omega = \frac{L(1 - \omega^2 LC) - R^2 C}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}$$

$R_e$  fällt entweder mit **steigender Frequenz**, oder durchläuft ein **Maximum**, je nachdem, ob der Wert von  $\text{SQR}(2 \cdot L/C)$  **größer, oder kleiner als R** ist.

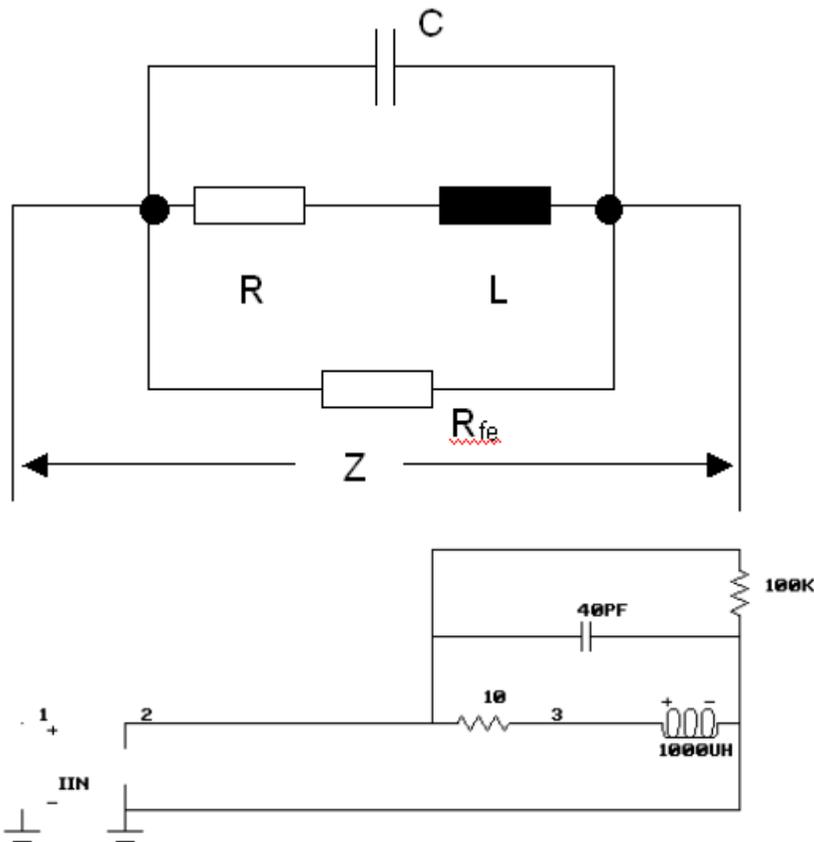
$L_e$  **steigt** mit kleinem R stark an, durchläuft ein **Maximum**, **fällt** ab und **wechselt** das Vorzeichen. Das bedeutet, dass aus induktivem ein kapazitives Verhalten geworden ist.

Die Spule wirkt wie ein **Kondensator**, wenn  $R^2 C$  den Wert von  $L(1 - \omega^2 LC)$  übersteigt und dadurch  $L_e$  negativ wird.

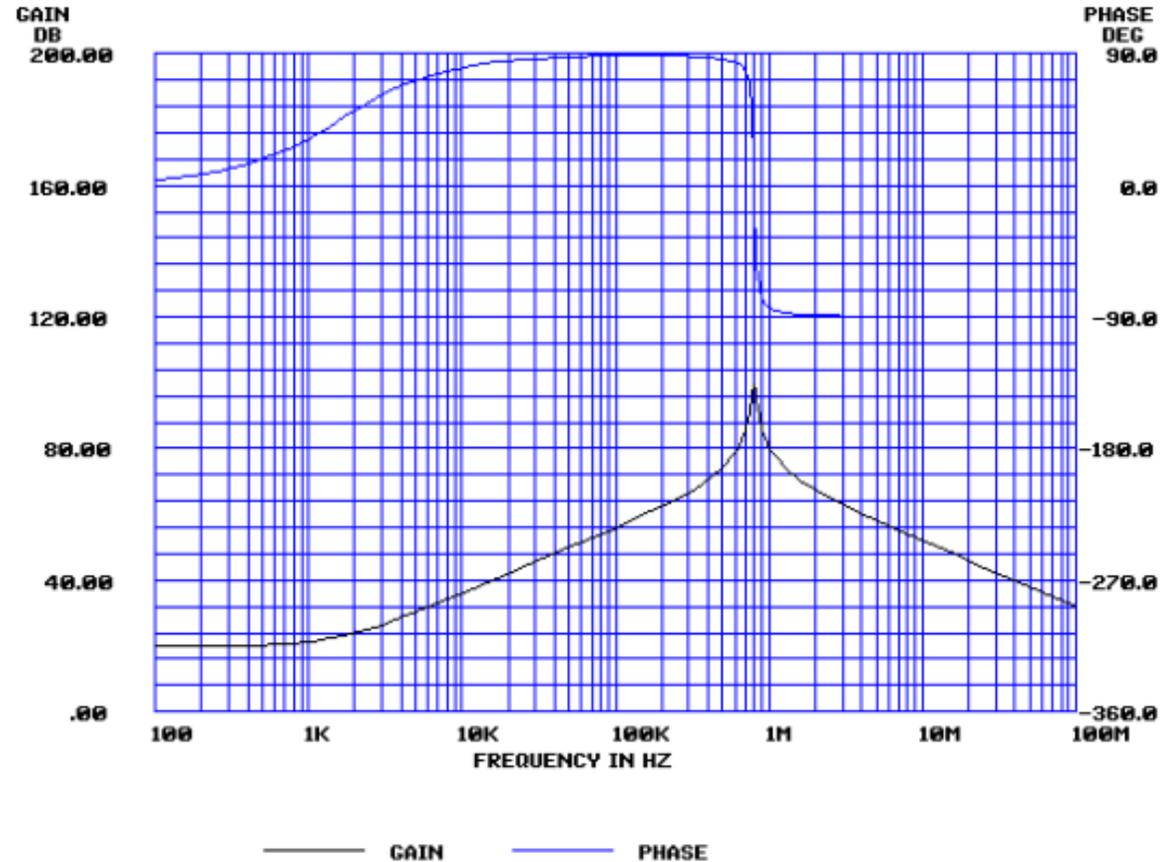
Dies ist bei niedrigeren Frequenzen als  $x = \text{SQR}(1/LC - (R/L)^2) / 2\pi$  der Fall. Dabei ist immer  $f_0 = \text{SQR}(LC) / 2\pi > f_x$  die Resonanzfrequenz ohne Dämpfung (durch R)!.  $f_x$  wird Null für  $R = \text{SQR}(L/C)$ .

