



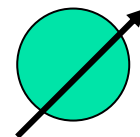
Elektrische Meßtechnik: Messung elektrischer und magnetischer Feldgrößen

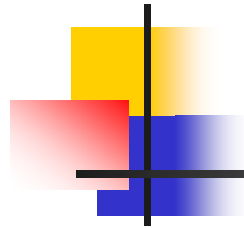
SS 2009

Prof. Dr. sc. nat. Manfred Schmidt

Fachhochschule Jena

Fachbereich Elektrotechnik/Informationstechnik



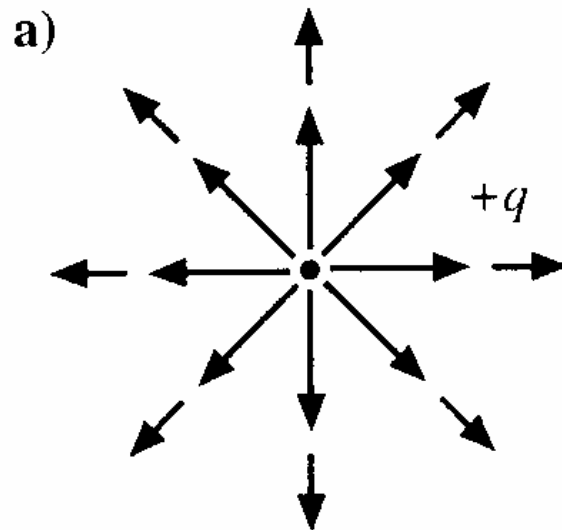


Elektrische Feldgrößen

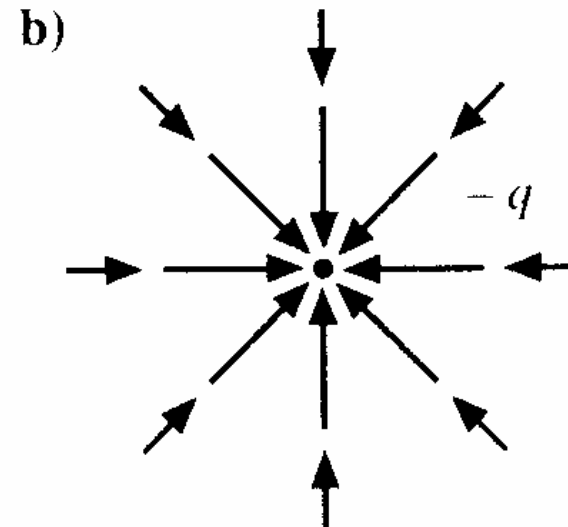
- Elektrische Feldstärke
- Elektrische Flußdichte
- Dielektrische Funktion
- Messung elektrischer Feldgrößen



