ETiT – Praktikum

Durchsprache der elektrotechnischen Grundlagen

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder

Tel. : 06151 / 16-2167

abinder@ew.tu-darmstadt.de

ETiT – Praktikum

Versuch 4
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. Yoseph Gessese
Raum S3|10/036
Tel. : 06151 / 16-3579
E-Mail : ygessese@ew.tu-darmstadt.de

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Inhalt

- Allgemeines zu Gleichfeldmessungen
- Gleichfeldmessung durch feldabhängige Materialeigenschaften
- Weich- und hartmagnetische Werkstoffe
- Das magnetische Rückschlussjoch
- Magnetische Wechselfeldmessungen
- Dynamische Hystereseschleifen
- Die Wirbelstrombremse
- Magnetisch gekoppelte Kreise

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.1 Allgemeines zu Gleichfeldmessungen

B : **magnetische Flussdichte (Induktion)**, Vs/m^2 = T (*Tesla*)

H : **magnetische Feldstärke**, A/m

J : **magnetische Polarisation**, Vs/m^2 = T (*Tesla*) $(\vec{J} = \mu_0 \vec{M})$

Im leeren Raum ("Luft"): $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

Permeabilität des leeren Raumes: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Vs/(Am)

In **ferromagnetischen Stoffen** (Eisen, Nickel, Kobalt): $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu \cdot \vec{H}$

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Relative Permeabilität: μ_r . In ungesättigtem Eisen: μ_r = ca. 5000

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

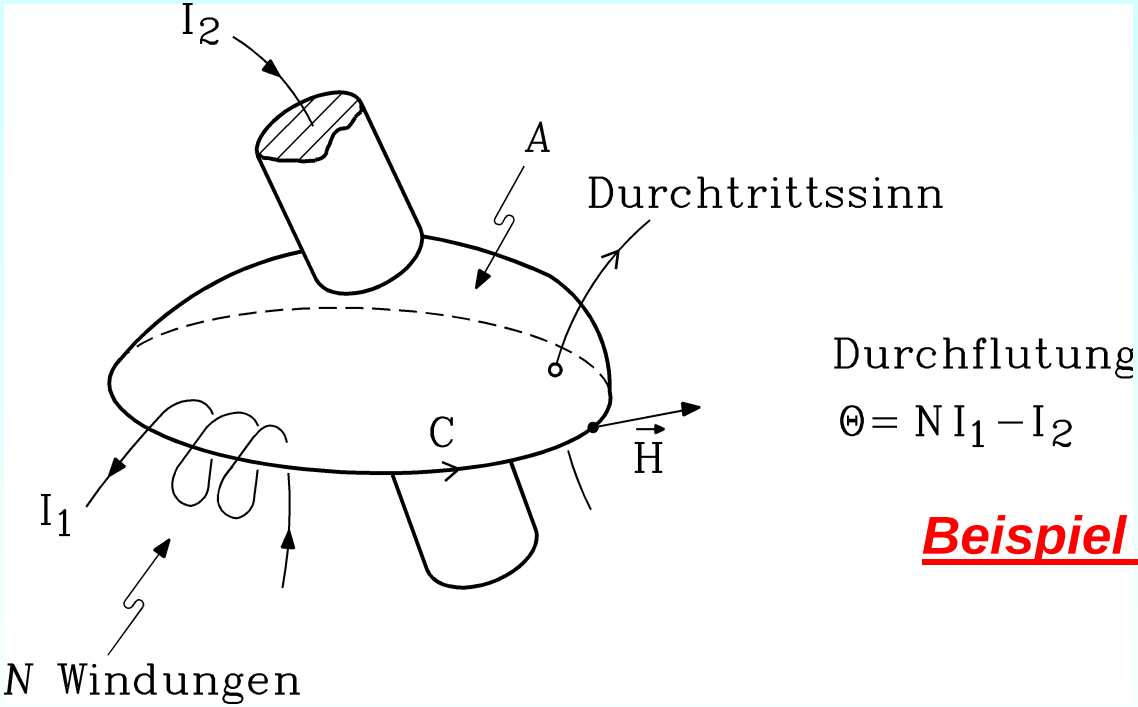
Erzeugung magnetischer Felder

Stromdurchflossene Spulen	Permanentmagnete
- Erregerverluste (Abhilfe: Supraleitung)	+ keine Verluste
- Stromversorgung nötig	+ einfacher Aufbau des Motors
+ (beliebig) hohe Felder möglich	- Magnetfeld nicht veränderbar
+ Magnetfeld veränderbar	- Gefahr der Entmagnetisierung
+ bei großen Maschinen kostengünstiger	

Material: Kupfer, Isolierstoff — Eisen-Nickel-Kobalt-Legierungen u. Sinterwerkstoffe mit Seltenen Erden

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Der *AMPERE´*sche Durchflutungssatz



Durchflutung

$\Theta = N I_1 - I_2$

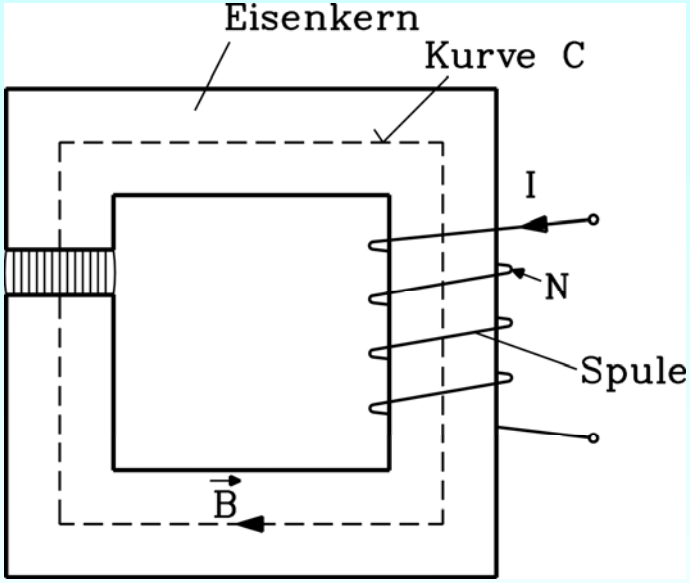
$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta$$

***Beispiel* für Θ : $\Theta = N I_1 - I_2$**

Das Kurvenintegral der magnetischen Feldstärke *H* längs der geschlossenen Kurve *C*, die die Fläche *A* aufspannt, ist gleich der resultierenden Durchflutung Θ, die durch die Fläche *A* hindurch tritt.

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Stromerregte Magnetfelder



- **Geschlossene Kurve *C* = hier gewählt: Feldlinie *B***
- **In der Spule: Strom *I***
- **Spulenwindungszahl *N* (hier: 4)**

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta = N \cdot I \cong H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + ... + H_n \cdot l_n$$

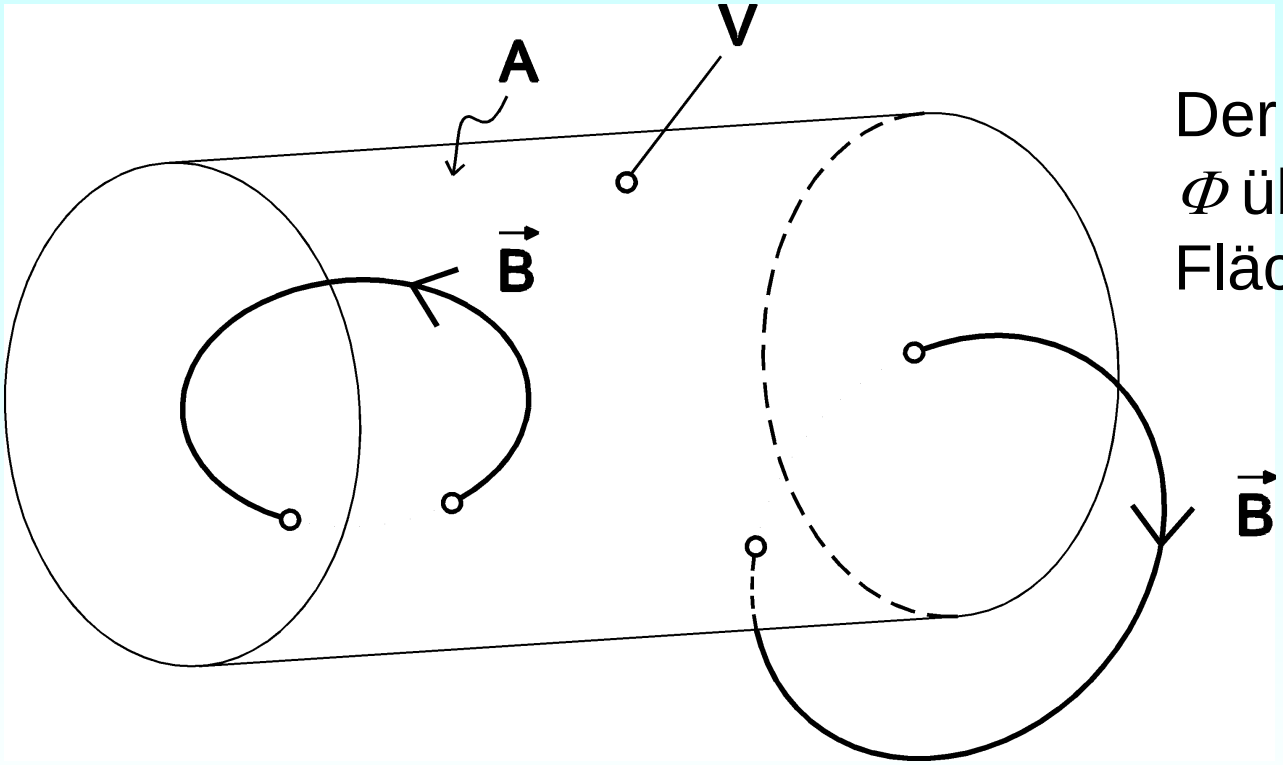
Anwendung des Durchflutungssatzes:

- Linienintegral über magn. Feldstärke *H* entlang geschlossene Linie *C*

- Durchflutung Θ = gesamte Strom *N·I* durch die von C gebildete Fläche

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Gesetz vom magnetischen Hüllenfluss



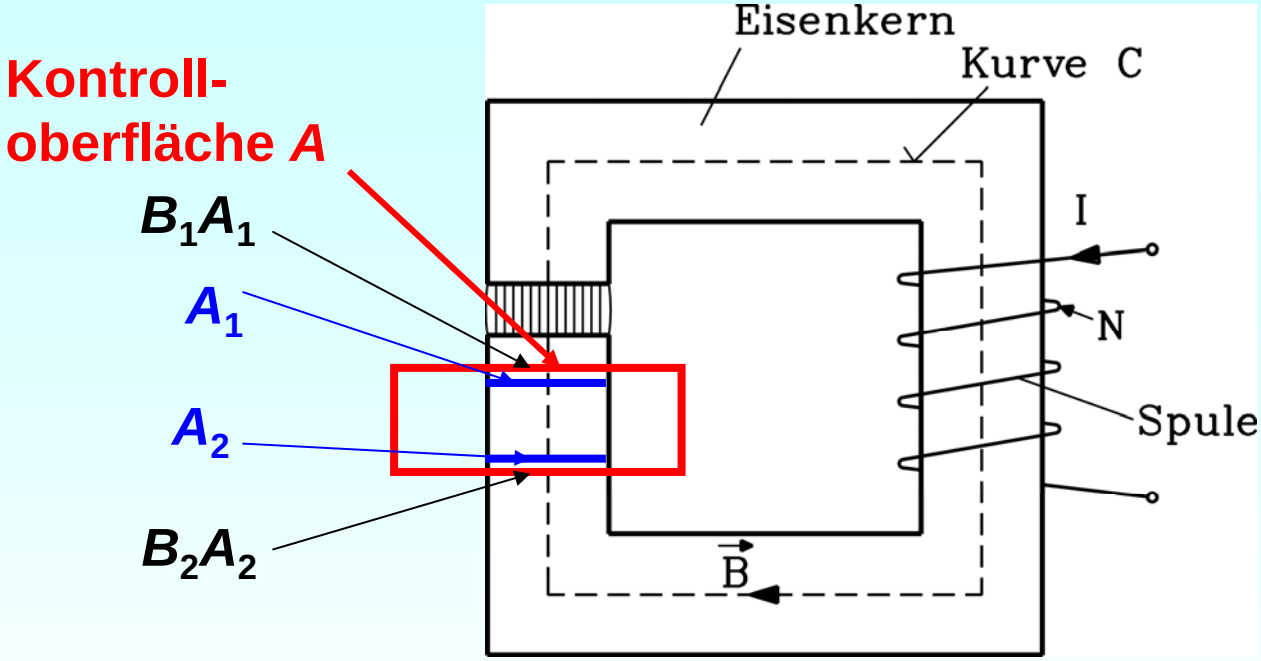
Der magnetische Hüllenfluss Φ über eine geschlossene Fläche *A* ist **stets Null** !

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \Phi = 0$$

- **Konstanz der *B*-Normalkomponente an Grenzflächen:** $B_{n,1} = B_{n,2}$
- **Nord- und Südpole** treten stets **gemeinsam** auf.
- Die Mindest-Polzahl ist 2 - ein Nord- und ein Südpol.

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Flusskonstanz in allen Eisenquerschnitten A_{Fe}

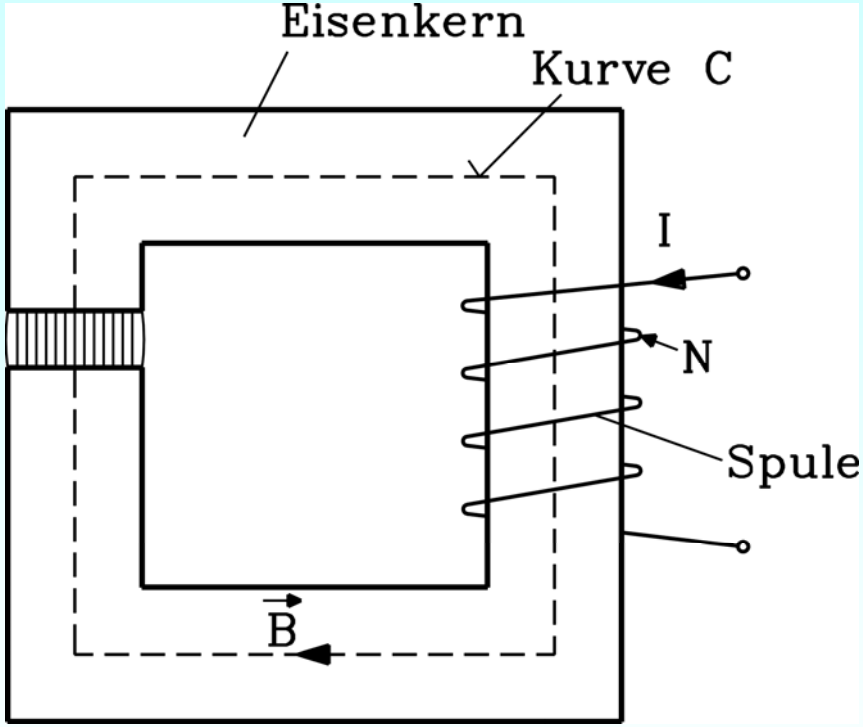


Anwendung des Satzes vom magnetischen Hüllenfluss:

- **Kontrolloberfläche *A***
- **Kein seitlicher Feldaustritt**
- **$B_1A_1 = B_2A_2$**
- **hier: $A_1 = A_2 = A_{Fe}$: *B* im Eisen ist konstant**

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Verstärkung des Magnetfelds durch Eisen



- **In Luft ist die magnetische Flußdichte *B* der magnetischen Feldstärke *H* über μ_0 direkt proportional:**

$$B = \mu_0 \cdot H \qquad \mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ \mathrm{V{\cdot}s/(A{\cdot}m)}.$$

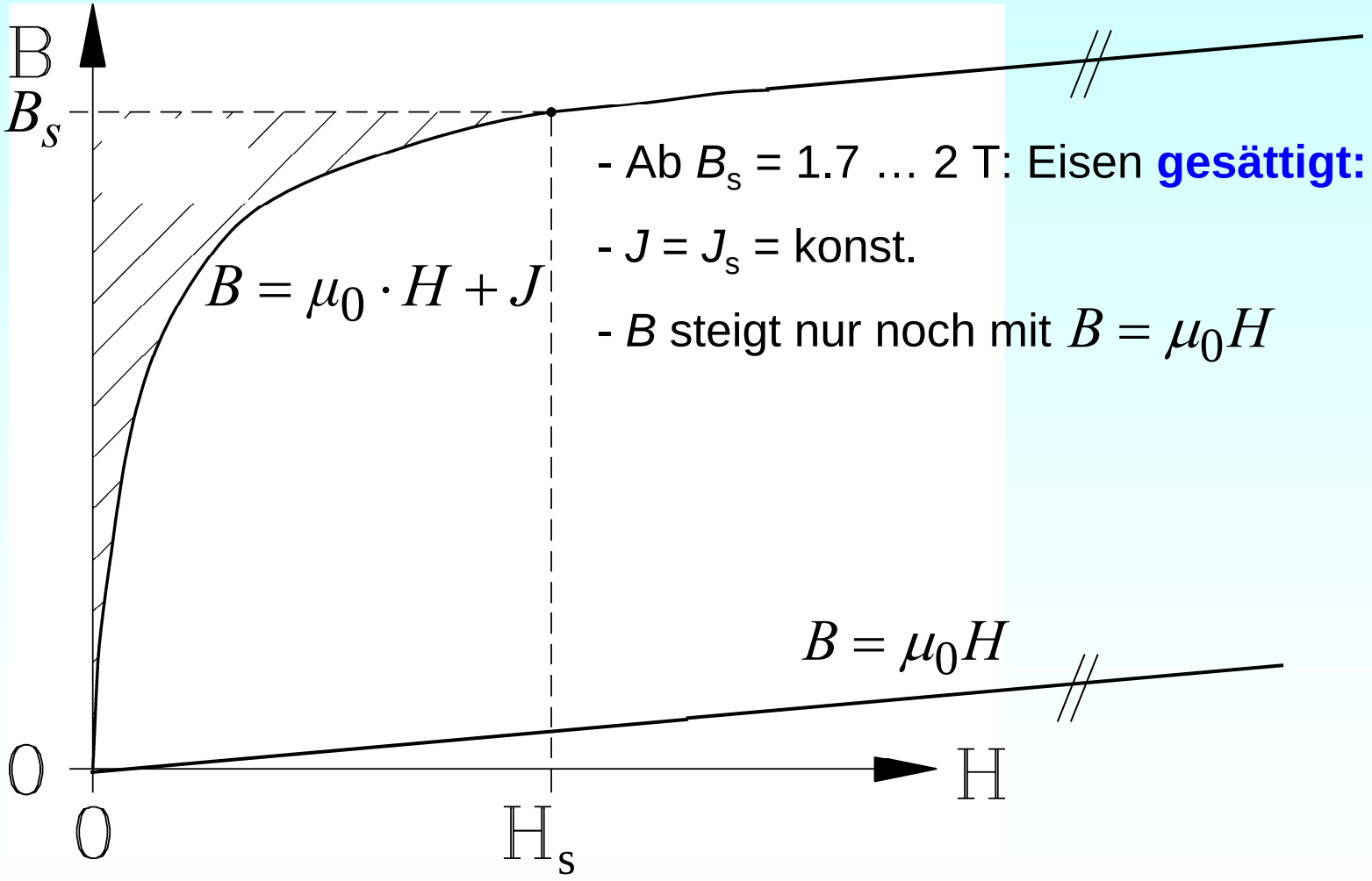
- **Eisen besteht aus vielen kleinen "Elementarmagneten", die sich im Feld *H* der Spule parallel ausrichten und damit ein eigenes Magnetfeld *J* erzeugen, welches das *H*-Feld verstärkt.**

$$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu \cdot H >> \mu_0 \cdot H$$

- **Diese Verstärkung funktioniert nur bis ca. B = 1.7 T, dann sind alle "Elementarmagnete" parallel (SÄTTIGUNGSEFFEKT).**

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

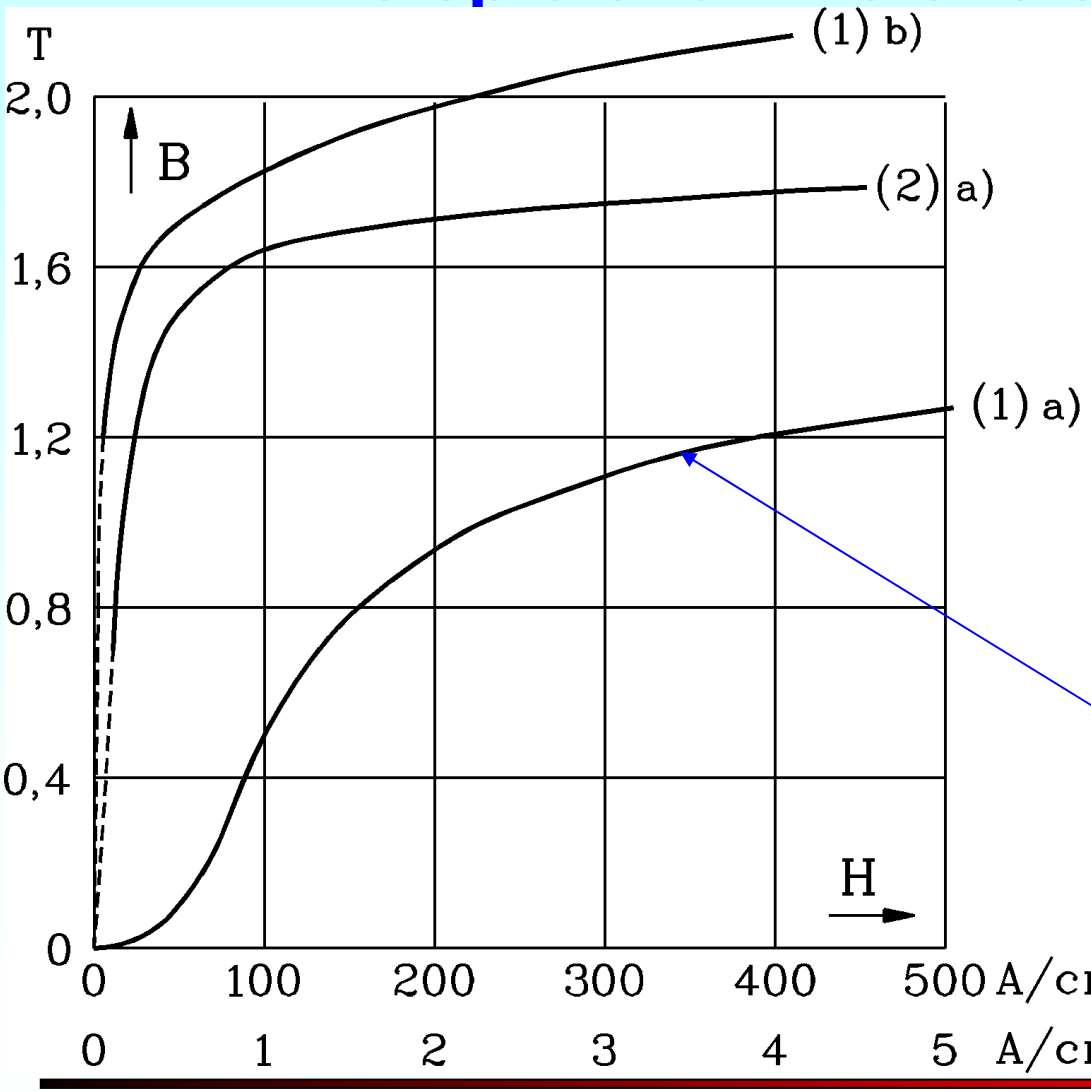
B(*H*)-Kennlinie des Eisens



- Ab B_s = 1.7 … 2 T: Eisen **gesättigt:**
- $J = J_s$ = konst.
- *B* steigt nur noch mit $B = \mu_0 H$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Beispiele für Weicheisenwerkstoffe



(1) Elektroblech
Dicke 0.5 mm
(2) Kornorientiertes Blech
Dicke 0.35 mm

Hystereseschleife klein: nicht dargestellt

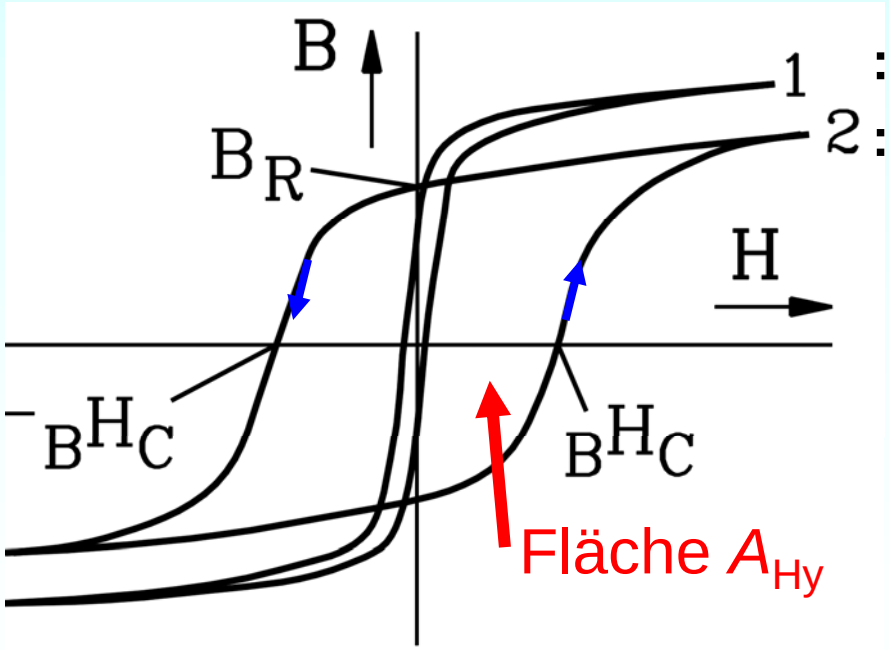
Gedehnter H-Maßstab

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Magnetische Werkstoffkennlinie: Hystereseschleife

- **Eisen: weichmagnetisch: für Wechselfelder geeignet**
- **Permanentmagnete: hartmagnetisch, z. B. Ferrit**

  Remanenzflussdichte B_R, Koerzitivfeldstärke $_BH_C$
  nur für Gleichfelder geeignet!