Spulen mit Eisen- oder Ferritkernen zeigen noch eine weitere charakteristische Eigenschaft. Die Verluste des Kerns beim Ummagnetisieren können angenähert durch einen parallel zu den Wicklungsanschlüssen liegenden Widerstand  $R_{fe}$  (normalerweise im kOhm-Bereich) simuliert werden. Dieser Widerstand begrenzt den Resonanzwiderstand des Schwingkreises und damit den maximalen Wert von  $Z$  selbst bei kleinen Werten für den Reihenwiderstand  $R$ . Die Resonanzschärfe wird verringert.

W.W.



Schaltbild:  
Spannungsgesteuerter Stromquelle für Simulation von Z



Z-Verlauf der Schaltung:  
0dB entspricht  $Z = 1 \text{ Ohm}$ , 20dB = 10 Ohm, 100dB = 100kOhm  
von W.Wehr

## Magnetische Durchflutung $\Theta$ (Theta) [A]

Die Summe sämtlicher eine Fläche durchsetzender Ströme wird als Durchflutung  $\Theta$  (Theta) bezeichnet.

Wenn ein stromdurchflossener Leiter aus mehreren Windungen besteht, dann trägt der Stromfluss jeder Windung zum Erzeugen eines Magnetfeldes, d. h. zur Erhöhung der Durchflutung, bei.

Die magn. Durchflutung ist die elektromagnetische Quelle eines magnetischen Kreises - vergleichbar mit der Spannung  $U$  im elektrischen Stromkreis. Auch hier sind Teildurchflutungen möglich. Die Kirchhoff'schen Gesetze gelten auch hier (z.B. Spannungsteiler). Dadurch wird die Durchflutung im Kern berechenbar.

In einem Magnetkreis einer Spule kommen unterschiedliche Materialien vor, wie Kern – Luftspalt

Hierbei muss die Permeabilität  $\mu_r$ -Kern  $\gg 1$  berücksichtigt  
 $\mu_r$ -Luftspalt = 1

Daraus ergibt sich die Definition für die magnetische Durchflutung

$$\Theta := N \cdot I \quad [\text{A}] \qquad H \cdot l_e \quad [\text{Am/m}] = I \cdot N \quad [\text{A}] = \Theta$$

Das Ohm'sche Gesetz gilt auch für den magnetischen Kreis

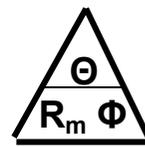
elektrischen Stromkreis,



$$U = R \cdot I$$

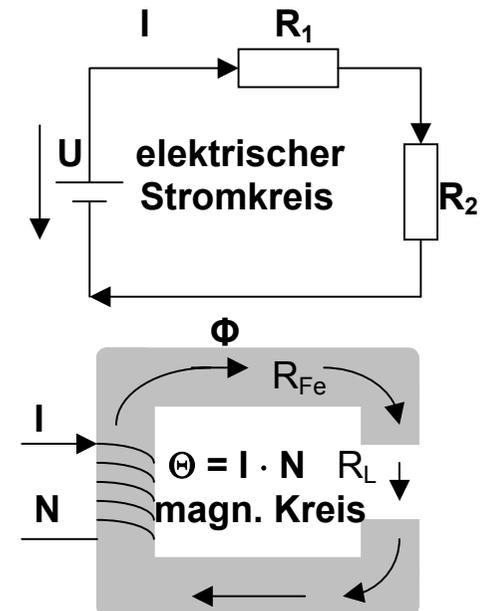
Spannung  $U$  [V]  
 Widerstand  $R$  [ $\Omega$ ]  
 Stromstärke  $I$  [A]

magnetischer Kreis



$$\Theta = R_m \cdot \Phi$$

magn. Durchflutung  $\Theta$  [A]  
 magn. Widerstand  $R_m$  [1/H; A/Vs, 1/ $\Omega$ s]  
 magn. Fluss  $\Phi$  [Vs]



Hopkinson'scher Satz

## Der magnetische Fluss $\Phi$ , Flußdichte (Phi) [Wb, Vs]

$\Phi = Vs = Wb$ (Weber), Alte Unterlagen sind noch mit der Einheit Maxwell M versehen  $1M = 10^{-8}Vs(Wb)$

Der magnetische Fluss  $\Phi$  ist die Summe aller magnetischen Feldlinien in der betrachteten Materie (Kern).

Bei der Bestimmung von Kernmaterialien interessiert die Wirkung, die die Flussdichte B in der betrachteten Querschnittsfläche hervorruft. Der magnetische Fluss ist also das Maß für die Anzahl magnetischer Feldlinien, die eine Fläche durchsetzen.