Elektrisches Feld von Punktladungen

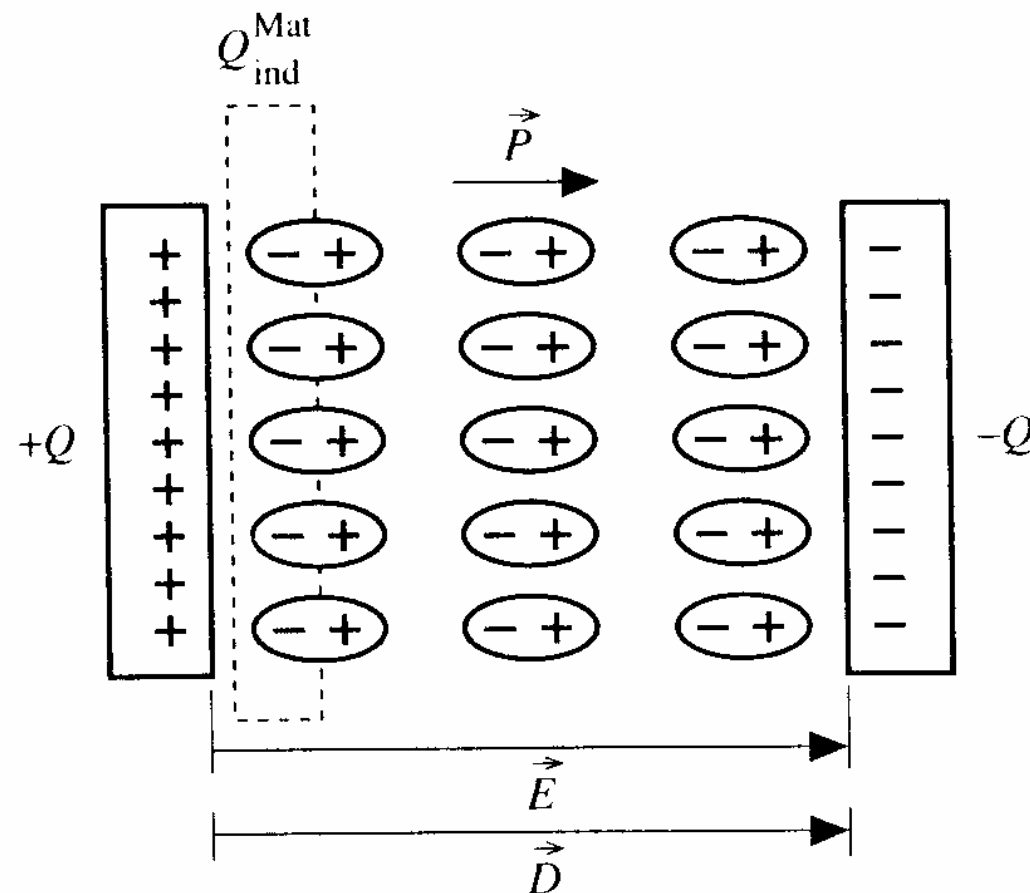


Positive Ladung

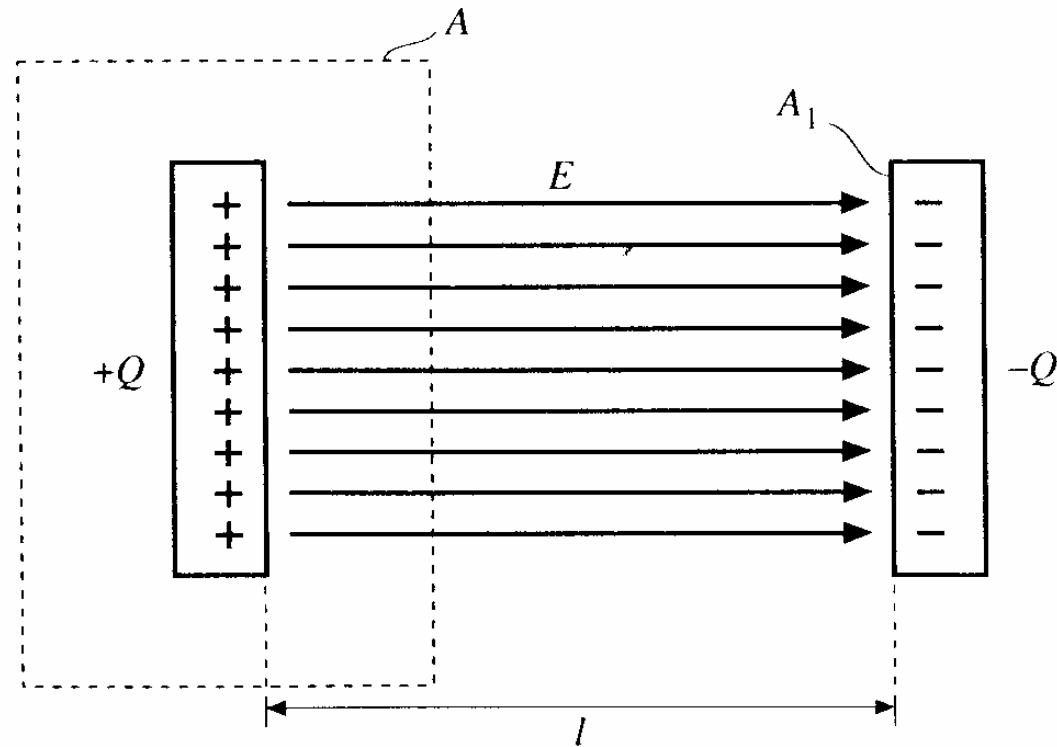


Negative Ladung

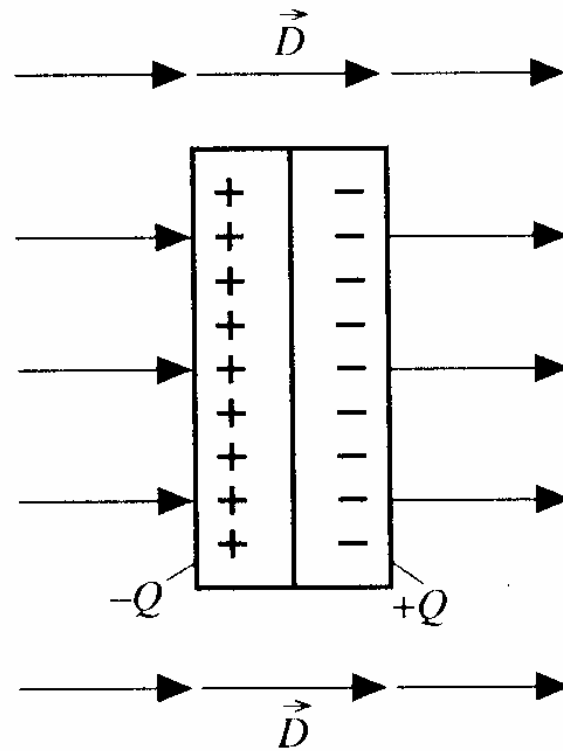
Polarisation von Materie im elektrischen Feld



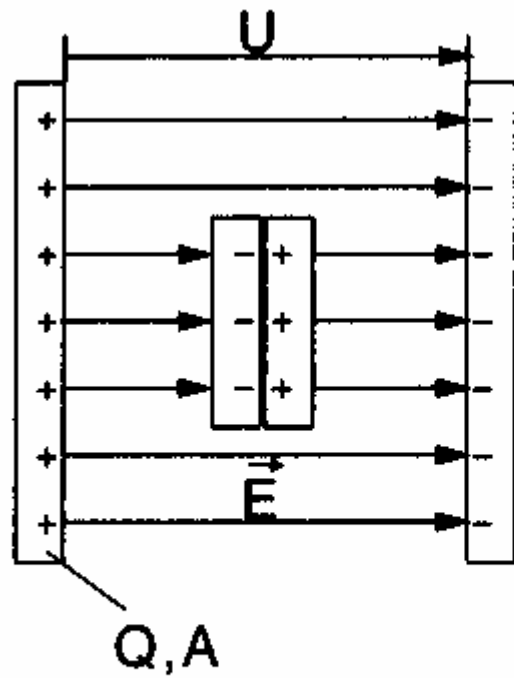
Plattenkondensator



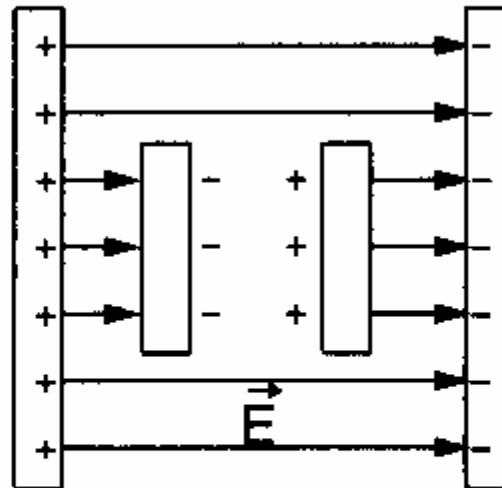
Maxwellsche Doppelplatte zur statischen Feldmessung



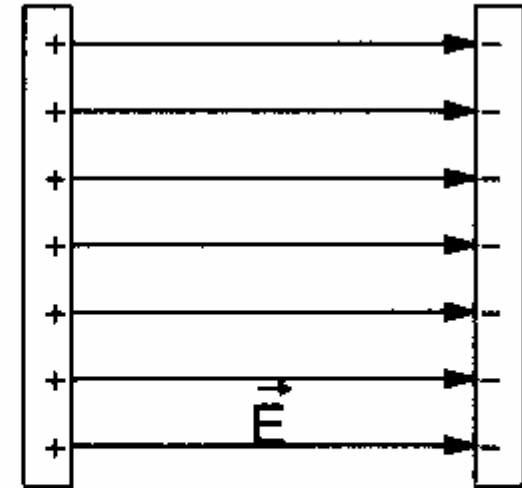
Maxwellsche Doppelplatte



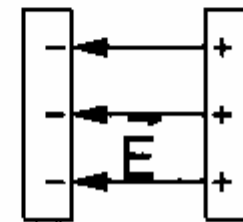
a)



b)

