

# Magnetics 4 Freaks: Alles rund um den Elektromagnetismus SS 2026

## 148'te Veranstaltung



Bitte



Danke!

**Willkommen an der  
Reinhold-Würth-  
Hochschule in  
Künzelsau**

Die Kolloquiumsreihe  
von Institut  
und Industrie

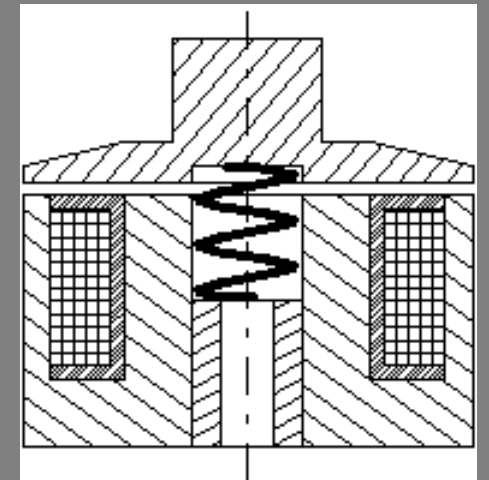


Foto: Wilhelm Feucht

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm  
Institut für schnelle mechatronische Systeme (ISM)  
Institut für Digitalisierung und elektrische Antriebe (IDA)

# Programm Sommersemester 2026:

Mittwoch, 6. Mai 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Mathematische Grundlagen, Maxwellgleichungen, magnetisches und unmagnetisches. Geklärt wird zudem die Frage:  
„Was haben ein Festtagsbraten und ein Elektromagnet gemeinsam?“



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Masterschwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

Mittwoch, 27. Mai 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Grundlagen Ferritmaterialien für passive Bauteile



**Dipl.-Ing. Steffen Schulze**

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Als Applikationsingenieur berät er Hardware-Entwickler bei der Auswahl von passiven Bauteilen und zu EMV-Thematiken.

Mittwoch, 17. Juni 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Grundlagen von Induktivitäten und deren Messtechnik



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Masterschwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

Mittwoch, 1. Juli 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Wicklungsauslegung und Wicklungsqualitäten



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Masterschwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

# Induktivität in Theorie und Anwendung: Messmethoden, Grenzen und parasitäre Effekte

## Inhalt

- 1) Hinweise
- 2) Theorie der Induktivität
- 3) Messmethoden der Induktivität
- 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte



# Induktivität in Theorie und Anwendung: Messmethoden, Grenzen und parasitäre Effekte

## Inhalt

- 1) **Hinweise**
- 2) **Theorie der Induktivität**
- 3) **Messmethoden der Induktivität**
- 4) **Messanwendungen – Grenzen – Effekte**



# IDA -News

INSTITUT FÜR DIGITALISIERUNG UND ELEKTRISCHE ANTRIEBE

## Durchgeführter IDA-Infotag am 03.03.26:

- Derzeitiger Jahresbericht erhältlich unter <https://www.hs-heilbronn.de/ida>

Unter Federführung von Institutsassistentin



Dr. Anna Konyev  
Telefon: +49 7940 1306 163  
E-Mail: [anna.konyev@hs-heilbronn.de](mailto:anna.konyev@hs-heilbronn.de)  
Büroadresse: C207  
Postadresse: Daimlerstr. 22, 74653 Künzelsau



## Veranstaltungen:

# Symposium Elektromagnetismus

11 und 12 März 2027

am Campus Künzelsau



11. + 12. März 2027 | Hochschule Heilbronn - Campus Künzelsau und Online

# CALL FOR PAPERS Elektromagnetismus

Fachtagung zum neuesten Stand aus Forschung und Technik

Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm

in Zusammenarbeit

**VDE** **IDA** **MagTronX**

**tr**  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

**HTN**  
HOCHSCHULE HEILBRONN  
Reinhold-Würth-Hochschule  
Campus Künzelsau

weiterbilden  
weiterkommen



## Veranstaltungen:


### Workshop Elektrische Maschinen

Theoretische Grundlagen und Laborübungen am Prüfplatz für elektrische Maschinen

Beginn:  
16.07.2026 - 09:00 Uhr

Ende:  
17.07.2026 - 15:00 Uhr

Dauer:  
2,0 Tage

 Künzelsau ⓘ

Veranstaltungsnr.: 35695.00.005

Leitung

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm  
Hochschule Heilbronn

Alle Referent:innen

Inhouse anfragen

# Induktivität in Theorie und Anwendung: Messmethoden, Grenzen und parasitäre Effekte

## Inhalt

- 1) Hinweise
- 2) **Theorie der Induktivität**
- 3) Messmethoden der Induktivität
- 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte

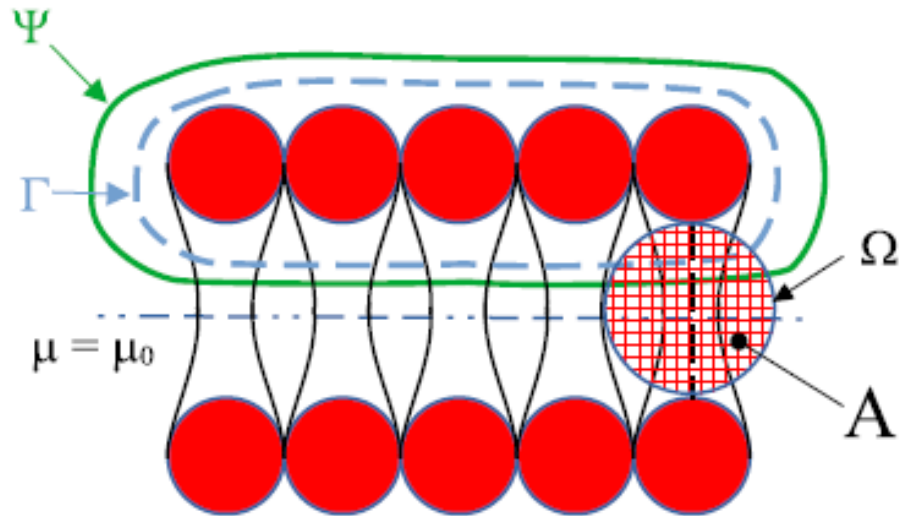


## 2) Theorie der Induktivität: Zuordnung Zeitabhängigkeit

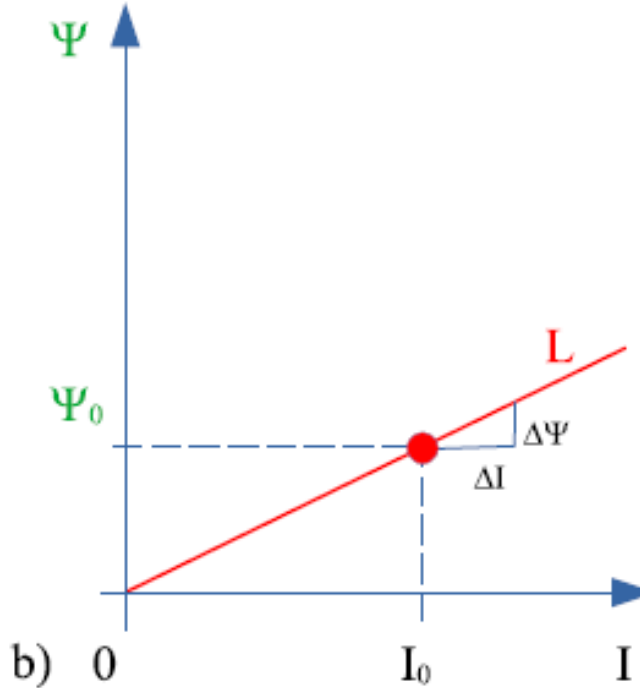
<b>Zeitunabhängige Felder</b>	Statische Felder	Elektrostatistisches Feld im Nichtleiter $rot \vec{E} = 0; div \vec{D} = \rho; \vec{D} = \epsilon \vec{E}$	<b>Zeitabhängige Felder</b>	Quasistationäre Felder	Elektrisches Feld $rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; div \vec{D} = \rho; \vec{D} = \epsilon \vec{E}$
		Elektrostatistisches Feld im Leiter $\vec{E} = 0; \vec{D} = 0$			Magnetisches Feld $rot \vec{H} = \vec{J}; div \vec{B} = 0; \vec{B} = \mu \vec{H}$
	Stationäre Felder	Stationäres elektrisches Feld $rot \vec{E} = 0; div \vec{D} = \rho; div \vec{J} = 0; \vec{J} = \kappa \vec{E}; \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$		Schnell veränderliche Felder	Elektrisches Feld $rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; div \vec{D} = \rho; \vec{D} = \epsilon \vec{E}$
		Magnetisches Feld stationärer Ströme $rot \vec{H} = \vec{J}; div \vec{B} = 0; \vec{B} = \mu \vec{H}; \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$		Magnetisches Feld $rot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; div \vec{B} = 0; \vec{B} = \mu \vec{H}; \vec{J} = \kappa \vec{E}$	

**Legende:**  
 E = elektrische Feldstärke [V/m];      H = magnetische Feldstärke [A/m];  
 D = Ladungsdichte [As/m<sup>2</sup>];            B = magnetische Flussdichte [Vs/m<sup>2</sup>];  
 ε = Permittivität [As/(Vm)];            μ = Permeabilität [Vs/(Am)];  
 κ = spezif. elektr. Leitfähigkeit [1/(Ω m)];    ρ = Ladung [As];  
 J = Stromdichte [A/m<sup>2</sup>]

## 2) Theorie der Induktivität: Definition

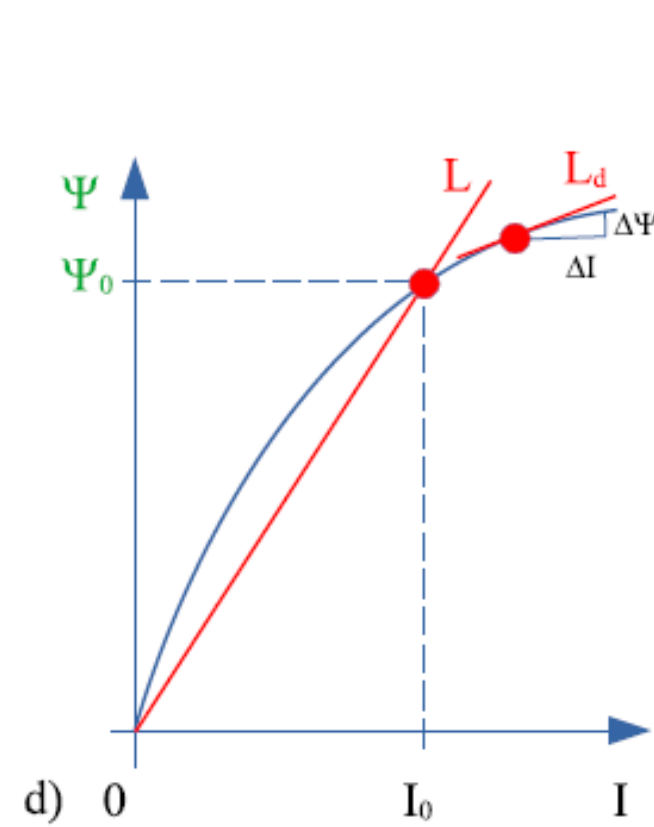
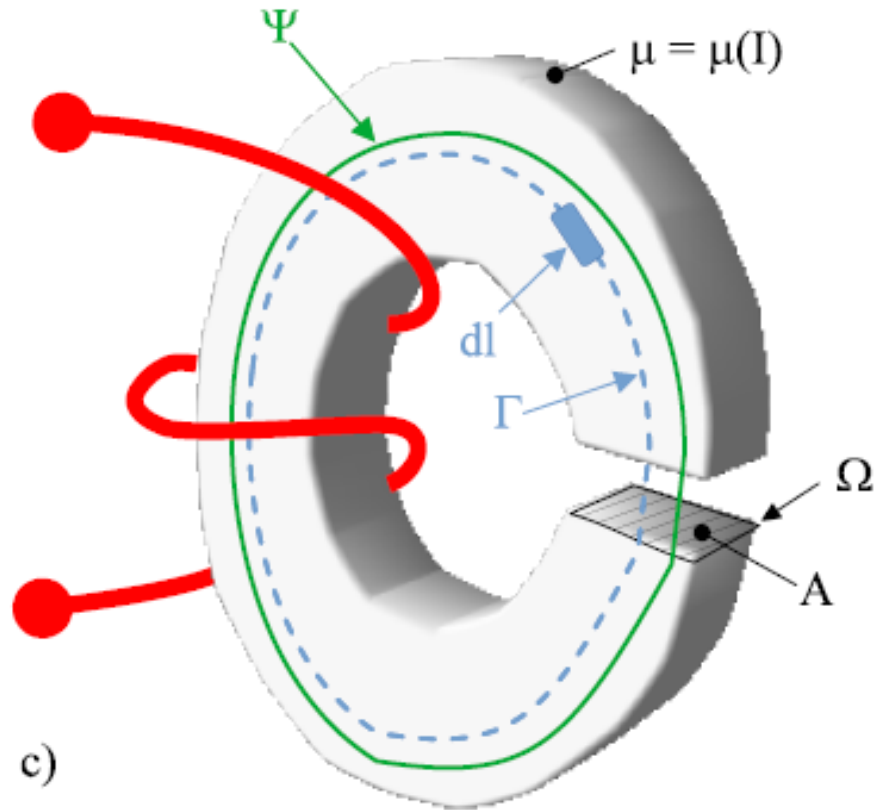


a)



b)

## 2) Theorie der Induktivität: Definition

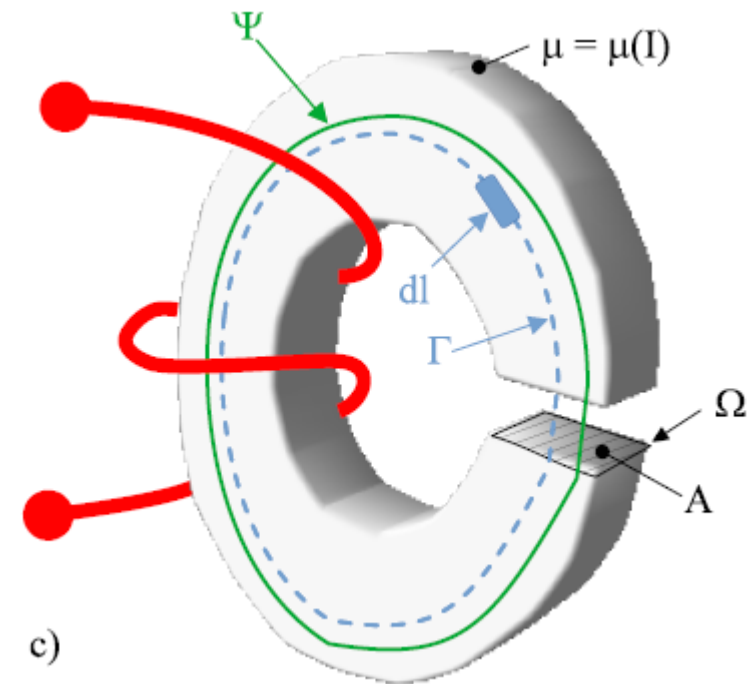


## 2) Theorie der Induktivität: Definition

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{d^2 W_{mag}}{dI^2} \\
 &= \frac{\iint_{\Omega} B \, dA}{\oint_{\Gamma} H \, dl} = \frac{\mu \iint_{\Omega} H \, dA}{H l} \\
 &= \frac{\mu H A}{H l} = \mu \frac{A}{l}
 \end{aligned}$$