1 : Eisen

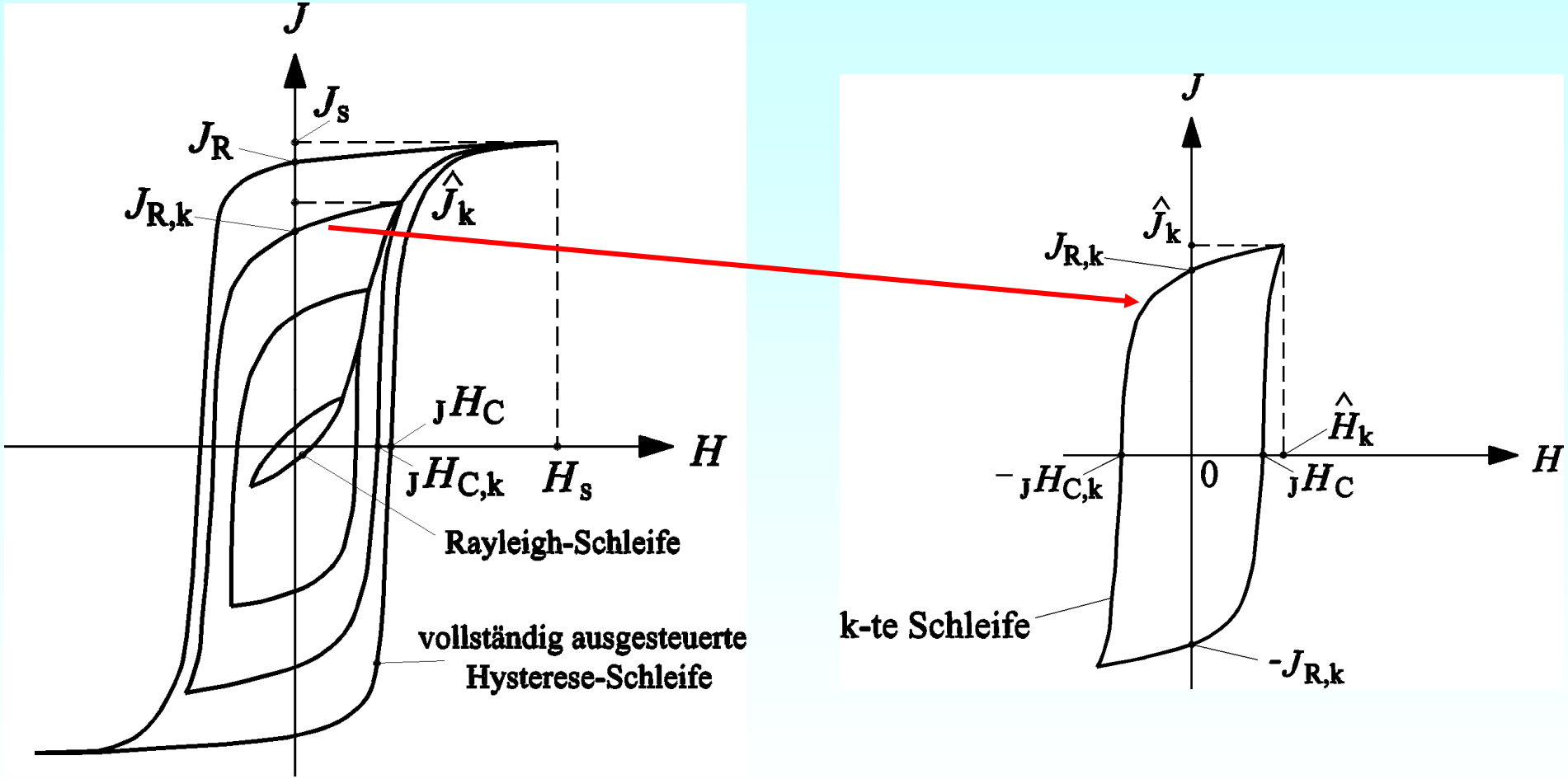
2 : Permanentmagnet

- Bei **Ummagnetisieren** von +*B* nach –*B* wird die Hystereseschleife im Uhrzeigersinn „umfahren“

- **Hysterese-Verluste** (Wärme !) durch „atomare Reibung“ beim Ummagnetisieren der mikrsokopisch kleinen magnetischen Bezirke. Verluste proportional A_{Hy} !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

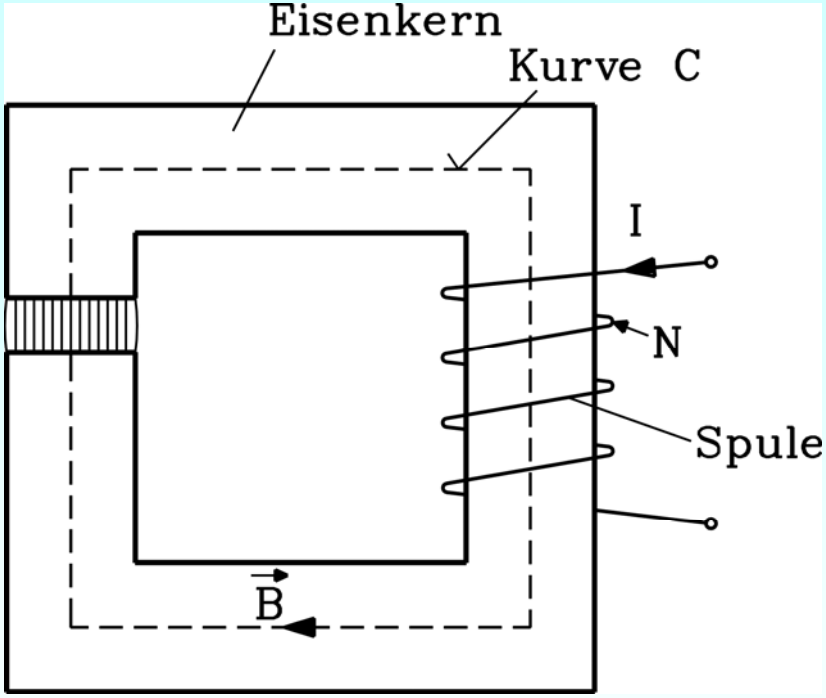
Statische Hystereseschleifen (Gleichfeld !)



Schar von Schleifen für unterschiedliche Feldstärkeamplituden *H*

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Beispiel: Berechnung der Luftspaltflussdichte



- **Ungesättigtes Eisen**: $\mu \approx 5000\mu_0$
- **Luft**: $\mu = \mu_0$
- **Magnetischer Fluss**: $\Phi = B \cdot A$

$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{A} = B_\delta \qquad H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} << H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$$

- **Durchflutungssatz:**

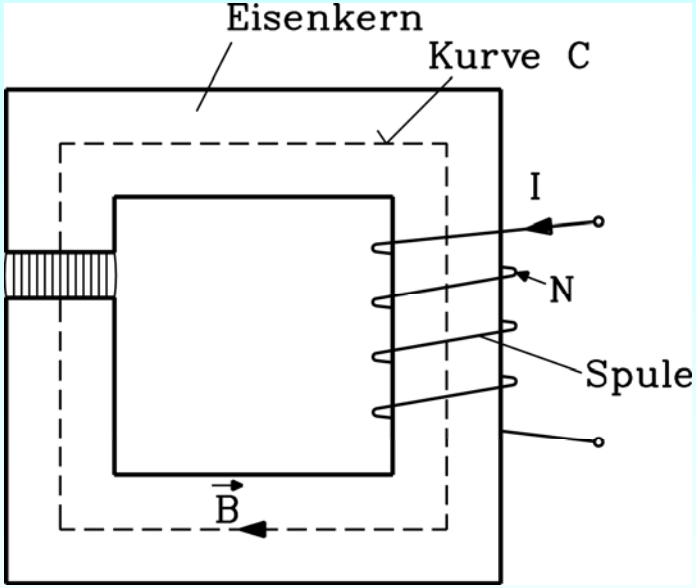
$$H_{Fe} \cdot s_{Fe} + H_\delta \cdot \delta = N \cdot I \qquad \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} \cdot s_{Fe} + \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta = N \cdot I = V_{Fe} + V_\delta$$

- **z. B. $s_{Fe}/\delta = 100$: daher $V_{Fe}/V_\delta = 0.02 \sim 0$**

Nur die Luftspaltweite δ muss magnetisiert werden: $B_\delta \approx \mu_0 NI/\delta$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Zahlenbeispiel: Magnetkreis



- ***Beispiel:***
  - ungesättigtes Eisen: $\mu >> \mu_0$
  - Magnetfeld im Luftspalt soll $B_\delta = 1$ T sein
  - Luftspalt beträgt $\delta = 3$ mm

- **Wie groß ist Erregerbedarf $N \cdot I$?**

  $B_\delta = \mu_0 \cdot N \cdot I / \delta = 1\ \text{T} \quad \Rightarrow \quad N \cdot I = \underline{2390\ \text{A}}$

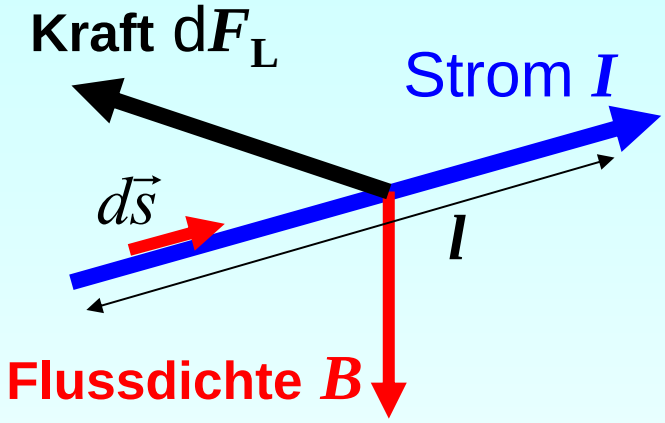
- **Auslegung der Erregerspule:**

  z. B. N =100 Windungen: I = 2390/100 = <u>23.9 A</u>

  oder N = 250 Windungen: I = 2390/250 = <u>9.56 A</u>

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Lorentz-Kraft des *B*-Felds auf Strom *I*



- **Leiterstrom *I* im Leiter-Wegelement *ds* im Magnetfeld *B***
- ***LORENTZ*-Kraft F_L senkrecht auf Feldrichtung und Stromflussrichtung.**

$$d\vec{F}_L = I \cdot (d\vec{s} \times \vec{B})$$

- **differentiell kleines Leiterelement *ds*: differentiell kleine *LORENTZ*-Kraft dF_L**
- **Resultierende Kraft F_L auf gesamtes Leiterstück der Länge *l*: Integrieren!**

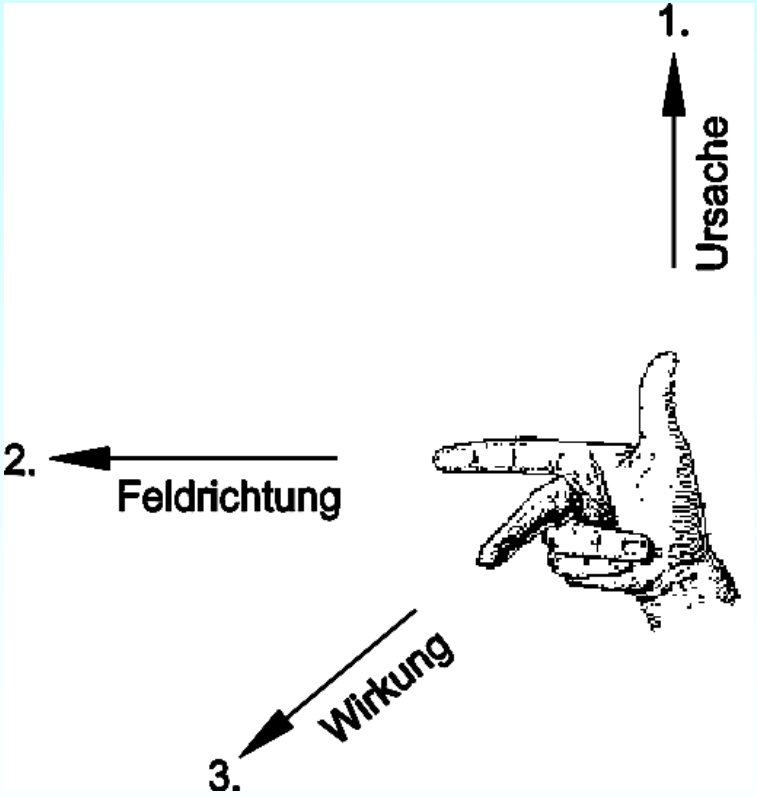
$$\vec{F}_L = \int_0^l d\vec{F}_L = I \cdot \int_0^l d\vec{s} \times \vec{B}$$

***Sonderfall:* B konstant:**

$$\vec{F}_L = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Dreifingerregel der rechten Hand



1. **Daumen**
2. **Zeigefinger**
3. **Mittelfinger**

dass sie rechte Winkel miteinander bilden.

- **1. Finger in Richtung der Ursache (Richtung des Stroms),**
- **2. Finger in Richtung der Feldlinien,**
- **3. Finger gibt die Richtung der Wirkung (Kraft).**

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

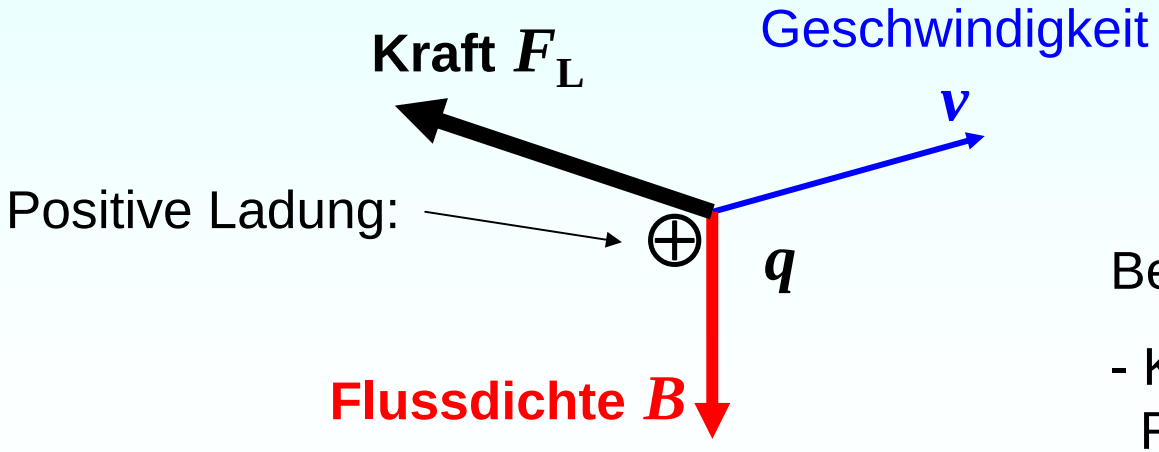
Lorentz-Kraft des B-Felds auf Ladungsträger

- Strom: Bewegte Ladungsträger, Ladung *q*

- Strom $I = q/t$: Durchtritt an Ladung *q* durch Leiterquerschnittsfläche A in der Zeit *t*

- Ladungsgeschwindigkeit: $v = l/t$

$$\vec{F}_L = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} = (q/t) \cdot \vec{l} \times \vec{B} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$



Bei negativer Ladung:

- Kraft in entgegen gesetzte Richtung !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.2 Gleichfeldmessmethoden

a) Bestimmung der **Feldrichtung**
- drehbare **Magnetnadeln** u. Messgeneratoren (Tauchspulen, *Hall*-Sonden)

b) Darstellung von **"Feldlinien„:**
- **Eisenfeilspäne** auf eine Messebene gestreut

c) Größe und **Richtung von** *B*:
- **Fluxmeter**: Aus induzierter Spannung in einer Prüfspule ("Tauchspule") wird Fluss Φ bestimmt. Tauchspule klein = *B* ist „**lokale“** Größe. Drehen der Spulenachse in die drei Raumrichtungen: ***B*-Vektor** gemessen.
- **Magnetoresistiver Effekt**,
- ***Hall*-Effekt**.
- **Magnetooptisch**: Polarisationsebene des Lichts dreht im Magnetfeld (*Faraday*-Effekt).
- **Elektronenstrahlkrümmung** im *B*-Feld durch ablenkende *Lorentz*-Kraft.
- **Kernresonanzmessung:** Atomare Kreiselwirkung („Präzession“)

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.2.1 Magnetoresistiver Effekt

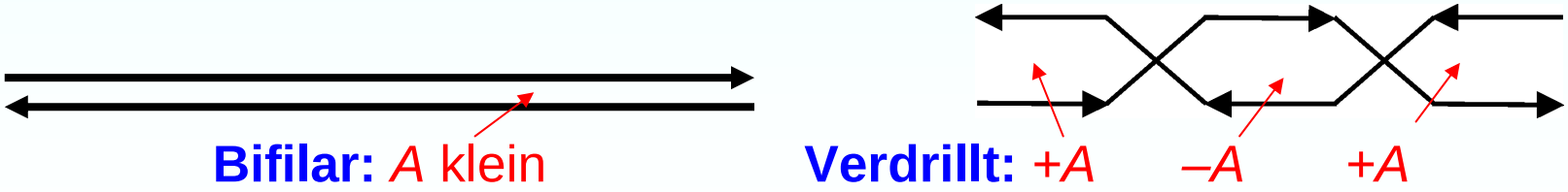
- **Wismut:** $B > 0.1$ T: lineare Widerstandszunahme R bei Erhöhung von B:

- **Feldplatten:** Wismutdrähte hoher Reinheit im Magnetfeld: R gemessen

- Wismutdraht zu einer Spule gewickelt. $B \sim R = U_{Mess} / I_{Mess}$

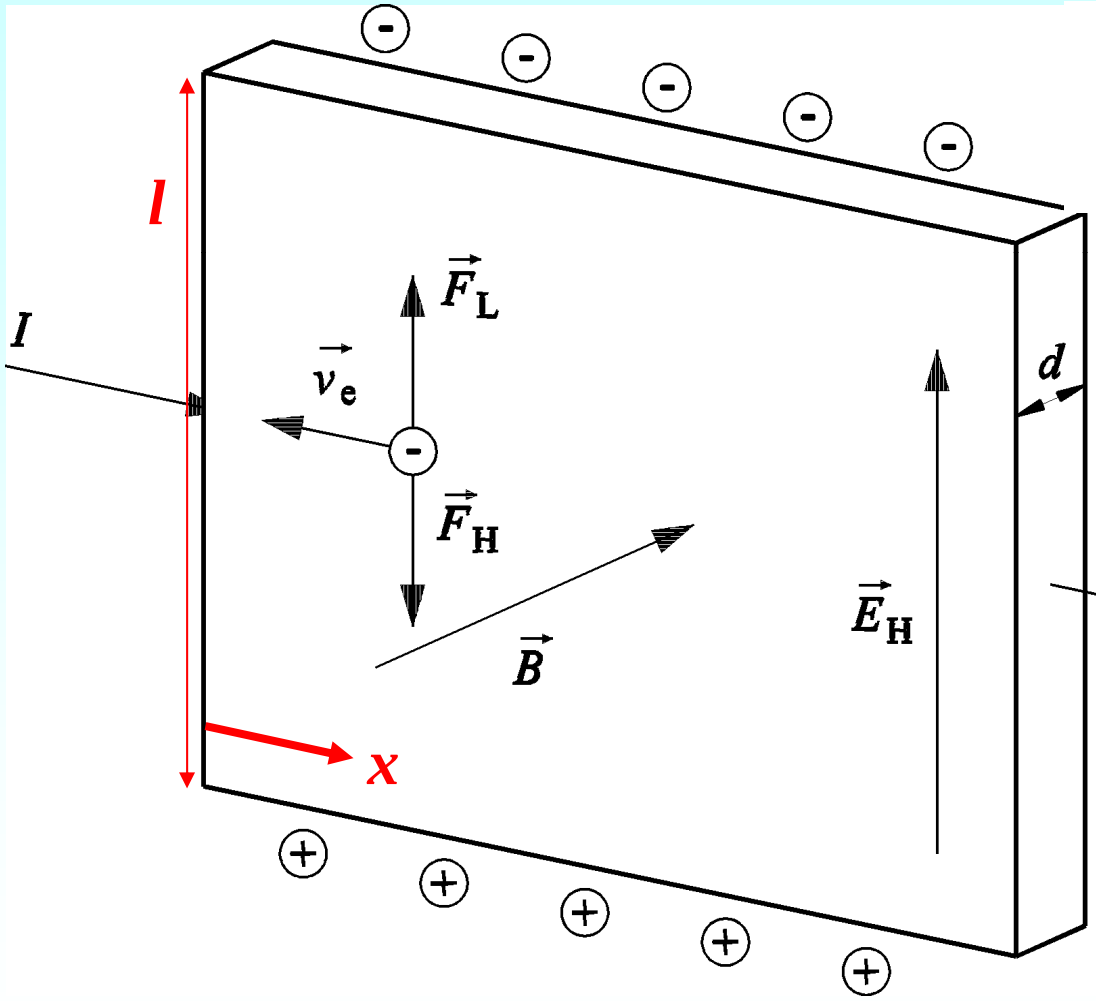
- Bei Wechselfeld $B(t)$: Gefahr der zusätzlichen Spannungsinduktion U_i in die Zuleitungsdrähte. Verfälscht U_{Mess}. $u_i(t) = -d\Phi(t)/dt = -A \cdot dB(t)/dt$

- **Abhilfe:** A so klein wie möglich machen:
  a) Bifilar Drahtverlegung: Hin- und Rückleiter unmittelbar nebeneinander liegen,
  b) Verdrillen: Hin- und Rückleiter ausgekreuzt: Positiv und negativ wirkende Flächen $+A$ und $-A$ heben Induktionswirkung auf



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.2.2 *Hall*-Effekt: Halbleiter im *B*-Feld



$$\vec{F}_L = -e(\vec{v}_e \times \vec{B})$$

$$\vec{F}_H = -e \cdot \vec{E}_H$$

- Stromfluss I durch Halbleiter
- Elektronen: Ladung $-e$
- Elektronengeschwindigkeit v_e
- *Lorentz*-Kraft F_L drängt Elektronen nach oben
- Obere Kante wird negativ: E_H entsteht
- Ist als $U_H = E_H l$ messbar

Material:

Halbleiter Germanium u. Indiumarsenid haben großen *Hall*-Effekt

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Entstehen der *Hall*-Spannung proportional zum *B*-Feld

- Leitungselektronen $q = -e$, **Elementarladung** $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ As, 1As = C (*Coulomb*)
- Strom $\boldsymbol{I}$ durch Halbleiter (Breite $\boldsymbol{l}$, Dicke $\boldsymbol{d}$) = Ladungsänderung dQ/dt am Ort x
- Q: Ladungsmenge ρ je Volumeneinheit (**Ladungsdichte**) im Volumenelement V

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\rho \cdot dV}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v_e = J_e \cdot A = J_e \cdot (d \cdot l) \qquad \vec{J}_e = \rho \cdot \vec{v}_e$$

- J_e: elektrische Stromdichte (wegen $-e$ ist $\rho < 0$):
- B: *Lorentz*-Kraft auf bewegte Leitungselektronen: $\vec{F}_L = -e\left(\vec{v}_e \times \vec{B}\right)$
- Obere Kante lädt sich negativ auf, erzeugt E_H-Feld nach oben.
- Elektrostatische Kraft auf Ladungsträger nach unten: $\vec{F}_H = -e \cdot \vec{E}_H$
- Endzustand: Kräftegleichgewicht: Strom fließt ungehindert: $\vec{F}_{res} = \vec{F}_L + \vec{F}_H = 0$
- ***Hall*-Spannung:** $\boxed{U_H = E_H \cdot l}$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Hall-Spannung proportional zum *B*-Feld

$$\vec{F}_L = -e(\vec{v}_e \times \vec{B})$$

$$\vec{F}_H = -e \cdot \vec{E}_H$$

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_L + \vec{F}_H = 0 \qquad \boxed{\vec{F}_L = -\vec{F}_H}$$

Hall-Feldstärke: $$\vec{E}_H = -(\vec{v}_e \times \vec{B}) = -\frac{1}{\rho}\vec{J}_e \times \vec{B} = h \cdot \left(\vec{J}_e \times \vec{B}\right)$$

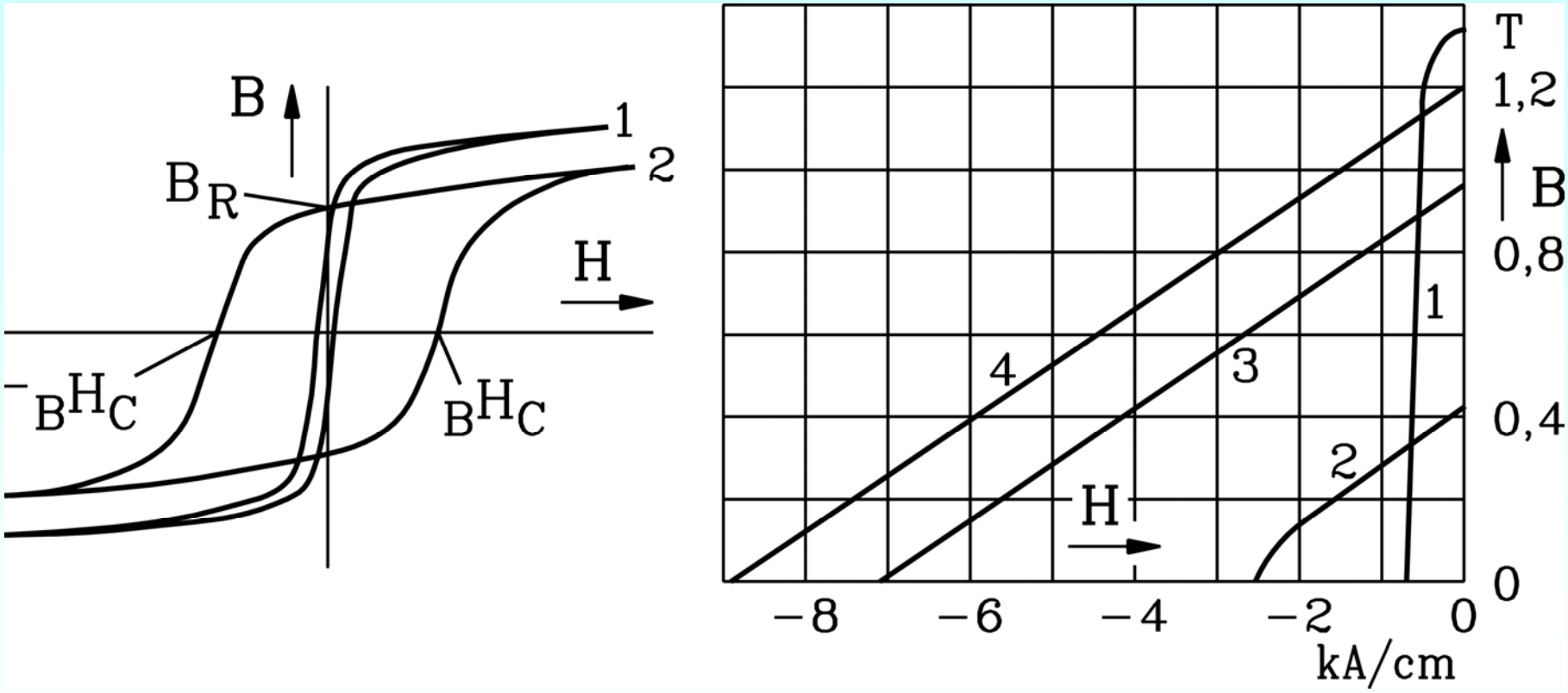
Hall-Konstante *h*

Hall-Spannung: $$\boxed{U_H = E_H \cdot l = h \cdot l \cdot J_e \cdot B = h \cdot B \cdot I}$$

- Proportional zum Messstrom *I* und zur Flussdichte *B*
- **Halbleiter** Germanium und Indiumarsenid haben hohe Hall-Konstante *h*
- Zusammenhang zwischen *B* und U_H linear; Messbereich zw. 10^{-5} T bis ca. 1 T.