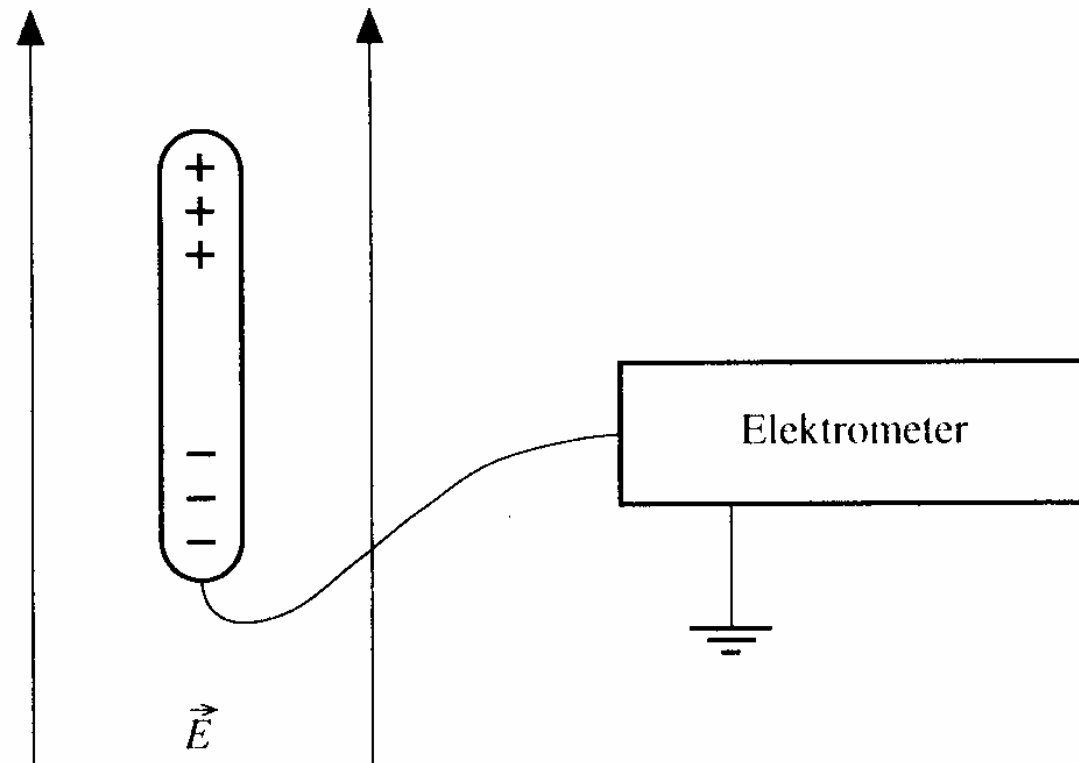


c)

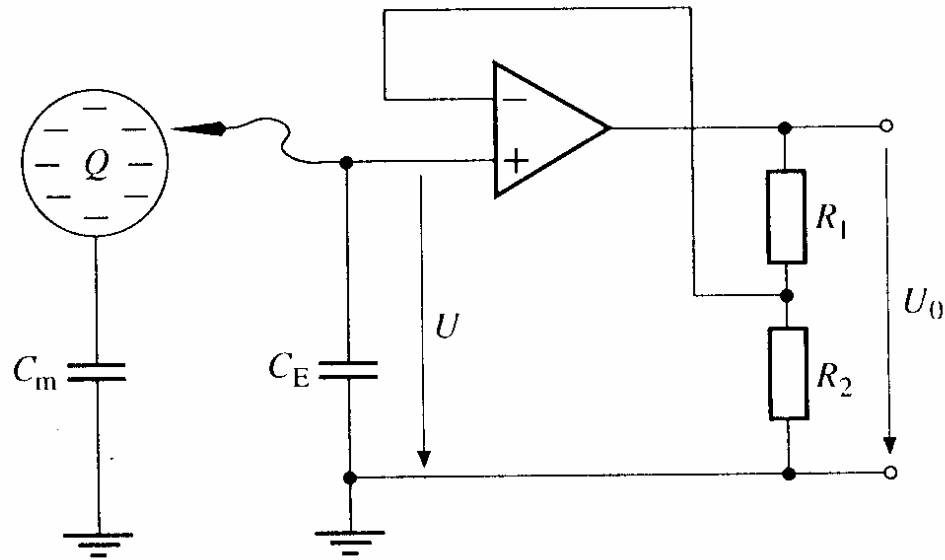




Potentialsonde



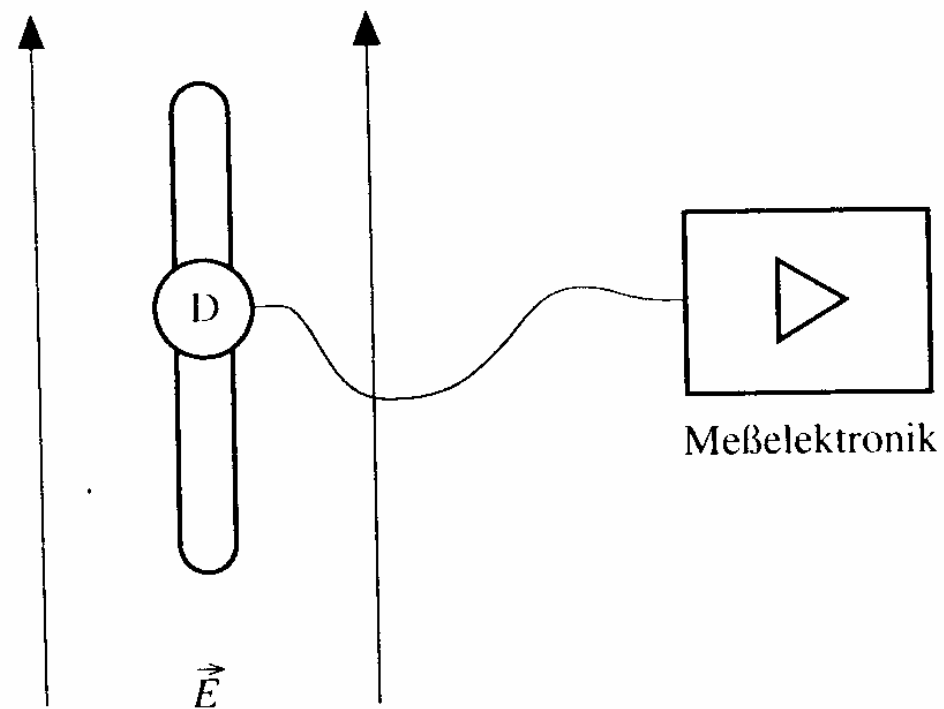
Ladungsmessung mit Elektrometer



$$\frac{Q_E}{Q} = \frac{Q_e}{Q_E + Q_m} = \frac{1}{1 + \frac{C_m}{C_E}}$$



Feldstärkemessung mit Dipolantenne





Messantennen

(Selektive Messung, EMV)



Messung der elektrischen Feldstärke

Antennen als Sonden bzw. Wandler:

Elektrisches Feld influenziert Ladungsverschiebung in Leitern.