L als Proportionalitätsfaktor der mag. Erregung:

$$\underbrace{L}_{1/R_m} \underbrace{\oint_{\Gamma} H \, dl}_U = \underbrace{\iint_{\Omega} B \, dA}_I = \Psi$$

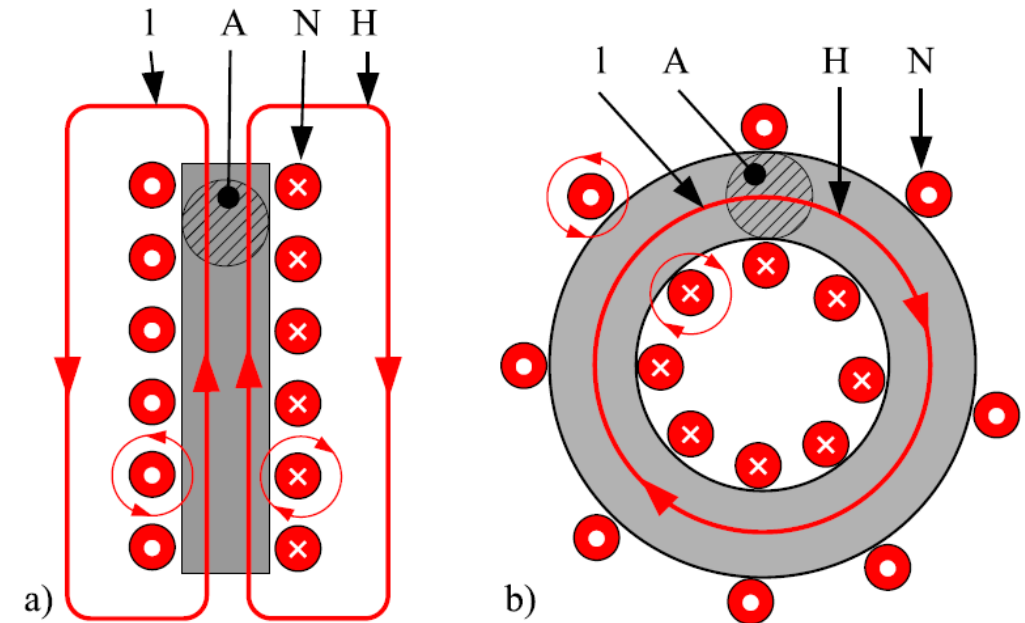


## 2) Theorie der Induktivität: Definition

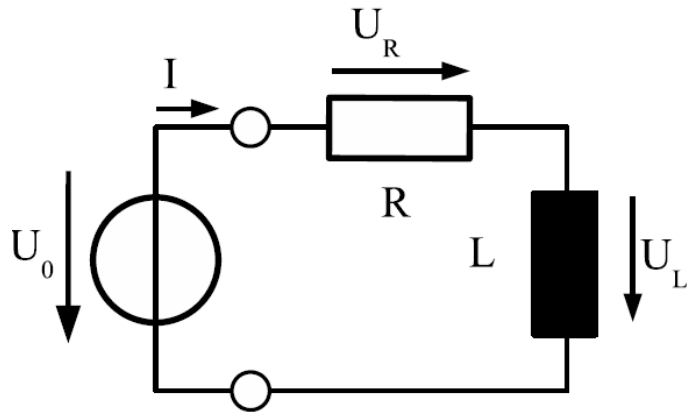
Beispiele Flussverläufe

a) Stabmagnet

b) Bewickelter Ringkern



## 2) Theorie der Induktivität: Definition



$$U_L + U_R = U_0$$

$$\begin{aligned} U_L &= \frac{d\Psi}{dt} \\ &= N \frac{d\phi}{dt} \\ &= N A \frac{dB}{dt} \\ &= N A \mu \frac{dH}{dt} \end{aligned}$$

Mit Ampere'schen Gesetz folgt

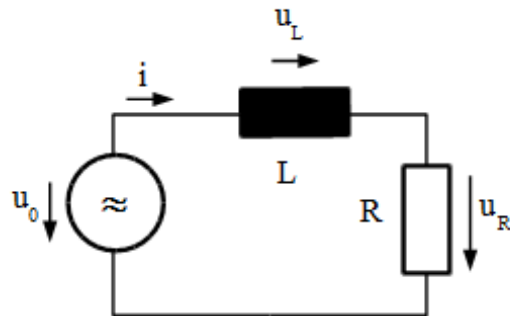
$$\begin{aligned} \oint H dl &= N I \\ H \cdot l &= N I \\ H &= \frac{N I}{l} \end{aligned}$$

...einsetzen führt zur induzierten Spannung

$$\begin{aligned} U_L &= \underbrace{\frac{N^2 A \mu}{l}}_{L} \frac{di}{dt} \\ &= L \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

## 2) Theorie der Induktivität: Definition

Beispiel: Strom-DGL



Mit

$$u_0 - u_R - u_L = 0$$

$$u_R = i \cdot R$$

folgt

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$u_0 - i \cdot R - L \cdot \frac{di}{dt} = 0$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{1}{L}u_0$$

Zeitkonstante

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Lösung der Gleichung führt zum  
a) Einschalten

$$i = \frac{u_0}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

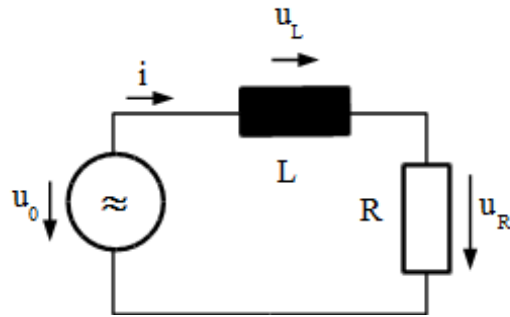
$$u_L = U - i_L \cdot R$$

$$= U - \frac{U}{R} (1 - e^{-t/\tau}) R$$

$$= U \cdot e^{-t/\tau}$$

## 2) Theorie der Induktivität: Definition

Beispiel: Strom-DGL



Mit

$$u_0 - u_R - u_L = 0$$

$$u_R = i \cdot R$$

folgt

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$u_0 - i \cdot R - L \cdot \frac{di}{dt} = 0$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{1}{L} u_0$$

Lösung der Gleichung führt zum  
b) Ausschalten:

Mit

$$I = \frac{U}{R}$$

dem sich vor dem Ausschalten einstellenden  
Strom.

Damit folgt

$$u_L = U_{\max} \cdot e^{-t/\tau}$$

und

$$U_{\max} = I \cdot R_{\text{ges}}$$

Legende:

$\tau$  Zeitkonstante [s]; L, Induktivität [Vs/A];

## 2) Theorie der Induktivität: Wirbelstrombildung/Wirbelströme

Herleitung Wirbelstrom:

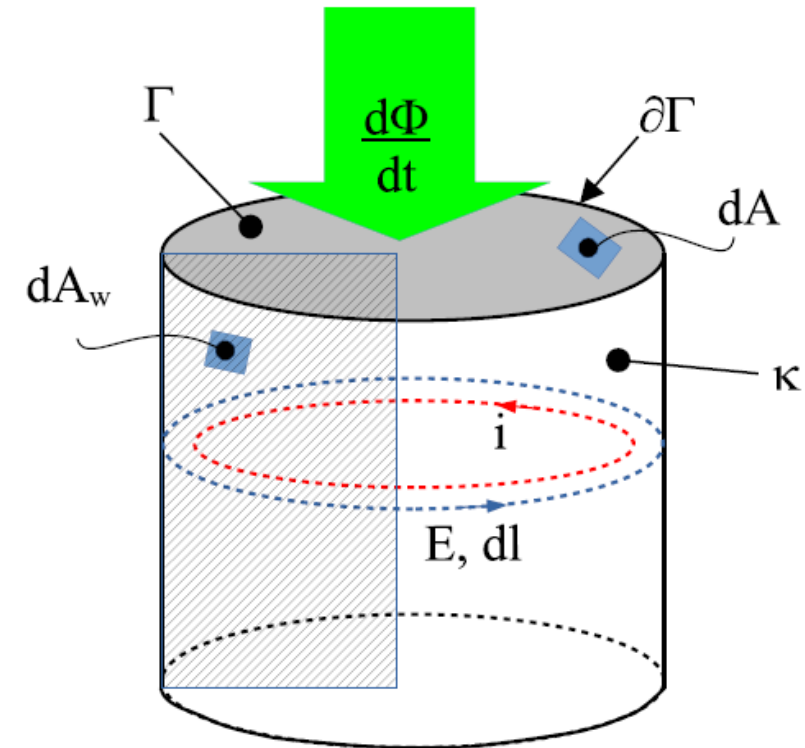
Ansatz mit Faraday'schen Gesetz:

$$\underbrace{\oint_{\partial\Gamma} E \, dl}_{U_{ind}} = \underbrace{\iint_{\Gamma} \frac{dB}{dt} \, dA}_{\frac{d\phi}{dt}}$$

Entwicklung linke Seite

$$E \, l = \frac{d\phi}{dt}$$

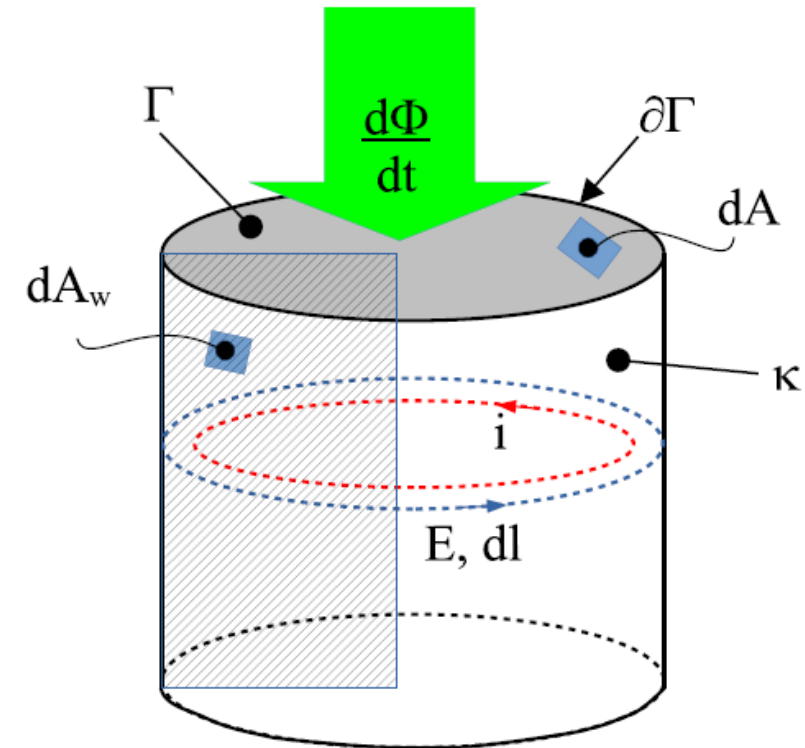
$$\frac{J}{\kappa} \, l = \frac{d\phi}{dt}$$



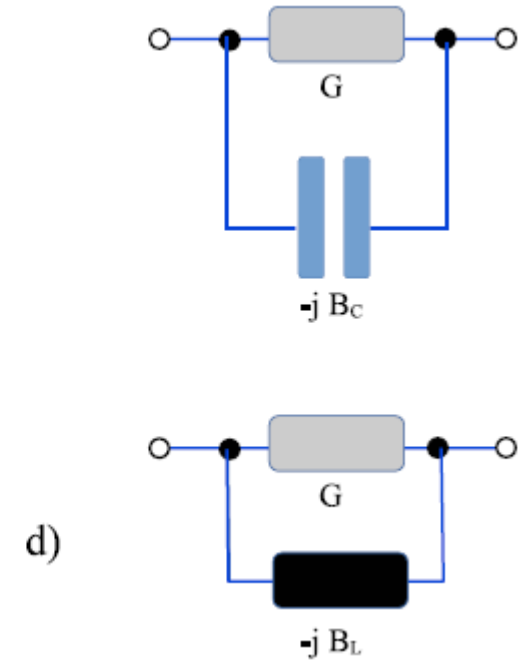
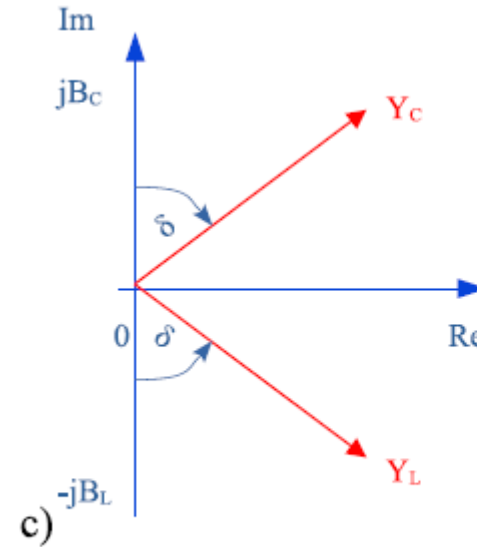
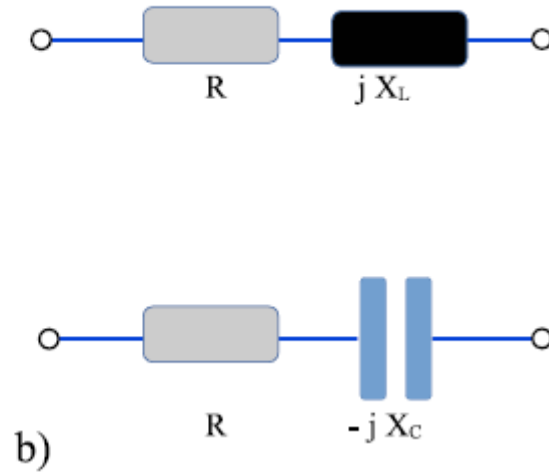
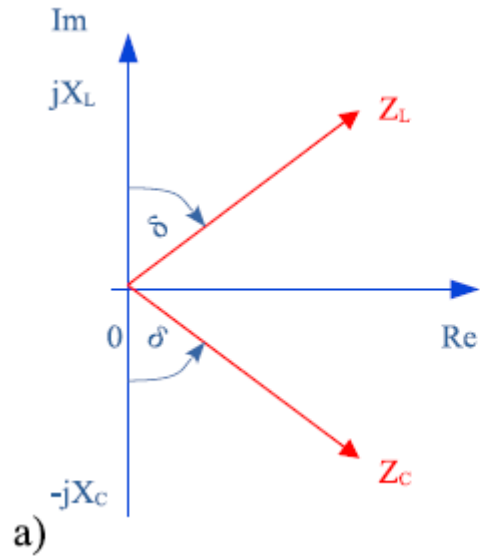
## 2) Theorie der Induktivität: Wirbelstrombildung/Wirbelströme

Herleitung Wirbelstrom - Fortsetzung:

$$\begin{aligned} \frac{J}{\kappa} l &= \frac{d\phi}{dt} \\ J &= \frac{\kappa}{l} \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{i}{A_w} &= \frac{\kappa}{l} \frac{d\phi}{dt} \\ i &= \frac{\kappa A_w}{l} \frac{d\phi}{dt} \\ &= \frac{1}{R_{el}} \frac{d\phi}{dt} \end{aligned}$$