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.3 Weich- und hartmagnetische Werkstoffe

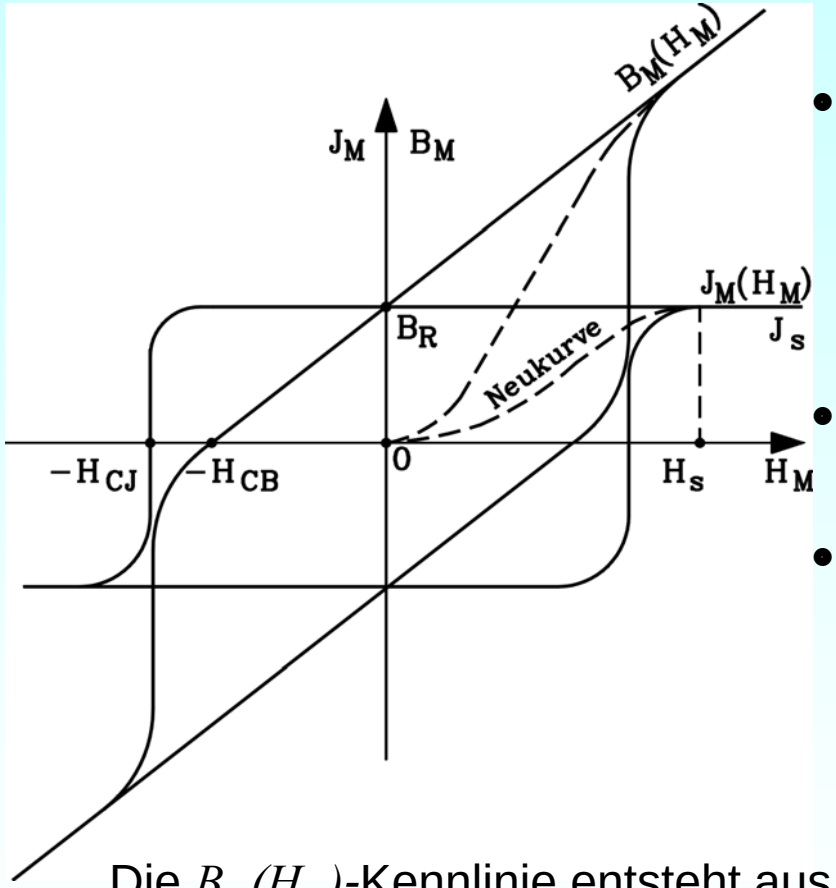


a) 1: Eisen
2: Permanentmagnet

b) Permanentmagnete: 1: Al-Ni-Co, 2: Ba-Ferrit
3: Sm-Co, 4: Nd-Fe-B

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

B(H)-Kennlinie der Permanentmagnete



- Das Eigenfeld der Permanentmagnete ist die **magnetische Polarisation J_M**, die sich dem äußeren Fremd-Feld H_M überlagert zur resultierenden Flussdichte B_M:

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{H}_M + \vec{J}_M$$

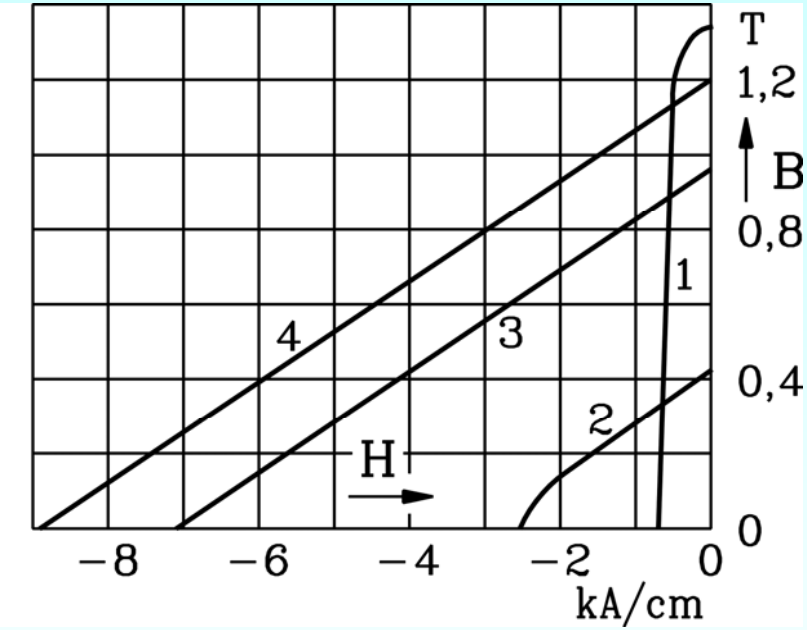
- Nach Abschalten des äußeren Felds verbleibt die **Remanenzflussdichte** $B_R = J_M(H_M = 0) = J_R$.
- Zwei **Koerzitivfeldstärken** H_C :
  a) Bei $-H_{CB}$ ist die resultierende äußere magnetische Flussdichte B_M Null.
  b) Bei $-H_{CJ}$ ist die magnetische Polarisation J_M im Magneten Null.

Die $B_M(H_M)$-Kennlinie entsteht aus $J_M(H_M)$-Kennlinie durch Addition von $B_M = \mu_0 H_M$ und ist daher im zweiten Quadranten **nahezu linear:**

$$B_M = B_R + \mu_M H_M, \quad \mu_M = ca.1.05\mu_0$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

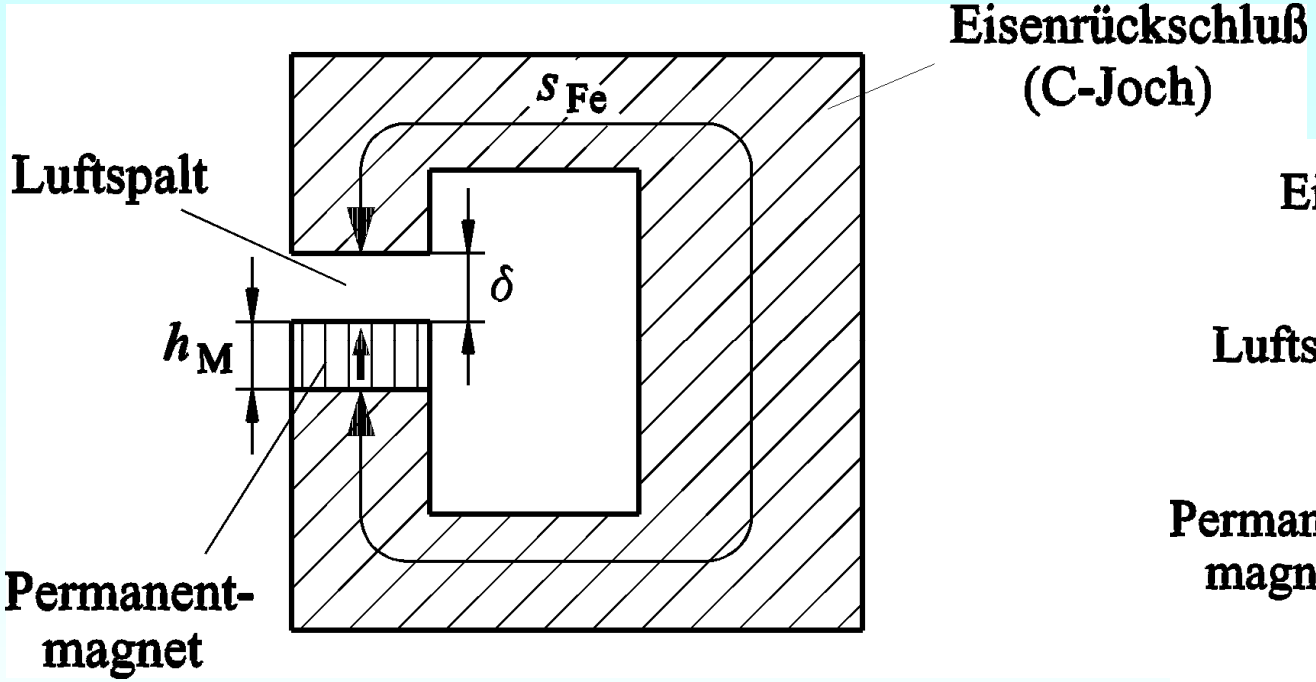
Permanentmagnetwerkstoffe

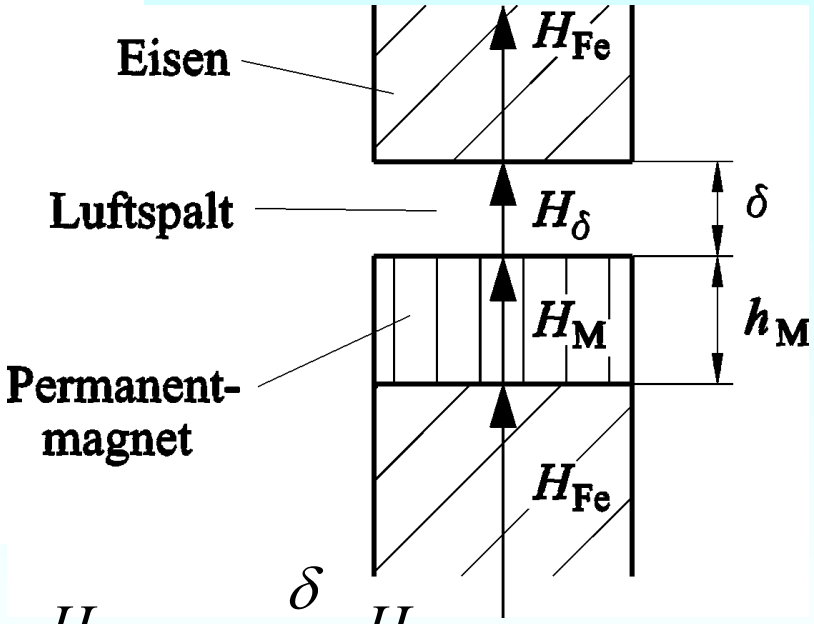


1. **Aluminium-Nickel-Kobalt-Magnete** (AlNiCo): hohes B_R, niedriges ${}_BH_C$
2. **Ferrite** (z.B. Barium-Ferrit): deutlich niedrigeres B_R, erhöhtes ${}_BH_C$
3. **Selten-Erd-Magnete** Samarium-Kobalt: hohes B_R und ${}_BH_c$, kleiner Temperatureinfluss
4. **Selten-Erd-Magnete** Neodym-Eisen-Bor: sehr hohes B_R und ${}_BH_C$, aber stärker sinkend mit steigender Temperatur

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Permanentmagnet im Eisenkreis mit Luftspalt



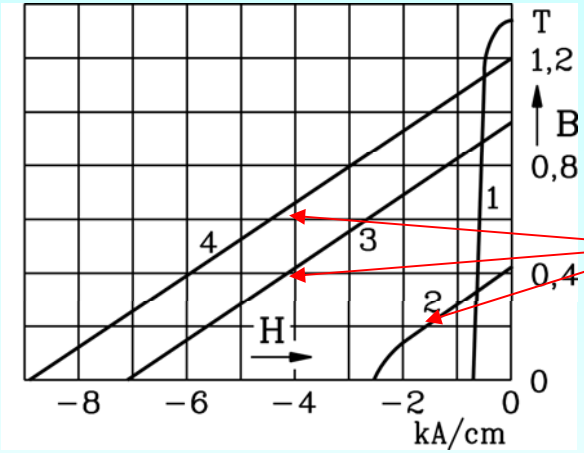


$$\oint_C \vec{H} \bullet d\vec{s} \approx H_{Fe} s_{Fe} + H_M h_M + H_\delta \delta = \Theta = 0 \Rightarrow \quad H_M = -\frac{\delta}{h_M} H_\delta$$

Der Magnet wird durch das Luftspaltfeld tw. **entmagnetisiert**: Das *H*-Feld im Magneten **ist negativ**: Kennlinie im **zweiten** *B*-*H*-Quadranten WICHTIG!

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Arbeitspunkt des Permanentmagneten



Magnetkennlinie im 2. *B*-*H*-Quadranten:
- Für Ferrite und Selten-Erd-Magnete LINEAR!

$$B_M = B_R + \frac{B_R}{H_C} \cdot H_M$$

$$B_\delta = B_M \quad \Rightarrow \quad B_\delta = \mu_0 H_\delta = -\mu_0 \frac{h_M}{\delta} H_M = B_R + \frac{B_R}{H_C} \cdot H_M$$

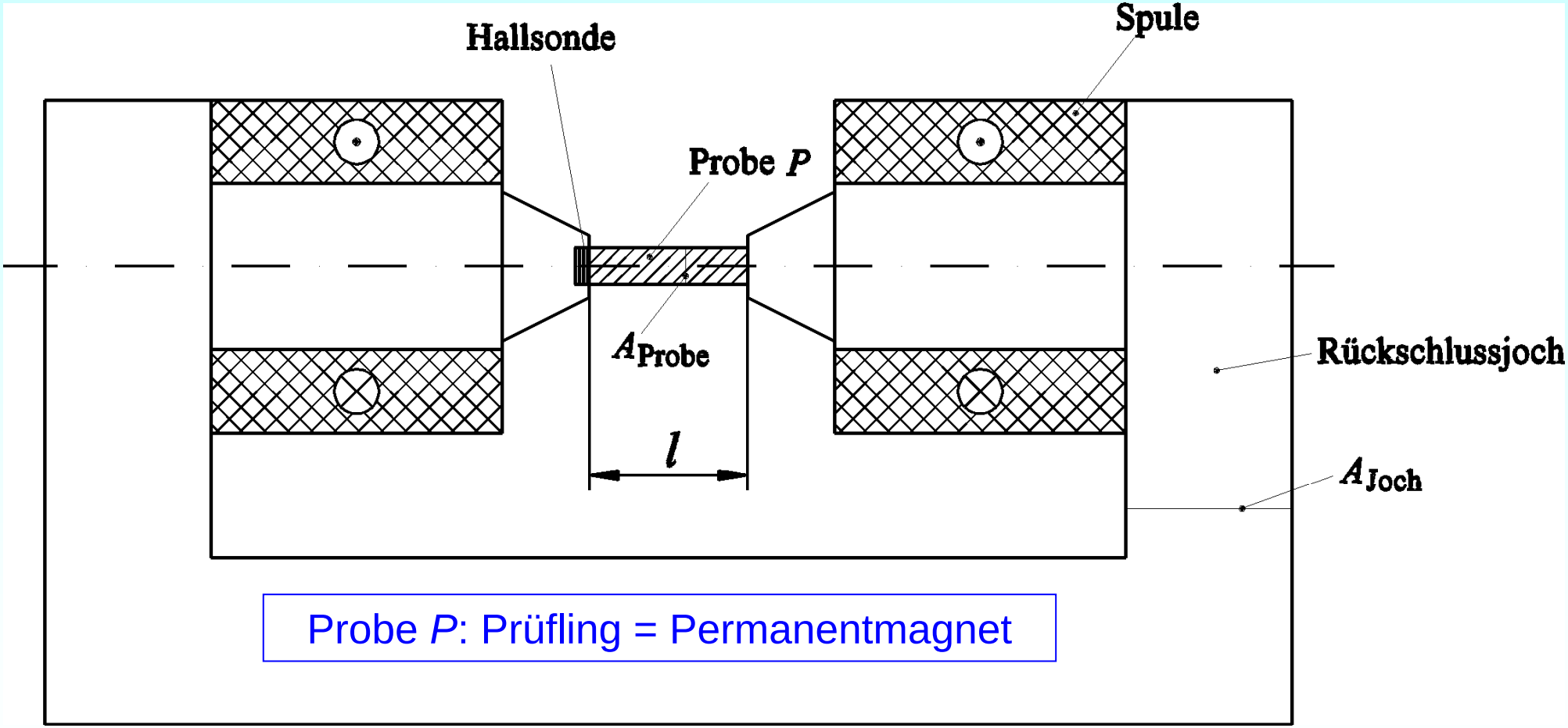
$$B_M = B_R - \frac{B_R}{1 + \mu_0 \cdot \frac{h_M}{\delta} \cdot \frac{H_C}{B_R}}$$

- Magnetische Flussdichte im Magneten und im Luftspalt kleiner als Remanenz-flussdichte: $B_M < B_R$.

- Um Magnetflussdichte zu messen, muss der Eisenkreis geschlossen, OHNE Luftspalt und hochpermeabel ($\mu_{Fe} >> \mu_0$) sein = **magnetisches Rückschlussjoch !**

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.4 Das magnetische Rückschlussjoch



Probe *P*: Prüfling = Permanentmagnet

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messung $B_M(H_M)$ im magnetischen Rückschlussjoch

- Erregerspulen (Windungszahl *N*) mit Gleichstrom I erregt: Probenlänge l

$$\oint_C \vec{H} \bullet d\vec{s} \approx H_{Fe} s_{Fe} + H_M h_M = H_M h_M = \Theta = N \cdot I$$

$$H_M = \frac{\Theta}{l} = \frac{N \cdot I}{l}$$

- Flussdichte B_M mit *Hall*-Sonde an der Probenoberfläche gemessen.

-Strom I : Schrittweise: Von 0 auf $+I_{max}$ erhöht, dann auf $-I_{max}$ gesenkt, und wieder auf $+I_{max}$ erhöht.

- Gesamte Hystereseschleife wird gemessen: $B_M(H_M)$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.5 Magnetische Wechselfeldmessungen

Magnetmaterial im zeitlich veränderlichen Magnetfeld (z. B. periodische Wechselmagnetisierung):

Ummagnetisierungsverluste

- Wirbelstromverluste (wenn elektrisch leitfähig): ~ f^2,

- Hysterese-Verluste: ~ f,

- Nachwirkungsverluste: ~ $f^{1.5}$ (i. a. klein, hier vernachlässigt).

a) Magnetische Werkstoffe i. a. elektrisch leitfähig (z. B. **Eisen:** 1/6 der Leitfähigkeit von Kupfer)

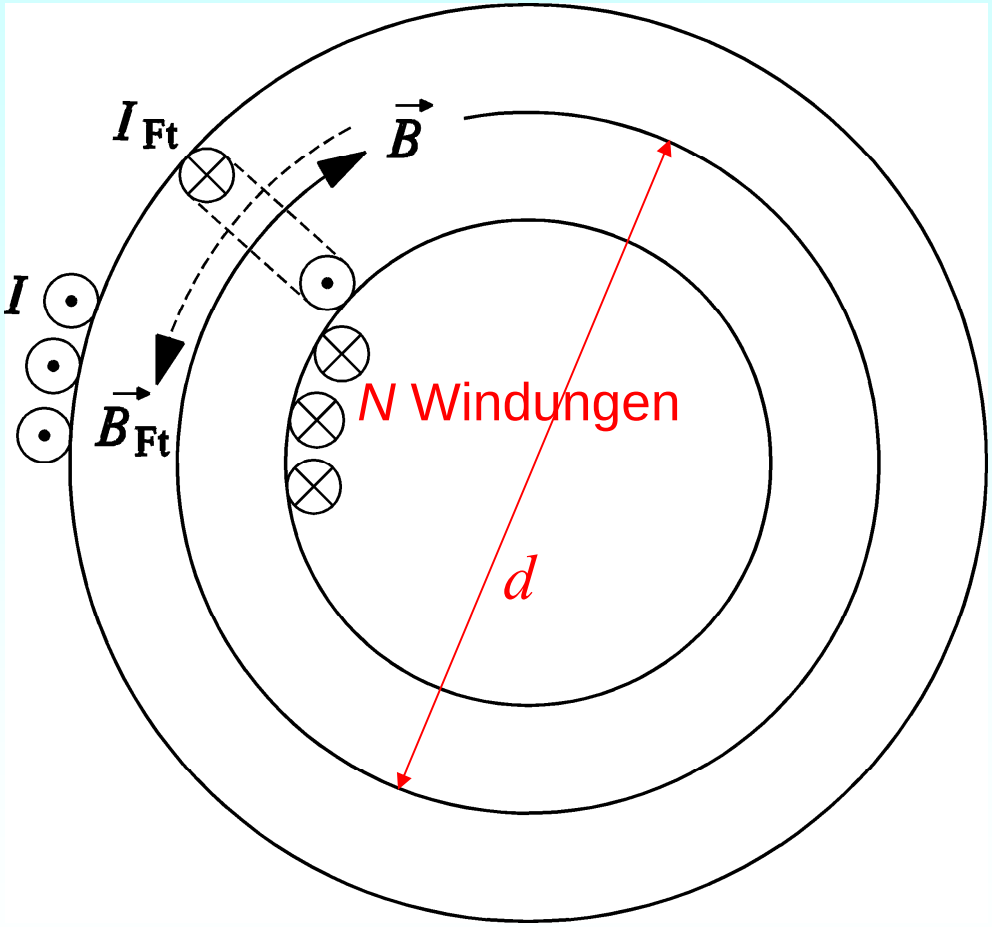
b) Ferrite haben hohen *Ohm´*schen Widerstand

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Wirbelstromverluste

Beispiel: Eisenringkern - Ringspule

- Wechselstrom I in der Spule
- I erregt Wechselflussdichte *B*
- *B* induziert im Eisen u_i (*Faraday´*sches Induktionsgesetz)
- u_i treibt im Eisen Kreisströme I_{Ft} (*Foucault´*sche **Wirbelströme**)
- I_{Ft} erregt Eigenfeld B_{Ft}, das entgegengesetzt zu *B* wirkt (*Lenz´*sche Regel) = schwächt *B*
- I_{Ft} verursacht **Wirbelstromverluste** im Eisen am Eisenwiderstand R_{Fe}.



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Wirbelstromverluste

Wechselflussdichte im Eisenkern:

$$B_{Fe}(t) = \mu_{Fe} \cdot H_{Fe}(t) = \mu_{Fe} \cdot (N \cdot I(t)) / s_{Fe} \qquad s_{Fe} = d \cdot \pi$$

Wechselfluss im Eisenkern: $\Phi(t) = B_{Fe}(t) \cdot A$

Induktionsgesetz, sinusförmiger Wechselfluss, Kreis-Frequenz $\omega = 2\pi f$:

$$\Phi(t) = \Phi \sin(\omega t) \quad \Rightarrow \quad u_i = -d\Phi / dt = -A \cdot dB / dt = -A \cdot \omega B \cdot \cos(\omega t) = R_{Fe} \cdot i_{Ft}(t)$$

Wirbelstromverluste P_{Ft} bei vernachlässigter Rückwirkung von B_{Ft} auf B:

$$P_{Ft} = \frac{R_{Fe} \hat{I}_{Ft}^2}{2} = \frac{\hat{U}^2}{2R_{Fe}} = \frac{(A \cdot \omega B)^2}{2R_{Fe}}$$

$$\boxed{P_{Ft} \sim B^2 f^2}$$

Die Wirbelstromverluste sind proportional zum Quadrat der Frequenz f^2 und der Flussdichte B^2.

Abhilfe: a) **Lamellierter Eisenkörper**: aus isolierten Blechen geschichtet (f = 50 Hz: Dicke d = 0.35 mm ... 0.5 mm), b) Siliziumzugabe im Eisen erhöht *Ohm´*schen Widerstand R_{Fe}

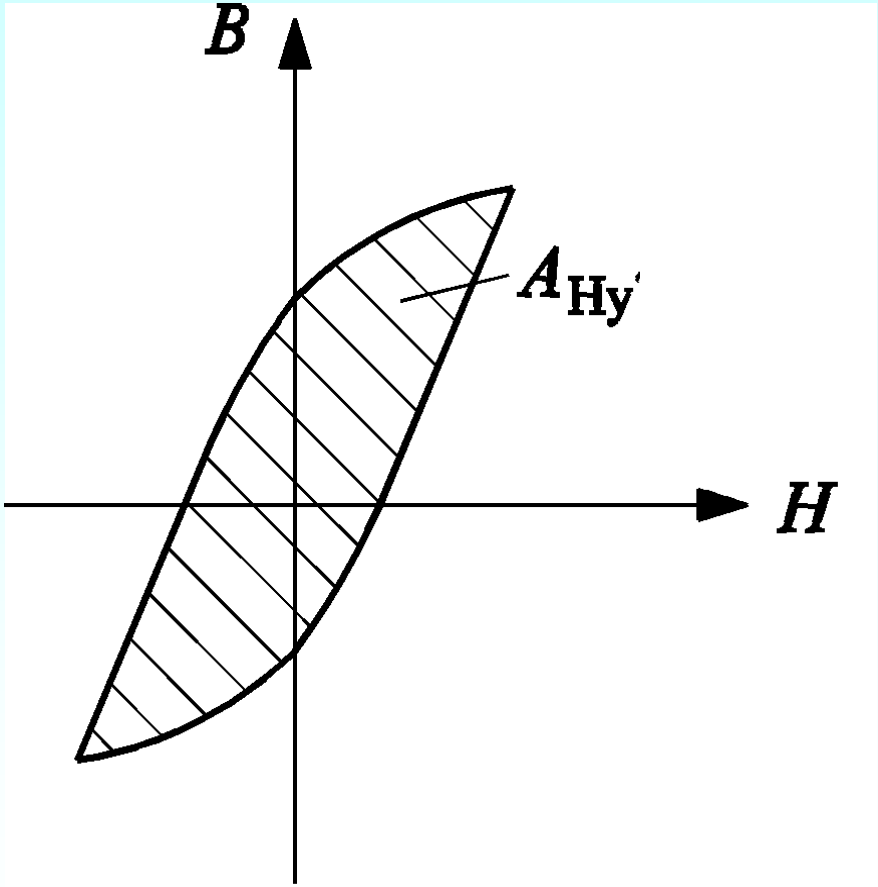
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Hysterese-Verluste

Hysterese-Verluste sind proportional
- zur Frequenz *f* des Wechselfelds,
- zum Volumen *V* des Körpers und
- zur Schleifenfläche A_{Hy} des Werkstoffs.

Die Schleifenfläche ist bei "mittleren" Flussdichteamplituden *B*
- zum Quadrat der Flussdichteamplitude B^2 proportional.

$$P_{Hy} = A_{Hy} \cdot V \cdot f \sim B^2 \cdot f \cdot V$$



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Ummagnetisierungsverluste

Ummagnetisierungsverluste ("Eisenverluste"):

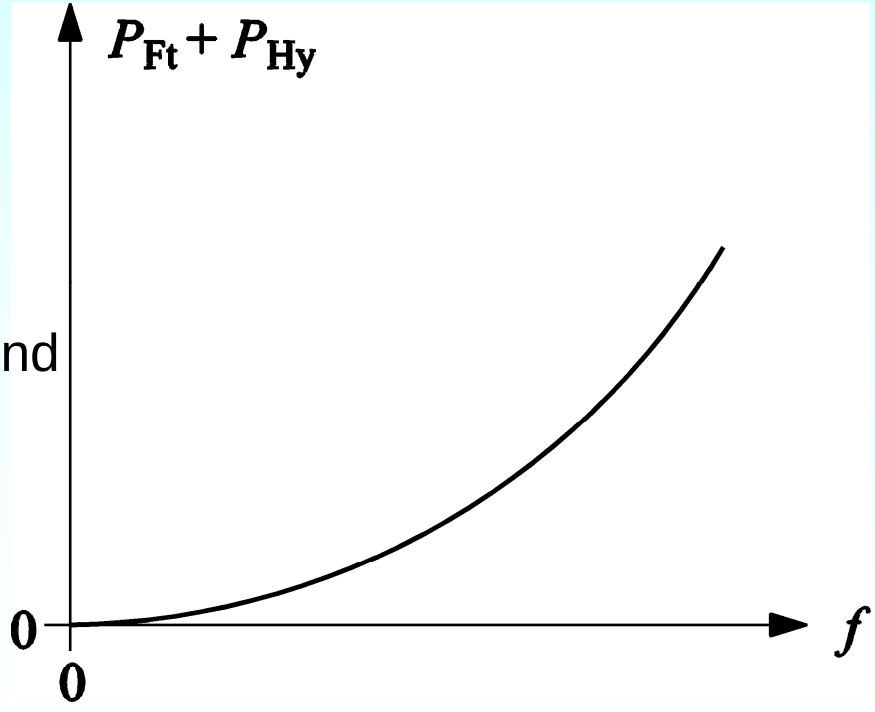
- Summe aus Wirbelstrom-, Hysterese- und Nachwirkungsverluste

$$P_{Fe} = P_{Ft} + P_{Hy} = \left[p_{Ft} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + p_{Hy} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right) \right] \cdot \left(\frac{B}{B_N} \right)^2 \cdot m_{\mathrm{Fe}}$$

$$P_{Fe}(B_N = 1T, f_N = 50Hz) = v_{10} \cdot m_{\mathrm{Fe}}$$

Verlustziffer $v_{10} = p_{Ft} + p_{Hy}$:

- Verluste je Masseneinheit (je kg) bei B_N = 1 T und f_N = 50 Hz)
- Im ***Epstein*-Rahmen** gemessenen
- ***Beispiel:*** v_{10} = 2.3 W/kg: 2.3 W Verluste je m_{Fe} = 1 kg Eisen bei 1 T, 50 Hz.