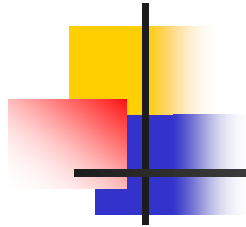
Zusammenhang zwischen

Feldstärke und Leerlaufklemmspannung:

$$h_{\text{eff}} = \frac{|\underline{U}_0|}{|\underline{E}_{\text{St}}|} \quad .$$



effektive Antennenlänge



Charakterisierung von Antennen

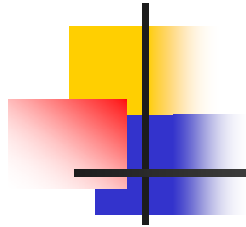
Antennenfaktor

$$AF = \frac{|\underline{E}_{St}|}{|\underline{U}_{St}|}$$

Übertragungsmass,
Umwandlungsmass

$$AF_{dB} = 20 \lg \frac{|\underline{E}_{St}|}{|\underline{U}_{St}|}$$

(messtechnisch im Fernfeld ermittelt, Kalibrierkurven)



Messung von (Stör-) Feldstärken

$$E_{\text{St dB}\mu\text{V/m}} = U_{\text{St dB}\mu\text{V}} + A F_{\text{dB}}$$

$$\frac{E}{H} = 377 \Omega$$

$$H_{\text{St dB}\mu\text{A/m}} = E_{\text{St dB}\mu\text{V/m}} + 52 \text{ dB}$$

Antennenfaktor liegt typisch zwischen 0 dB ... 60 dB

empfindliche Antenne

unempfindliche Antenne

Messdipol für 433 MHz



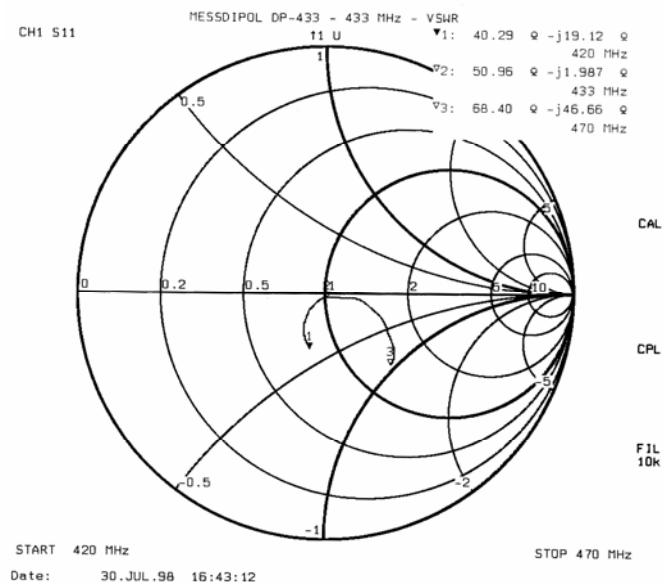
Rolf Heine
Hochfrequenztechnik

Meßdipol Typ DP-433

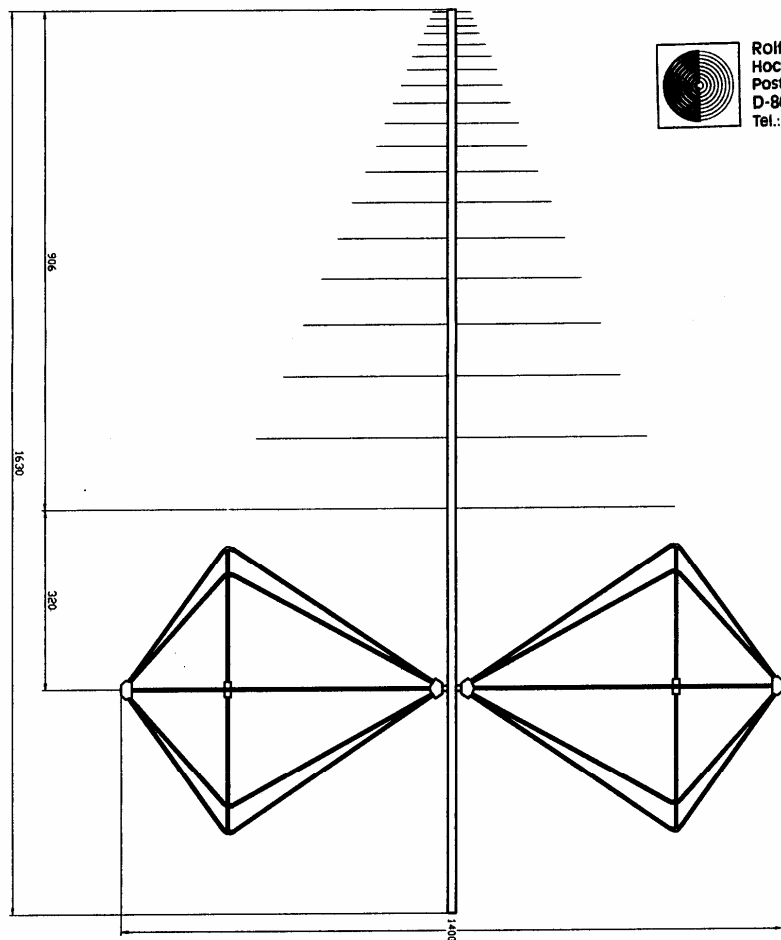
Der Meßdipol DP-433 ist für die Feldstärkemessung im ISM Bereich 433 MHz vorgesehen. Mit dem Dipol können Feldstärken von Funkanlagen und Funkstörfeldstärken von ISM Geräten gemessen werden. Die Antenne kann nach Öffnen der Halterklemmung horizontal und vertikal polarisiert werden. Dazu benötigt man den mitgelieferten Sechskant-Steckschlüssel, mit dessen Hilfe die Schrauben der Klemme gelockert werden, um dann die Antenne zu drehen.

Technische Daten:

Frequenzbereich	432.8 ... 434.4 MHz
Gewinn	1.95 dBi
Antennenfaktor (3m Abstand)	22.4 dB/m
zul. Sendeleistung	500 Watt CW
VSWR	siehe Meßkurve
Symmetrierung	Ferrit-Stromwandlersymmetrierung
Anschluß	50 Ohm Koax-N
Vermessung	SAE-ARP-958
Mastaufnahme	5/8" Innengewinde, passend für Stativ ST-1