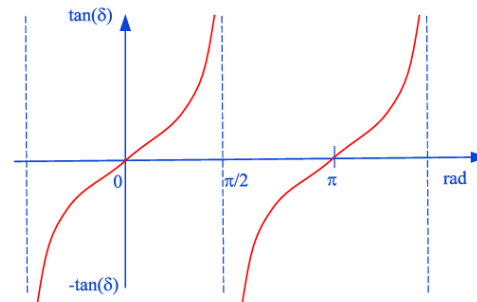
## 2) Theorie der Induktivität: Admittanz/Impedanz



Definitionen:

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

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{-X_C} = \frac{G}{-B_L} = \frac{G}{B_C}$$



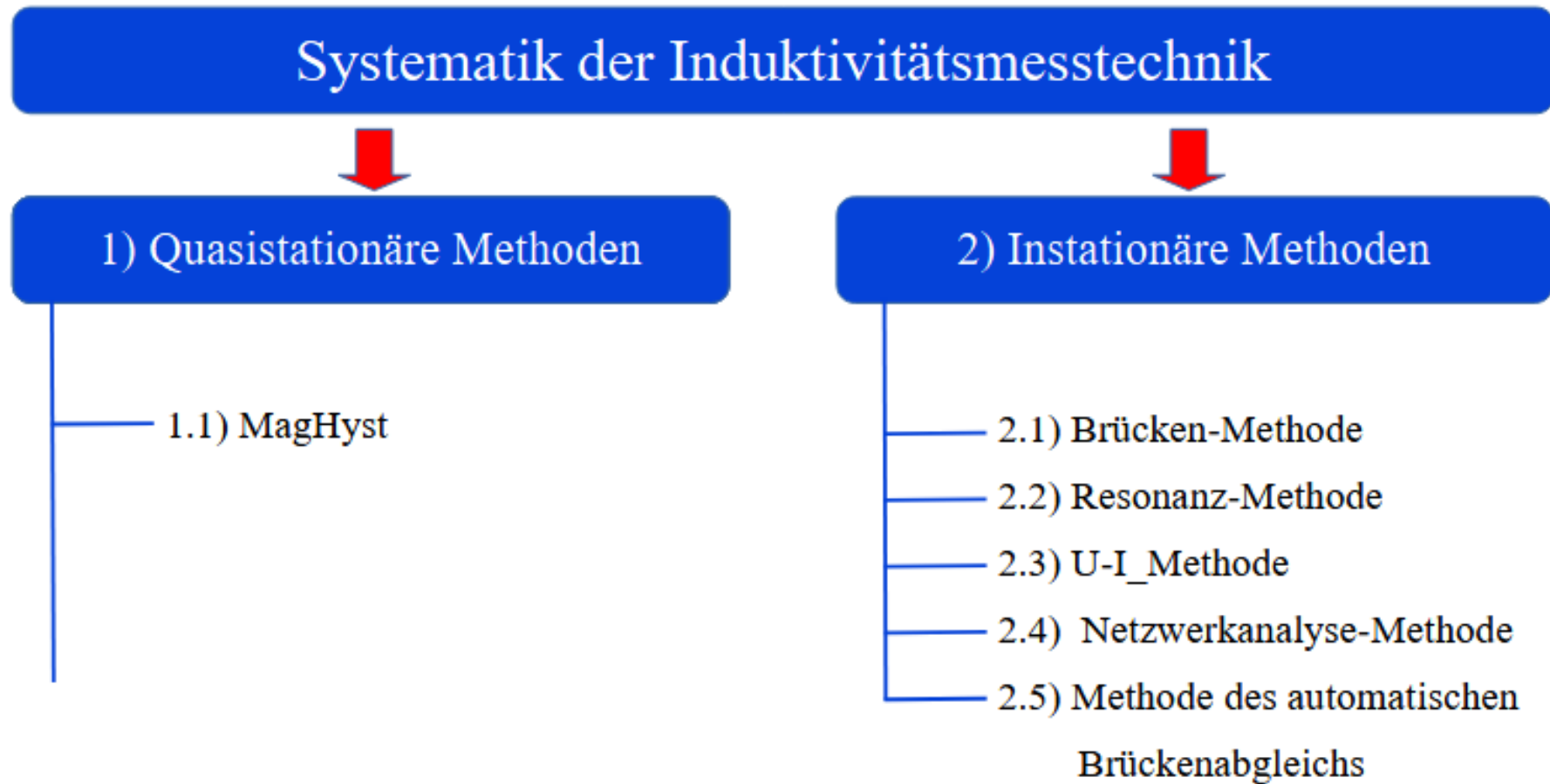
# Induktivität in Theorie und Anwendung: Messmethoden, Grenzen und parasitäre Effekte

## Inhalt

- 1) Hinweise
- 2) Theorie der Induktivität
- 3) **Messmethoden der Induktivität**
- 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte



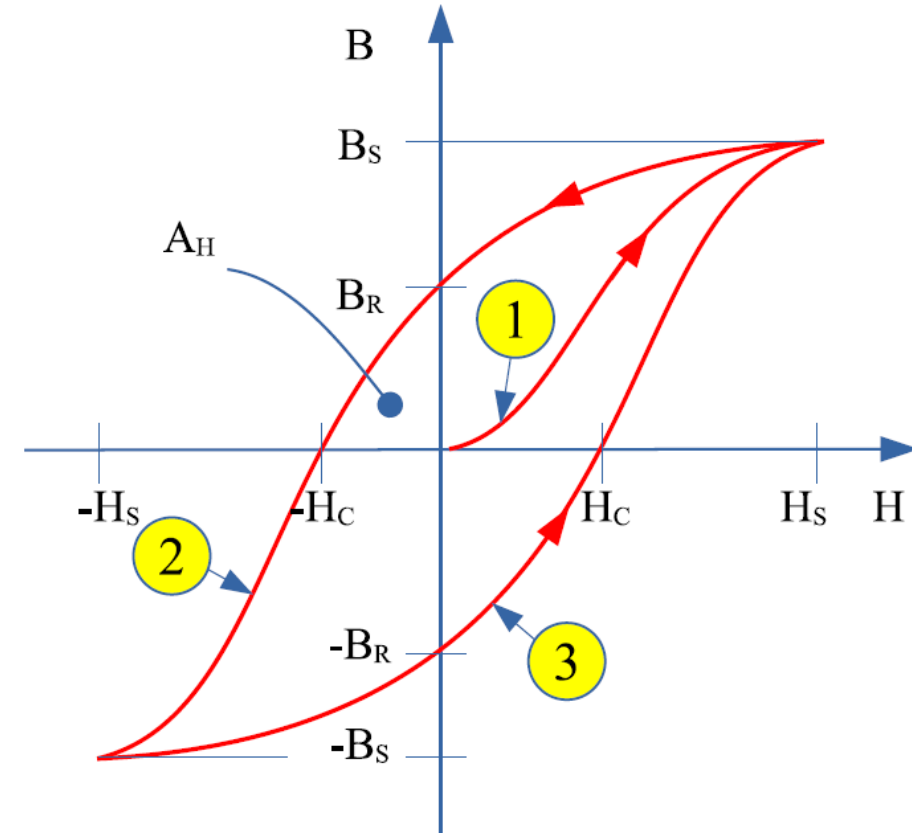
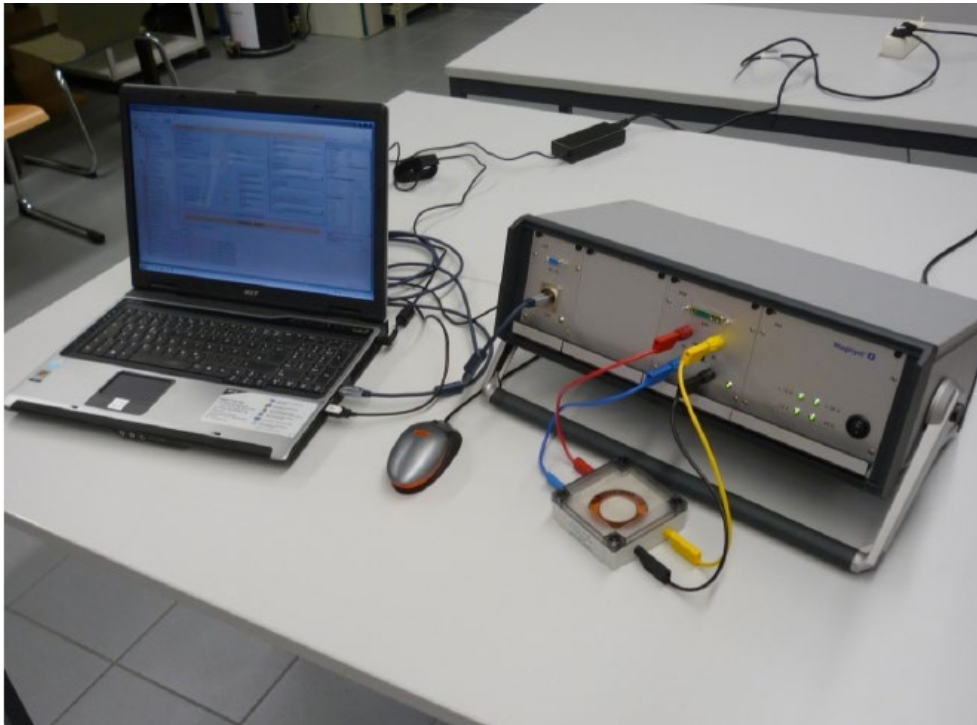
### 3) Messmethoden der Induktivität



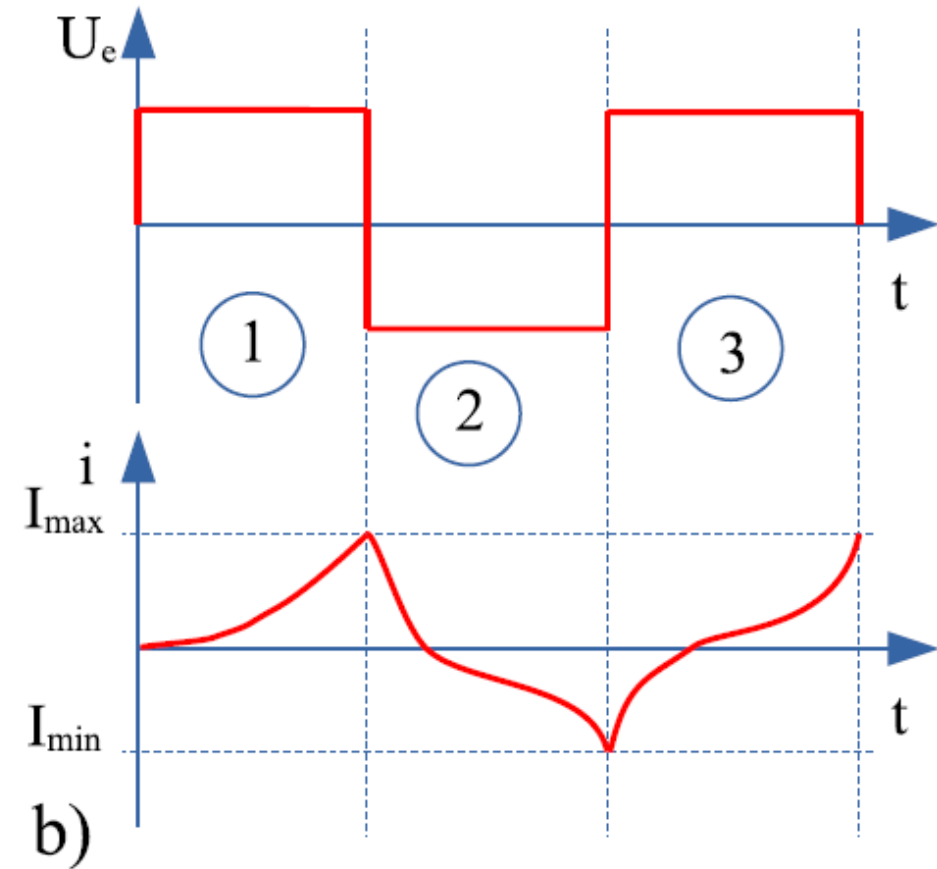
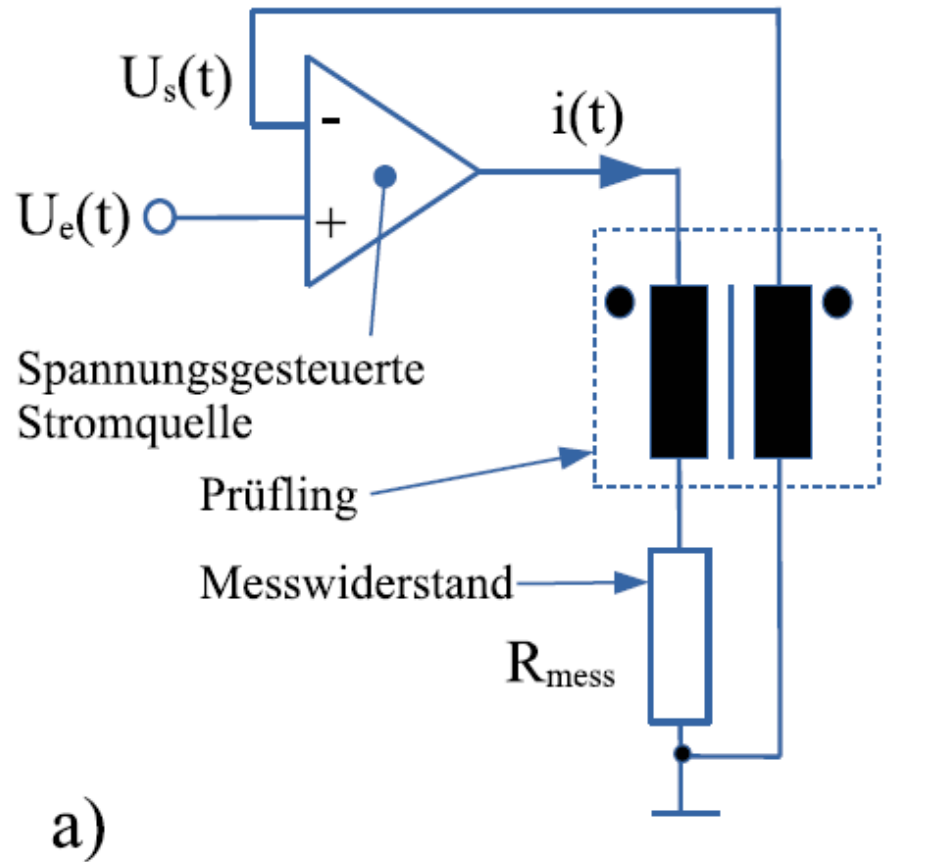
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