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.6 Dynamische Hystereseschleifen

-Statische Hystereseschleife:

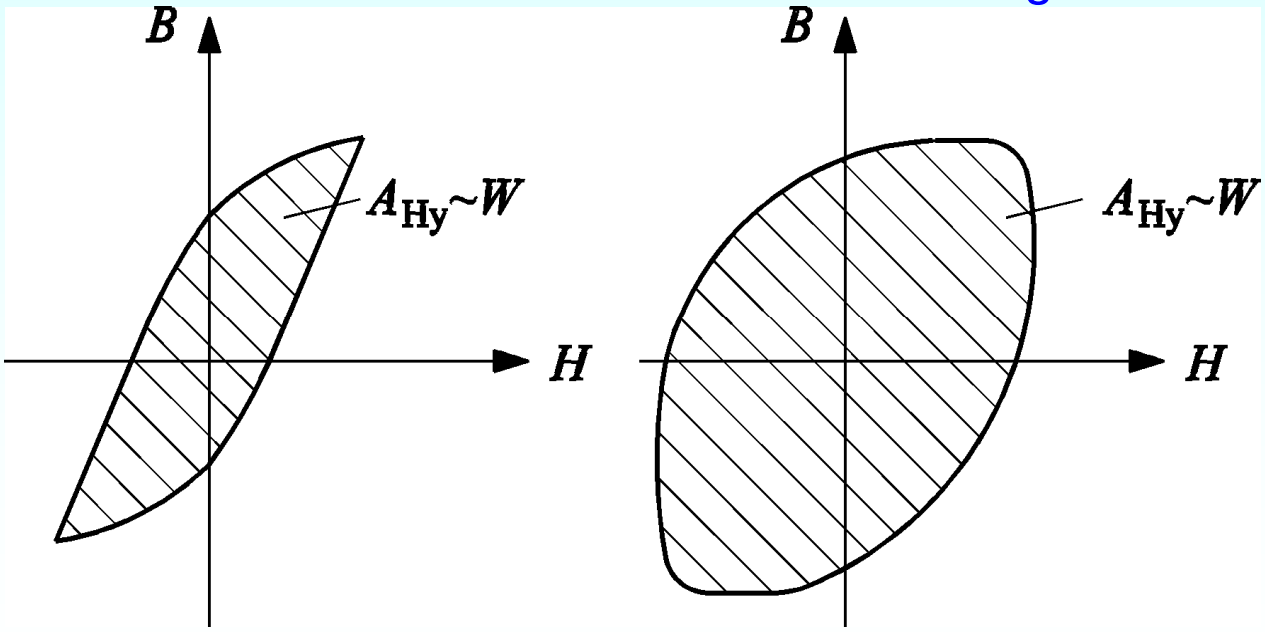
Gleichfeldmessung: Nur Hystereseverluste: $A_{Hy} \sim P_{Hy}$

- Dynamische Hystereseschleife:

Wechselfeldmessung: Wirbelstrom- und Hystereseverluste: $A_{Hy} \sim P_{Ft} + P_{Hy}$

- Dynamische Schleifenfläche ist durch Wirbelstromverluste größer als statische Schleifenfläche

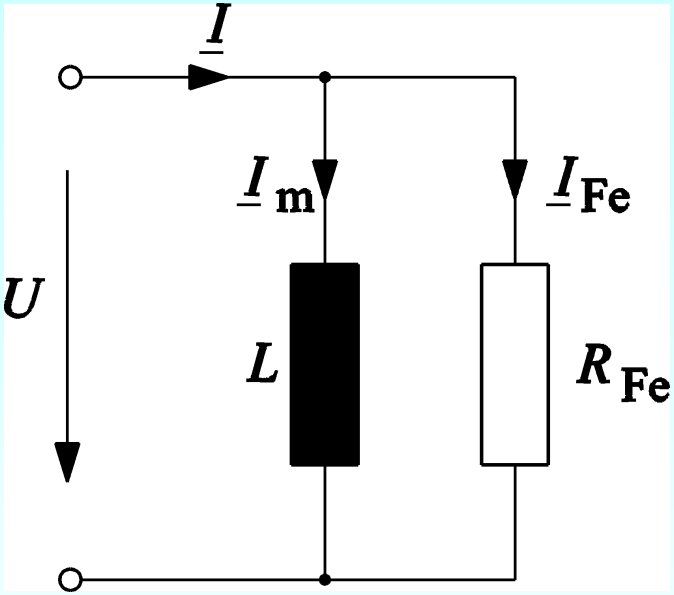
Statische Schleife



Dynamische Schleife

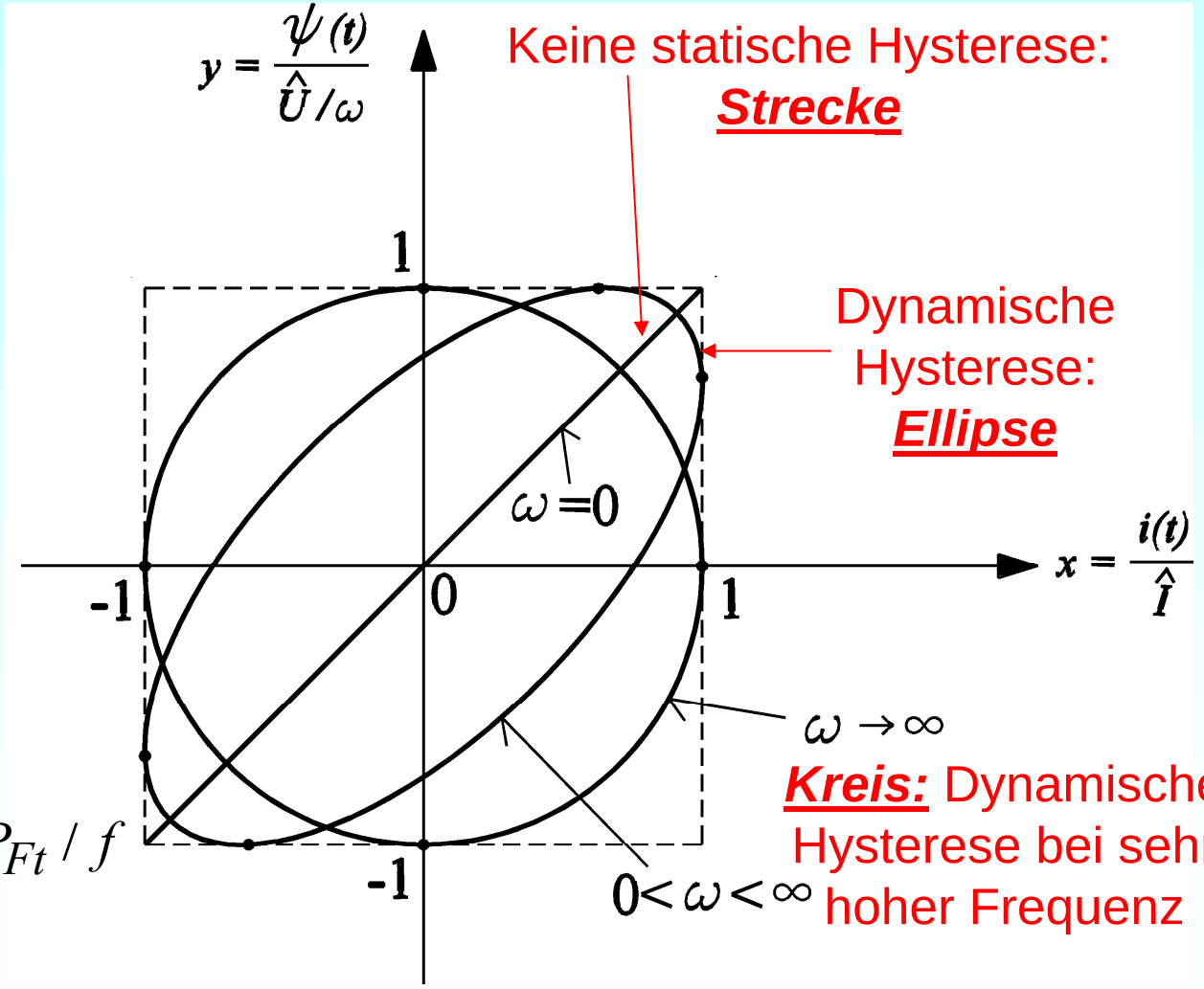
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Schleifenfläche zufolge Wirbelströme



Von den Wirbelströmen **geleistete Arbeit je Zyklus**:

$$W_{Ft} = A_{Ellipse} \cdot \frac{\hat{U}}{\omega} \cdot \hat{I} = \frac{\pi \hat{U}^2}{\omega R_{Fe}} = P_{Ft} / f$$



Keine statische Hysterese: ***Strecke***

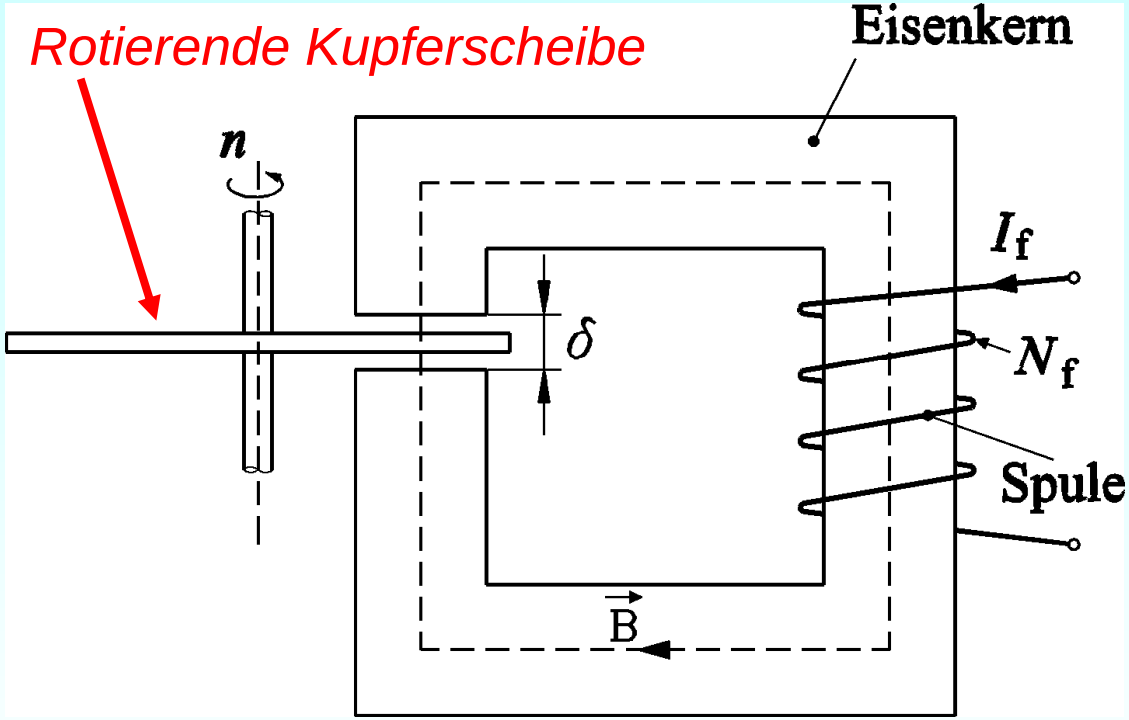
Dynamische Hysterese: ***Ellipse***

Kreis: Dynamische Hysterese bei sehr hoher Frequenz

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.7 Die Wirbelstrombremse

- **Leitfähige Scheibe** rotiert in einem magnetischen Gleichfeld
- Spannung in die Scheibe induziert, die **Wirbelströme** treibt.
- Wirbelströme bilden mit Magnetfeld eine bremsende ***Lorentz***-Kraft.
- Die Scheibe wird gebremst = **Wirbelstrombremse**
- ***Anwendung:*** **ICE3:** Gleichstrommagnete über den Eisenschienen bewegt, induzieren Wirbelströme in den Schienen = Bremse



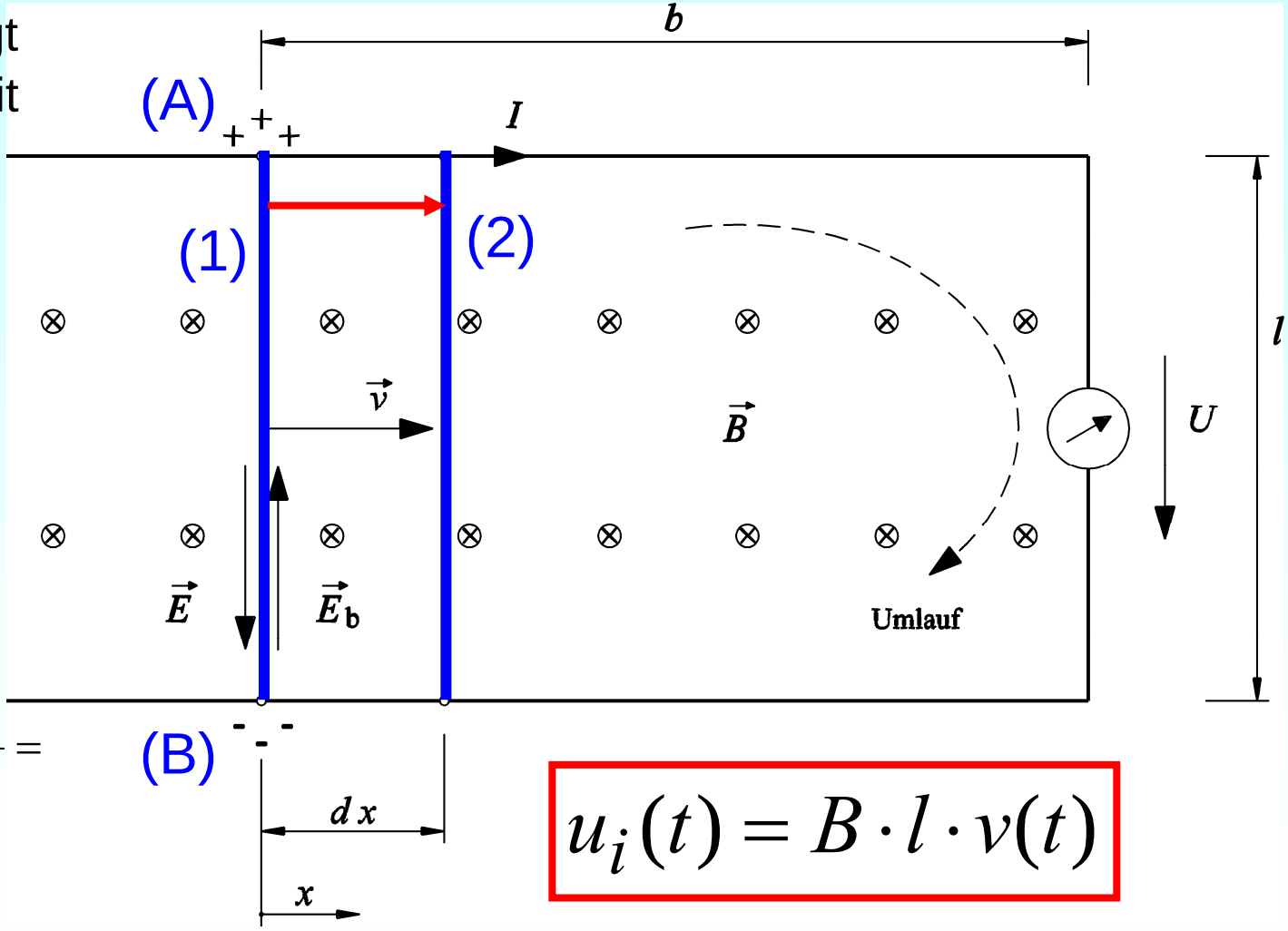
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.7.1 Bewegungsinduktion in einem bewegten geraden Leiter

- Leiter (Länge l) bewegt sich im Gleichfeld B mit Geschwindigkeit v von (1) nach (2)
- Leiter an Voltmeter angeschlossen
- Leiterschleife A wird kleiner = Fluss durch Schleife wird kleiner
- Induktionsgesetz:

$$u_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot A(t))}{dt} =$$

$$= B \cdot l \frac{dx}{dt} = B \cdot l \cdot v(t)$$



$$u_i(t) = B \cdot l \cdot v(t)$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Bewegungsinduktion – Herleitung über *Lorentz*-Kraft

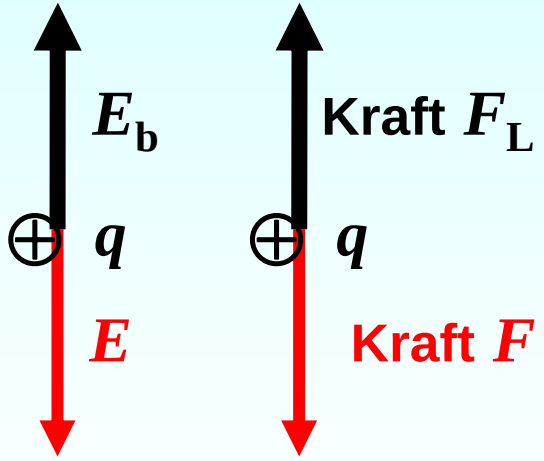
- Kraft auf Ladungsträger im bewegten Leiter: $\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$

- Positive Ladungsträger nach oben verschoben: Draht lädt sich oben auf. Ladung erzeugt ele. Feldstärke *E*, die Kraft auf *q* nach unten bewirkt: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

- Endzustand: Bei Kräftegleichgewicht verschieben sich keine Ladungen mehr:

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = -\vec{F} = -q \cdot \vec{E}$$

- Induzierte elektrische Feldstärke: $\vec{E}_b = \vec{v} \times \vec{B}$



- $E_b = -E$: Als induzierte Spannung messbar:

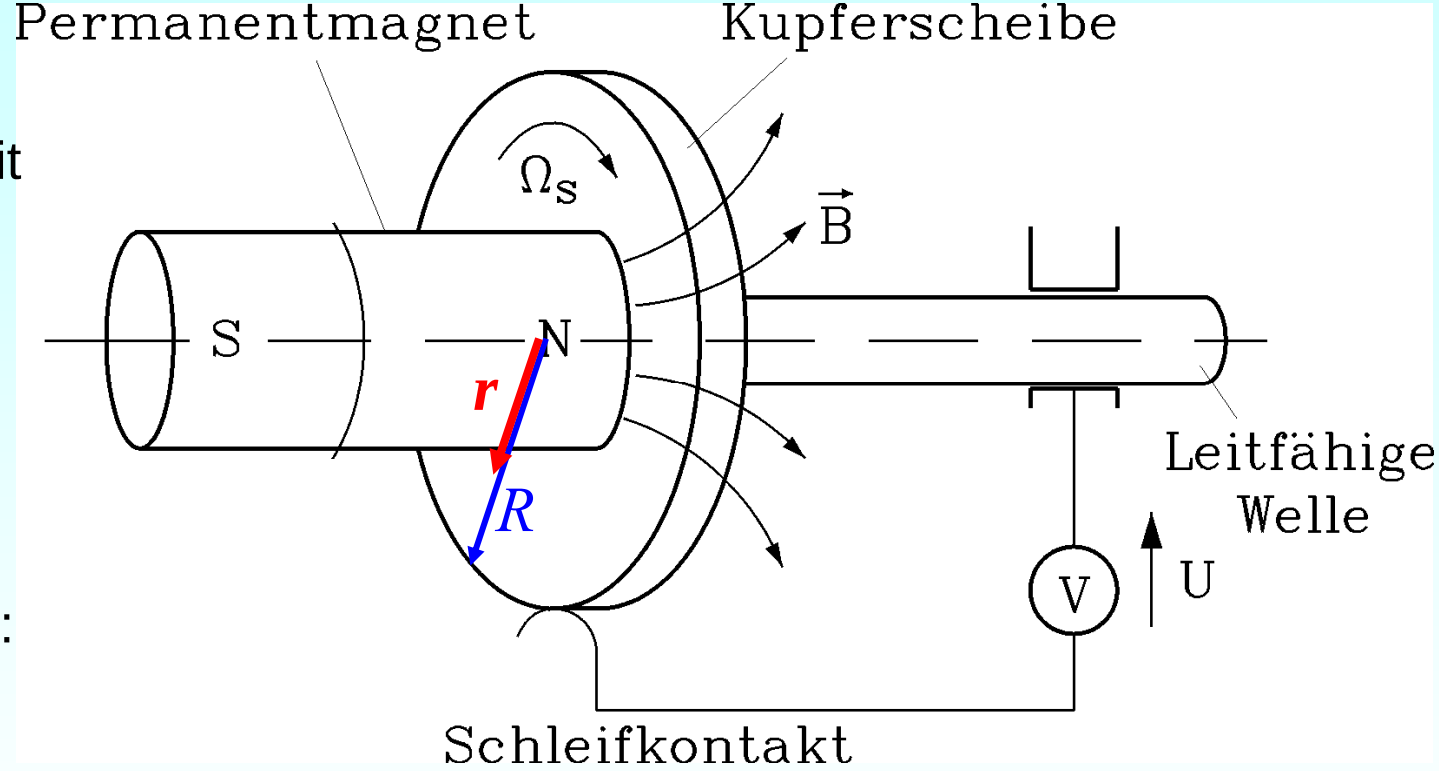
$$u_i = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\int_A^B \vec{E}_b \cdot d\vec{s} = \int_B^A (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}$$

- B im rechten Winkel zu v und l: $u_i = \int_0^l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} = v \cdot B \cdot l$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.7.2 Rotierende Leiter-Scheibe im Magnetfeld

Faraday-Scheibe:



Umfangsgeschwindigkeit

$$v(r) = 2\pi r \cdot n$$

Bewegungsinduktion:

$$\vec{E}_b(r) = \vec{v}(r) \times \vec{B}(r) =$$
$$= v(r) \cdot B(r) \cdot \vec{e}_r$$

Bei $B(r) = B$ = konstant:

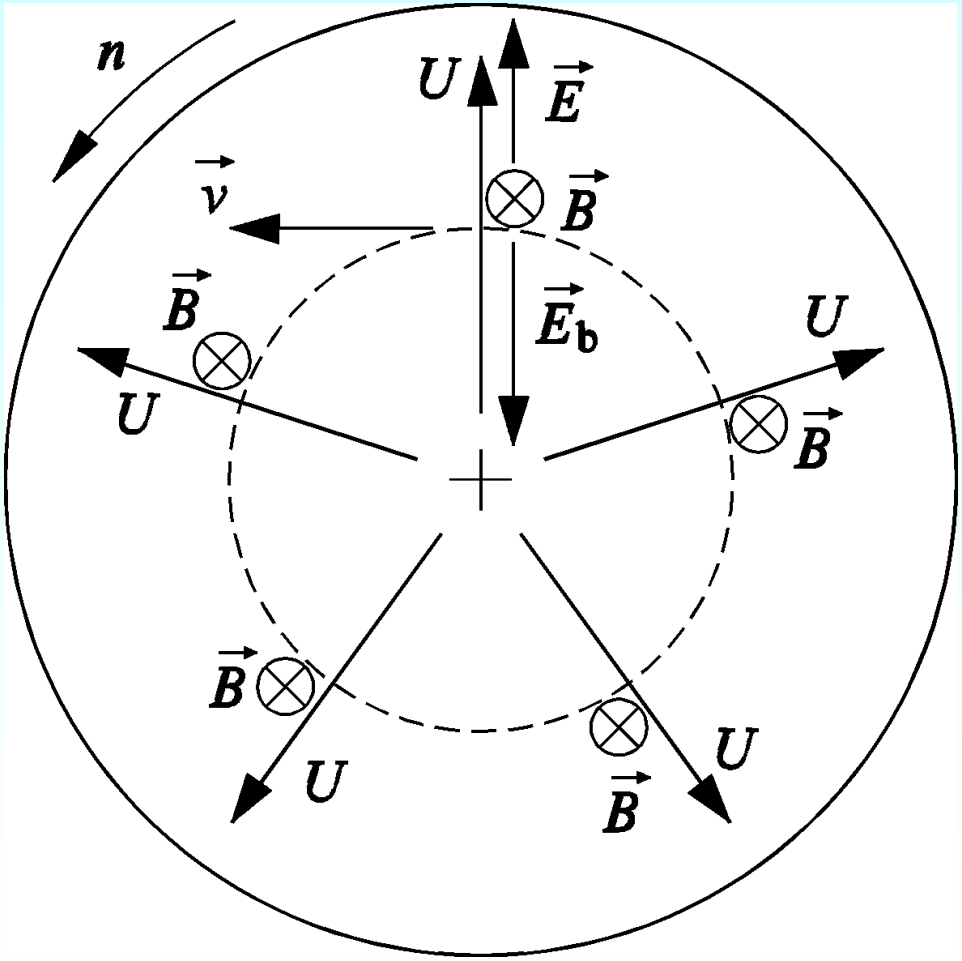
Induzierte Spannung:

$$U_i = \int_0^R \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_0^R E(r)dr = \int_0^R v(r)Bdr = \int_0^R 2\pi nrB \cdot dr = \pi nR^2 B$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

*Faraday´*sche Scheibe: Draufsicht

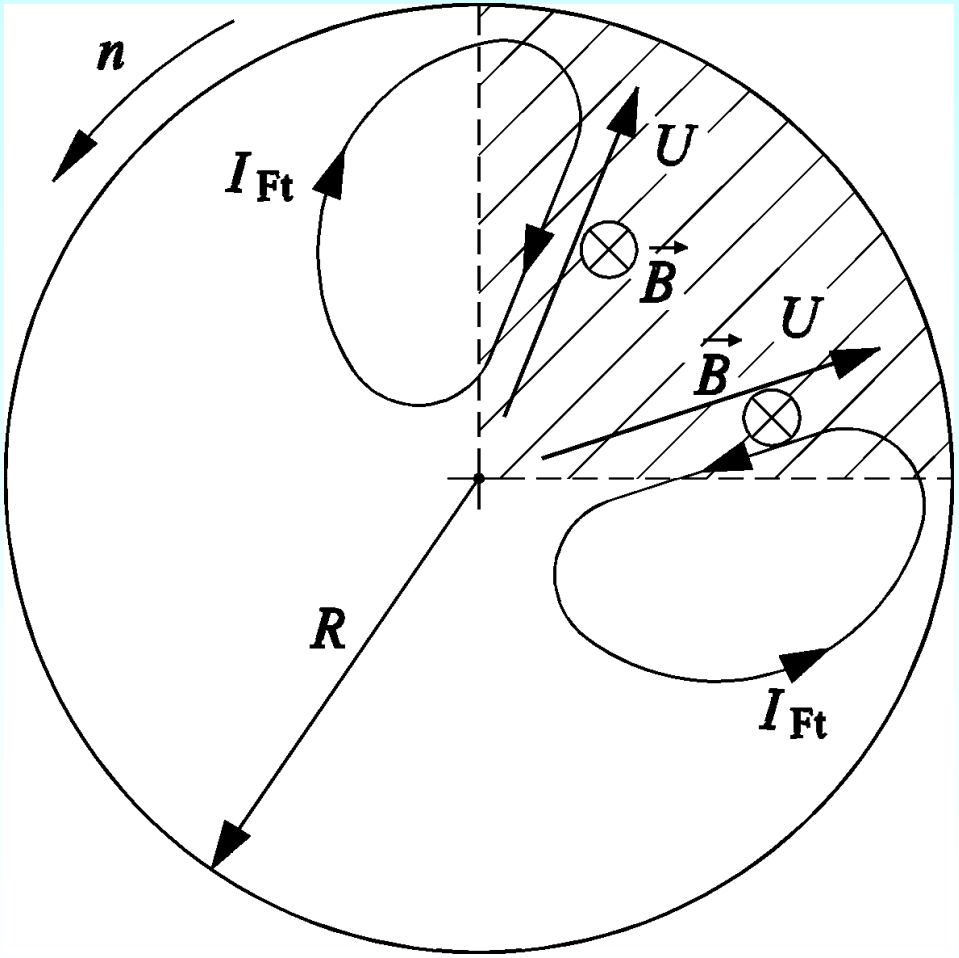
- Induzierte Feldstärke in der Scheibe radial
- Induzierte Spannung zwischen Scheibenmittelpunkt und Scheibenrand messbar.
- Ohne äußeren Anschluss mit Lastwiderstand kann kein Strom fließen.