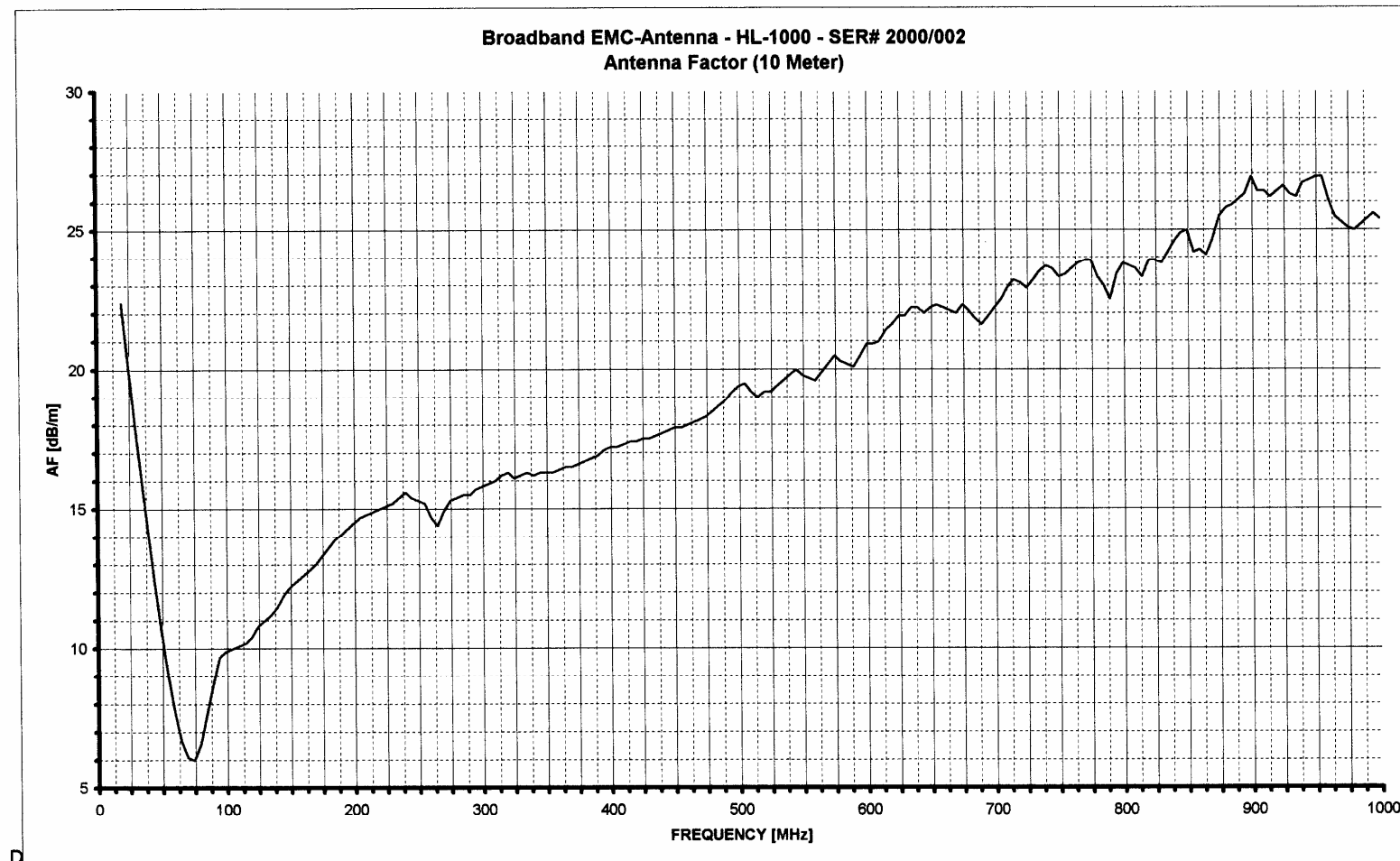
Breitband-Hybridantenne



Rolf Heine
Hochfrequenztechnik
Posthof 4
D-86609 Donauwörth
Tel.: 0906/24 42 30 Fax: 24 42 32

20 MHz ... 1000 MHz

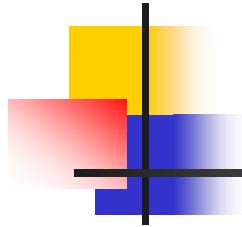
Antennenfaktor, Übertragungsmass



UNCERTAINTY: 1.5 dB
TEST SITE: SAE-ARP-958
SIGNATURE: 

Breitbandige Feldstärkemessung (Personenschutz, EMVU)

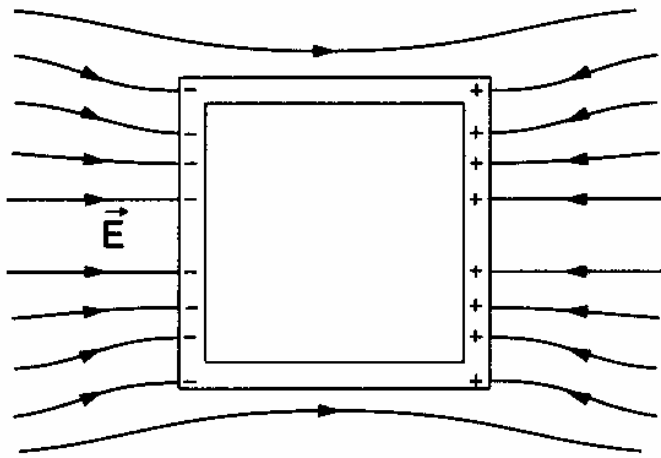




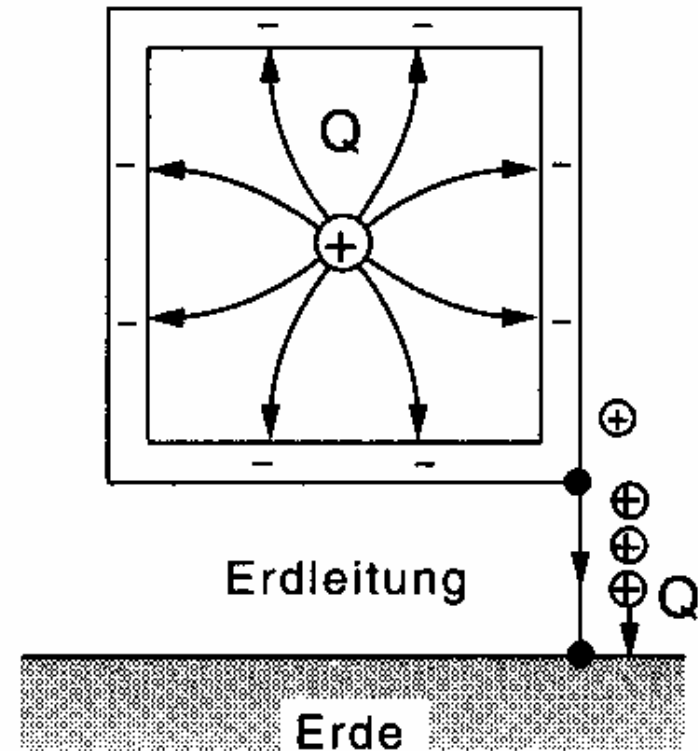
Elektrostatische Abschirmung

- Abschirmung gegen äußeres elektrostatisches Feld: **Influenz**
- Elektrisch leitender Körper ist im Innern feldfrei, weil sich elektrische Ladungen auf seiner Oberfläche so verschieben, daß sich die elektrische Feldstärke in seinem Inneren aufhebt.