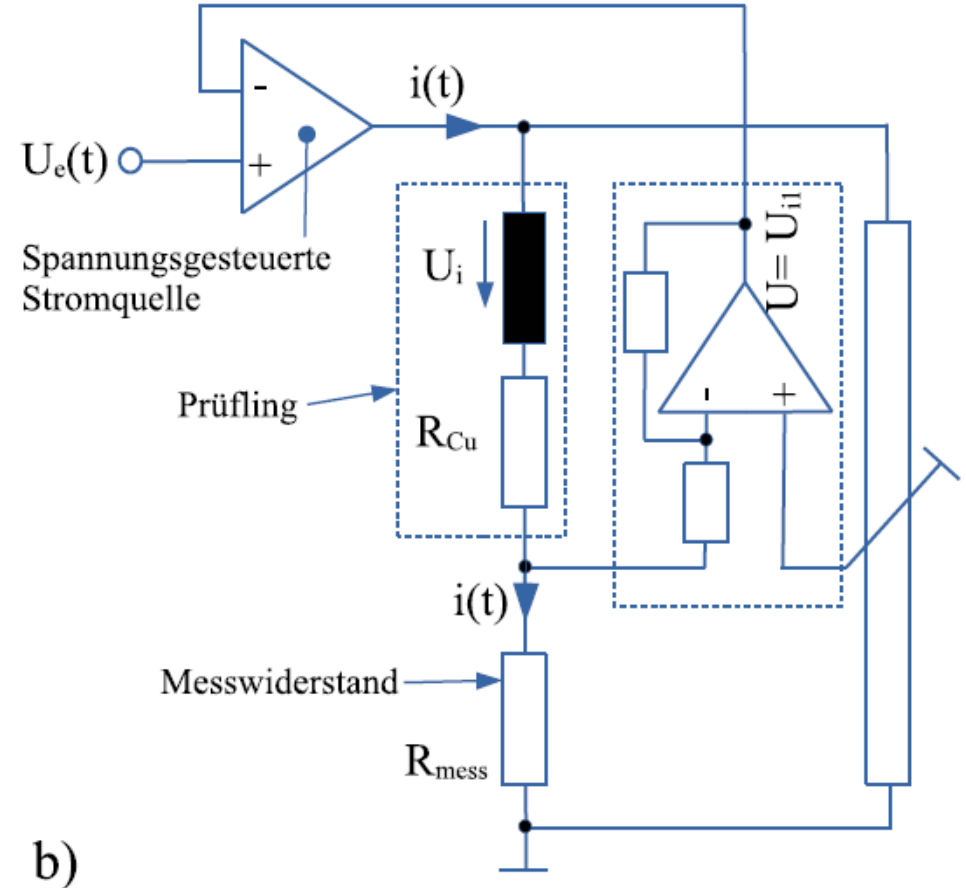
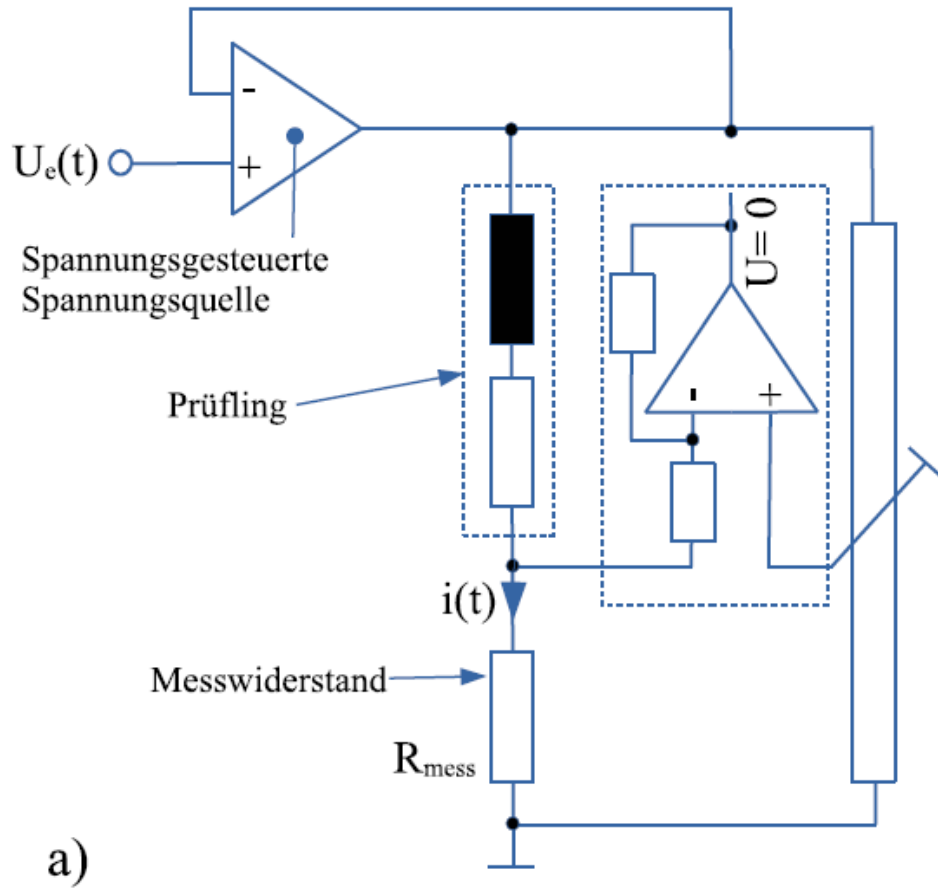
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



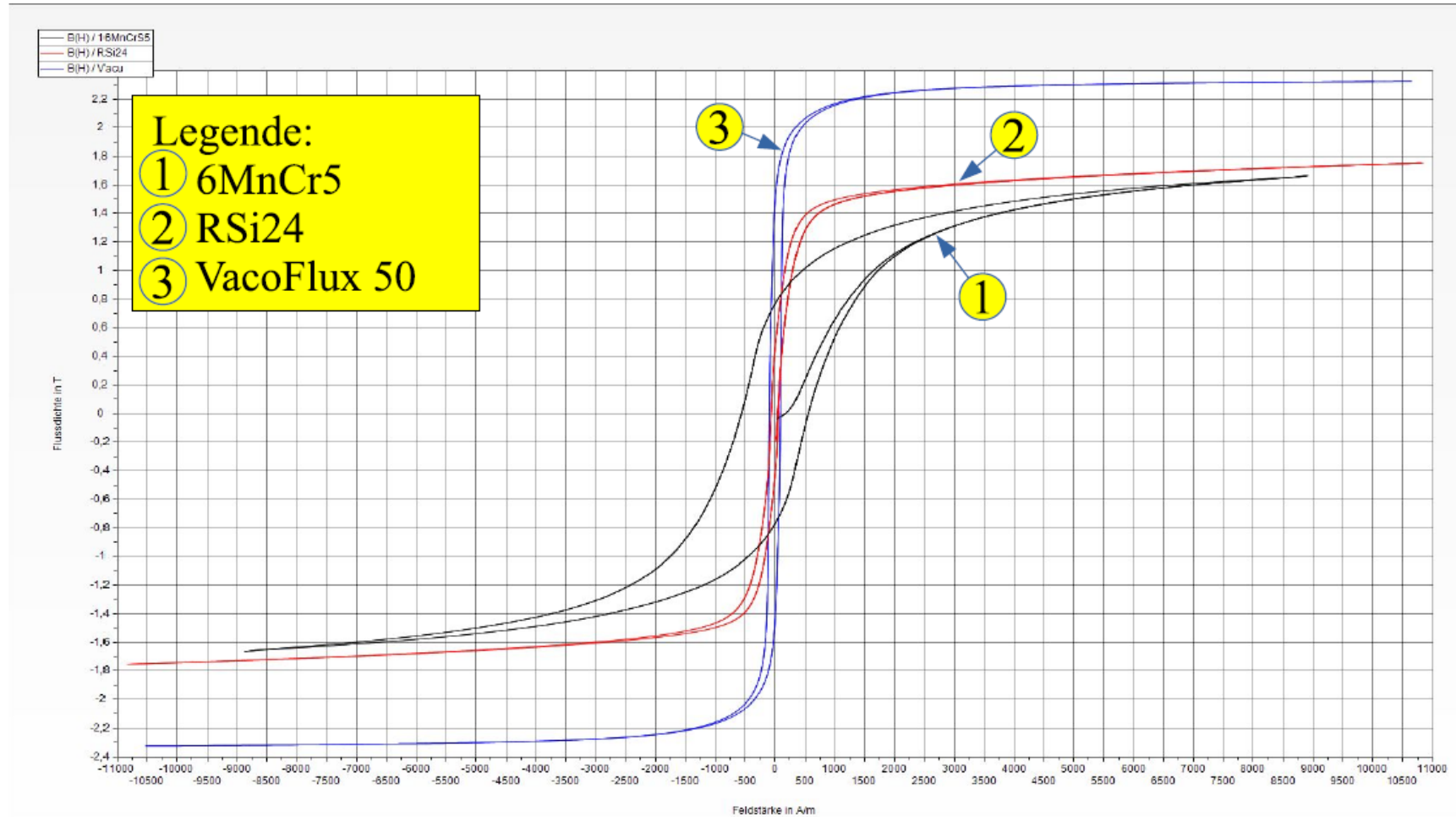
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



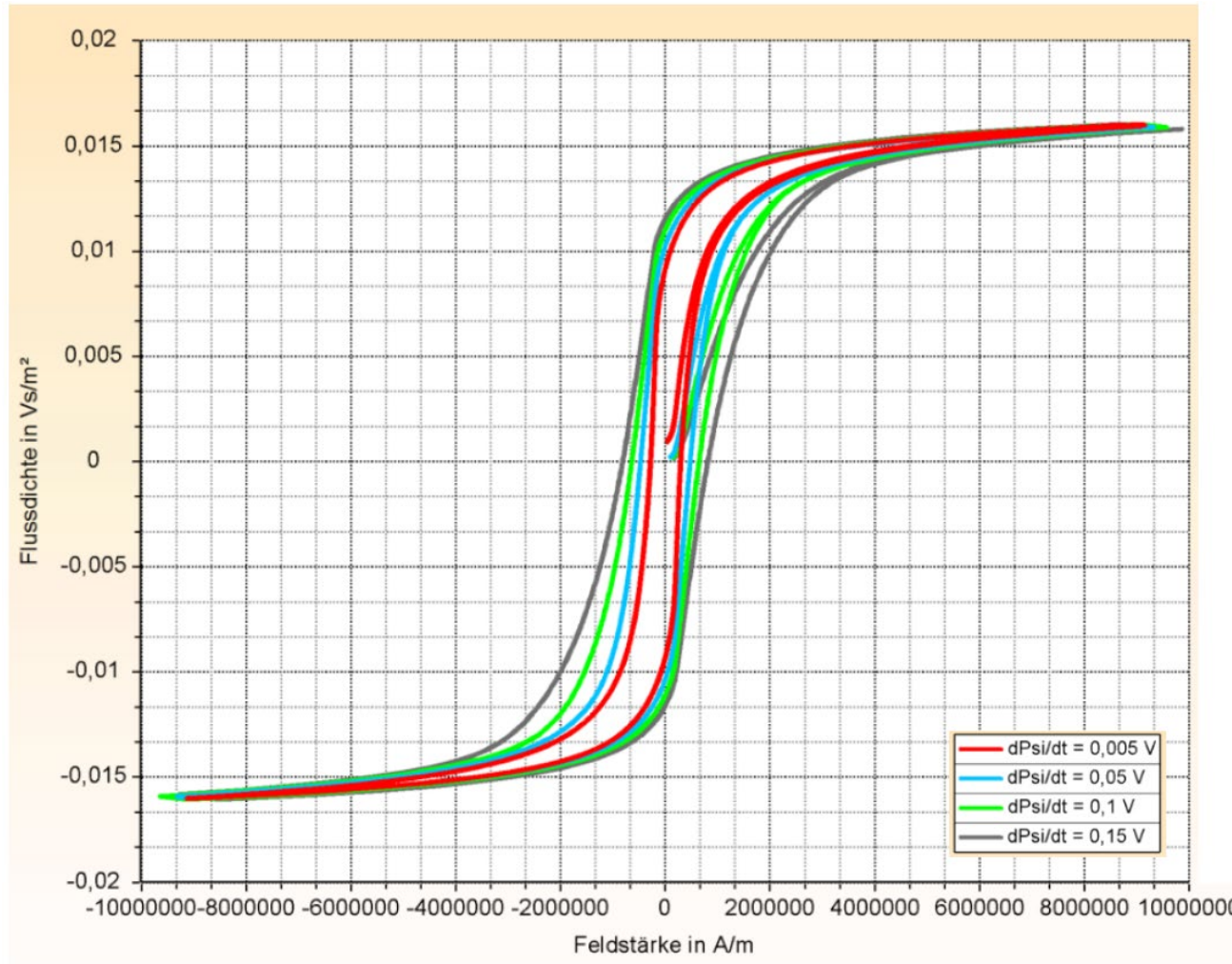
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



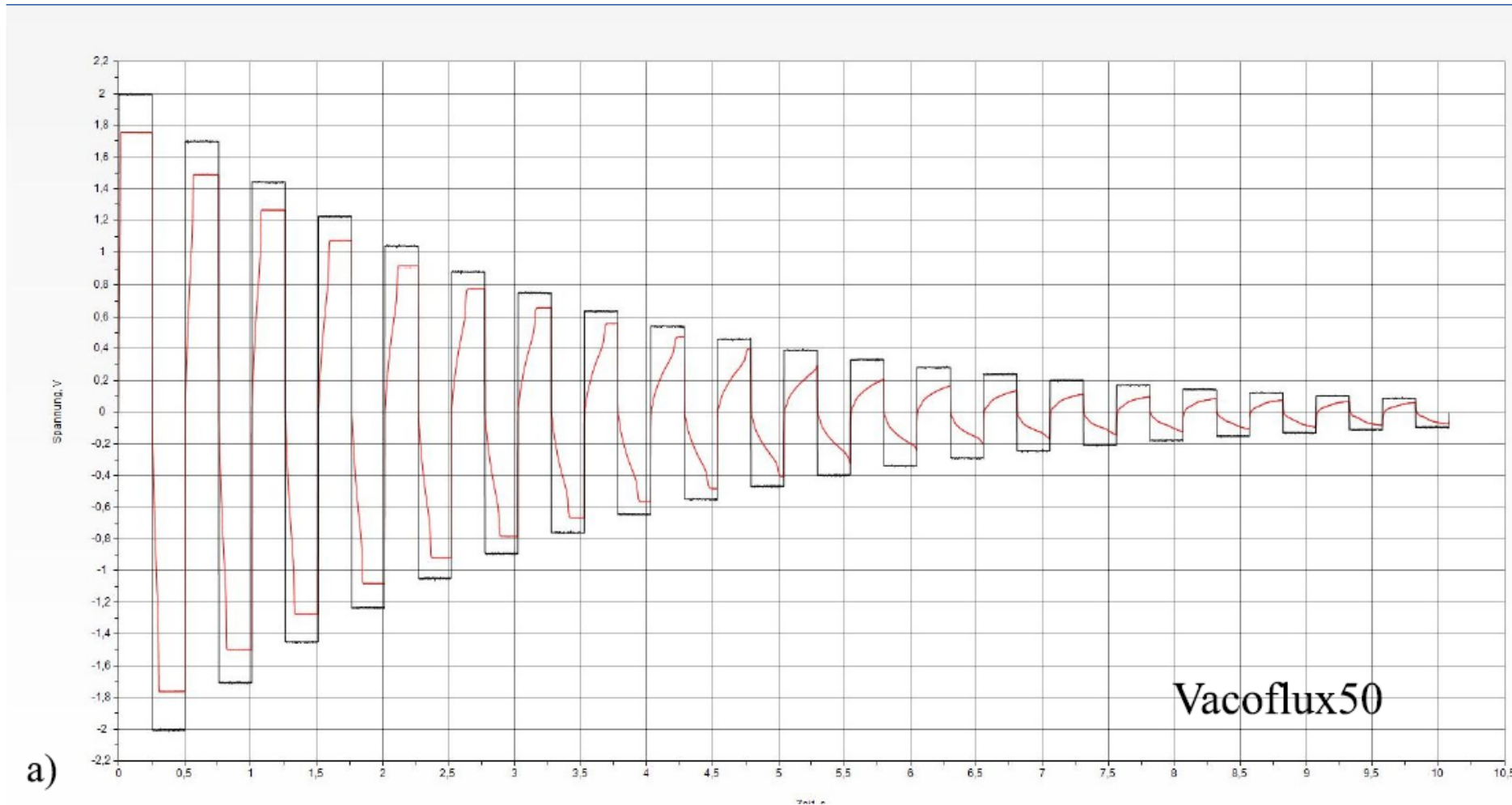
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