Der magnetische Fluss ist im gesamten magnetischen Kreis gleich. Im Luftspalt herrscht annähernd die gleiche Flussdichte wie im Kern. Durchsetzen die Magnetfeldlinien die Fläche A senkrecht, so ist der magnetische Fluss wie folgt definiert:

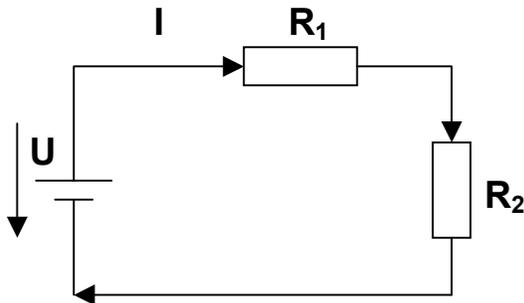
$$\Phi = B \cdot A_e [Vs] \quad \Phi = H \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_e [Vs] \quad \Phi = \Theta / R_m [Vs] \quad \Phi = I \cdot N / R_m [Vs] \quad \Phi = L \cdot I / N [Vs]$$

Der Betrag des magnetischen Flusses  $\Phi$  [Vs] ist proportional zur Feldliniendichte, Flussdichte B [Vs/m<sup>2</sup>].

Steht das Magnetfeld nicht senkrecht zur durchsetzten Fläche, so geht nur die zur Fläche senkrechte Komponente des B-Feld-Vektors in die Rechnung ein.

$$\Phi = B \cdot A_e \cdot \cos(\alpha)$$

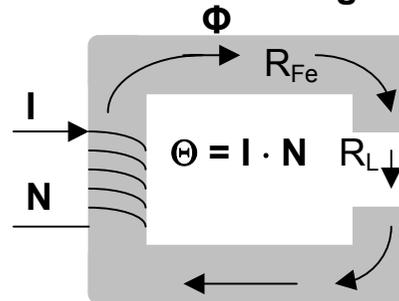
### Der Elektrische Kreis



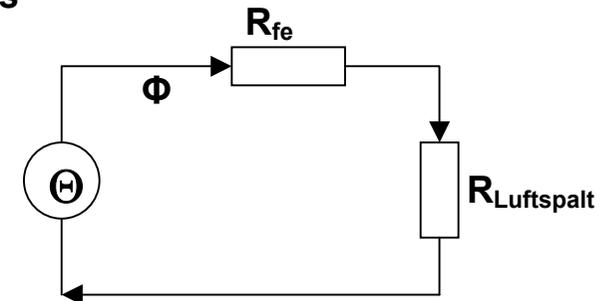
Widerstand  $R_{\text{elektr}} = R_1 + R_2$   
 Strom  $I = U / R_{\text{elektr}}$

$$R_{\text{mag}} := \frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_0 \mu_r \cdot A_{\text{Fe}}} + \frac{l_{\text{Luftspalt}}}{\mu_0 \cdot A_{\text{Luftspalt}}}$$

### Der elektromagnetische Kreis



magn. Widerstand  
 magn. Feldstärke  
 magn. Durchflutung  
 magn. Fuss



$$R_{\text{mag}} = R_{\text{fe}} + R_{\text{Luftspalt}} [1/\Omega_s; A/Vs]$$

$$H_{\text{ges}} = H_{\text{fe}} + H_{\text{Luftspalt}} [A/m]$$

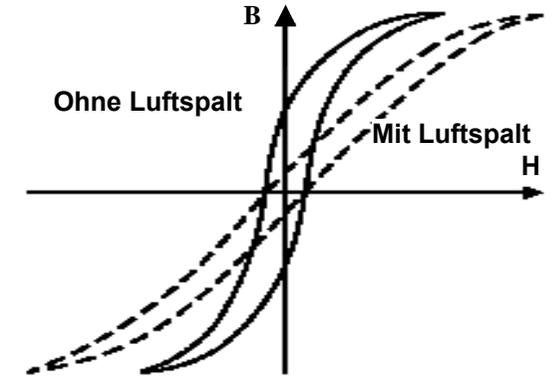
$$\Theta_{\text{ges}} = \Theta_{\text{fe}} + \Theta_{\text{Luftspalt}} [A]$$

$$\Phi = \Phi_{\text{im Kern}} = \Phi_{\text{im Luftspalt}}$$

## Der Luftspalt

Der Luftspalt erlaubt eine höhere magn. Durchflutung  $\Theta = I \cdot N$  des ganzen mag. Kreises. Die gesamte Durchflutung ist die Summe der Durchflutungen im Kern + Luftspalt

- Im Luftspalt gibt es keine Sättigung – quasi unendlich starkes Feld
- Im Kern muss die Feldstärke in engen Grenzen gehalten werden. Kleines Feld



$$R_{\text{mag}} := \frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_0 \mu_r \cdot A_{\text{Fe}}} + \frac{l_{\text{Luftspalt}}}{\mu_0 \cdot A_{\text{Luftspalt}}}$$

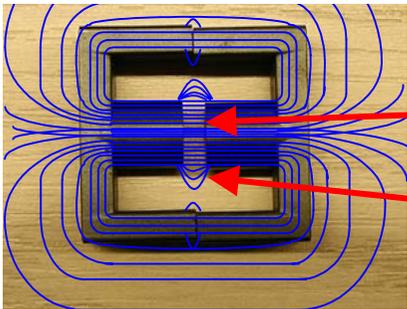
### Beziehung :

$$H_{Ls} \cdot l_{Ls} + H_{fe} \cdot l_{Fe} = I \cdot N = \Theta$$

Luftspalt      Kern      Durchflutung [A] gesamt

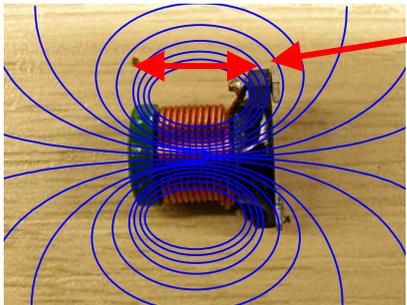
Luftspalt

In Bereich des Luftspaltes treten Feldlinien aus. Diese werden auf die Wicklung transformiert und sind bei manchen Applikationen sehr störend (Spulenkörper auffüttern)



Luftspalt

Bei Tonnenkernen ist der Luftspalt sehr groß. Eine Sättigungsmagnetisierung wird selten erreicht. Die Begrenzung durch den Draht ist eher.