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

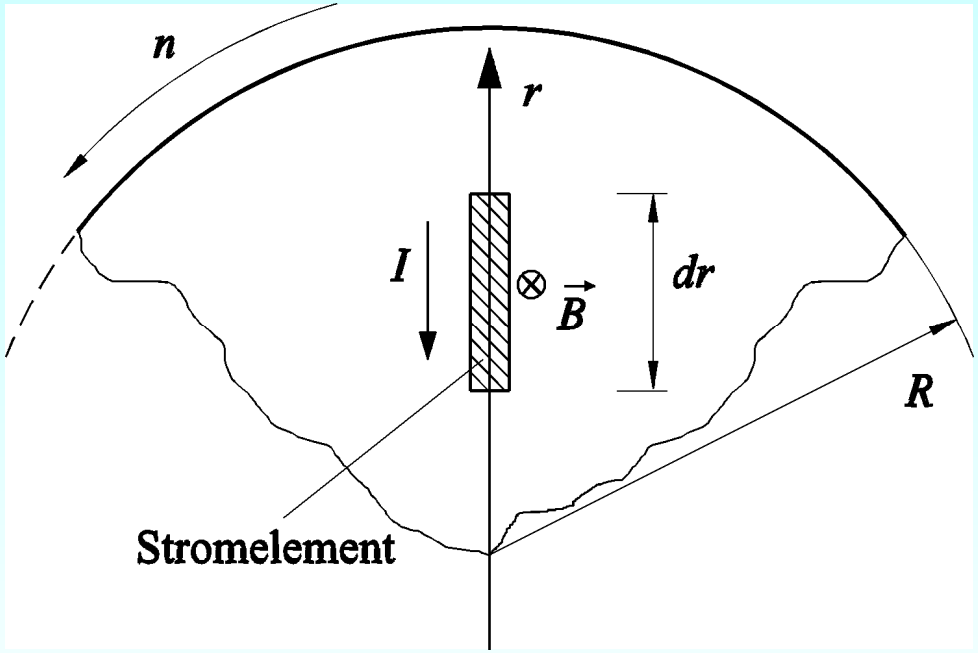
Scheibe als Wirbelstrombremse

- Flussdichte *B* wirkt nur im schraffierten Sektor der Scheibe.
- Induzierte Spannung zwischen Scheibenmittelpunkt und Scheibenrand kann Strom I_{Ft} als Wirbelstrom treiben.
- Auch ohne äußeren Anschluss kann ein (Wirbel-)Strom fließen.
- Dieser Wirbelstrom bildet mit *B* eine bremsende *Lorentz*-Kraft.

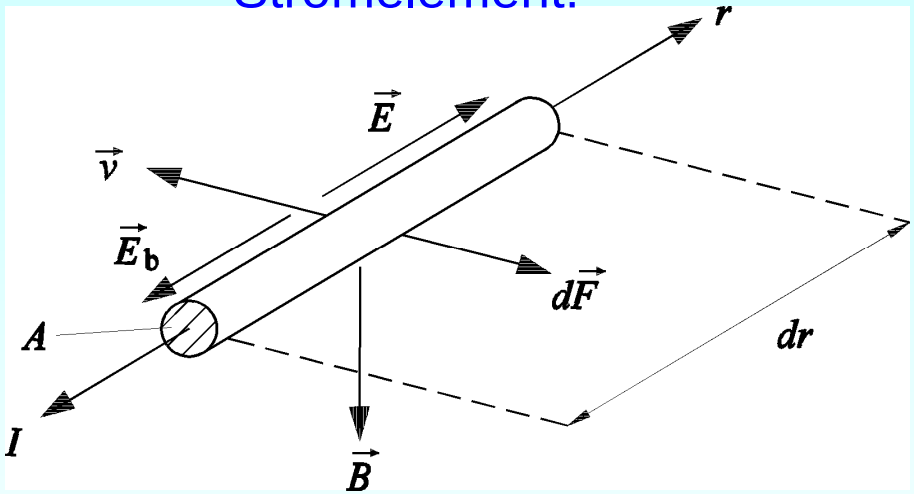


Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Bremskraft in der Scheibe



Stromelement:



Bremskraft auf Stromelement: $d\vec{F} = I_{Ft} \cdot d\vec{r} \times \vec{B}$

Kraft ist tangential, und entgegen der Umfangsgeschwindigkeit *v*. BREMSE !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Abhängigkeit des Wirbelstroms von der Drehzahl

- Mit steigender Drehzahl *n* steigt induzierte Spannung u_i.
- Der Wirbelstrom ist bezüglich jeder materiellen Schleife (Schleifeninduktivität *L*) in der Scheibe ein Wechselstrom mit der Frequenz $f = n$.
- Das Eigenfeld des Wirbelstroms induziert in die Schleife eine Selbstinduktionsspannung: $\underline{U}_L = j \cdot 2\pi f \cdot L \cdot \underline{I}_{Ft}$
- Schleifen-Gesamtspannung: Summe von
  Induktionsspannung u_i durch *B*,
  Spannungsfall von I_{Ft} **am Scheiben-Widerstand** *R* und
  Selbstinduktionsspannung U_L .

$$\underline{I}_{Ft} \cdot R + \underline{U}_L + \underline{U}_i = 0 \quad \Rightarrow \quad (R + j2\pi f \cdot L) \cdot \underline{I}_{Ft} = \underline{U}_i \sim f \cdot B$$

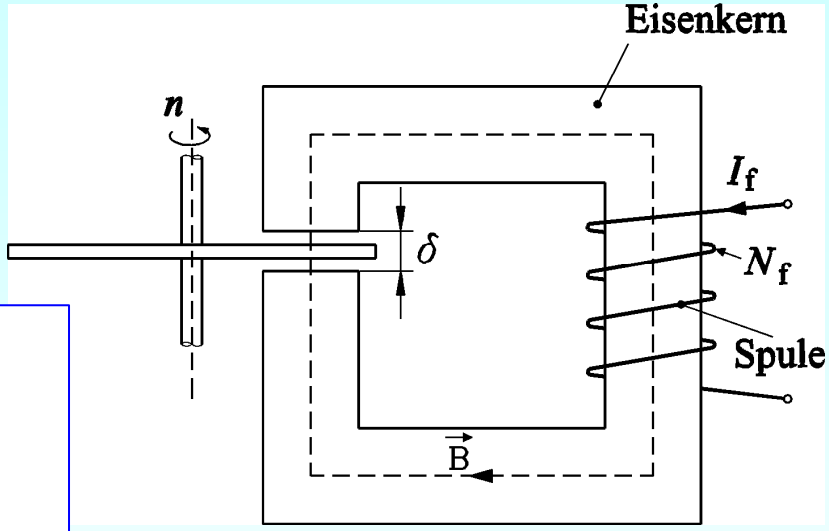
$$I_{Ft} \sim \frac{f \cdot B}{\sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}}$$

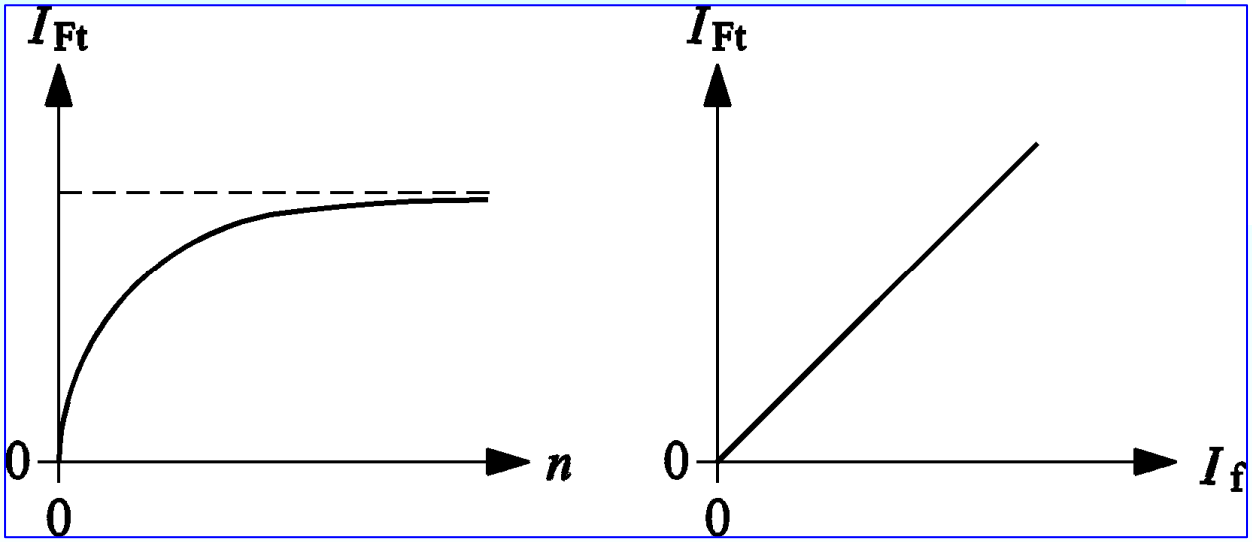
$$I_{Ft}(f \to \infty) \sim \frac{B}{2\pi L}$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Abhängigkeit des Wirbelstroms von Drehzahl und Erregerstrom

$$I_{Ft} \sim \frac{f \cdot B}{\sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}} \sim \frac{f \cdot I_f}{\sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}}$$

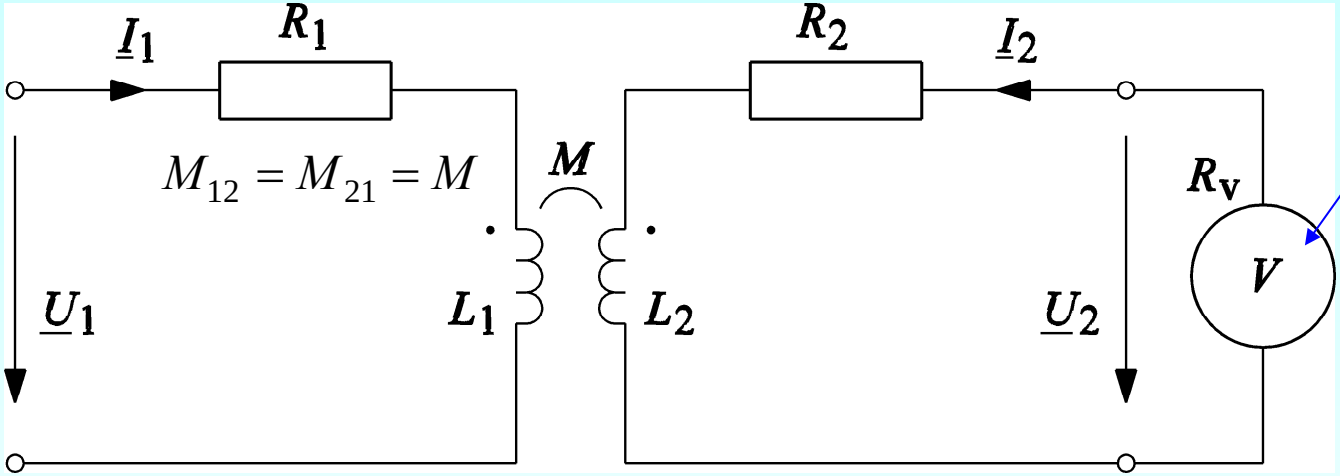




Abhängigkeit des Wirbelstroms I_{Ft} von der Drehzahl n und vom Erregerstrom I_f

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.8 Magnetisch gekoppelte Kreise



Voltmeter

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \cdot R_V$$

Selbstinduktivitäten L_1 und L_2 :

$$u_{i1}(t) = -L_1 \frac{di_1}{dt} \qquad u_{i2}(t) = -L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Gegeninduktivität *M* zwischen 1 und 2:

$$u_{i12}(t) = -M_{12} \frac{di_2}{dt} \qquad u_{i21}(t) = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

Maschengleichungen 1 & 2, komplexe Schreibweise:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1) \cdot \underline{I}_1 + j\omega M \cdot \underline{I}_2 \qquad \underline{U}_2 = j\omega M \cdot \underline{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2) \cdot \underline{I}_2$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Sekundäre Spannung

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1)\cdot \underline{I}_1 + j\omega M \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= j\omega M \cdot \underline{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\cdot \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \cdot R_V \end{aligned}\right\}$$

$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{U}_2$ unbekannt, $\underline{U}_1$ gegeben

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{j\omega M \cdot R_V}{(R_2 + R_V + j\omega L_2)\cdot(R_1 + j\omega L_1) + \omega^2 M^2}$$

Voltmeter sind hochohmig: $R_V >> R_1, R_2$ $\qquad R_V >> \omega M, \omega L_1, \omega L_2$

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{j\omega M}{R_1 + j\omega L_1}$$

Bei genügend hohen Frequenzen und geringem *Ohm´*schen Widerstand gilt auch: $\omega L_1 >> R_1$

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{M}{L_1}$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messung der Gegeninduktivität *M*

-Bekannte Eingangsspannung $\underline{U}_1$

- zuvor gemessene Induktivität L_1 der Primärspule

- Gegeninduktivität *M*:

$$M = L_1 \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \cong L_1 \frac{U_2}{U_1}$$

(u_1 und u_2 müssen etwa gleichen Phasenwinkel haben!)

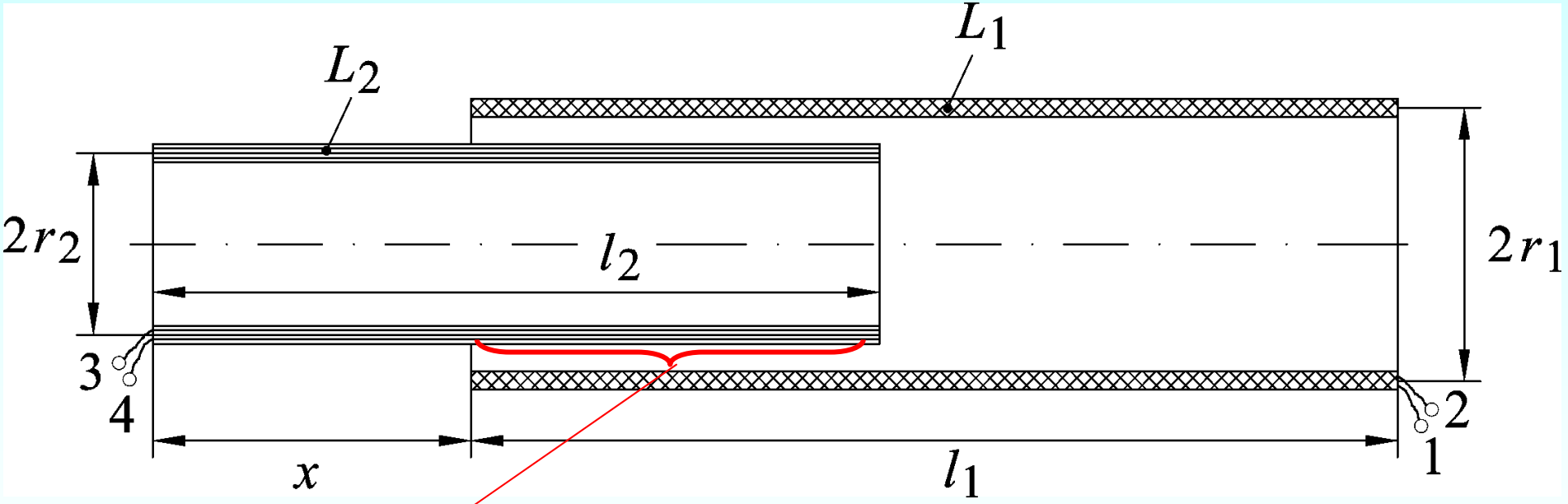
Bei größerem Phasenunterschied $\Delta\varphi$: $$M = L_1 \cdot \frac{|\underline{U}_2|}{|\underline{U}_1|} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{R_1}{\omega L_1}\right)^2}$$

(Messung wird frequenzabhängig!)

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Variable Gegeninduktivität (1)

Zwei zueinander verschiebbare Luft-Spulen: variable Gegeninduktivität *M(x)*



Wirksame sekundäre Windungszahl:

$$N' = N_2 \cdot \frac{l_2 - x}{l_2} = N_2 \cdot (1 - \xi) \quad 0 \le \xi \le 1 \quad \xi = x / l_2$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Variable Gegeninduktivität (2)

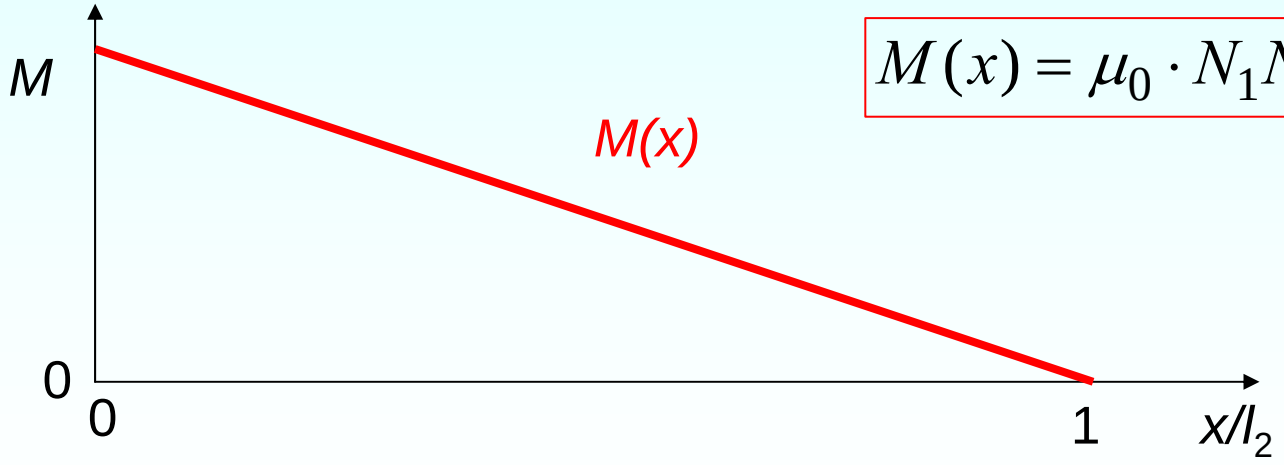
Magnetische Flussdichte B_1 (Strom I_1 von Spule 1): $B_1 = \mu_0 \cdot N_1 \cdot I_1 / l_1$

Fluss Φ_{21} durch die Windungsfläche A_2 der Spule 2: $\Phi_{21} = \mu_0 \cdot N_1 \cdot A_2 \cdot I_1 / l_1$

Gegeninduktivität $M = \Psi_{21} / I_1$: $M = \Psi_{21} / I_1 = N_2 \Phi_{21} / I_1$

Wirksame sekundäre Windungszahl: $N' = N_2 \cdot (1 - \xi)$

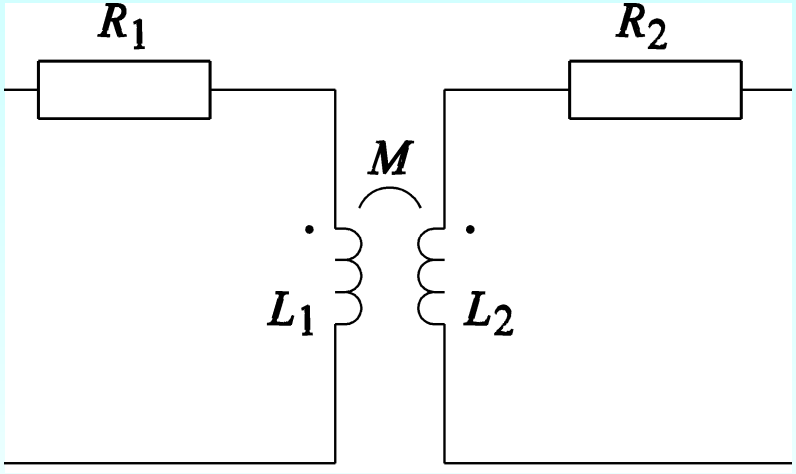
Variable Gegeninduktivität $M(x)$:

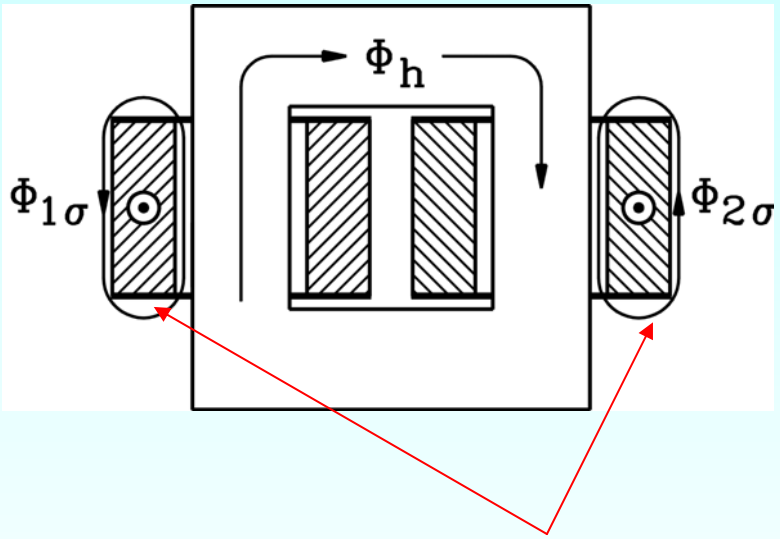


$$M(x) = \mu_0 \cdot N_1 N_2 \cdot A_2 \cdot (1 - (x / l_2)) / l_1$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Kopplungsgrad





Kopplungsgrad: $k = \dfrac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

$\sigma = 1$: $M = 0$, nur Streufluss

$\sigma = 0$: *kein* Streufluss

Streuziffer: $\sigma = 1 - k^2 = 1 - \dfrac{M^2}{L_1 L_2}$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Versuchsdurchführung

Versuch 4
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. Yoseph Gessese
Raum S3|10/036
Tel. : 06151 / 16-3579
E-Mail : ygessese@ew.tu-darmstadt.de

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Übersicht über die Aufgaben

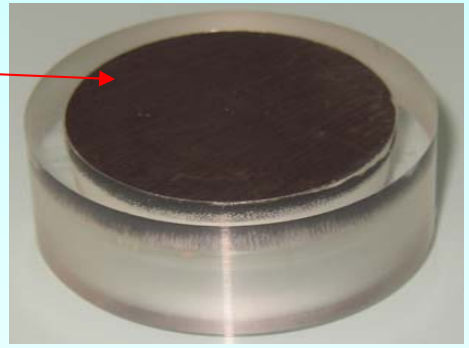
- **4.9 Permanentmagnete im Rückschlussjoch**
- **4.10 FARADAY´sche Scheibe als Wirbelstrombremse**
- **4.11 Hysteresis-Kennlinien und Ummagnetisierungs-verluste in einem Schnittbandkern**
- **4.12 Variable Gegeninduktivität, Kopplung, Streuziffer, Ruhinduktion**
- **4.13 Vergleich der ermittelten Streuziffern**

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.9 Permanentmagnete im Rückschlussjoch

Messung der *B*(*H*)-Kennlinie in allen vier Quadranten eines Ferritmagnets

a) Barium-Ferrit, b) Strontium-Ferrit



Aussendurchmesser d_a: a) 30 mm, b) 40 mm

Dicke d: a) 9 mm, b) 7 mm

Magnetisches Rückschlussjoch:

- Zwei Erregerspulen, Windungszahl je Spule N_c: 842
- Widerstand je Spule R: 2,66 Ω
- Strom dauernd/kurzzeitig: I / I_{max}: 4 A / 5 A
- Gleichstromquelle PS-405-D

Messung:

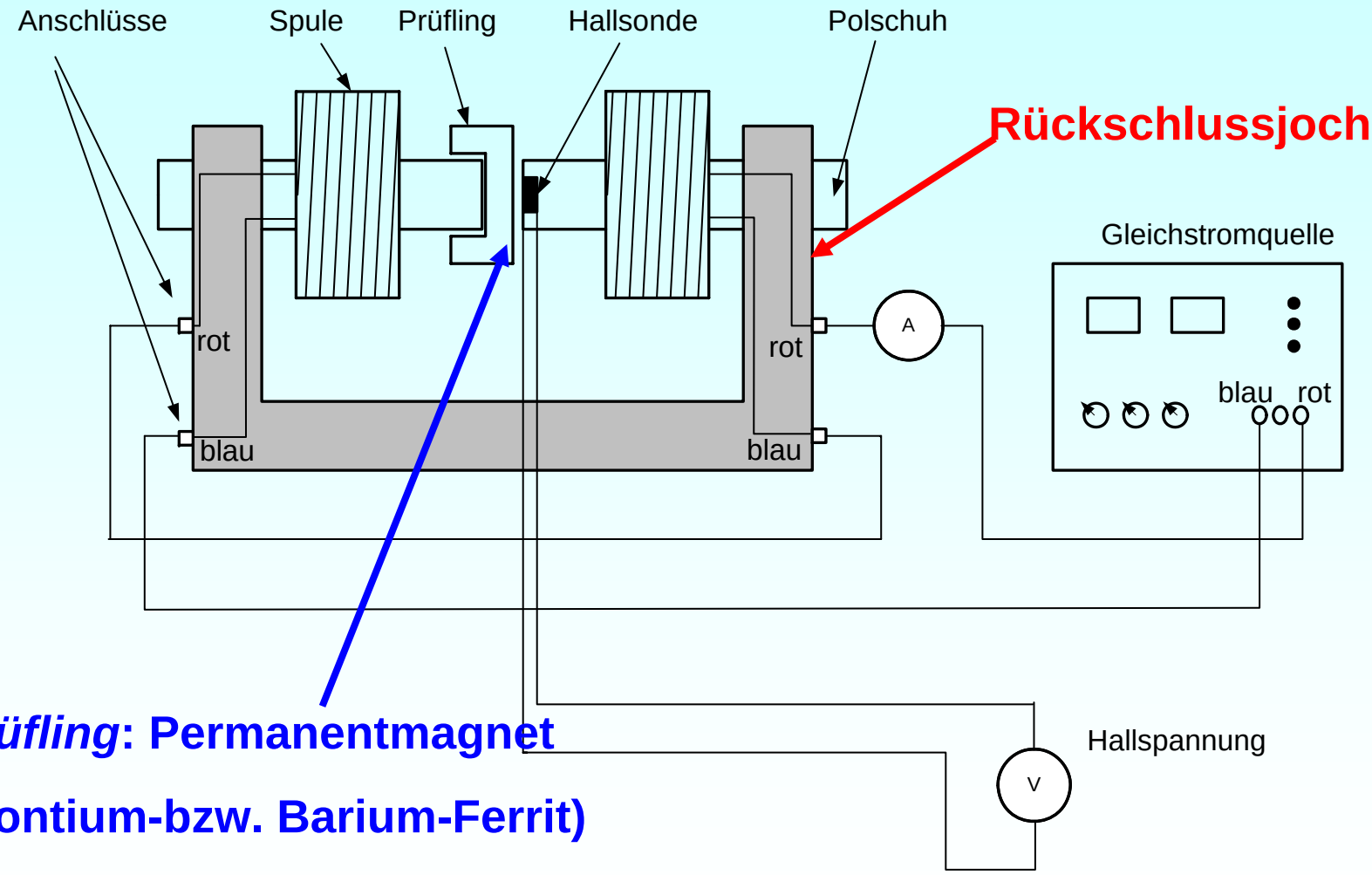
Strom von 0 … 4 A … -4 A … 4 A in Schritten von 0.25 A variiert.