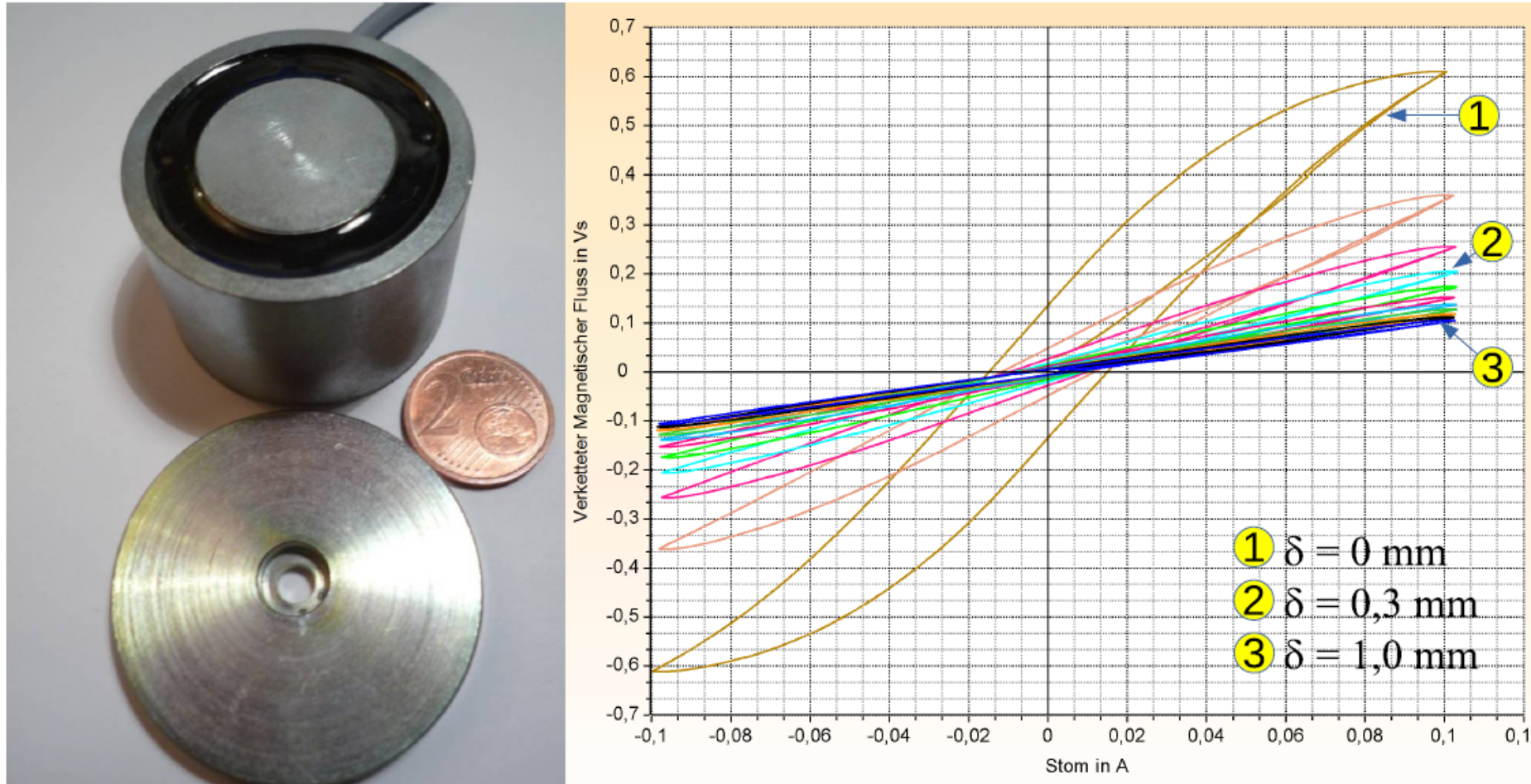
### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden

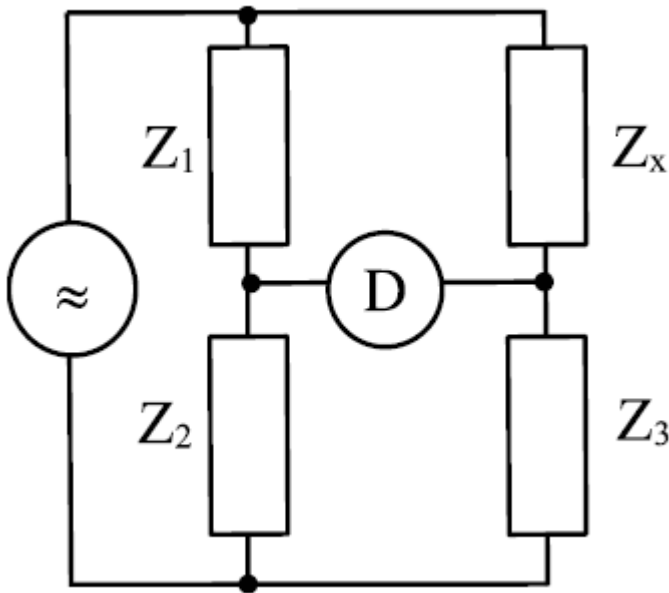


### 3) Messmethoden der Induktivität – Quasistationäre Methoden



### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden

Brückenmethode:



Abgleichbedingung:

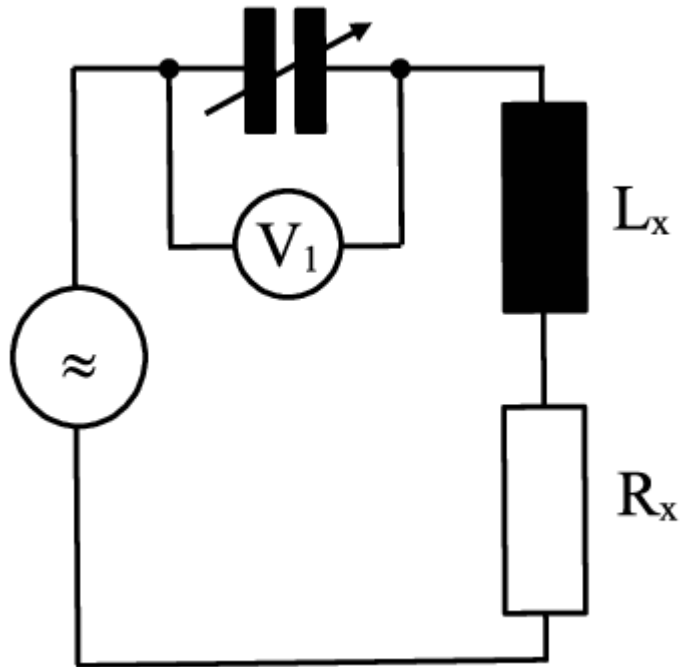
- Kein Stromfluss durch Detektor
- Impedanzbestimmung mit

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

mit Brückenelementen aus bekannten L, C, R

### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden

Resonanzmethode:

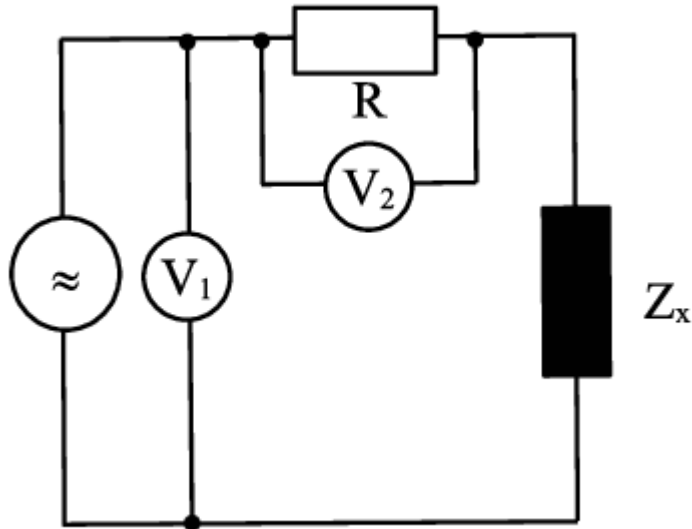


Funktion:

- Durch Einstellen des Kondensators (C) wird der Stromkreis bei einer gewählten Frequenz in Resonanz betrieben.
- Die unbekannt Impedanzwerte  $L_x$  und  $R_x$  werden aus der Testfrequenz, dem C-Wert und  $V_1$  ermittelt.

### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden

U-I-Methode:



Funktion:

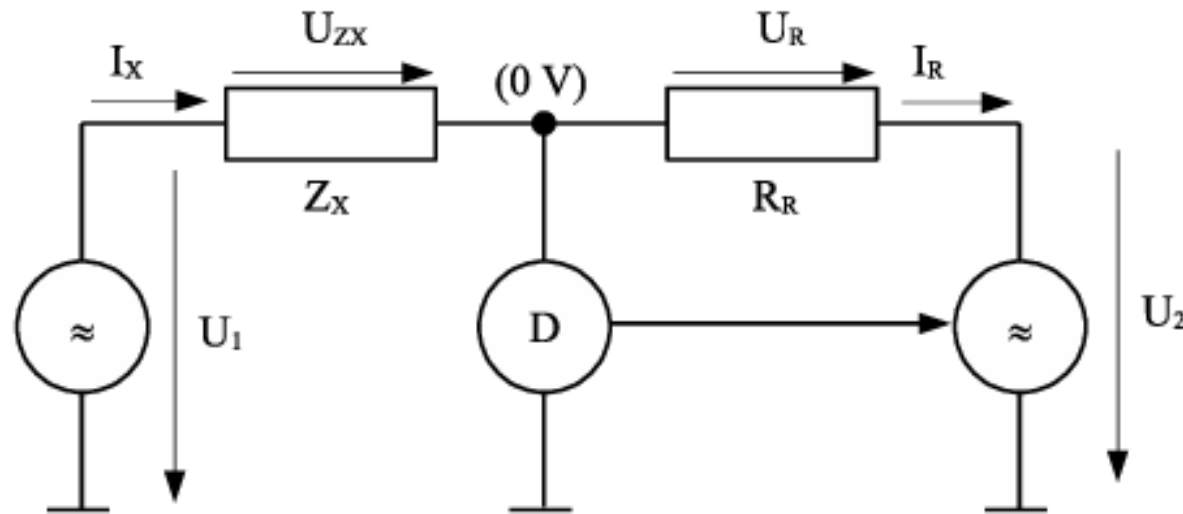
- Die unbekannte Impedanz  $Z_x$  wird aus den gemessenen Spannungs- und Stromwerten mit

$$Z_x = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R$$

berechnet.

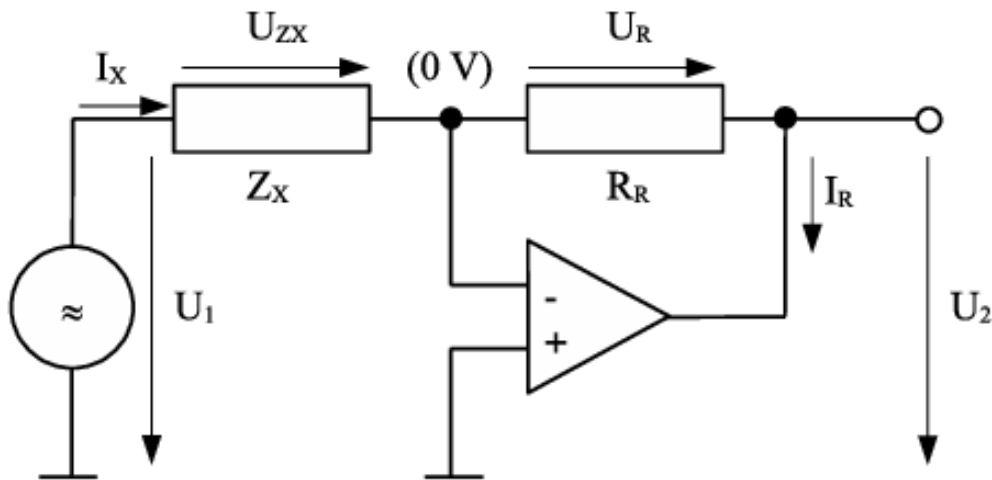
### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden

Methode der selbstabgleichenden Brücke:



### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden

Methode der selbstabgleichenden Brücke - Fortsetzung:



Funktion:

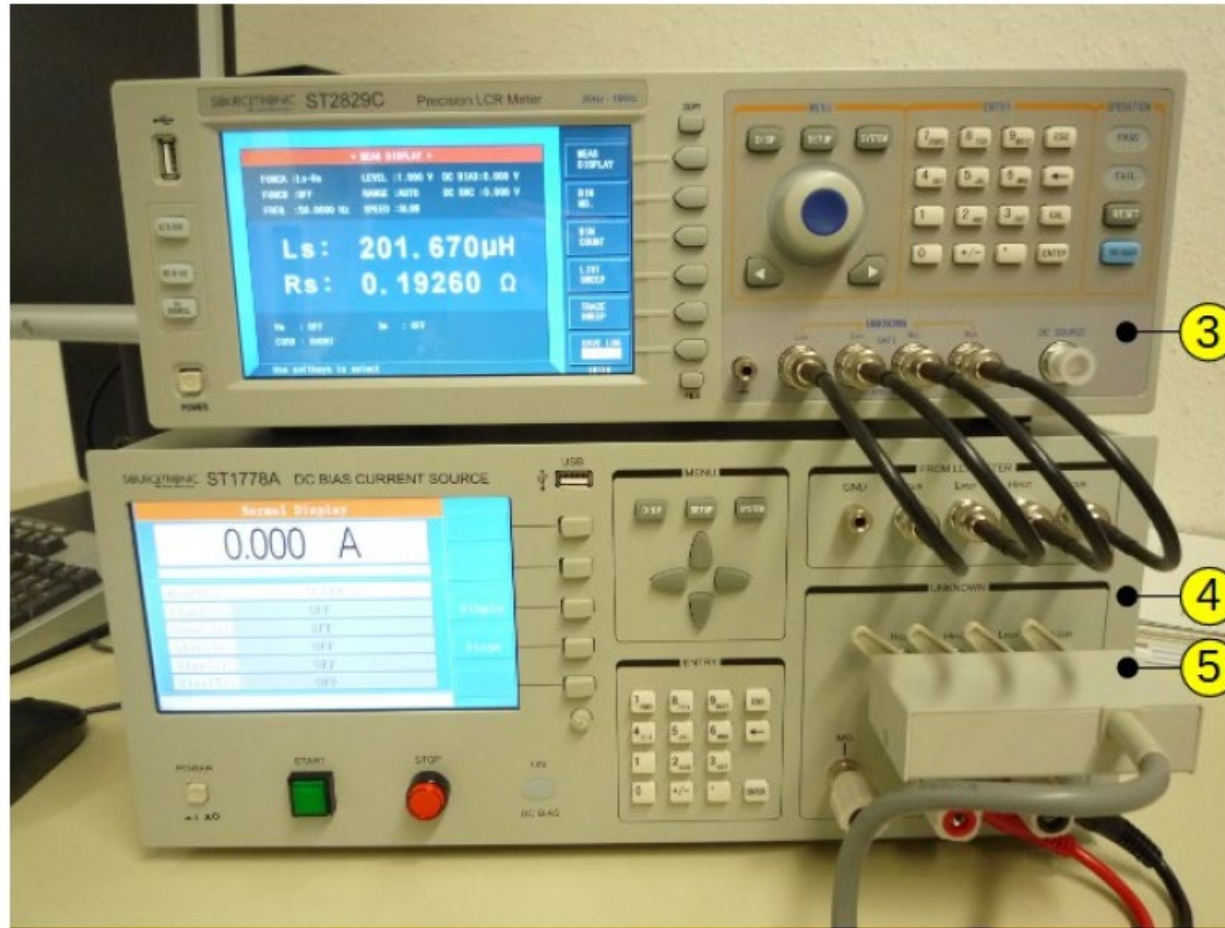
Der Strom  $I_x$  fließt durch den Widerstand und den Ausgang. Der als Null-Volt gekennzeichnete Punkt wird als virtuelle Masse bezeichnet,

da die Eingangsimpedanz und die OPV-Verstärkung im offenen Regelkreis hoch sind.