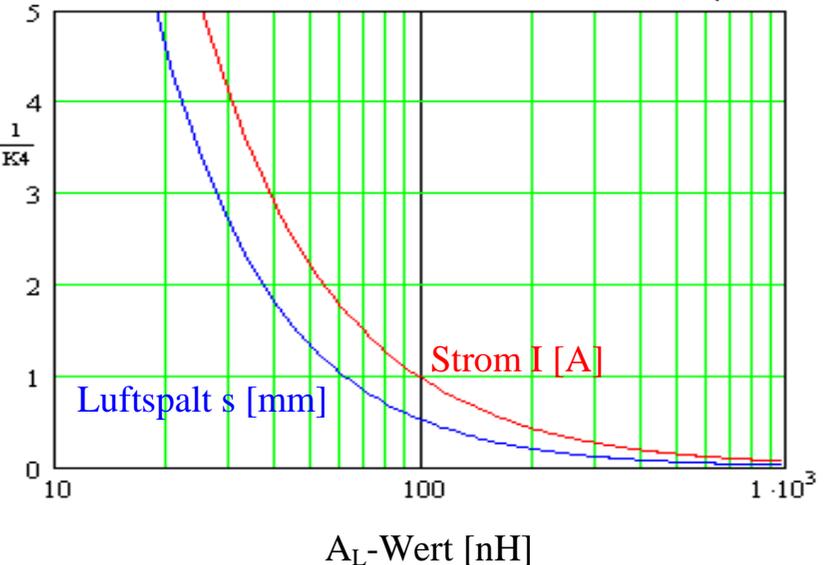


$$s \text{ [mm]} \quad I \text{ [A]} \quad \left( \frac{0.9 \cdot A_L}{K3} \right)^{\frac{1}{K4}} \quad \left( \frac{s}{K1} \right)^{\frac{1}{K2}}$$

### Verluste durch Luftspalt $I_{\text{gap}}$ :

$I_{\text{gap}} \uparrow \Rightarrow$  Kernverluste  $\downarrow$ , Kupferverluste  $\uparrow$   
 $I_{\text{gap}} \downarrow \Rightarrow$  Kernverluste  $\uparrow$ , Kupferverluste  $\downarrow$

EF20 erweiterte Strombelastbarkeit durch Luftspalt

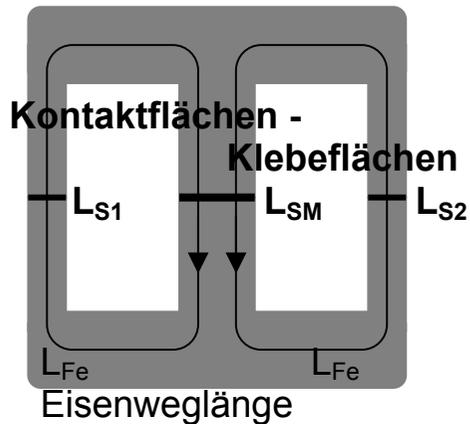


In Eisenpulverkernen ist der Luftspalt durch die isolierten, voneinander getrennten magnetischen Momente (mikroskopisch kleine Partikel) definiert. Dadurch können diese, zumeist Ringkerne, mit viel höheren Feldstärken angesteuert werden. Allerdings wird die Permeabilität mit zunehmendem Luftspalt geringer.

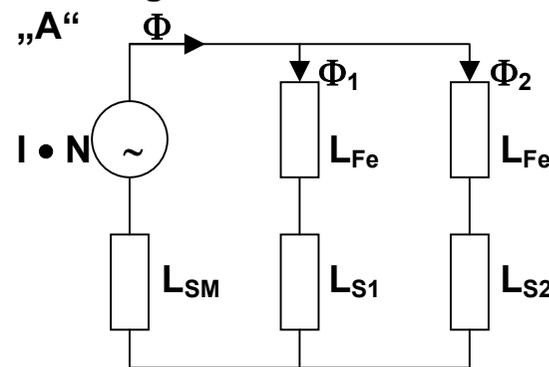
### Luftspaltwirkung

Bei hochpermeable Kernen und kleinen/keinen Luftspalten müssen alle Kontaktflächen beachtet werden. Hier werden die Kernhälften nicht verklebt, sondern geklammert. Das Klammern ermöglicht kleinere Luftspalte, weil der benötigte Raum für den Klebstofffilm entfällt. Zusätzlich werden die Kontaktflächen unter Druck zusammengehalten.