$$H = \frac{2 \cdot N_c \cdot I}{h_M}$$

Flussdichte aus Hallsondenspannung: $U_H = 1\text{V} \cong 1{,}35\ \text{T}$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Permanentmagneten im Rückschlussjoch

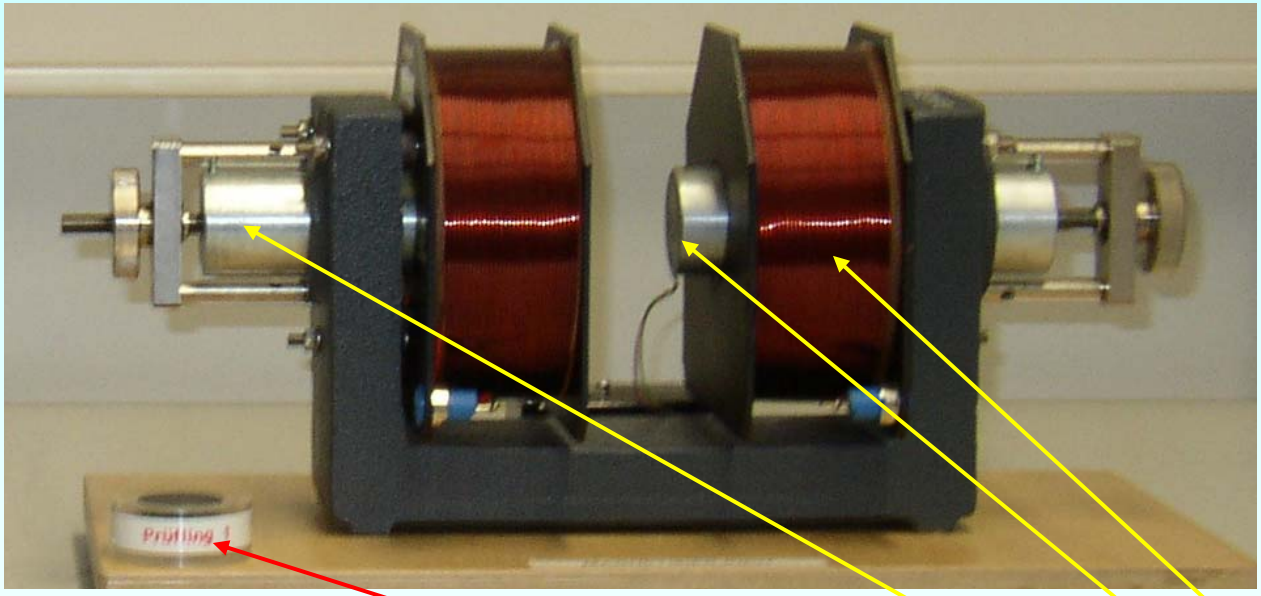


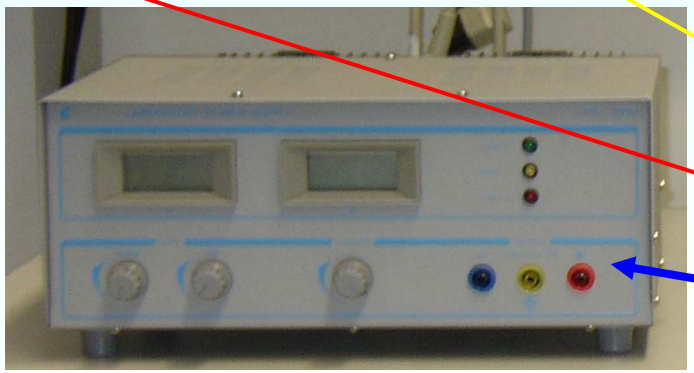
***Prüfling*: Permanentmagnet**

(Strontium-bzw. Barium-Ferrit)

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Rückschlussjoch

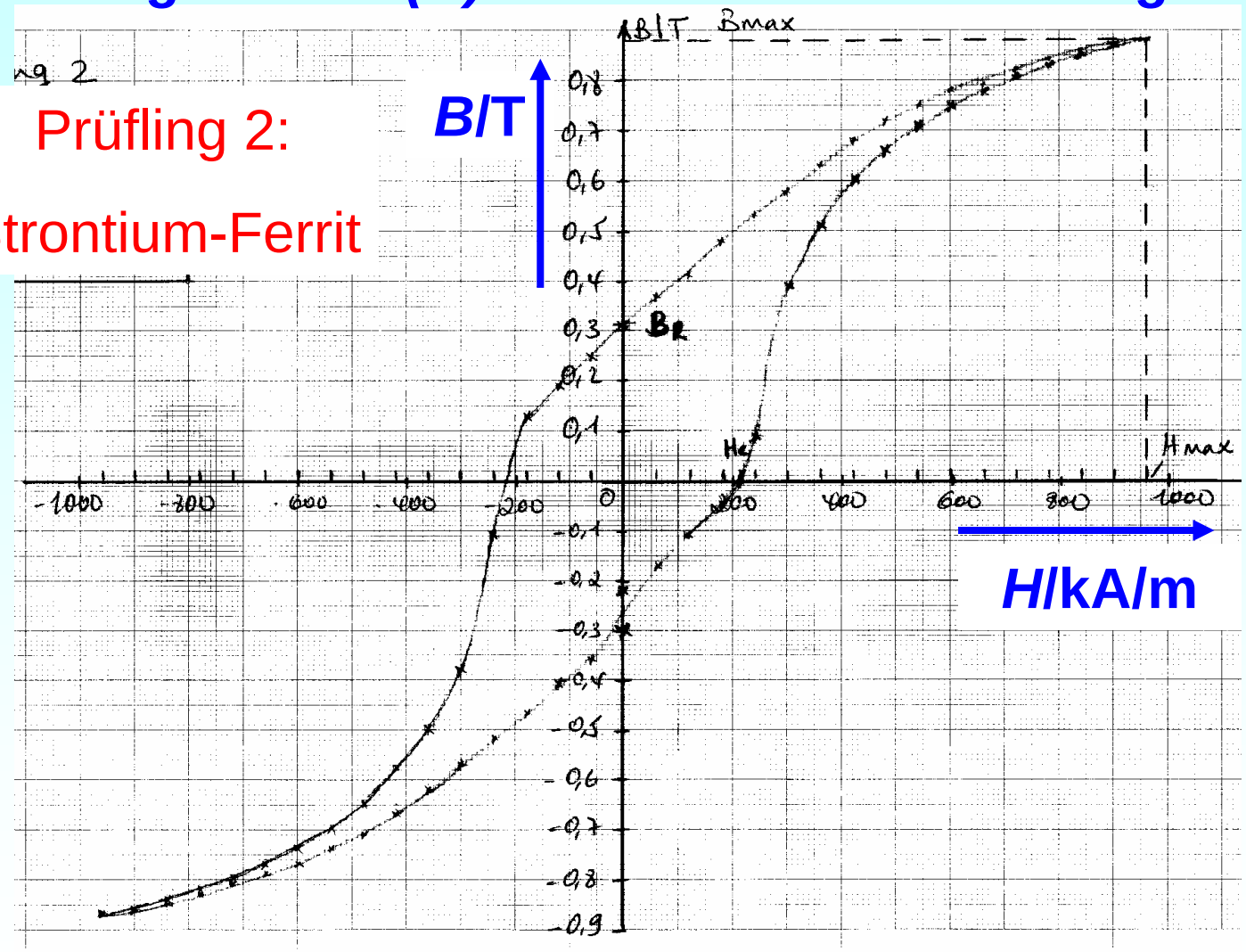




- Voltmeter
- Amperemeter
- Spule
- Hallsonde
- beweglicher Polschuh
- Prüfling
- Gleichstromquelle

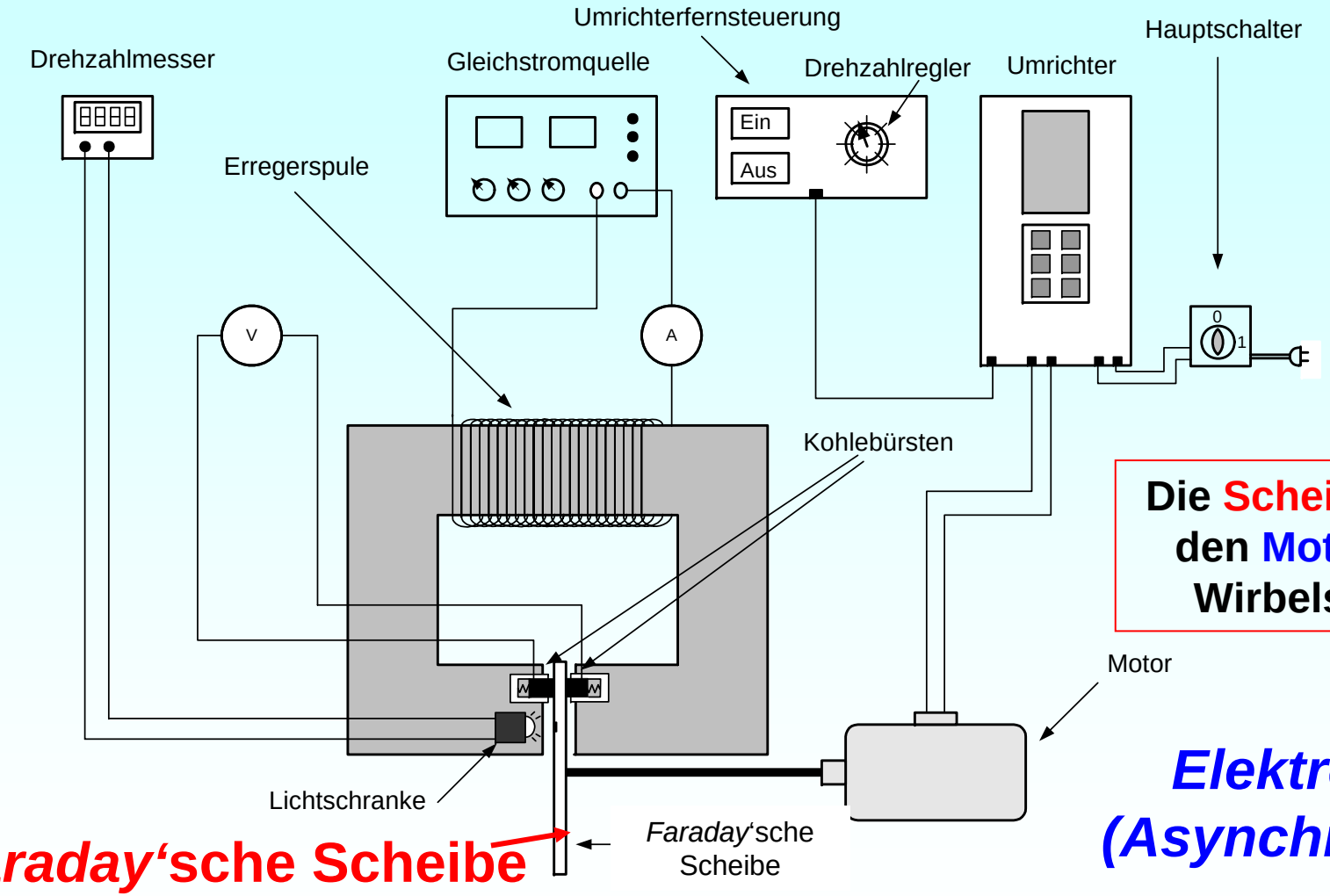
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messergebnis: *B(H)*-Kennlinie des Ferrit-Magneten



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.10 *FARADAY´*sche Scheibe als Wirbelstrombremse



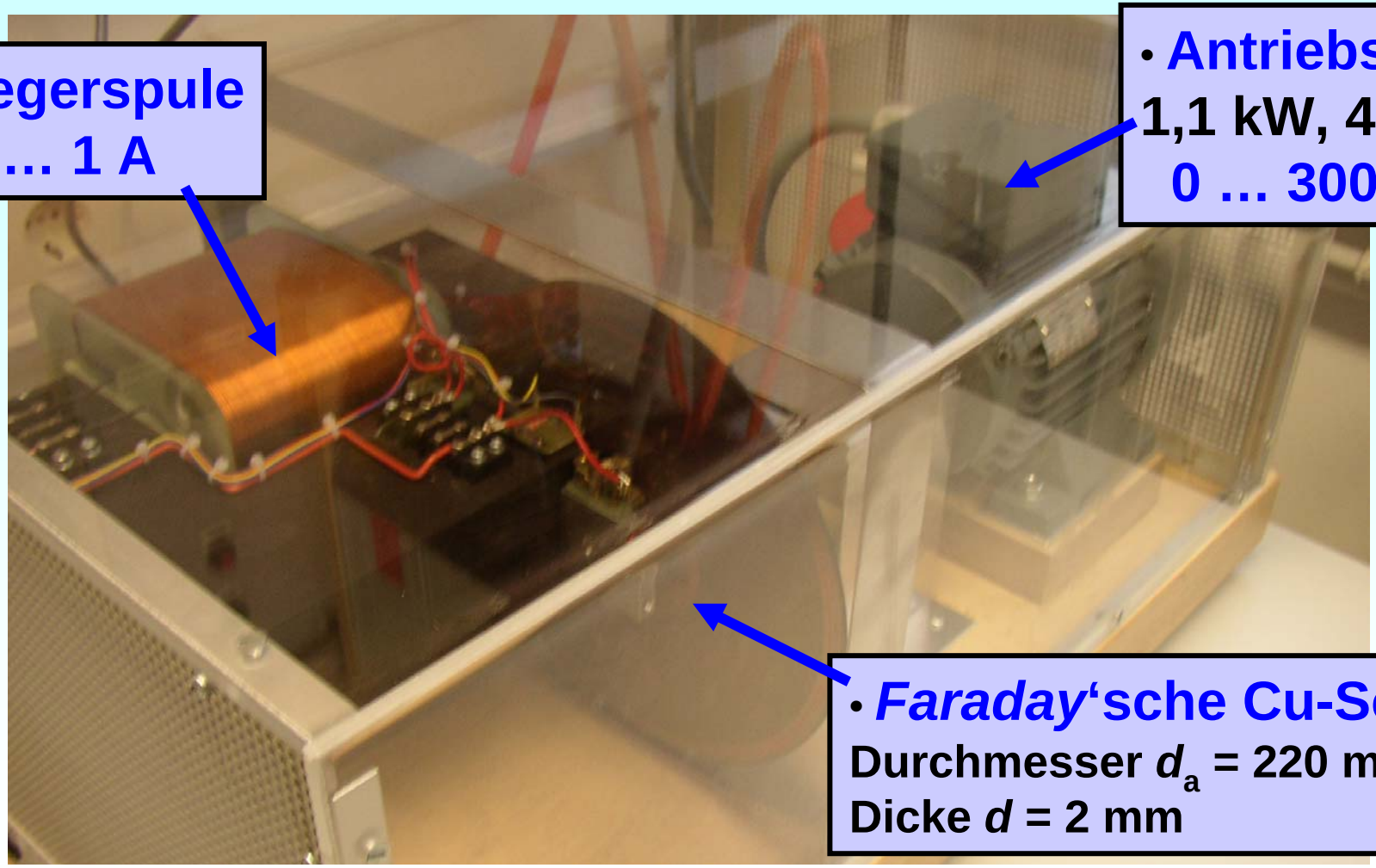
Die Scheibe bremst den Motor durch Wirbelströme !

***Faraday'*sche Scheibe**

Elektromotor (Asynchronmotor)

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

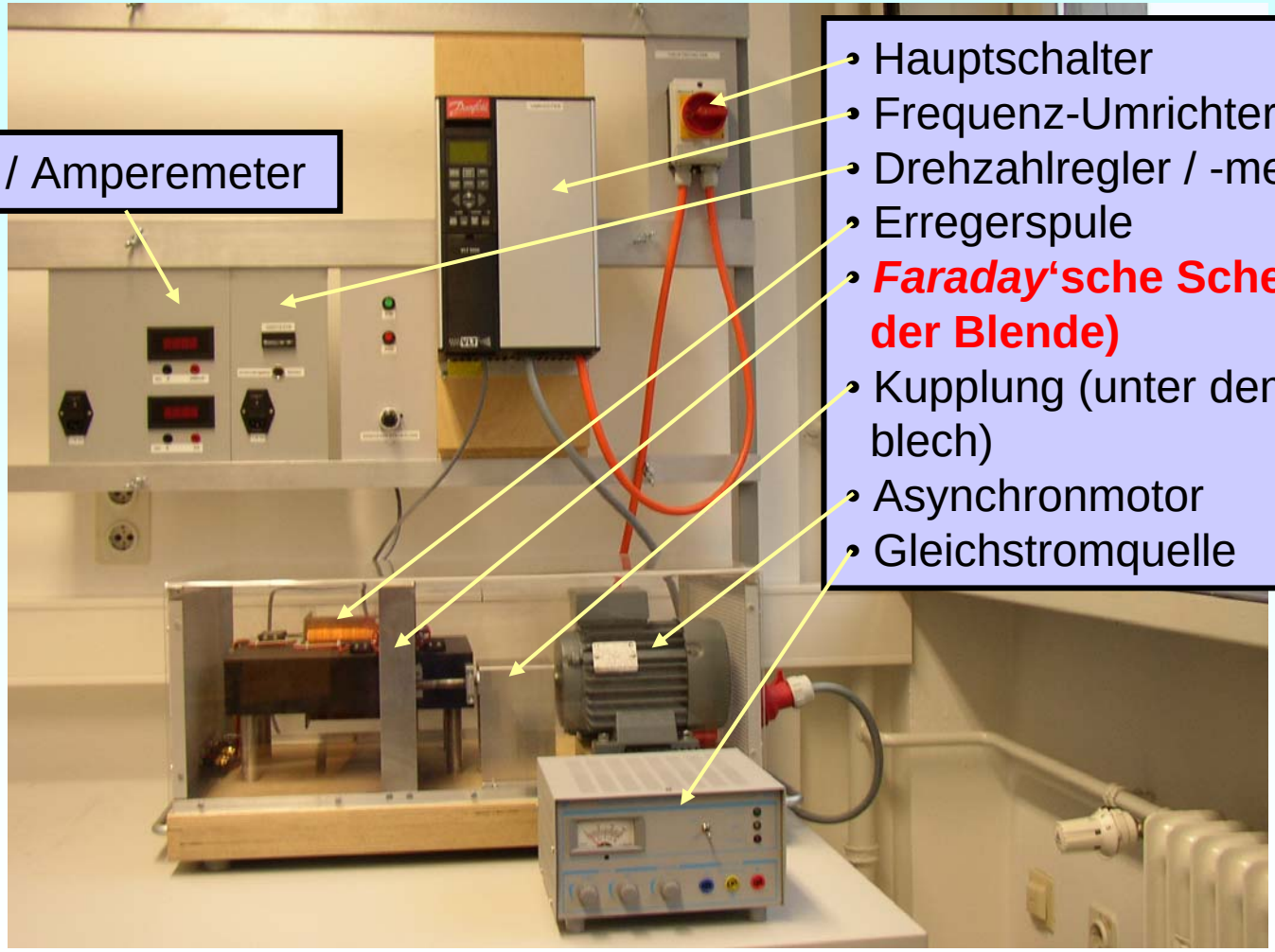
Faraday‘sche Scheibe als Wirbelstrombremse



- **Erregerspule**
  0 … 1 A
- **Antriebsmotor**
  1,1 kW, 400 V
  0 … 3000/min
- ***Faraday*‘sche Cu-Scheibe**
  Durchmesser d_a = 220 mm
  Dicke d = 2 mm

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Faraday‘sche Scheibe als Wirbelstrombremse



- Volt- / Amperemeter

- Hauptschalter
- Frequenz-Umrichter
- Drehzahlregler / -messer
- Erregerspule
- ***Faraday*‘sche Scheibe (hinter der Blende)**
- Kupplung (unter dem Schutz-blech)
- Asynchronmotor
- Gleichstromquelle

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

*FARADAY´*sche Scheibe als Wirbelstrombremse

4.10.1 Messung der $U_i(n)$-Kennlinie bei konstantem Magnetfeld

Drehzahlmessung mit Lichtschranke, Spannungsabgriff auf der Scheibe mit Graphitstiften, Erregerstrom 0.7 A

n / min^{-1}	0	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
U_i / mV											

4.10.2 Messung der $U_i(I_f)$-Kennlinie bei konstanter Drehzahl n = 2000 min^{-1}

I_f / A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_i / mV											

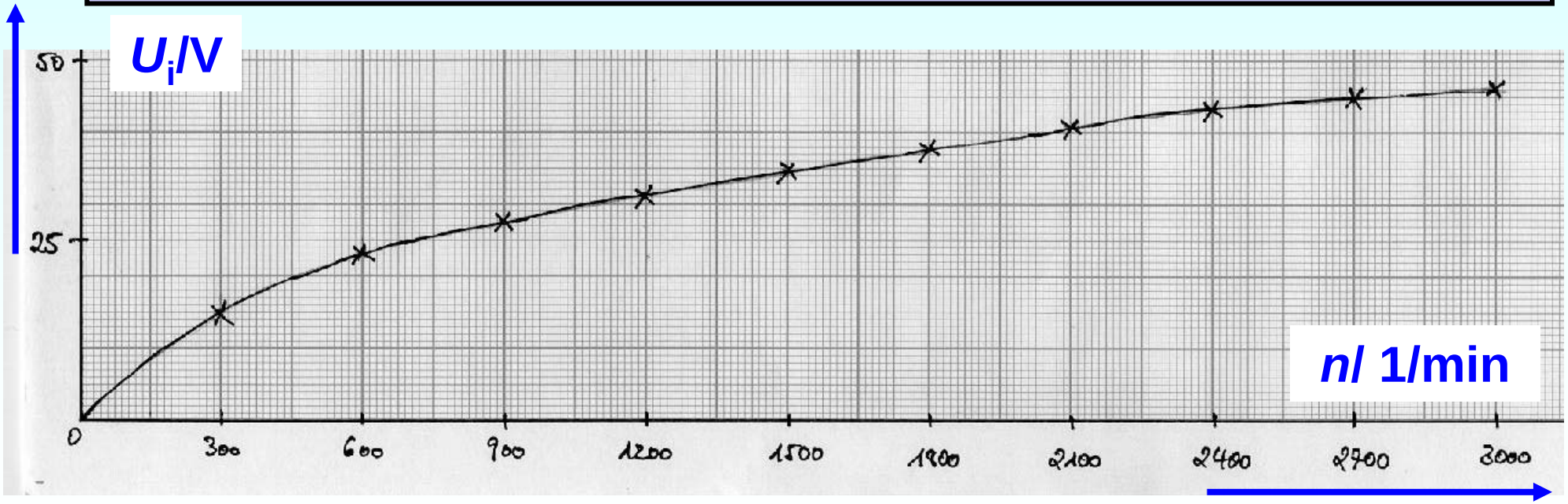
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Faraday'sche Scheibe als Wirbelstrombremse

Messung:

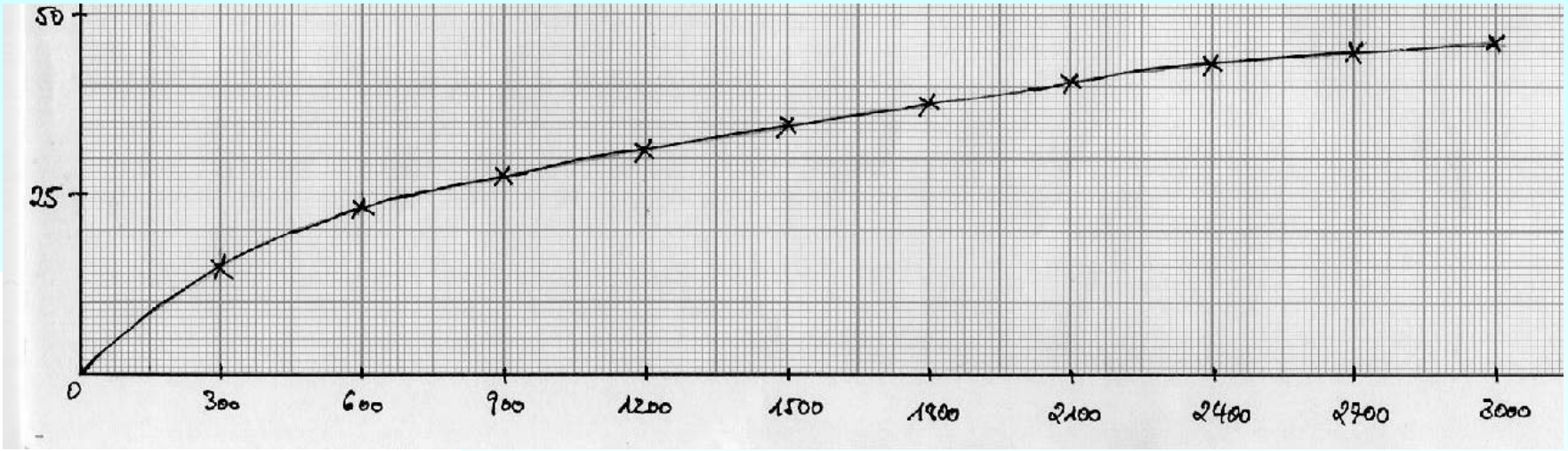
Variation der Drehzahl n bei konstantem Spulenstrom $I_f = 0{,}7$ A $\rightarrow$ Messung der induzierten Spannung in der Scheibe über zwei Graphit-Gleitkontakte $U_i(n)$

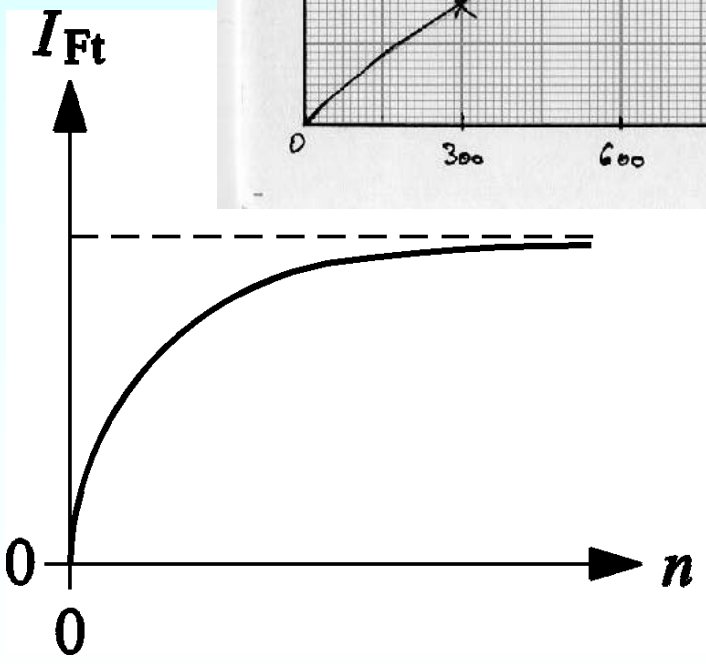
Induzierte Spannung in der Scheibe bei variabler Drehzahl