$$\begin{aligned} I_X &= I_R \\ \frac{U_{ZX}}{Z_X} &= \frac{U_R}{R_R} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{U_{ZX}}{U_R} R_R &= Z_X \\ &= \omega L \\ \frac{U_{ZX}}{U_R} \frac{R_R}{\omega} &= L \end{aligned}$$

### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden



SOURCETRONIC ST2829C Precision LCR Meter

### 3) Messmethoden der Induktivität – Instationäre Methoden



LCR-Messgeräte: (li) HP 4261 A, (re) HP 42841

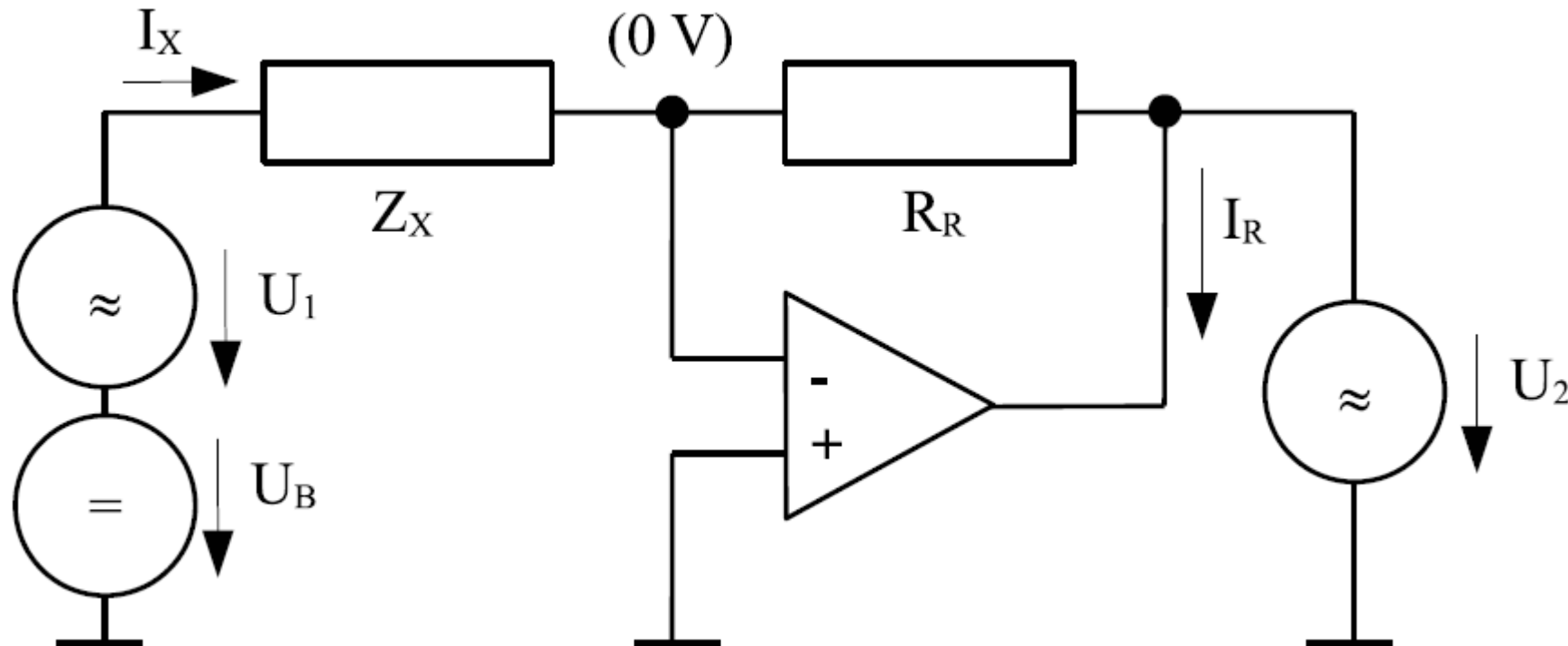
# Induktivität in Theorie und Anwendung: Messmethoden, Grenzen und parasitäre Effekte

## Inhalt

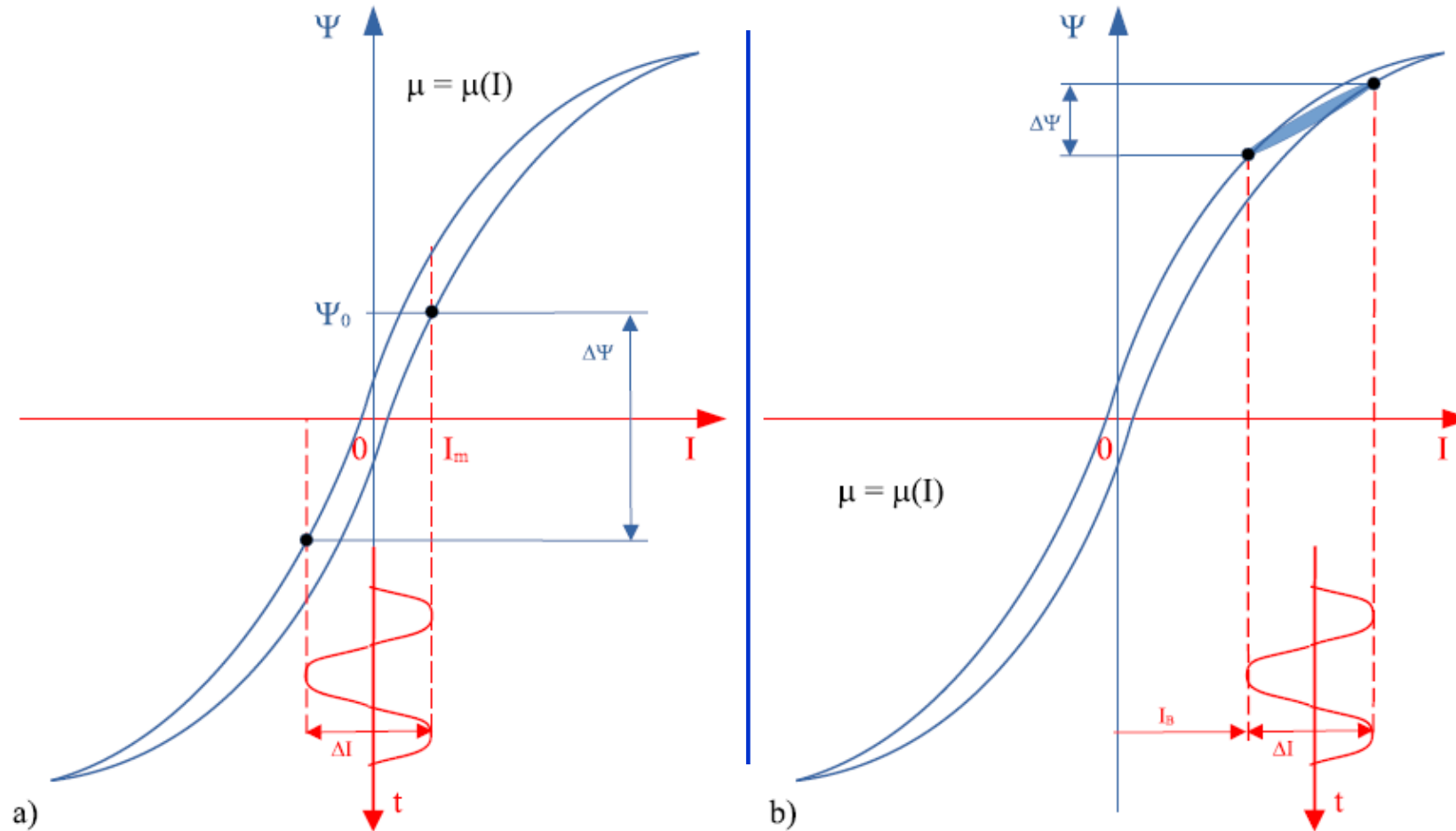
- 1) Hinweise
- 2) Theorie der Induktivität
- 3) Messmethoden der Induktivität
- 4) **Messanwendungen – Grenzen – Effekte**



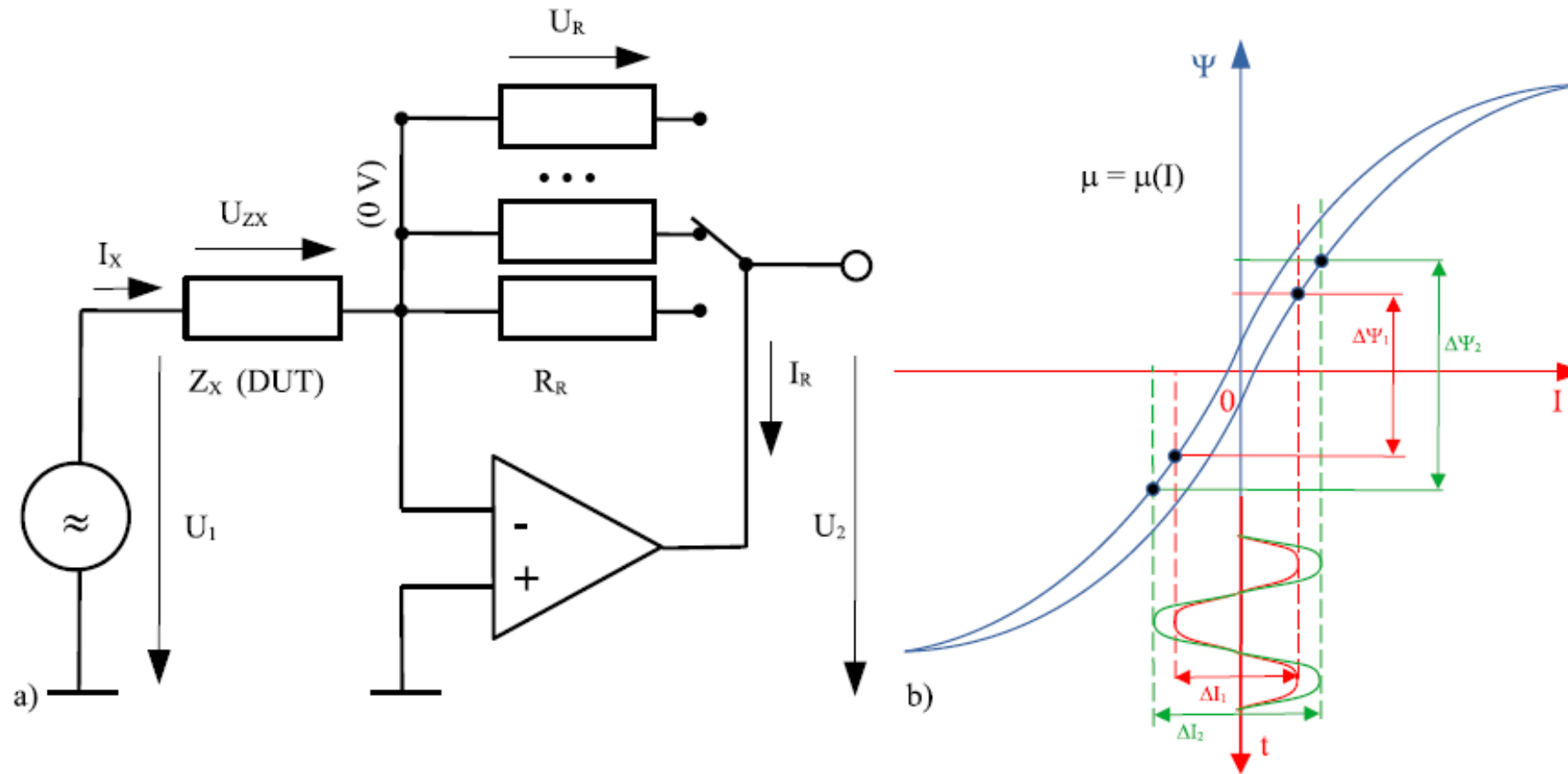
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Bias-Strom



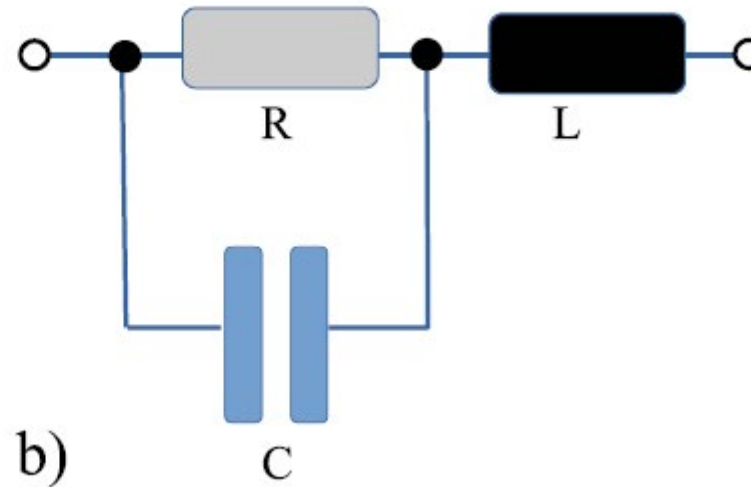
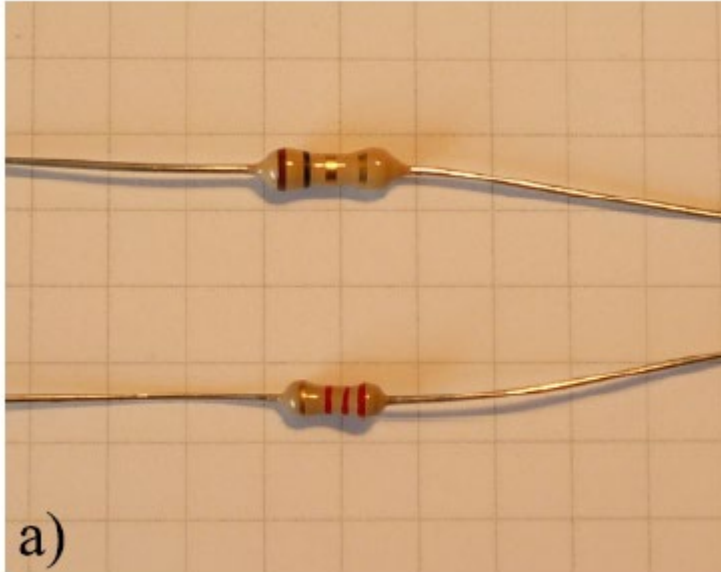
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Bias-Strom-Einfluss



## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Range-Resistor/Einfluss

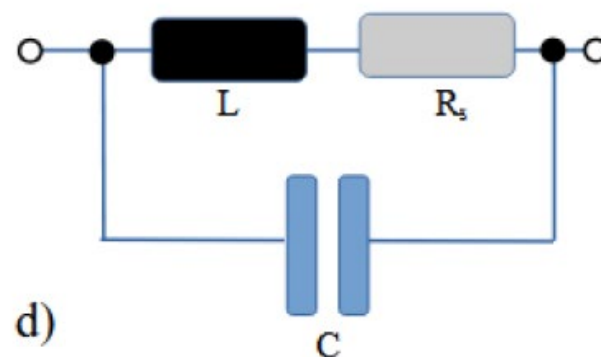
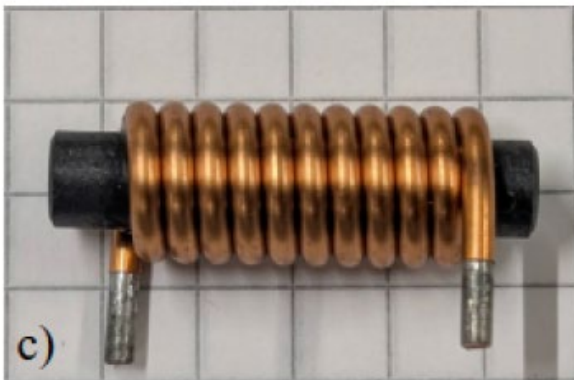
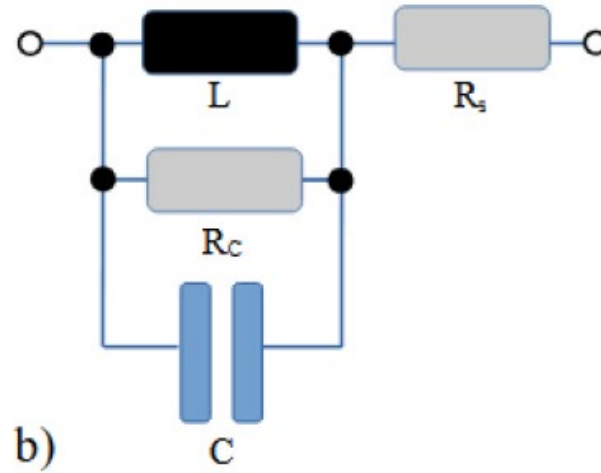
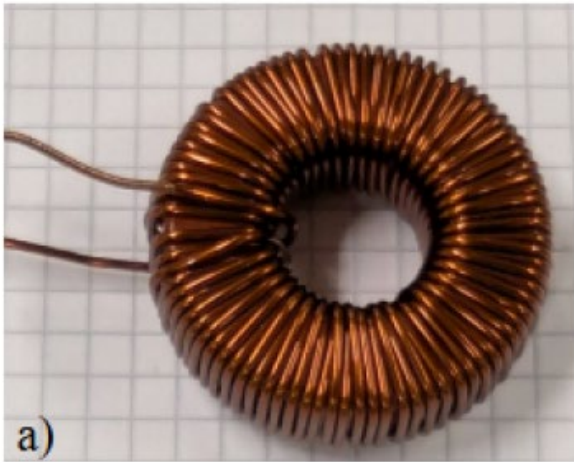


## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Ersatzschaltbilder



$$Z = \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} + j \frac{\omega L - \omega^2 R^2 C + \omega^3 R^2 L C^2}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

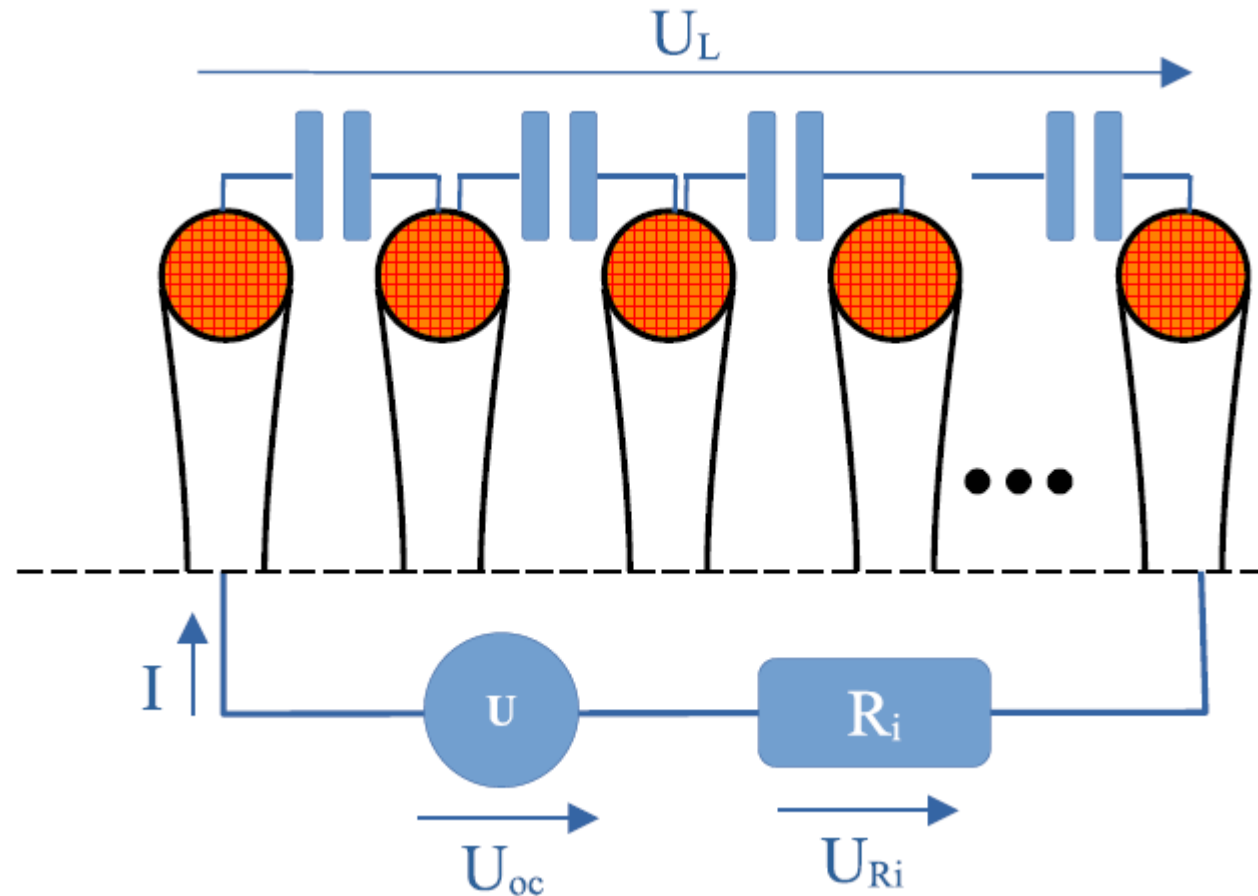
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Ersatzschaltbilder



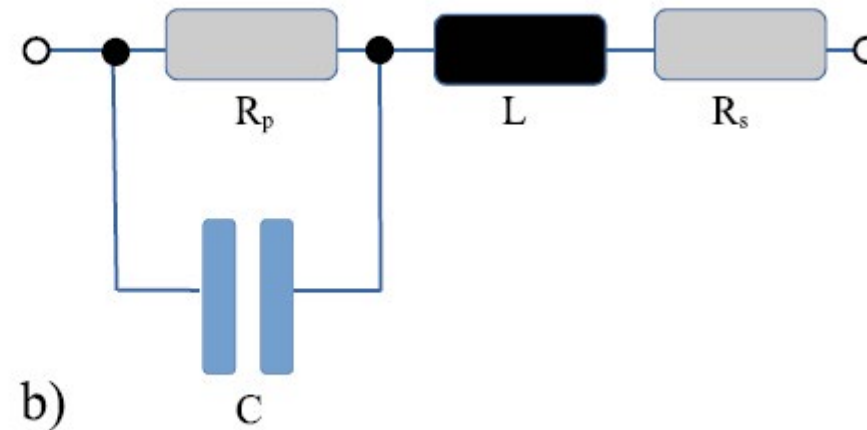
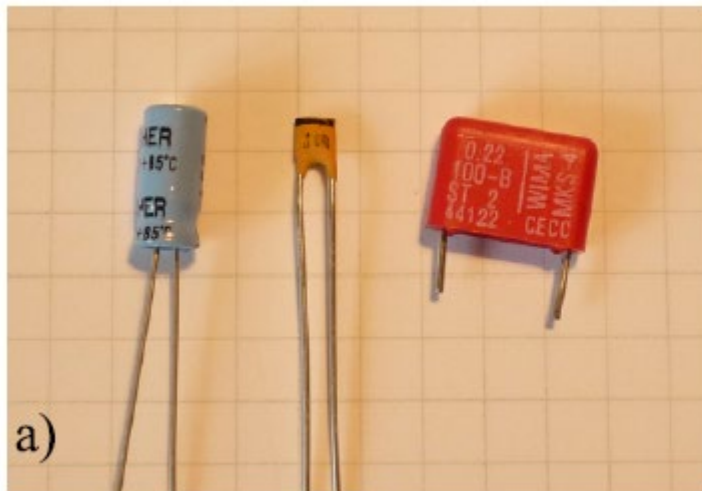
$$Z = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} + j \frac{\omega L(1 - \omega^2 LC) - \omega R^2 C}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}$$

$$\tan(\delta) = \frac{\omega L(1 - \omega^2 LC) - \omega R^2 C}{R}$$

## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Ersatzschaltbilder



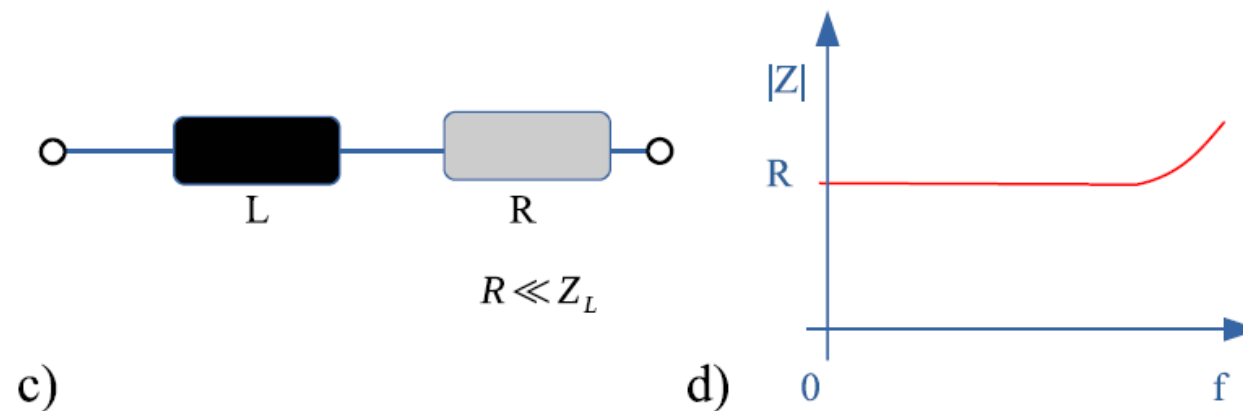
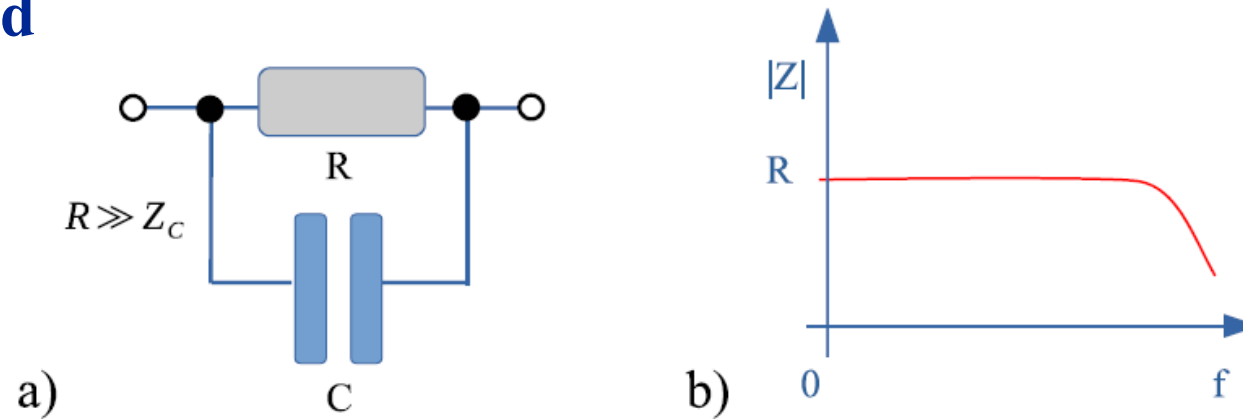
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Ersatzschaltbilder



$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2} + j \frac{\omega L - \omega^2 R_p^2 C + \omega^3 R_p^2 L C^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2}$$