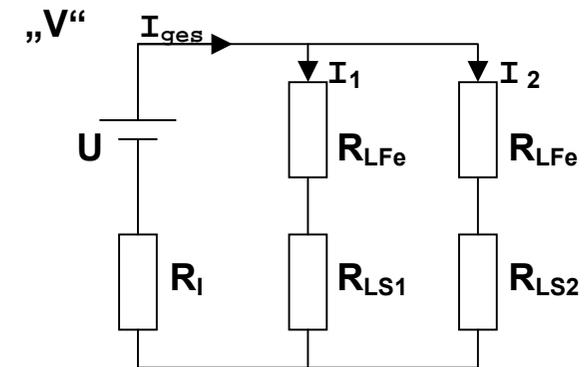
### Kernbeispiel



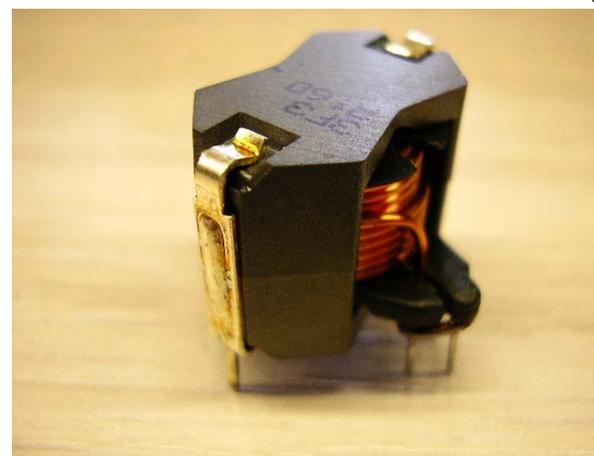
### Der magnetische Kreis



### Der elektrische Kreis



Hochpermeable Kerne der Kernformen P, PR, RM, EP, ETD usw. sollten möglichst geklammert werden um den Einfluss der Luftspalte möglichst gering zu halten. Ein Klebstofffilm hat eine Stärke von ca. 0,01 bis 0,05 mm



Magnetische Bauteile von G.Schindler

Da der magn. Fluss  $\Phi$  in Vs im gesamten Kreis annähern gleich ist, herrscht im Luftspalt die gleiche Flussdichte  $\Phi$ , wie im Kern (Streuung vernachlässigt). Die Feldlinienverteilung im Kern kann sich allerdings verschieben.

Mit der Beziehung:  $\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}$  ergibt sich:

$$\frac{B_{Ls} \cdot l_{Ls}}{\mu_0} + \frac{B_{Fe} \cdot l_{Fe}}{\mu \cdot \mu_0} = I \cdot N \quad B_{Ls} := B_{Fe} \quad B_{Ls} := \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l_{Ls} + \frac{l_{Fe}}{\mu}}$$

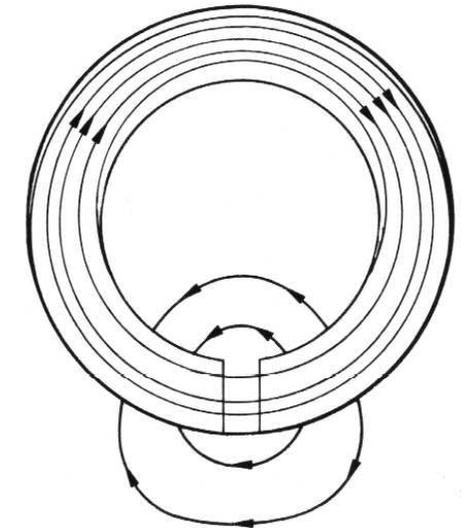
$\mu$  ist die Permeabilität des Eisenkreises ( $\mu \gg \mu_0$ )

Bei Ferriten ist die Permeabilität  $\mu$  groß, die Feldstärke  $H_{Fe}$  im Eisenweg von einigen cm ist viel kleiner gegenüber Feldstärke  $H_{Ls}$  im Luftspalt von einigen zehntel mm. Die Luftspaltinduktion  $B_{Ls}$  ist dann der Stromdurchflutung proportional. Die spezifischen magnetischen Eigenschaften des Kerns, der Magnetfeldabhängigkeit der Permeabilität, sind nur noch proportional abgeschwächt zu beachten.

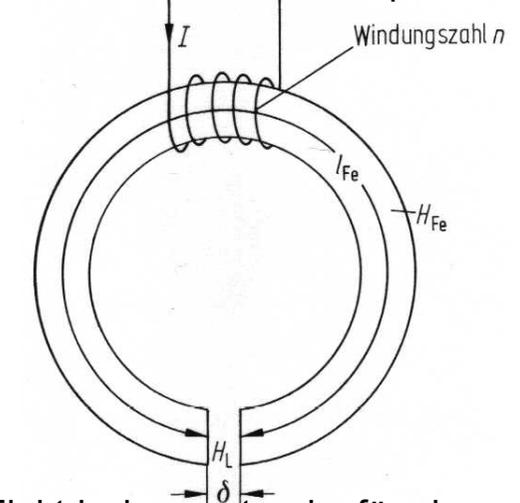
Wie die Abbildung rechts zeigt, treten einige Feldlinien des Magnetflusses bereits vor Erreichen des Luftspaltes am Kern aus und laufen seitlich am Luftspalt vorbei. Diese Erscheinung wird auch Luftspaltstreuung genannt.

Die magn. Induktion ist nicht im gesamten Eisenweg (Feldlinienverschiebung im Kern) konstant. Der größte Wert ist auf der dem Luftspalt gegenüberliegenden Seite. Diese Tatsache ist wichtig bei Feldsensoren, magn. Datenspeicherung usw.