Faradayscher Käfig

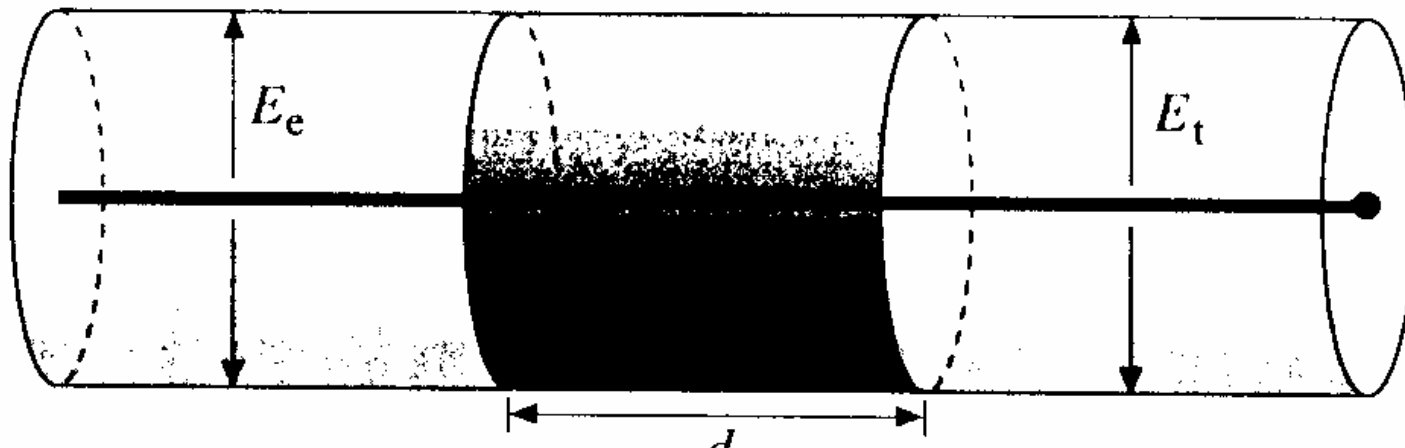


Innerer Raum ist feldfrei

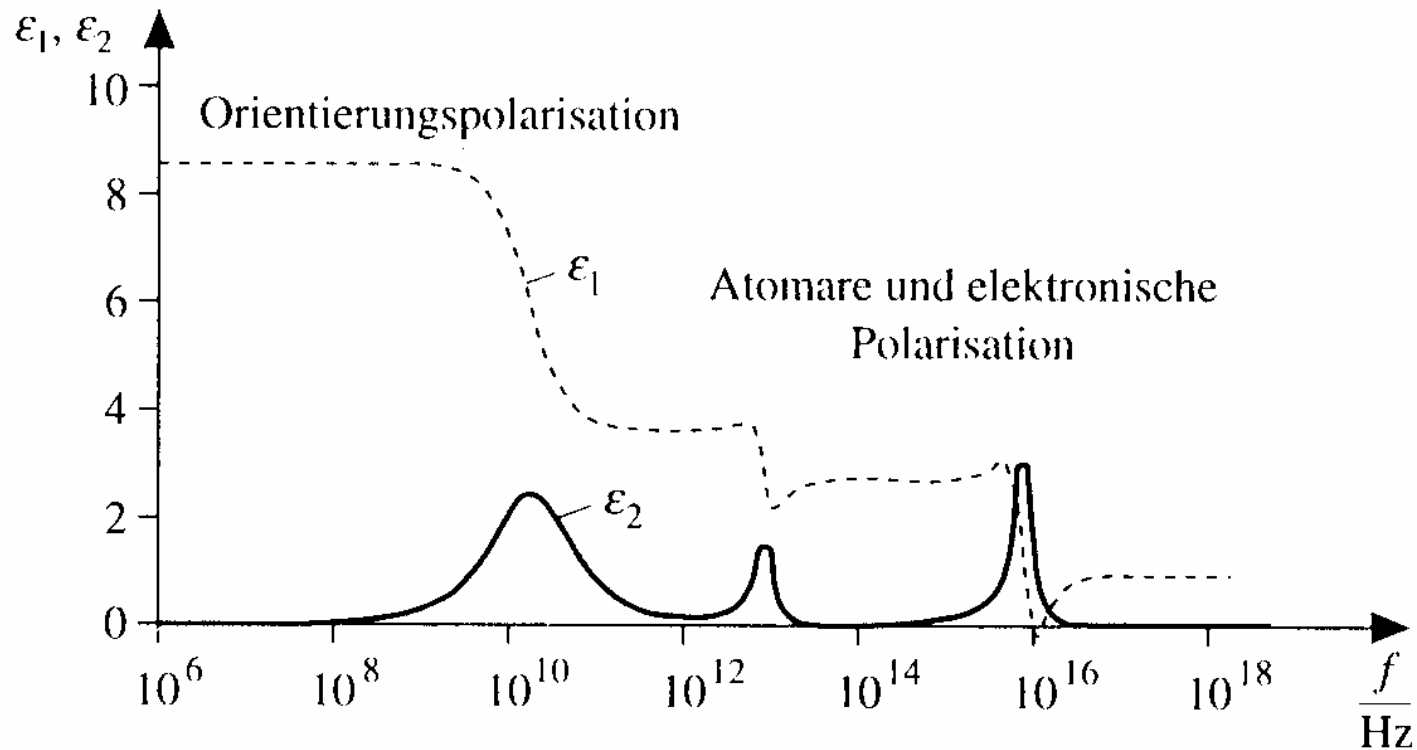


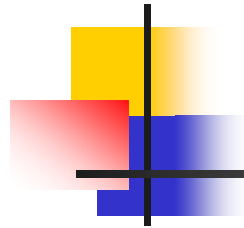
Äußerer Raum ist feldfrei

Materialmessung im Koaxialkabel



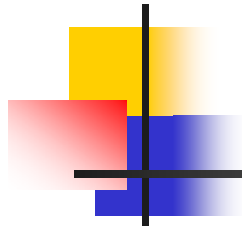
Typisches dielektrisches Verhalten





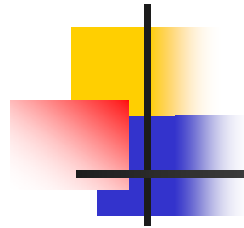
Feldgeneratoren zur Kalibrierung

- Plattenkondensator
- TEM – Zellen
- GTEM – Zellen
- Antennen



Magnetische Feldgrößen

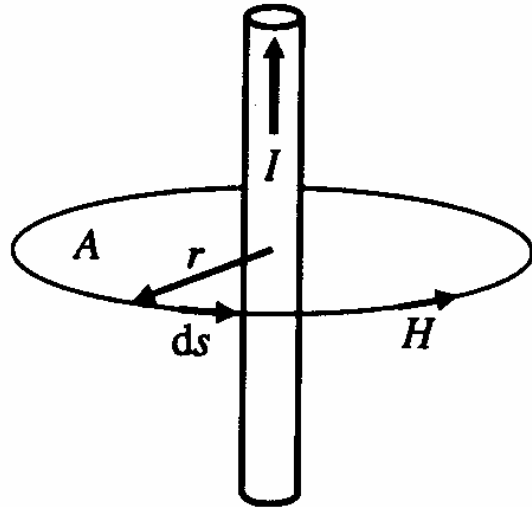
- Magnetische Feldstärke
- Magnetische Flußdichte
- Permeabilität, Hysteresekurve
- Magnetische Spannung, magnetischer Fluß
- Messung magnetischer Größen