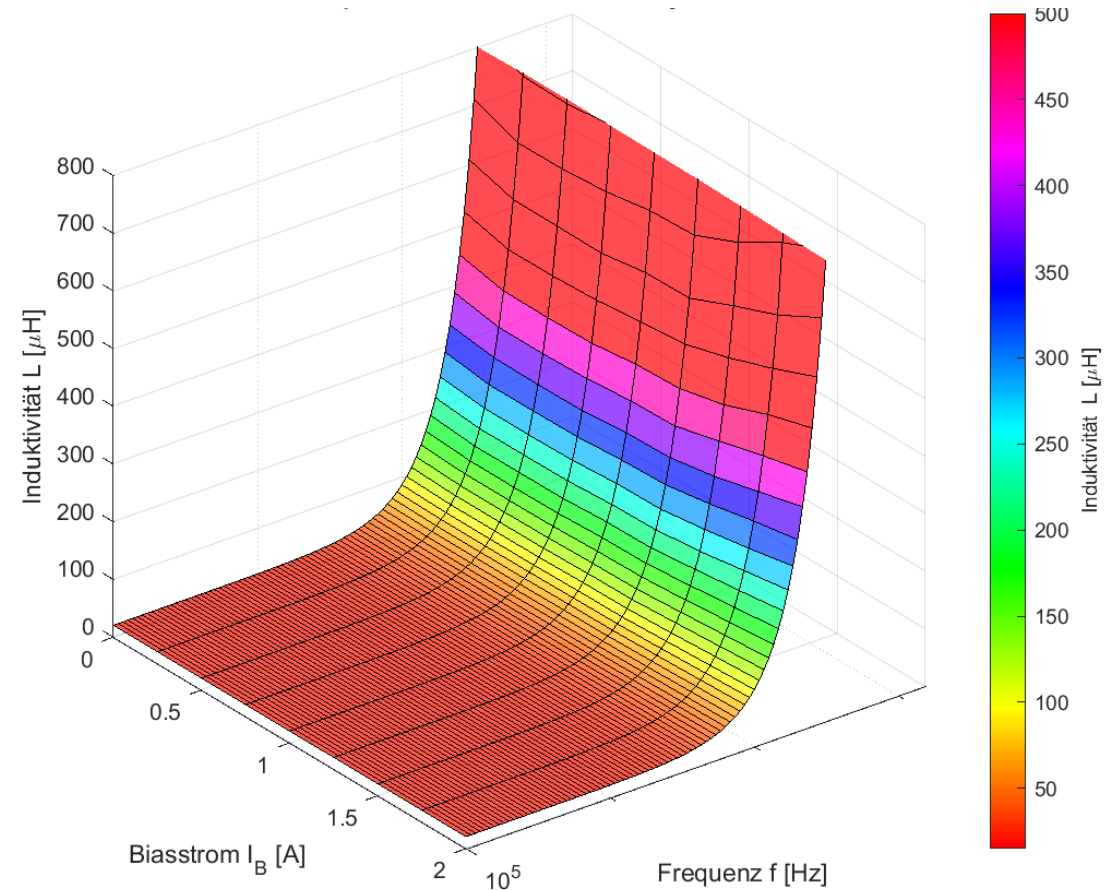
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Frequenzgang-Messungen

### Realer Widerstand



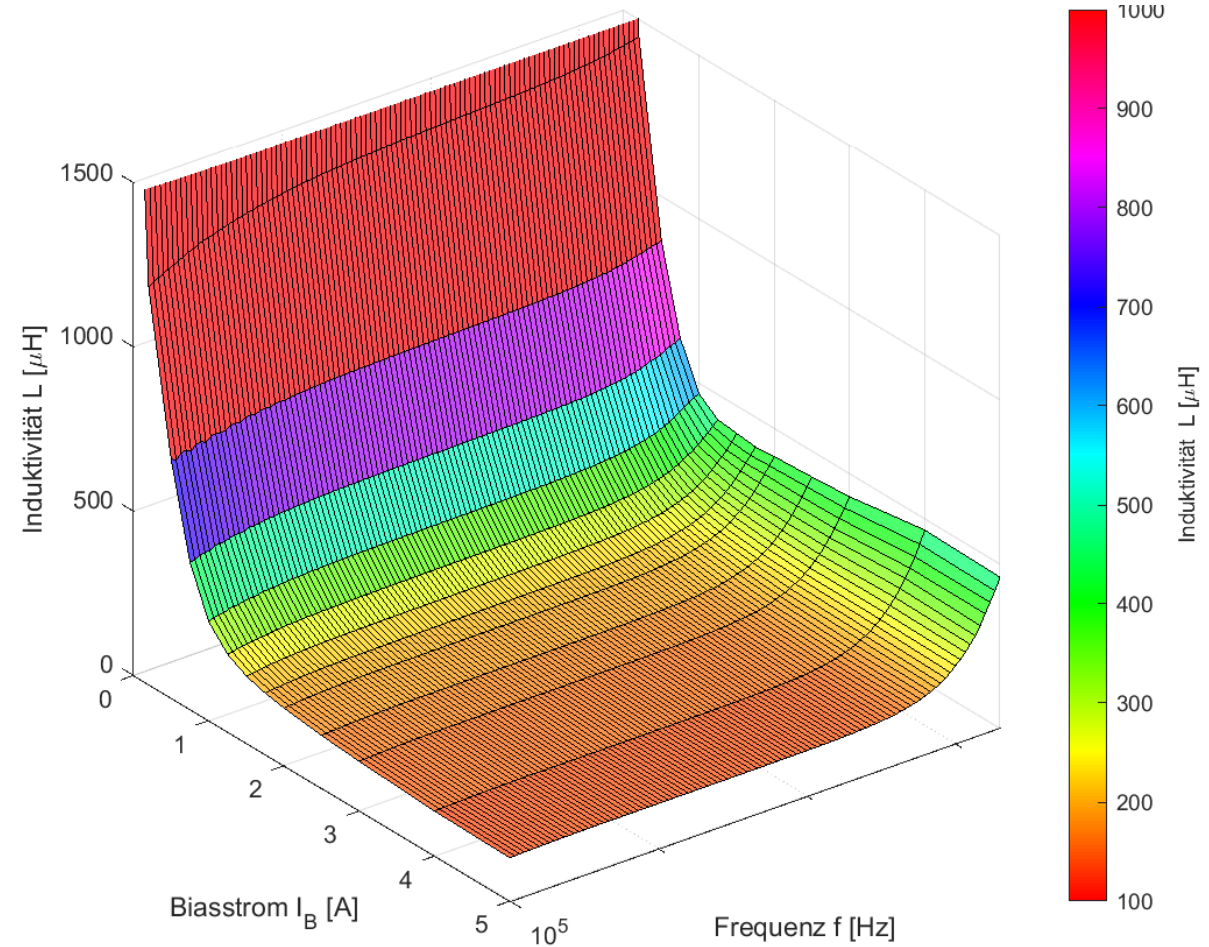
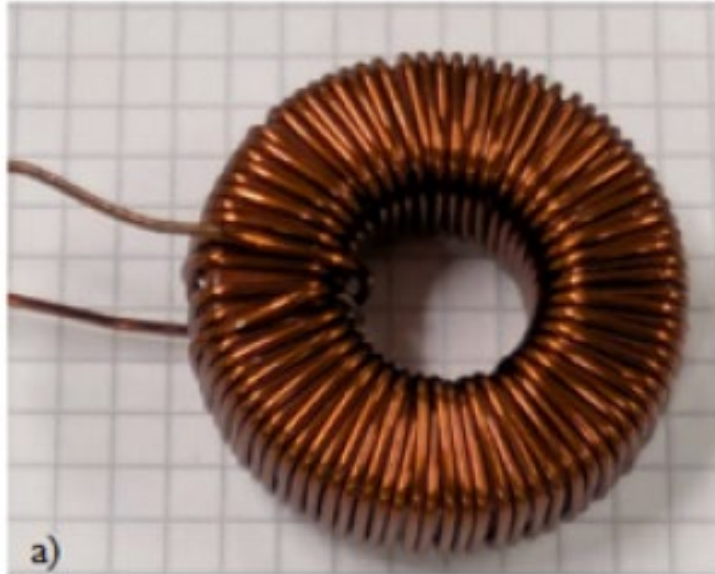
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Frequenzgang-Messungen

### Reale Induktivität



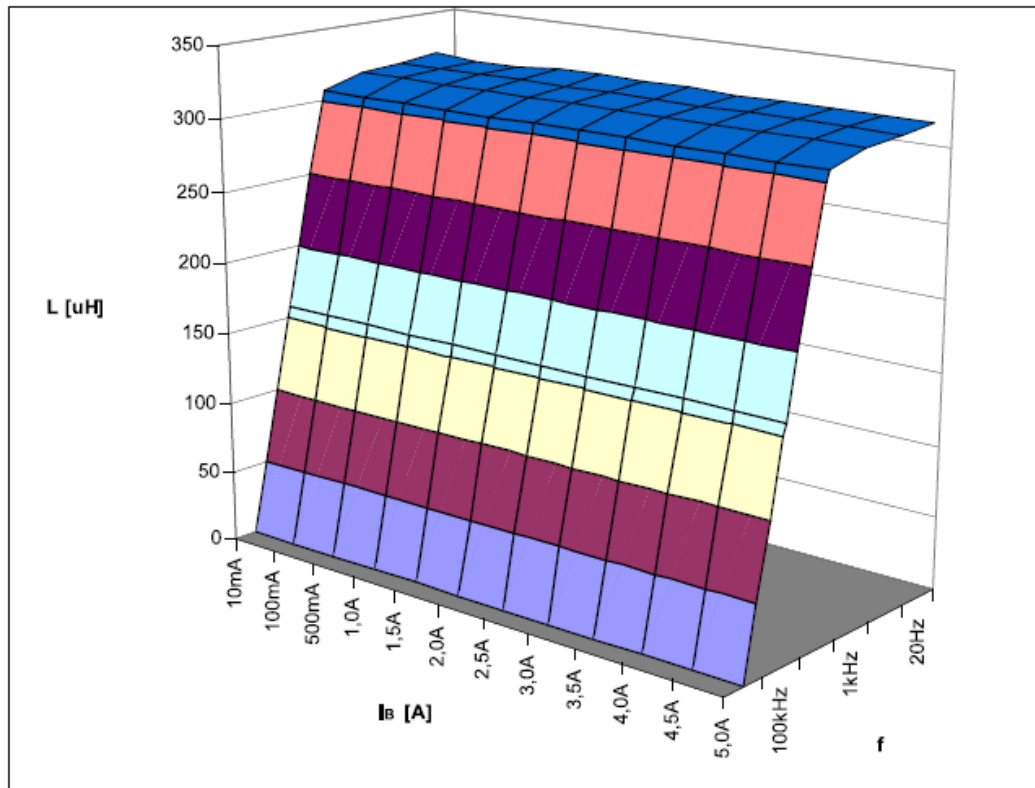
## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Frequenzgang-Messungen

### Reale Induktivität

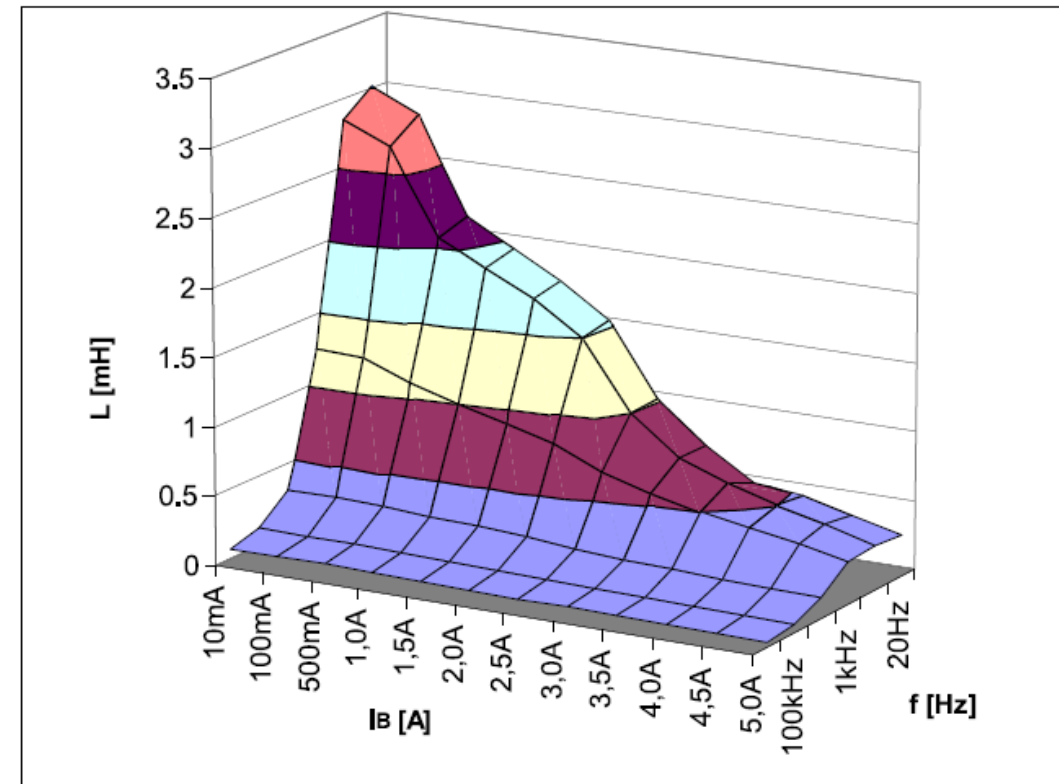


## 4) Messanwendungen – Grenzen – Effekte: Frequenzgang-Messungen

### Reale Induktivität



Luftspule



Elektromagnet

# Programm Sommersemester 2026:

Mittwoch, 6. Mai 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Mathematische Grundlagen, Maxwellgleichungen, magnetisches und unmagnetisches. Geklärt wird zudem die Frage:  
„Was haben ein Festtagsbraten und ein Elektromagnet gemeinsam?“



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Master-schwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

Mittwoch, 27. Mai 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Grundlagen Ferritmaterialien für passive Bauteile



**Dipl.-Ing. Steffen Schulze**

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Als Applikationsingenieur berät er Hardware-Entwickler bei der Auswahl von passiven Bauteilen und zu EMV-Thematiken.

Mittwoch, 17. Juni 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Grundlagen von Induktivitäten und deren Messtechnik



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Master-schwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

Mittwoch, 1. Juli 2026

16.30 bis 18.00 Uhr

Wicklungsauslegung und Wicklungsqualitäten



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm**

Hochschule Heilbronn, Campus Künzelsau,  
Reinhold-Würth-Hochschule

Schwerpunktgebiet in der Theorie der elektromagnetischen Felder und der elektromagneto-mechanischen Wandler im Master-schwerpunkt Elektromagnetische Systeme (EMS).

# Magnetics 4 Freaks: Alles rund um den Elektromagnetismus SS 2026

## 148'te Veranstaltung



**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**



**Willkommen an der  
Reinhold-Würth-  
Hochschule in  
Künzelsau**

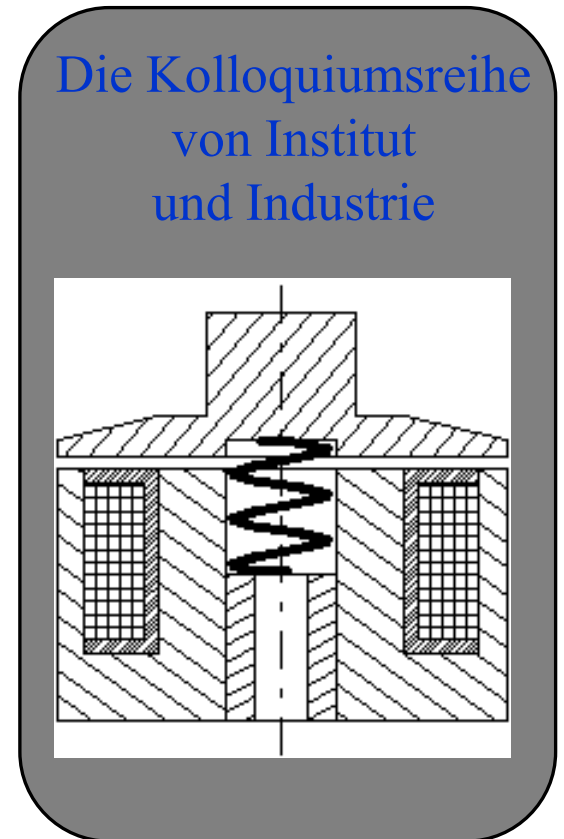


Foto: Wilhelm Feucht

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ulm  
Institut für schnelle mechatronische Systeme (ISM)  
Institut für Digitalisierung und elektrische Antriebe (IDA)