Bei Signal- oder Energieübertragern sind die austretenden Feldlinien am Luftspalt unter Umständen schädlich, weil sie Induktionsspannungen, so erzeugen, dass Wirbelströme in die Wicklung induziert werden. Je nach Flankenanstiegszeit, Amplitude, Strom usw. kann ein Datensignal verfälscht, oder gestört bzw. die EMV-Problematik bei Schaltnetzteilen vergrößert werden. Bei Verkopplungen mit peripheren Bauteilen und Gehäusen können auch in diesen störende Wirbelströme erzeugt werden. Die Störungssuche wird sehr aufwändig, da die Ursache u.U. nicht direkt auf die Schaltung zurückführen ist. Durch auffüttern des Spulenkörpers kann der Abstand zum Luftspalt vergrößert und sein Einfluss verringert werden, bzw. sollte der Luftspalt nicht größer sein als nötig => **anständige, kompetente Berechnung**



Verlauf der Feldlinien in einem Magnetkreis mit ausstreuendem Luftspalt



Elektrisch erregter ringförmiger Magnetkreis mit einem Luftspalt

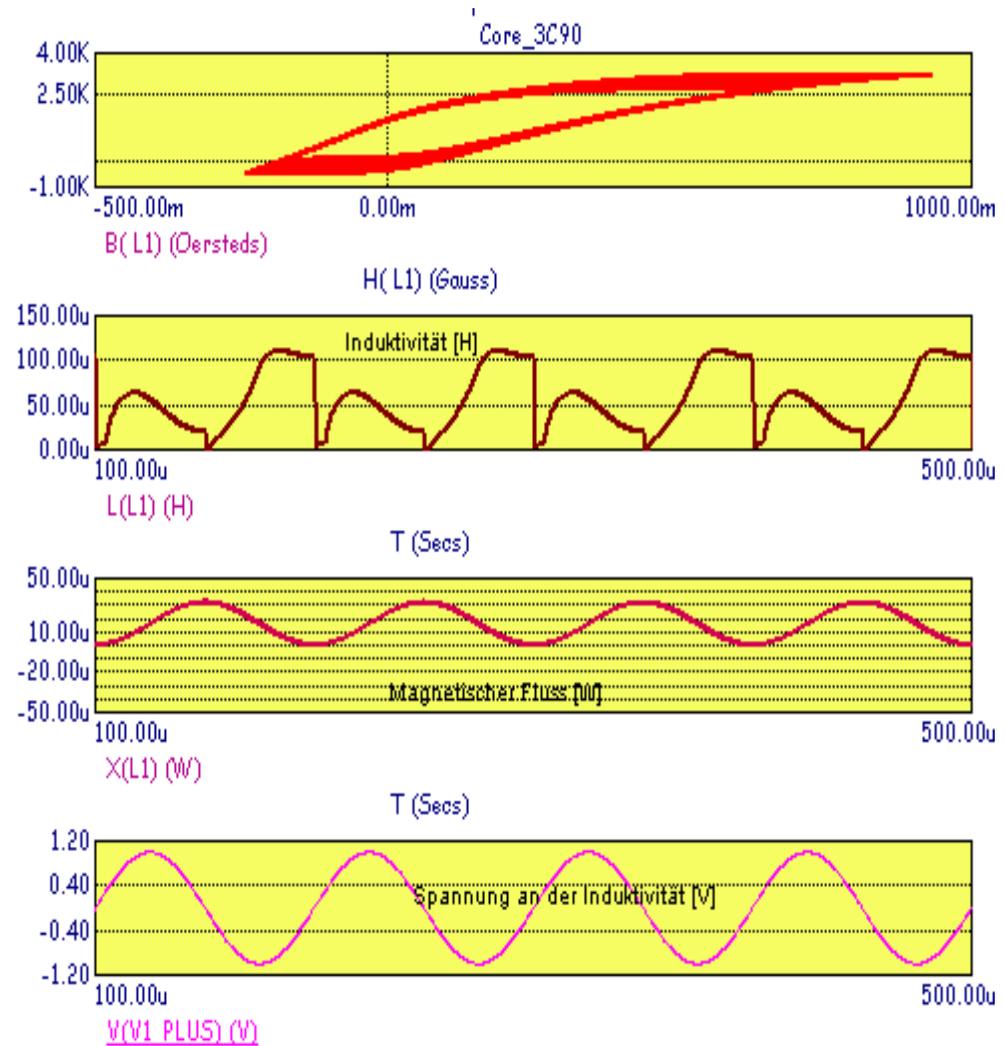
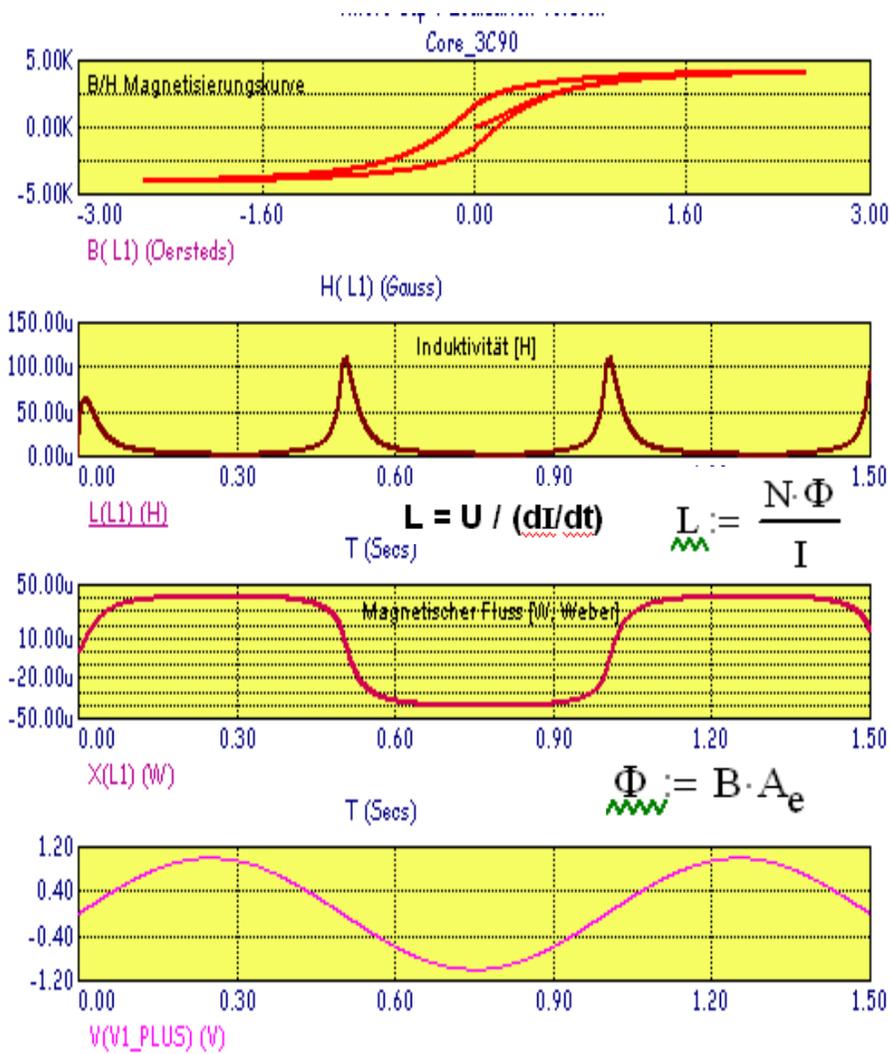
### Der Magnetisierungsvorgang