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.10.1 Messung der $U_i(n)$-Kennlinie bei konstantem Magnetfeld





$$U_i = I_{Ft} \cdot R_{scheibe}$$

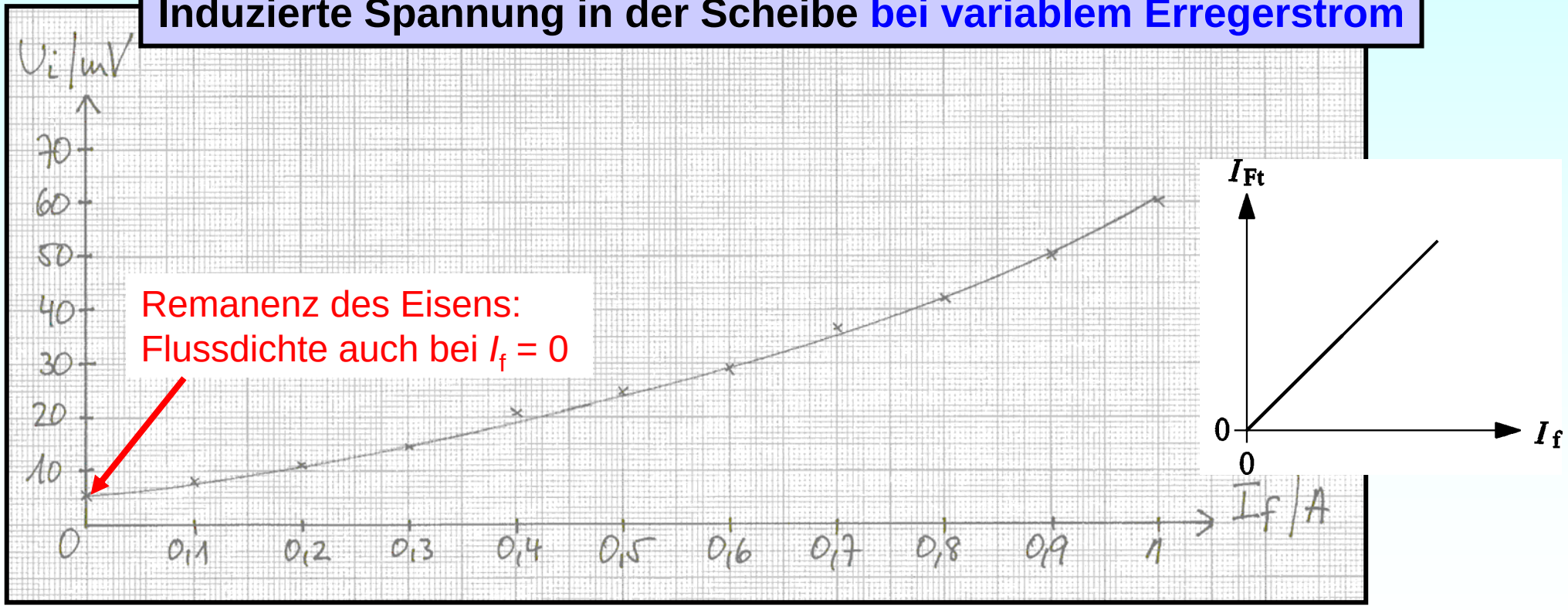
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Faraday‘sche Scheibe als Wirbelstrombremse

Messung:

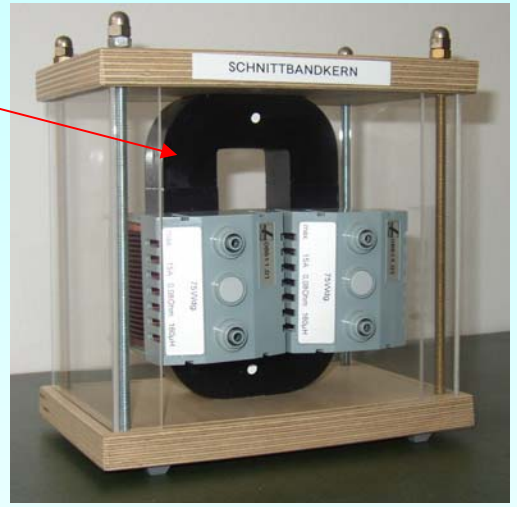
Variation des Spulenstroms I_f bei konstanter Drehzahl 2000/min → Messung der induzierten Spannung $U_i(n)$

Induzierte Spannung in der Scheibe bei variablem Erregerstrom



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.11 Hysteresis-Kennlinien und Ummagnetisierungsverluste in einem Schnittbandkern



Aufgabe:
Oszillographieren der Hysterese-Schleife:
Frequenzen 20 … 200 Hz bei B = 1T

Messobjekt:
Schnittbandkern mit zwei Spulen (Windungszahl je N_c = 75)

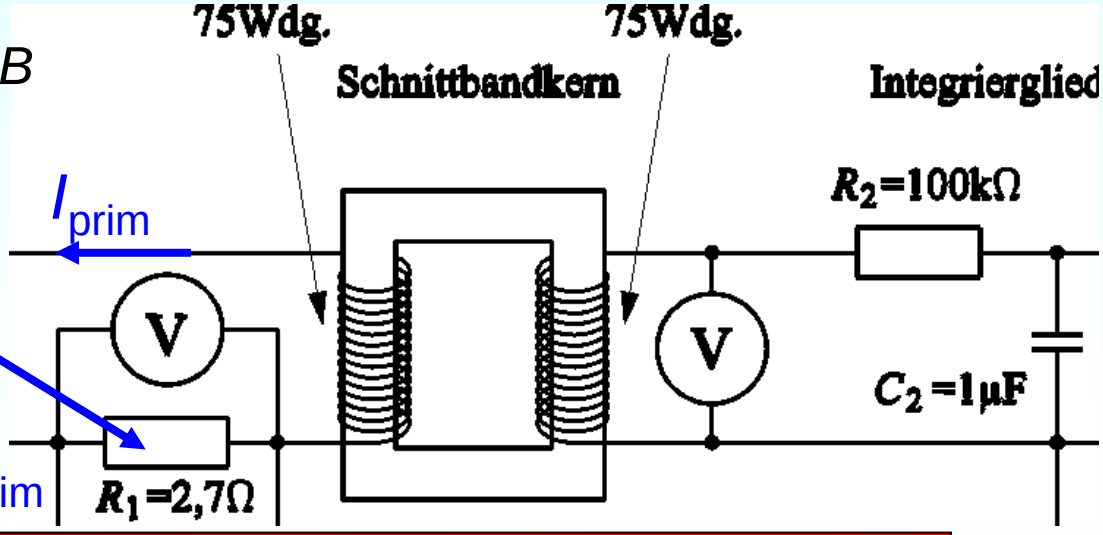
Spule 1: Erzeugt die Magnetwechselfeldstärke H

Spule 2: Misst die Wechselflussdichte B

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = N_C \cdot I_{prim} = H \cdot l_m$$

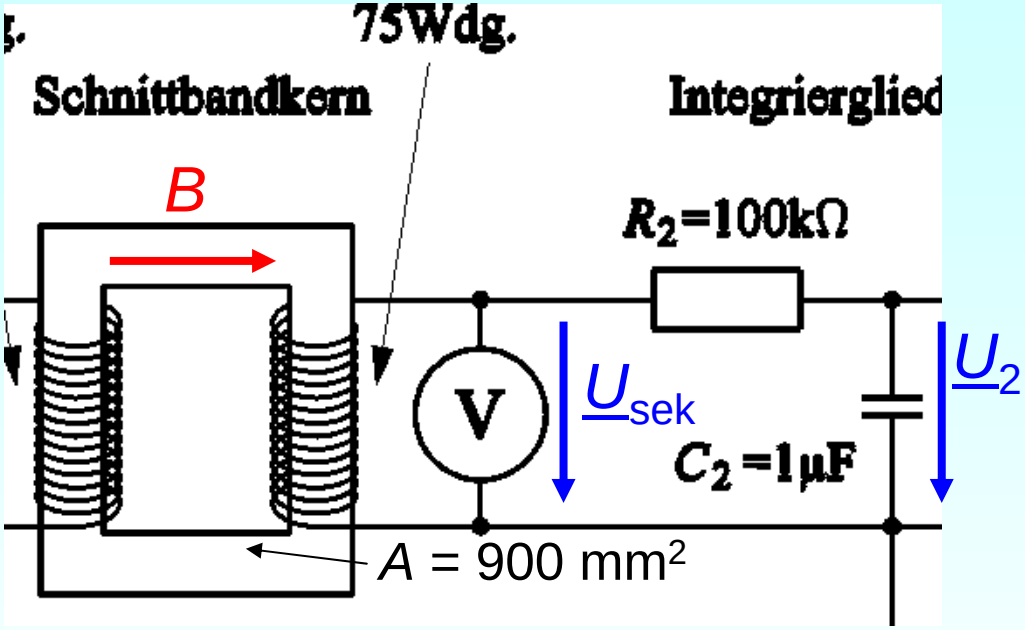
Primärstrom an Shunt R_1 gemessen.

$$\Rightarrow \quad H = \frac{N_C \cdot U_{prim}}{l_m \cdot R_1}$$



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messung der Flussdichte *B* über Integrierglied



$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \approx \frac{1}{j\omega R_2 C_2}$$

$$f >> \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^5 10^{-6}} = 1.6\text{Hz}$$

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \approx \frac{1}{j\omega R_2 C_2} \Rightarrow u_2(t) = \frac{\int u_1 \cdot dt}{R_2 C_2}$$

Für Frequenzen oberhalb 1.6 Hz ist u_2 das Integral der Spannung u_1.

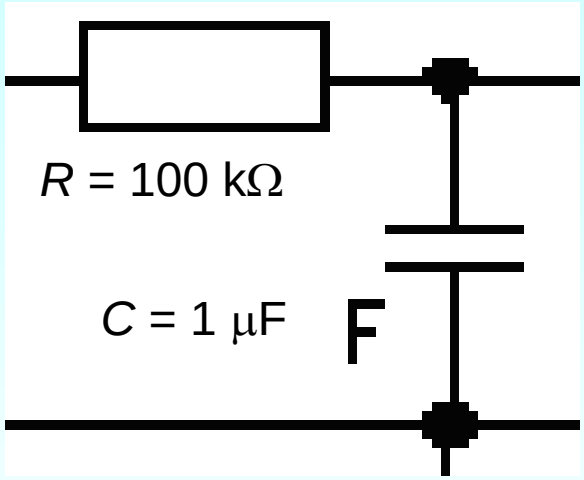
$$u_1 = -N_c \cdot d\Phi / dt = -N_c \cdot A \cdot dB / dt$$

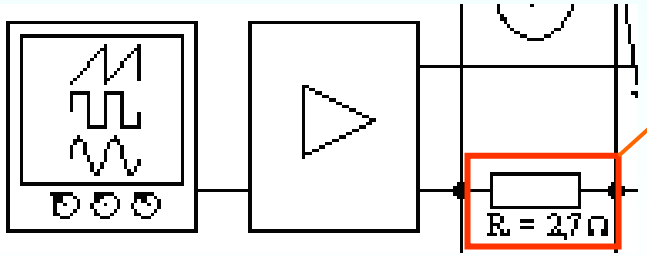
$$u_2 \sim \int u_1 dt \sim \int (dB/dt) \cdot dt = \int dB = B(t)$$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

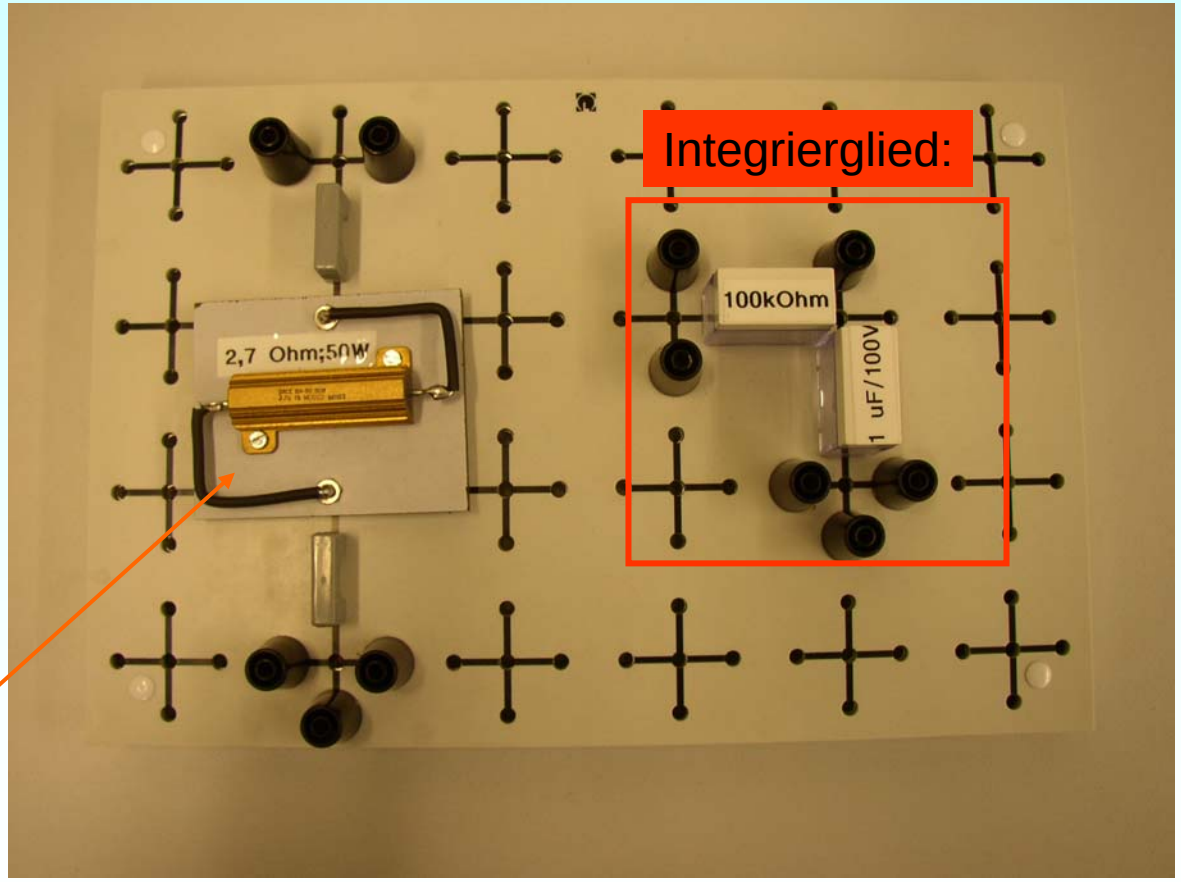
Aufbau des Integrierglieds für die *B*-Ermittlung

Integrierglied:



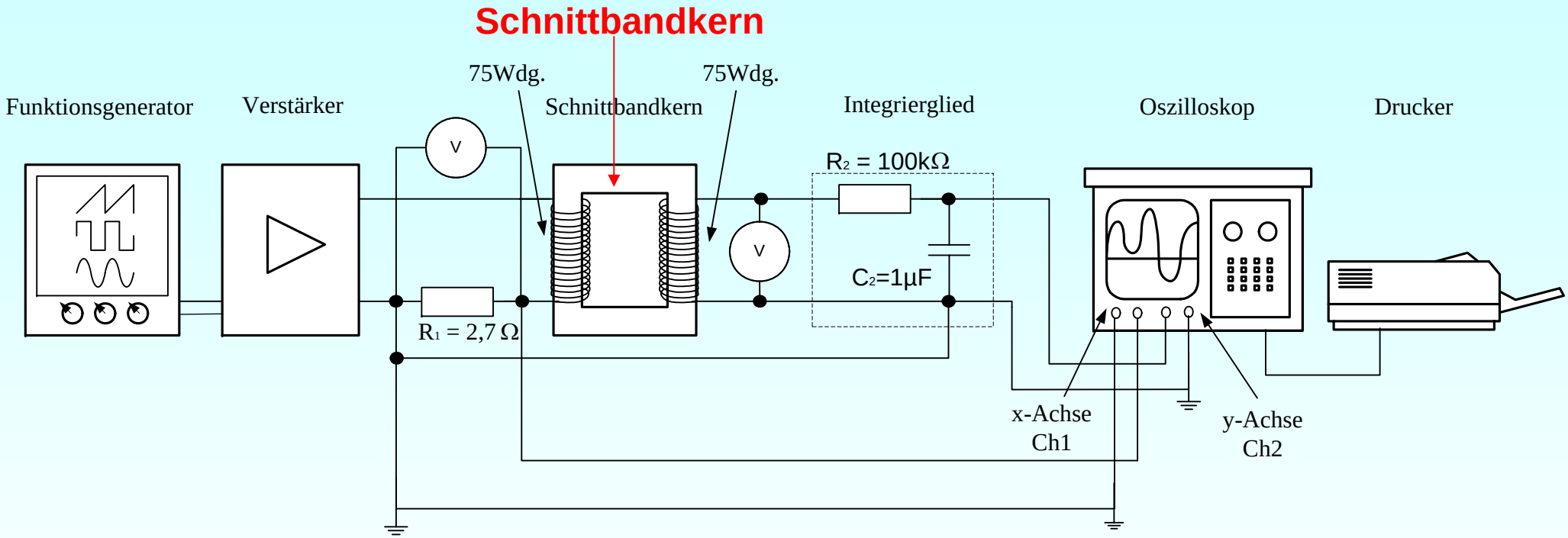


Steckbrett-Aufbau:



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

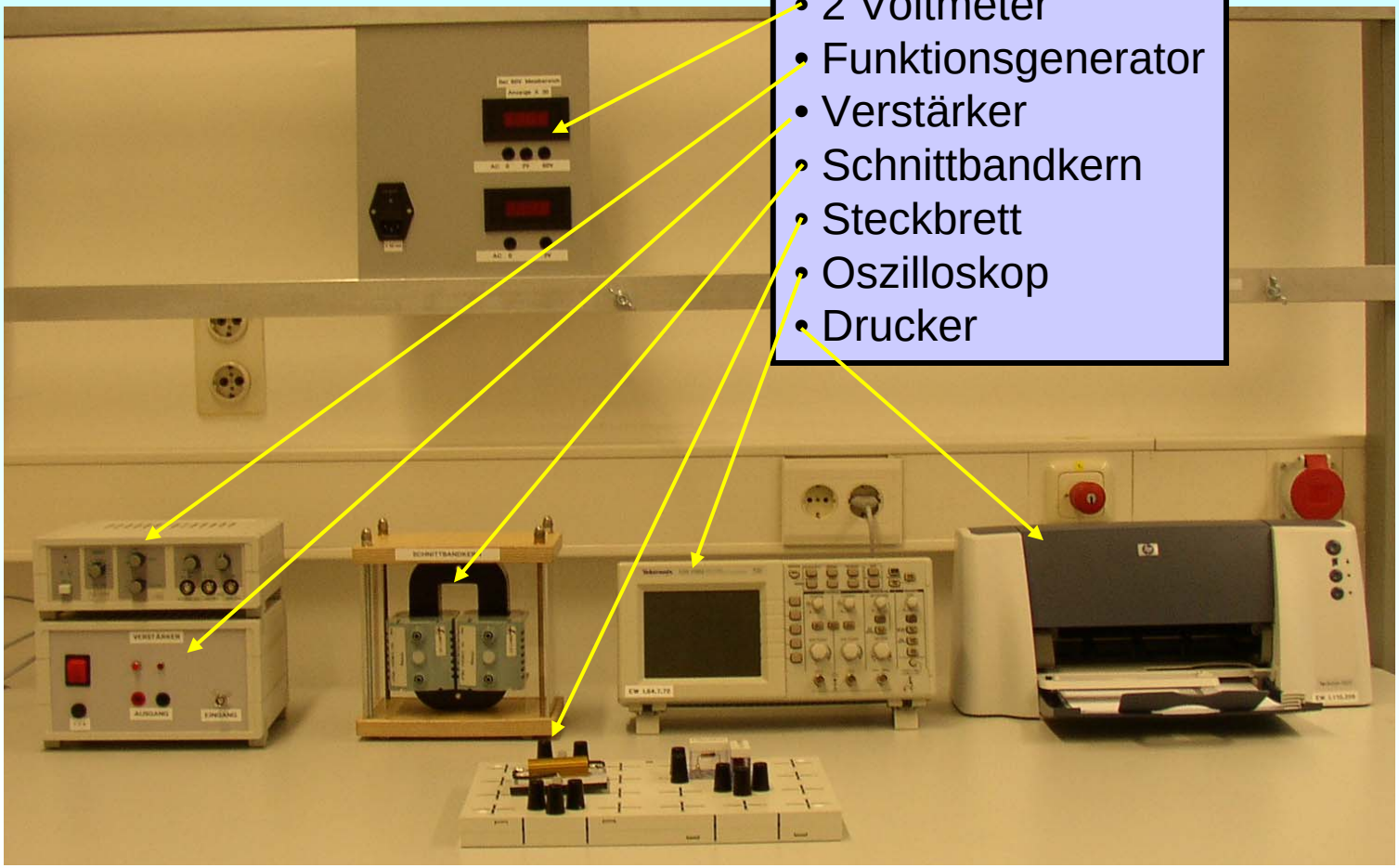
Aufbau zur Messung der Hystereseschleife



- Integration der Sekundärspannung u_{sek} ~ $-dB/dt$ die **Induktion *B*** ermitteln!
- Aus Primärstrom i_{prim} über $H{\cdot}s \sim N{\cdot}i_{prim}$ die **Feldstärke *H*** ermitteln !
- Oszillogramm $B(H)$ als $y(x)$-Darstellung der Spannungen an R_1 und C_2.
- Ausdrucken der Oszillogramme !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Versuchsaufbau im Labor



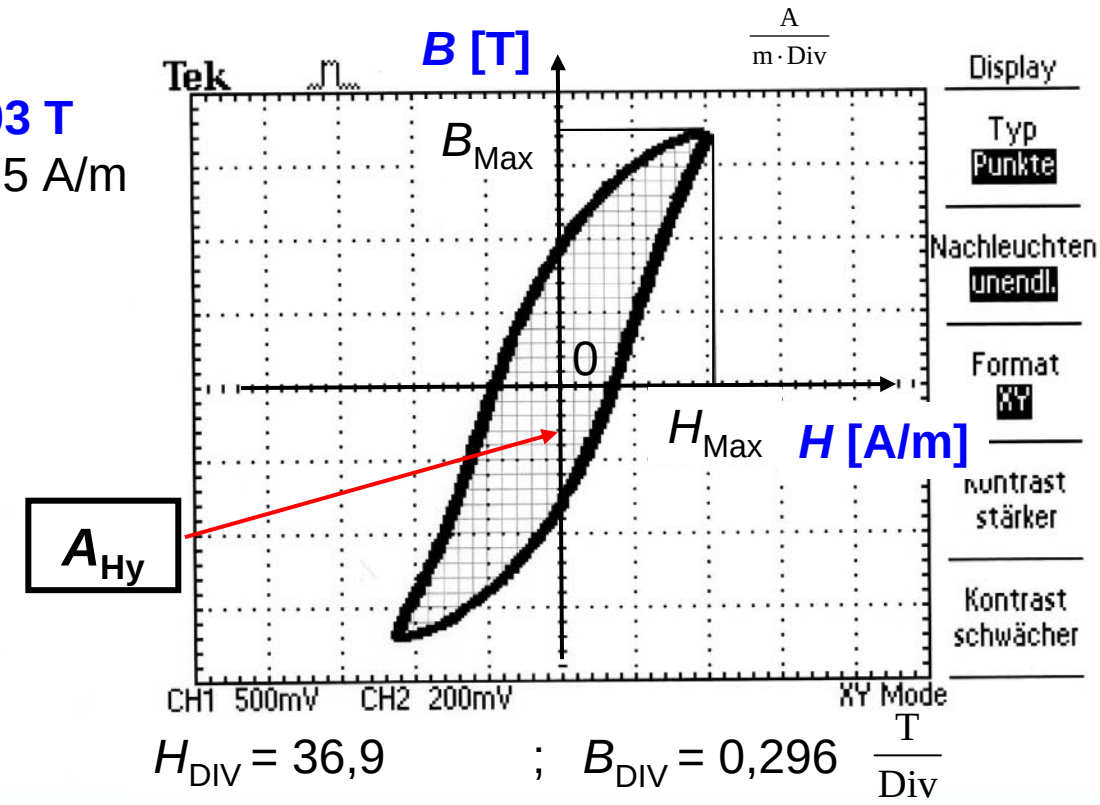
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Ummagnetisierungsverluste in einem Schnittbandkern

Durch Variation von Spannung und Frequenz am Funktionsgenerator **Messung** der Hysteresis-Kennlinien, daraus Berechnung der Ummagnetisierungsverluste im Schnittbandkern über Flächenberechnung A_{Hy} der Hystereseschleife.

$$P_{Fe} = f \cdot A_{Hy} \cdot V$$

$$B \sim \frac{U}{f} \overset{!}{=} konst. = 1\,\mathrm{T}$$



B_{Max} = 1,03 T
H_{Max} = 77,5 A/m

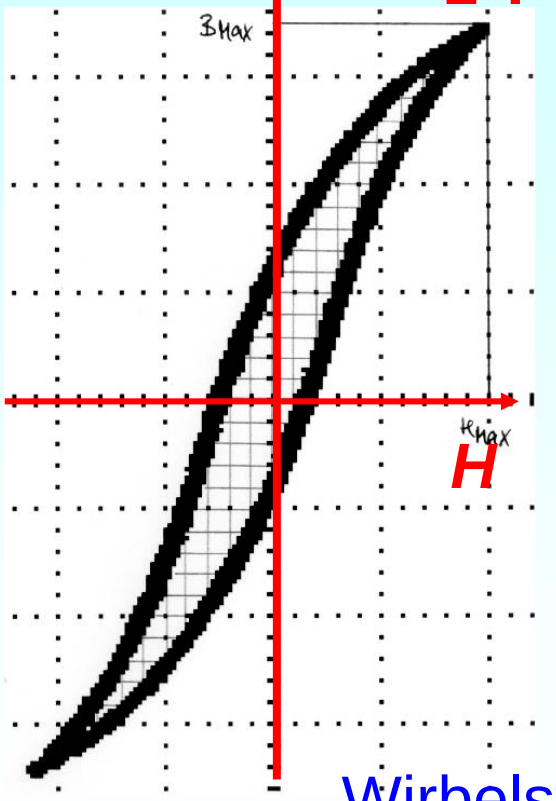
H_{DIV} = 36,9 ; B_{DIV} = 0,296 $\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{Div}}$

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

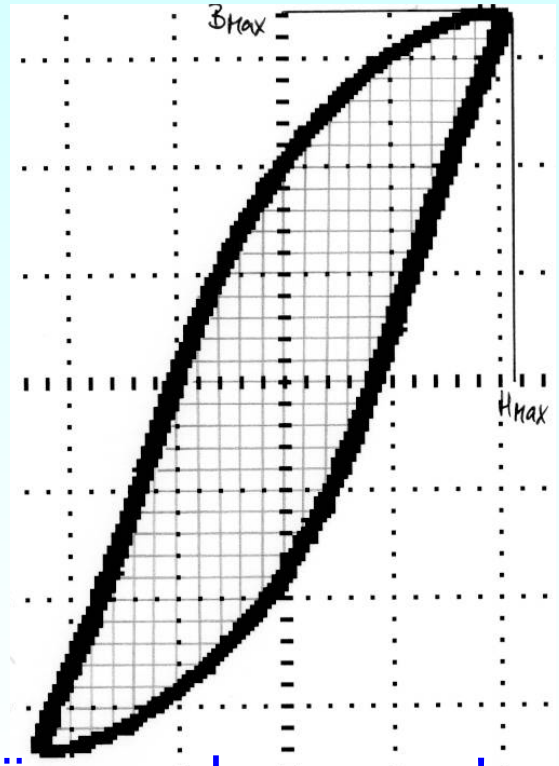
Statische und dynamische Hystereseschleifen