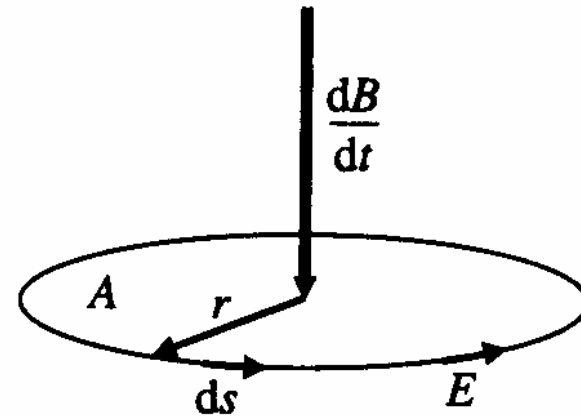
Magnetische Feldgrößen

- Biomagnetische Felder ca. 10^{-12} T
- Erdmagnetfeld ca. 10^{-6} T
- Technische Magnetfelder ca. 1 T
- Hochmagnetfeld-Labors bis zu 30 T

Magnetische Feldstärke und magnetische Induktion

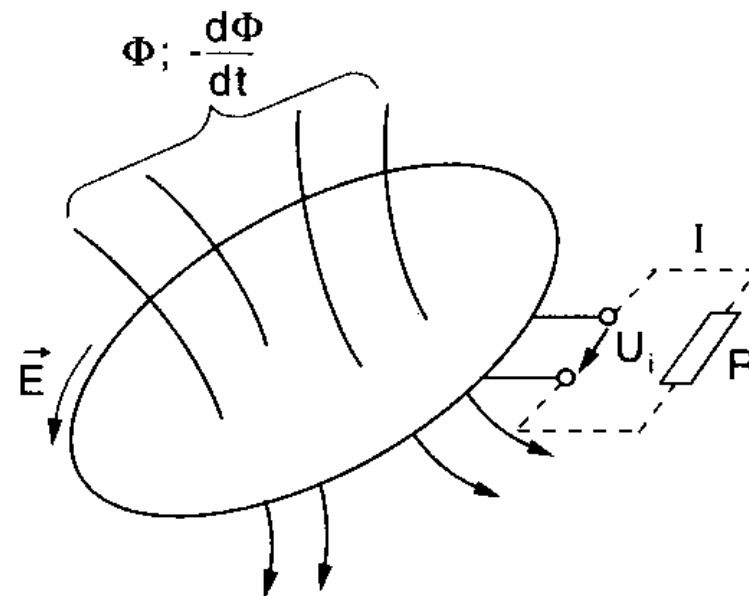
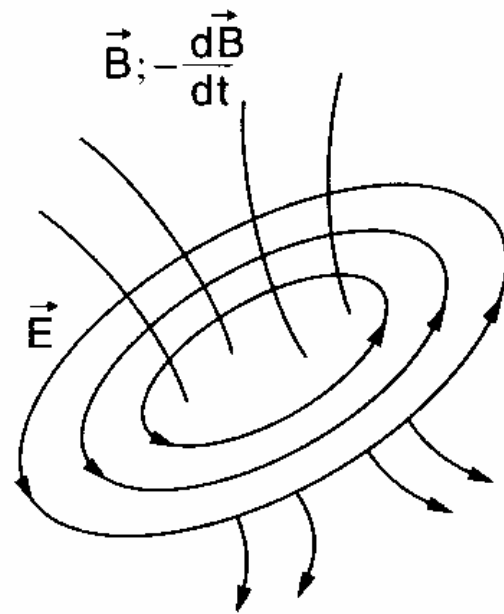


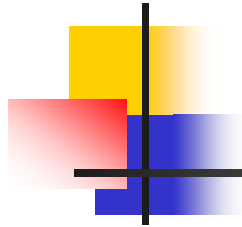
Ein elektrischer Strom erzeugt
ein magnetisches Wirbelfeld



Ein zeitlich sich änderndes
Magnetisches Feld erzeugt
ein elektrisches Wirbelfeld

Allgemeines Induktionsgesetz





Lenzsche Regel

- Der durch Induktion verursachte Strom ist immer so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Änderung des verursachenden Feldes entgegenwirkt.



Berechnung der induzierten Spannung

Die Änderung des magnetischen Flusses, der eine Leiterschleife durchsetzt, kann in zweierlei Weise erfolgen: Zum einen, indem sich die Flußdichte zeitlich ändert, und zum anderen, indem sich die umschlossene Fläche ändert:

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} (\vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{A}}) = - \left(\vec{\mathbf{B}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t} + \vec{\mathbf{A}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \right)$$



Beispiel

Eine Spule mit $N = 5$ Windungen wird mit $\hat{B} = 1.5\text{T}$; 50Hz durchsetzt. Ihr Querschnitt beträgt 200mm^2 (siehe Abb. 2.39 b).