Simulation nach Jiles-Atherton

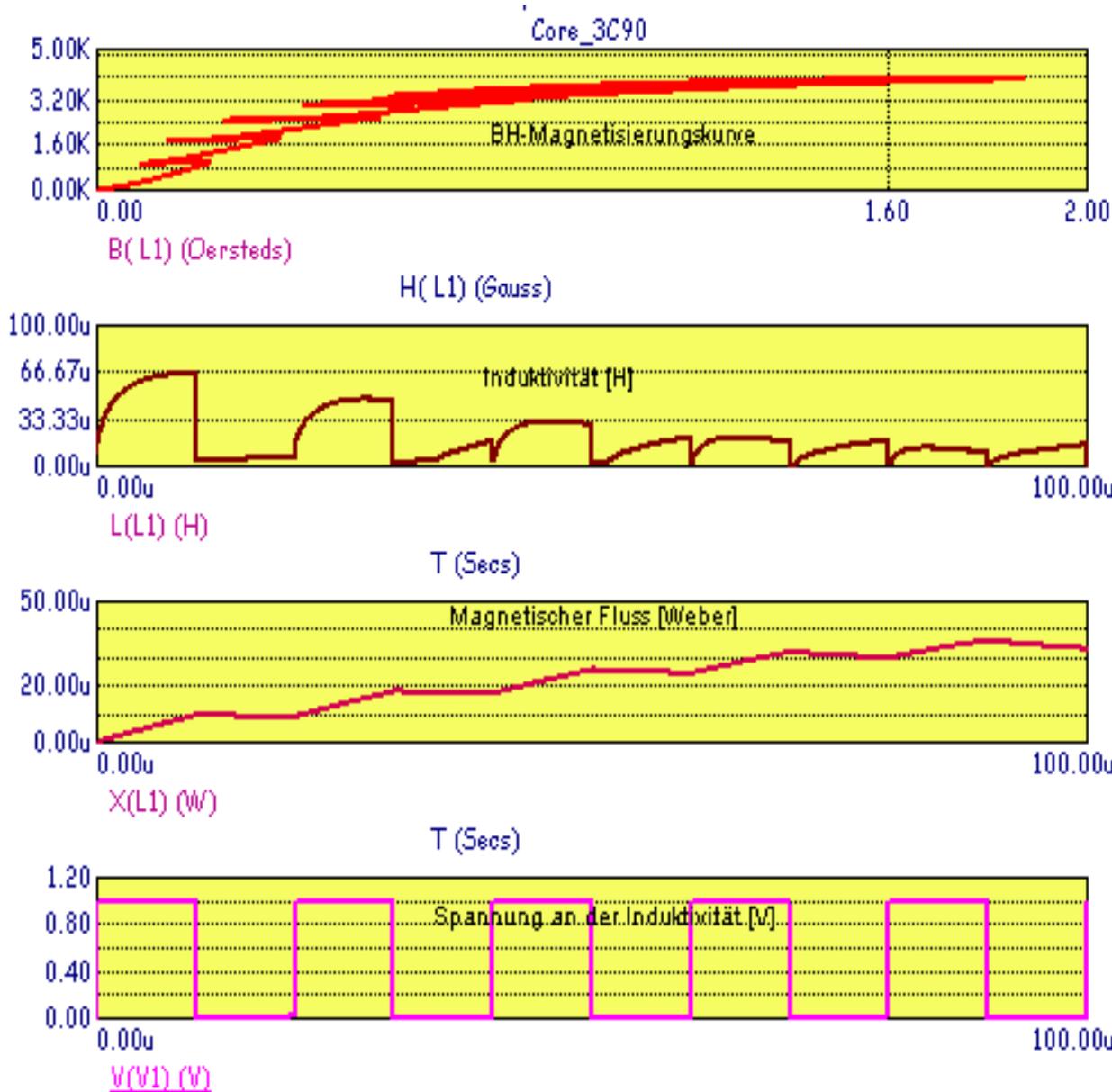
Messfrequenz 1 Hz Sinus

bei einer bipolaren Sinusspannung (dynamisches Wechselfeld)