Nahezu statisch

20 Hz

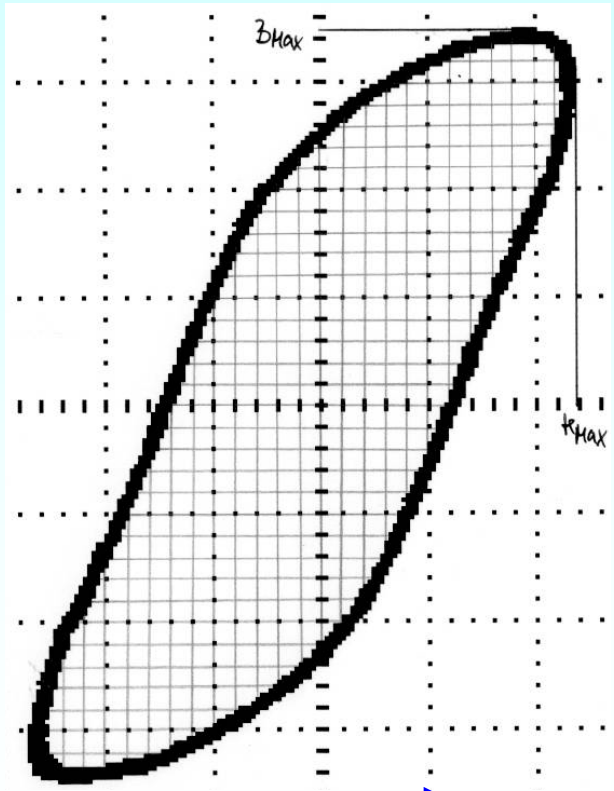


90 Hz



Dynamisch

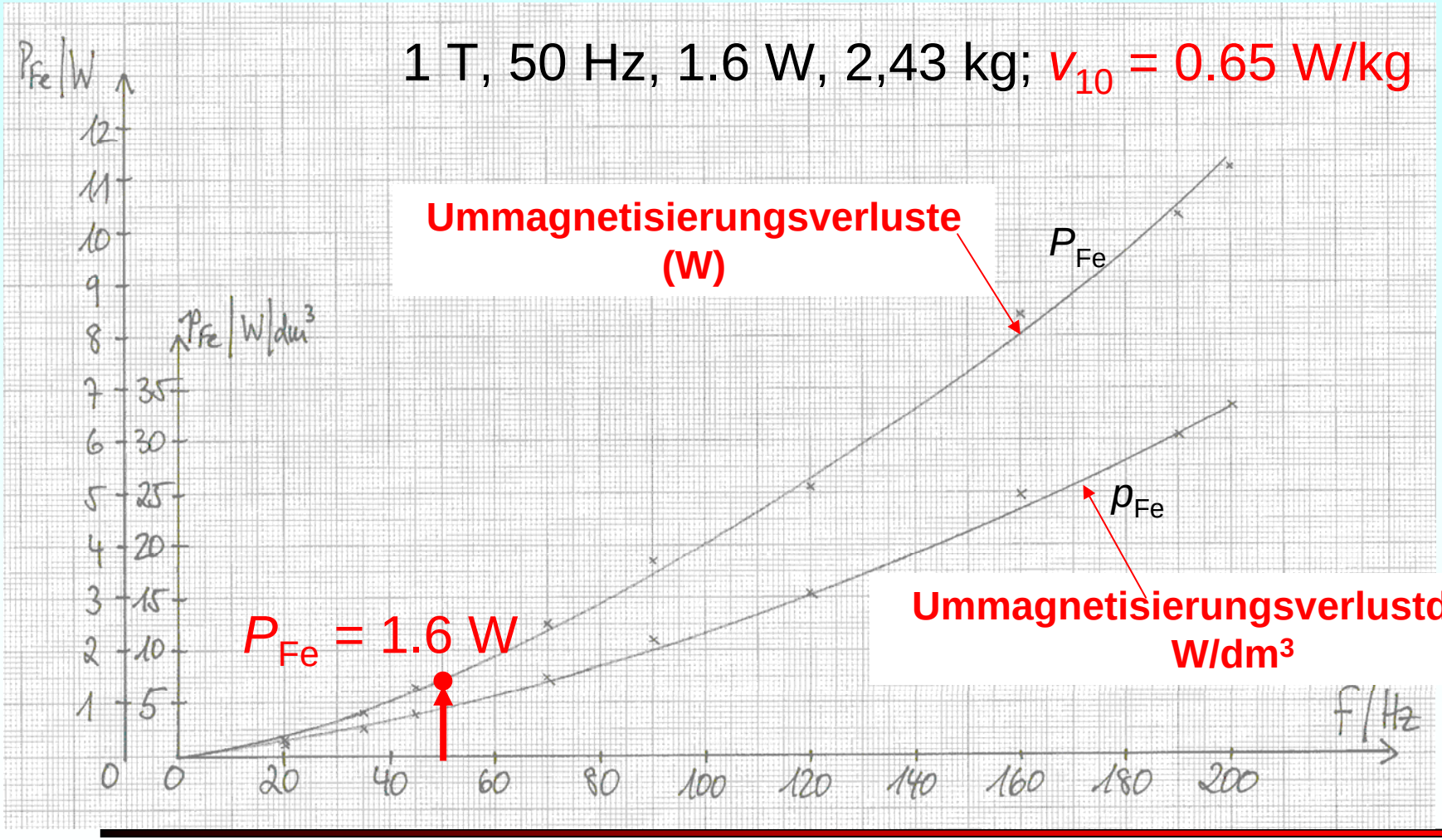
200 Hz



Wirbelströme nehmen zu !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Ummagnetisierungsverluste in einem Schnittbandkern

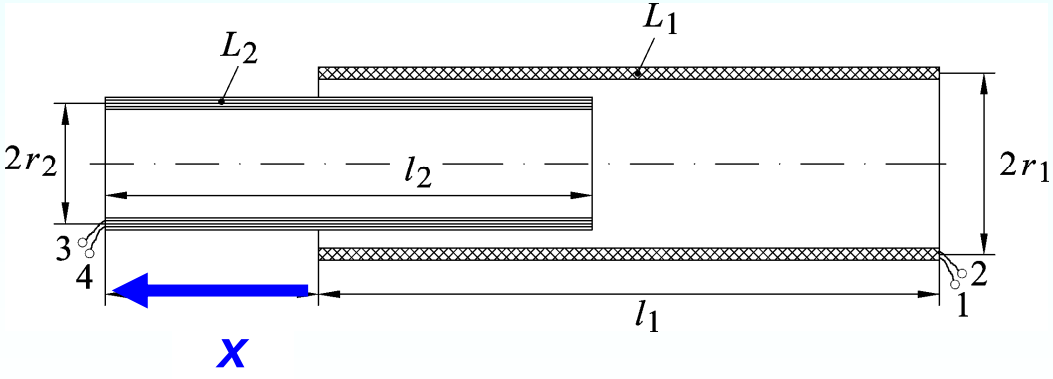


Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.12 Variable Gegeninduktivität, Kopplung, Streuziffer

Verwendetes Prüfobjekt:

Zwei koaxiale Zylinderspulen, die ineinander verschieblich sind



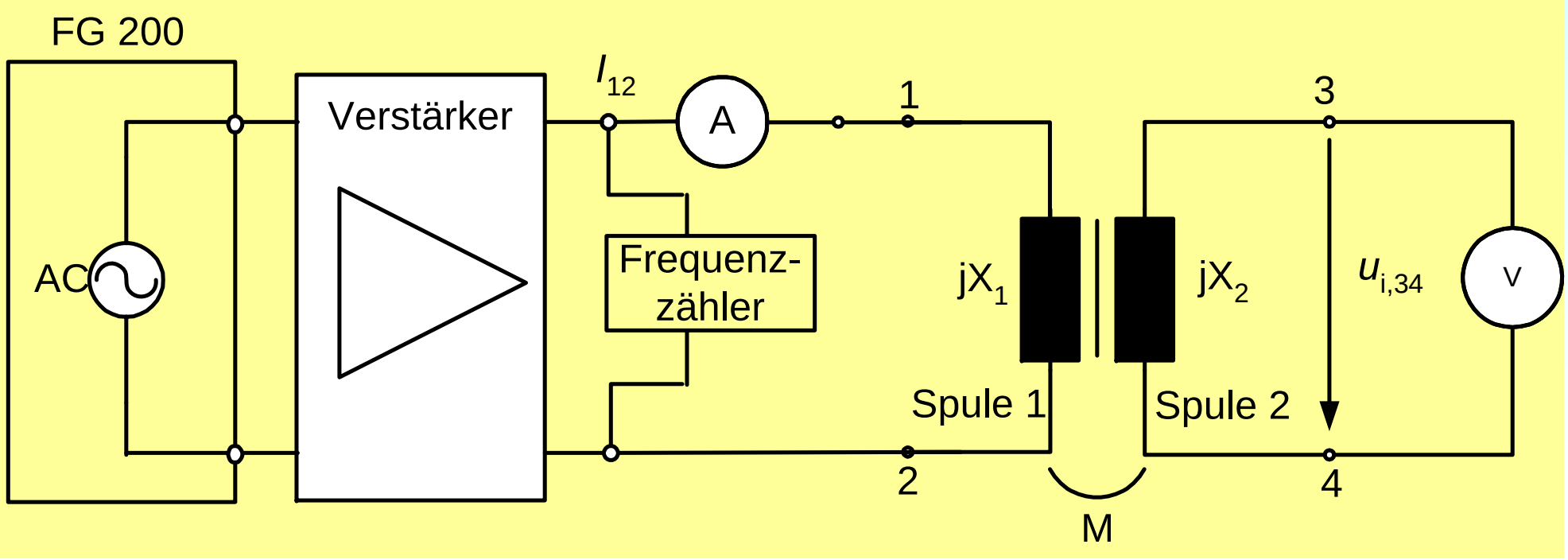
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.12.1 Messung der Leerlaufspannung $U_{i,34}$ bei variablem Abstand x

Verwendete Messgeräte:

- Funktionsgenerator
- Frequenzzähler
- Zwei koaxiale Zylinderspulen

Verstärker
Volt- & Amperemeter



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messwerttabelle

x / mm	I_{12} / mA	$U_{i,34}$ / V	M_{mess} / mH	M_{rech} / mH
0				
20				
40				
100				
150				
200				

Messung:

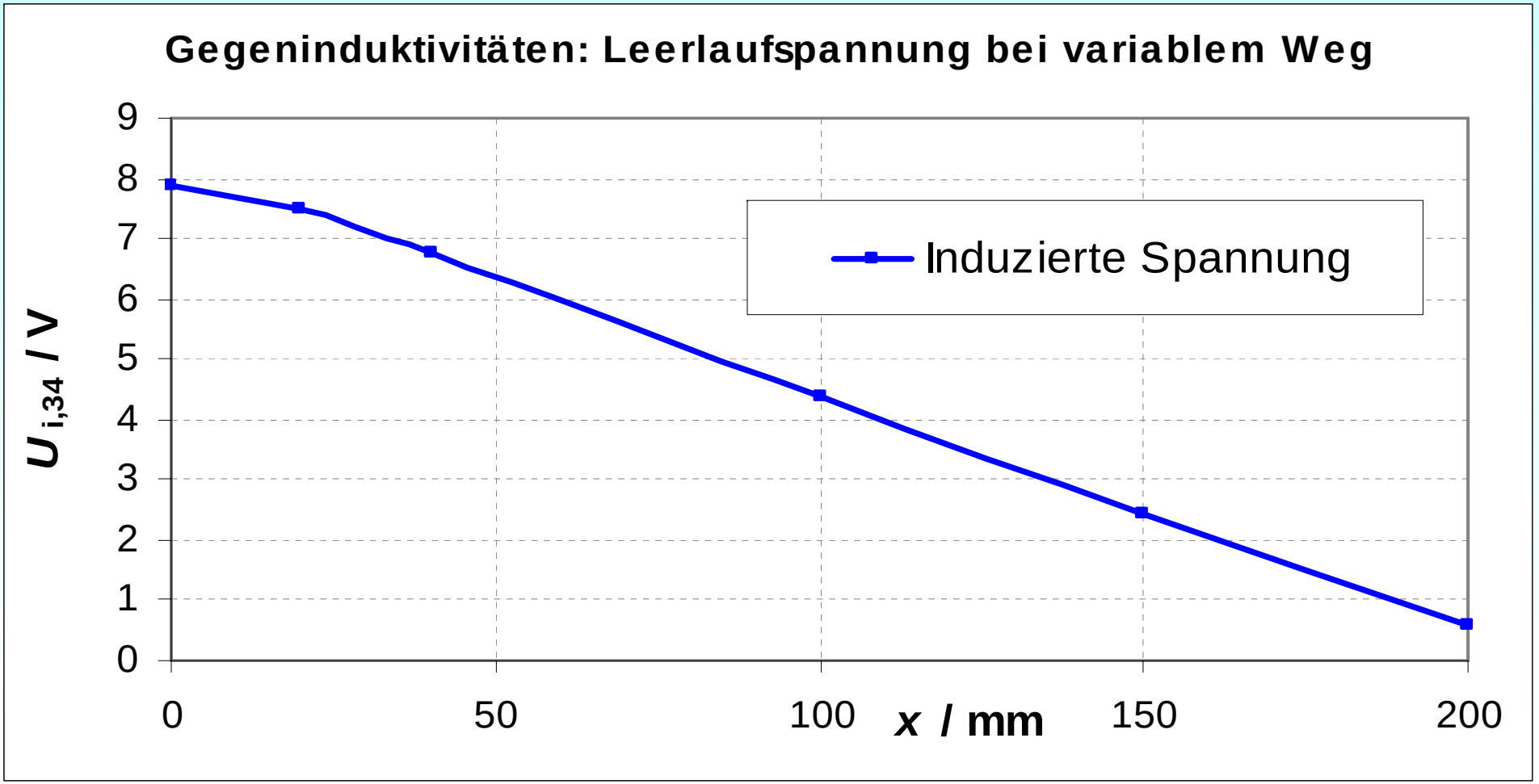
$$M_{mess} = \frac{U_i}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{i,34}}{2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot 300\text{mA}}$$

Rechnung:

$$M_{rech} = \mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{A_2}{l_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{l_2}\right)$$

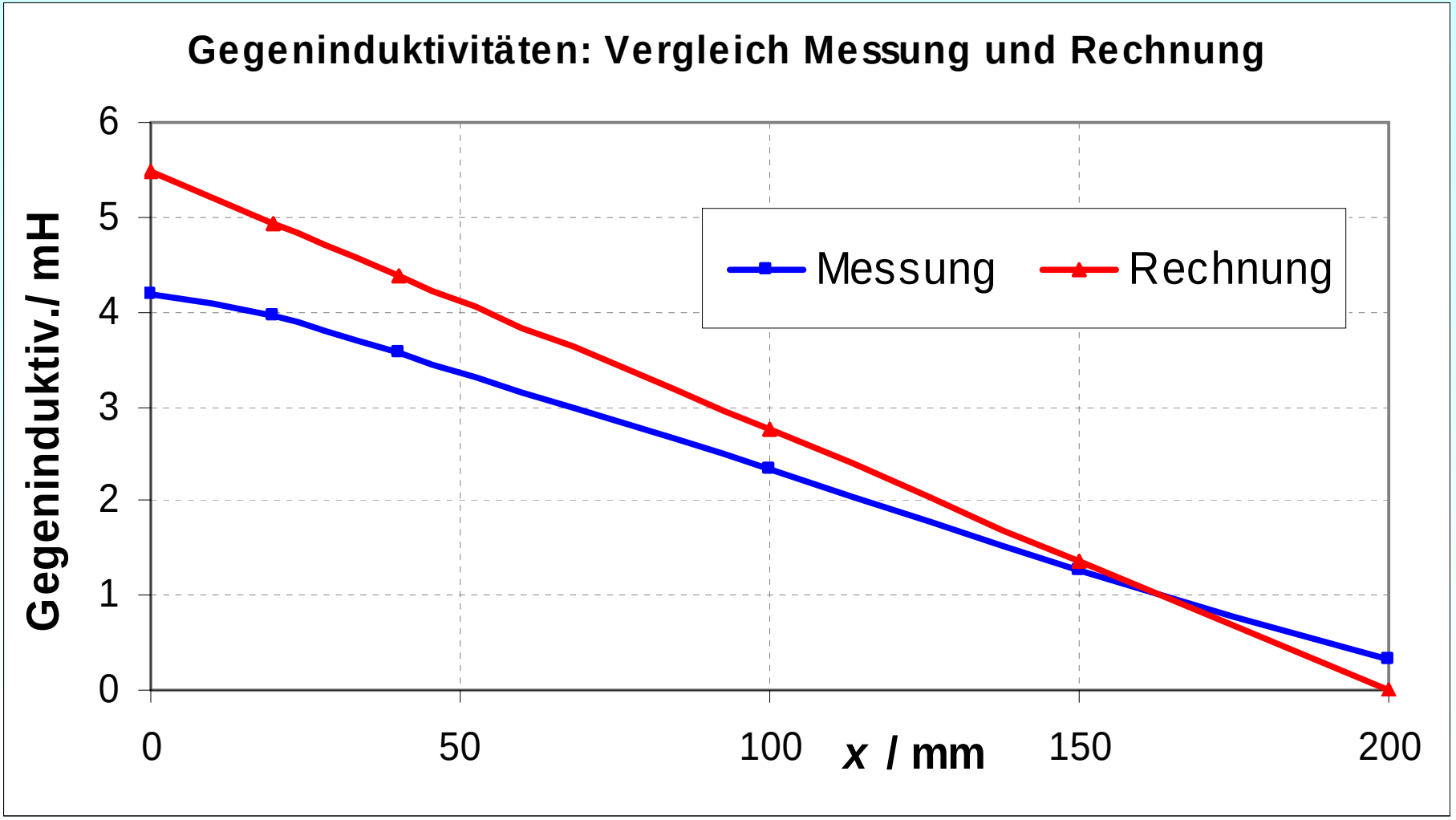
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Leerlaufspannung $U_{i,34}$, bei variablem Verschiebe-Weg x



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

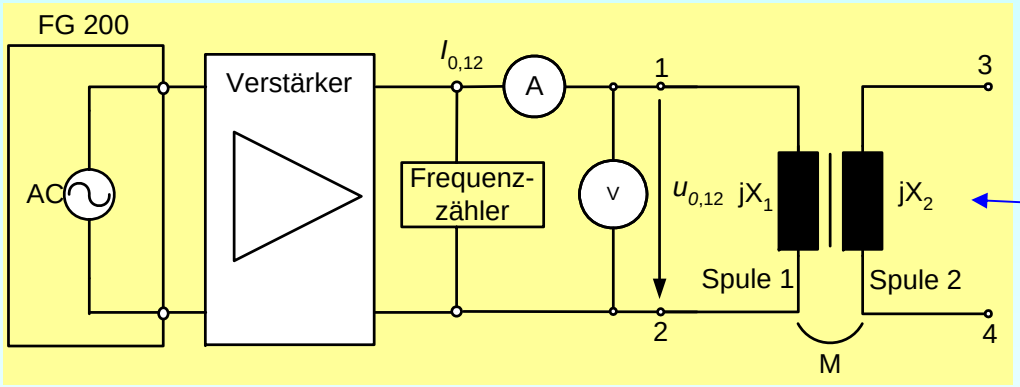
Gegeninduktivität *M* bei variablem Verschiebe-Weg *x*



Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.12.2 Messung der Spuleninduktivität L_{sp1}

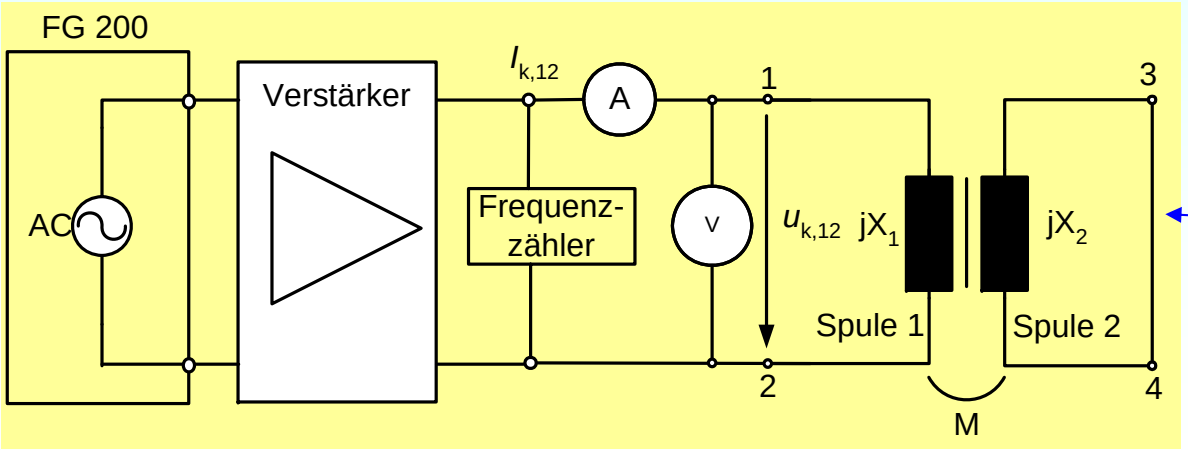
a) Messung der Leerlaufinduktivität $L_{sp1,0}$ (Spule 2 offen)



Spule 2 liegt vollständig innerhalb von Spule 1 ($x < 0$).

OFFEN

b) Messung der Kurzschlussinduktivität $L_{sp1,KS}$ (Spule 2 kurzgeschlossen)



KURZSCHLUSS

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Auswertung: Spuleninduktivität L_{sp1} - Streufaktor σ (Variante 1: σ_1)

Spuleninduktivität L_{sp1}:

$$Z_{sp10} = \frac{U_{0,12}}{I_{0,12}} \Rightarrow Z_{sp10} = \sqrt{R_{sp1}^2 + \omega^2 L_{sp10}^2} \Rightarrow R_{sp1} = 19{,}67\ \Omega \Rightarrow L_{sp1,0}$$

$$Z_{sp1ks} = \frac{U_{k,12}}{I_{k,12}} \Rightarrow L_{sp1,ks}$$

Streuziffer σ_1:

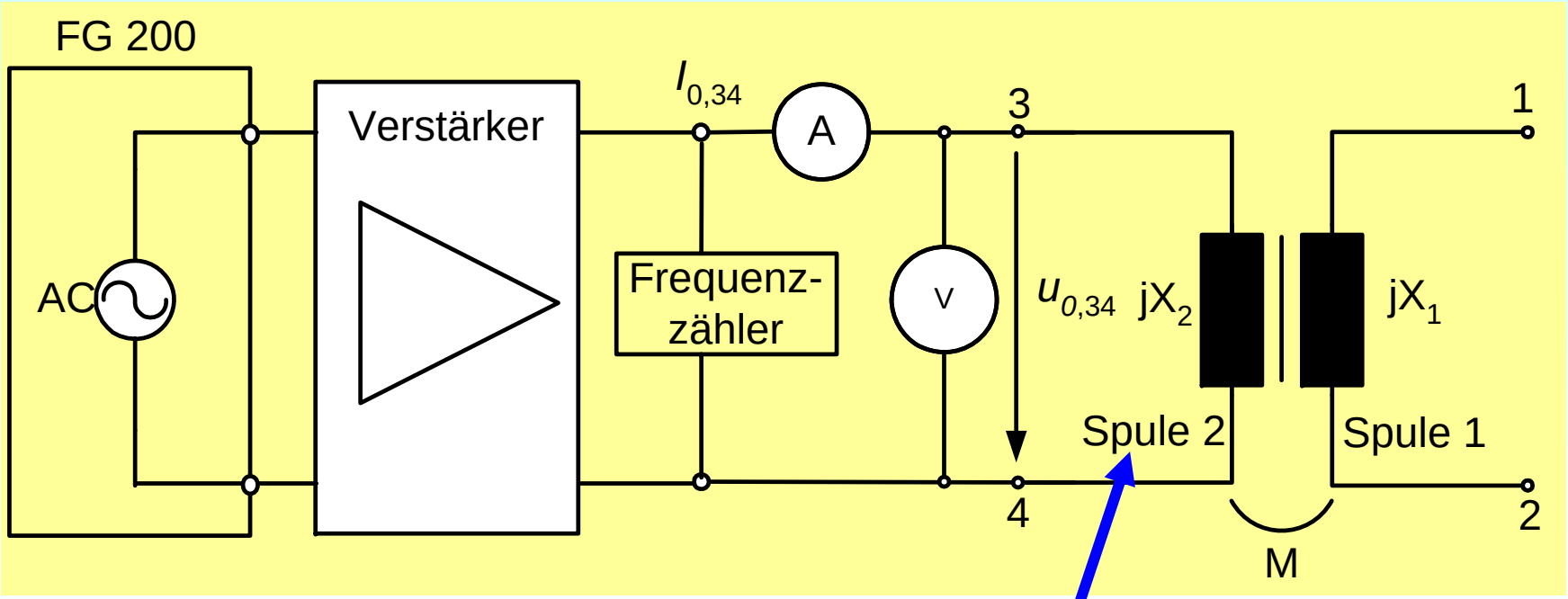
$$\sigma_1 = \frac{L_{sp1ks}}{L_{sp10}}$$

f / Hz	Z_{sp10} / Ω	Z_{sp1ks} / Ω	L_{sp10} / mH	L_{sp1ks} / mH	σ_1
501	51,6	46,3	15,18	13,31	0,877
1000	97,7	75,1	15,18	11,47	0,755
2000	196,1	138,7	15,49	10,93	0,705
5000	555	358,2	17,63	11,38	0,646

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4.12.3 Messung der Spuleninduktivität L_{sp20}, wenn Spule 1 offen

Messschaltung



Sekundärseite !

Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

Messtabelle für die Spuleninduktivität L_{sp20}

f_{soll} / Hz	f_{ist} / Hz	$U_{0,34}$ / V	$I_{0,34}$ / mA	Z_{sp20} / Ω	L_{sp20} / mH
500					
1000					
2000					
5000					

$$Z_{sp20} = \frac{U_{0,34}}{I_{0,34}} \Rightarrow Z_{sp20} = \sqrt{R_{sp2}^2 + \omega^2 L_{sp20}^2} \Rightarrow R_{sp2} = 8{,}59\ \Omega \Rightarrow \boxed{L_{sp20}}$$

f / Hz	**Z_{sp20} / Ω**	**L_{sp20} / mH**
501	**15,06**	**3,93**
1000	**26,5**	**3,97**
2000	**51,02**	**4**
5000	**131,57**	**4,17**

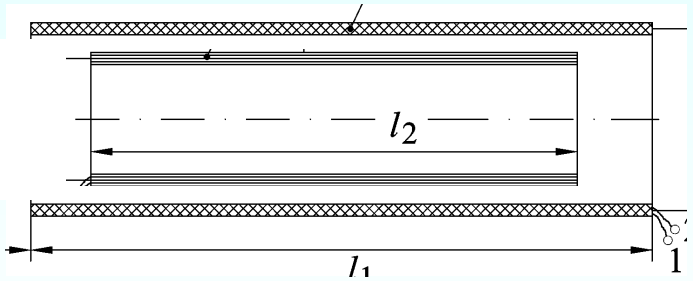
Magnetische Gleich- und Wechselfeldmessung

4. 13 Bestimmung der Streuziffer σ (Variante 2: σ_2)

$$\sigma_1 = \frac{L_{sp1ks}}{L_{sp10}} \qquad \sigma_2 = 1 - \frac{M^2}{L_{sp10} \cdot L_{sp20}}$$

Vergleich der ermittelten Streuziffern

f / Hz	M / mH	L_{sp10} / mH	L_{sp20} / mH	σ_2	σ_1	$\Delta\sigma$
1000	4,19	15,18	3,97	0,71	0,75	6%



Variante 1 Variante 2

Der Unterschied in der Bestimmung der Streuziffer σ des gekoppelten Magnetkreises ist klein: 6% !