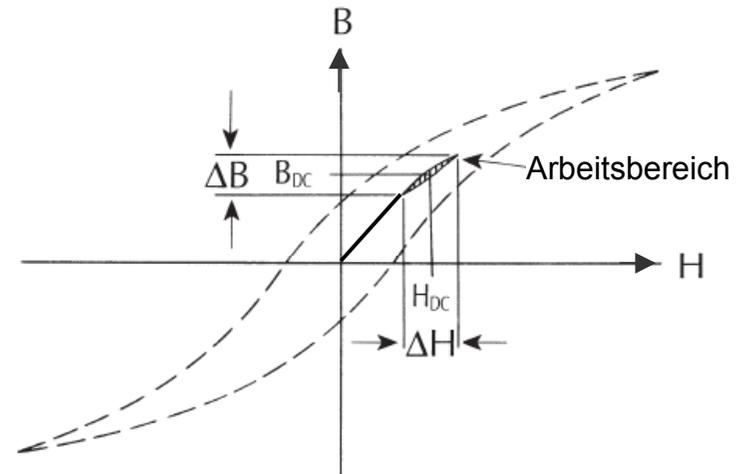
Messfrequenz 10 kHz Sinus mit leichter Unsymmetrie



Der Magnetisierungsvorgang bei einer Rechteckspannung



B = Magnetische Flussdichte, Induktion  
 [1 T(Tesla) = 1Vs/m<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> G (Gauß)]  
 Die Angabe erfolgt in Gauß oder Tesla  
 H = Magnetische Feldstärke, Magnetisierung  
 [1 A/m = 0,01256 Oe (Oersted) bzw.  
 1 Oe = 79,6 A/m]  
 Φ = Magnetischer Fluss VS; Weber



$$L := \frac{N \cdot \Phi}{I}$$

$$\Phi := B \cdot A_e$$

$$L := \frac{N^2}{R_m}$$

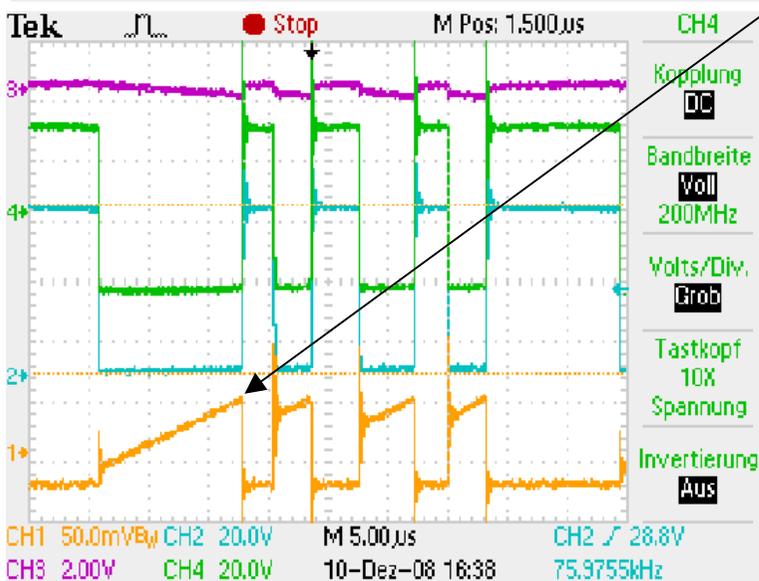
$$L = U / (dI/dt)$$

## Falsch definierte Induktion bzw. Flussdichte B an einem Schaltnetzteil



Chanal 1 R-sense 0,11Ω zwischen Source und Gnd.  
Chanal 2 über FET in Reihe zum Fet 0,11Ω  
Chanal 3 Versorgung über 33 µF Stabilisierung  
Chanal 4 Spannung direkt über Trafo

**Falsch dimensioniert**  
Die Induktion B in T bzw. Feldstärke in A/m ist zu hoch  
Der Trafo wird in der Sättigung betrieben bzw. überfahren

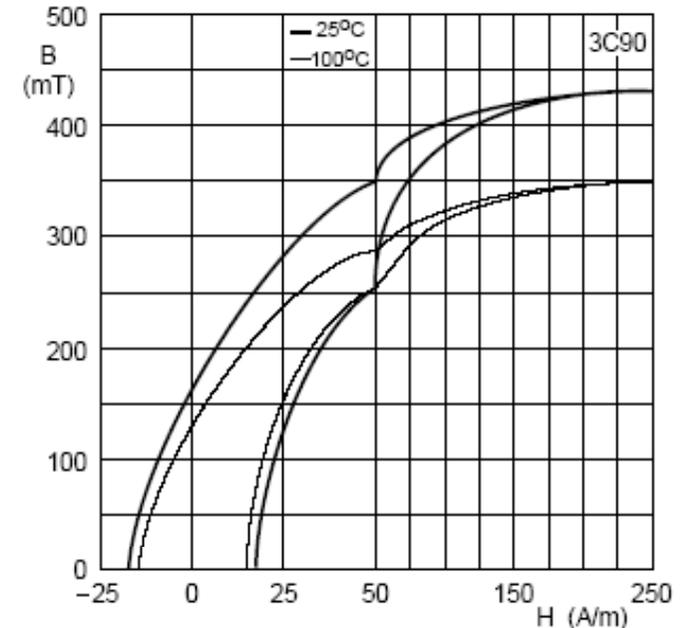


**Richtig dimensioniert**  
Innerhalb der Toleranzgrenzen der Induktion für Ferrite  
Das ist am kontinuierlichen Anstieg der Stromes sichtbar

Feldstärke und Induktion sind miteinander verknüpft

Wenn einer von beiden Werten außerhalb des zulässigen Toleranzbereiches ist, wird die Spule oder der Trafo in der Sättigung betrieben

[Berechnungsbeispiel](#)



**BH-Kurve, Magnetisierungskurve**  
Feldstärke im Kernmaterial  
abzgl. Luftspalt  
Bild: Ferroxcube 3C90