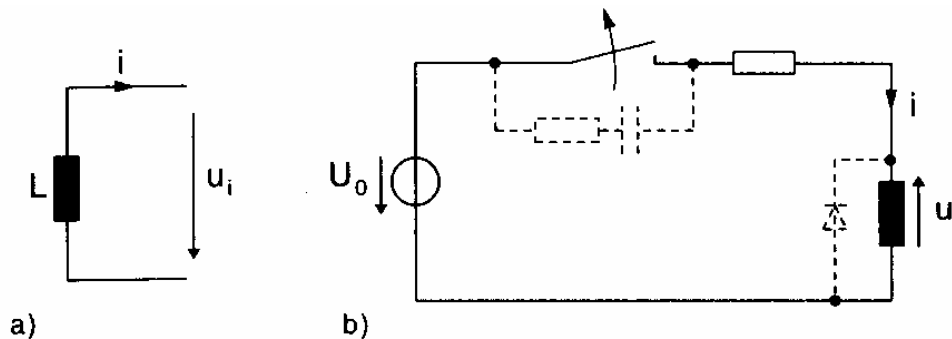
Welchen Scheitelwert hat die Spannung U_i ?

$$U_i = -N \cdot \left(\underbrace{\vec{B} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}}_{=0} + \vec{A} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -N \cdot A \cdot \frac{d(\hat{B} \cdot \sin \omega t)}{dt} = -N \cdot \hat{B} \cdot A \cdot \omega \cos \omega t \Rightarrow \hat{U}_i = 0.47\text{V}$$

Selbstinduktion

Mit $u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ und $L \cdot I = N \cdot \Phi$ gilt:

$$u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

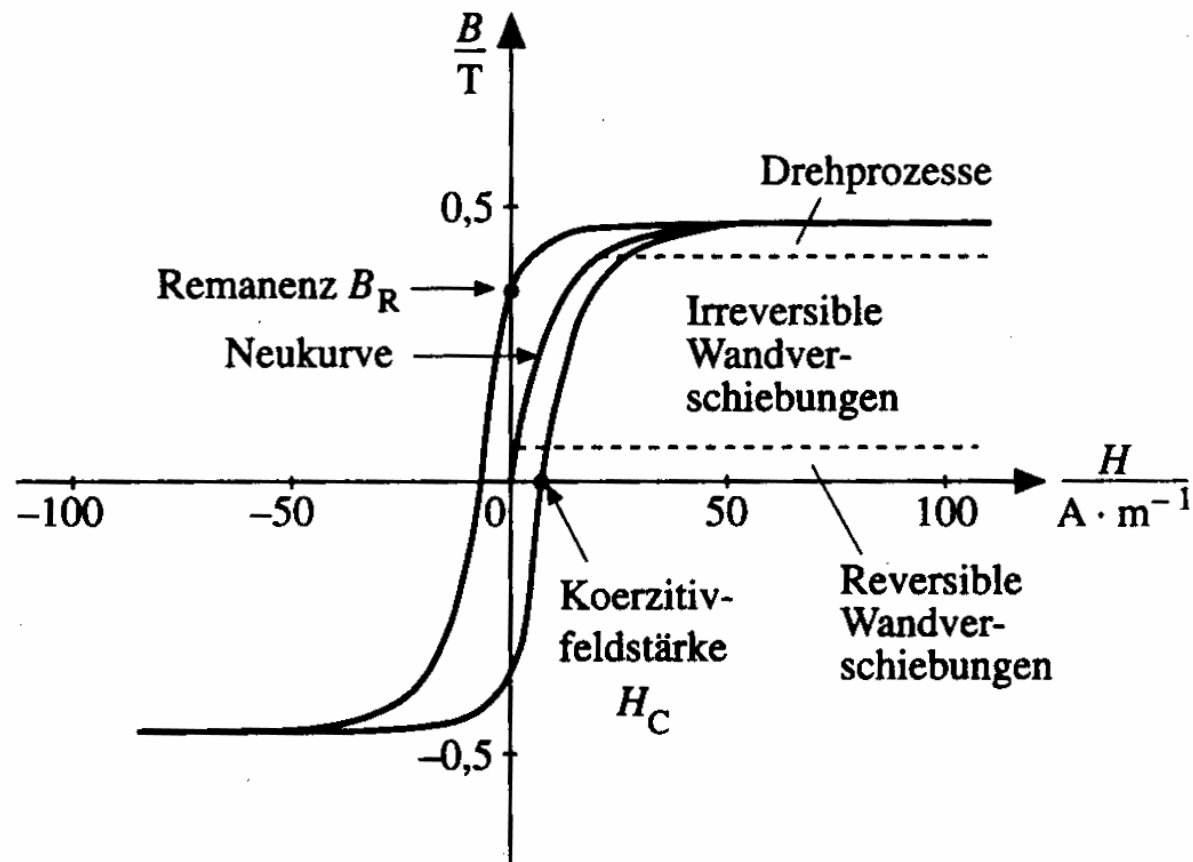




Magnetische Einheiten im SI- und cgs-System

Größe	Formelzeichen	Einheit		Umrechnung
		SI	cgs	
Magnetische Flußdichte (Induktion)	B	T (Tesla)	G (Gauß)	$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{ G}$ $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$
Magnetische Polarisierung	J	T	G	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$
Magnetische Feldstärke	H	A/m	Oe (Oersted)	$1 \text{ kA/m} = 12,57 \text{ Oe}$ $1 \text{ kOe} = 79,5 \text{ kA/m}$ $(\approx 80 \text{ kA/m})$
Maximale magnetische Energiedichte	$(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H})_{\max}$	J/m ³	G · Oe	$1 \text{ kJ/m}^3 = 0,1257 \text{ MGOe}$ $1 \text{ MGOe} = 7,95 \text{ kJ/m}^3$ $(\approx 8 \text{ kJ/m}^3)$
Induktionskonstante	μ_0	$\frac{\text{T}}{\text{A/m}}$	$\frac{\text{G}}{\text{Oe}}$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{A/m}}$ $= 1 \text{ G/Oe}$

Hysteresekurve mit Neukurve



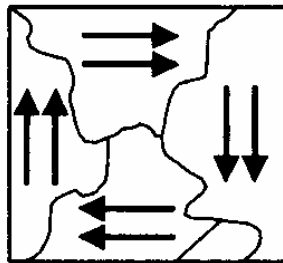


Einteilung magnetischer Materialien nach Permeabilität μ und magnetischer Polarisation J

Stoffmagnetismus		
$\mu_r < 0$	$J < 0$	diamagnetisch
$\mu_r > 0$	$J > 0$	paramagnetisch
$\mu_r \gg 0$	$J \gg 0$	ferromagnetisch

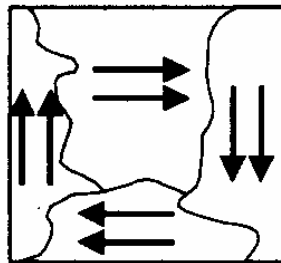
Bloch - Wände

Bloch-Wand-Verschiebungen



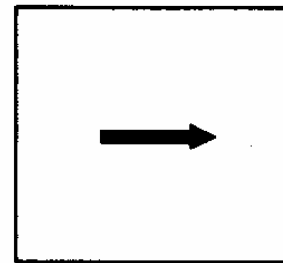
Bloch-Wand

$$H = 0$$

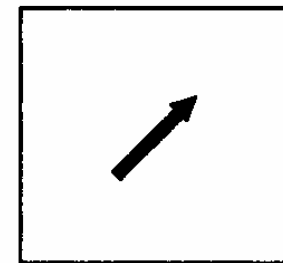


$$H > 0$$

Drehprozeß

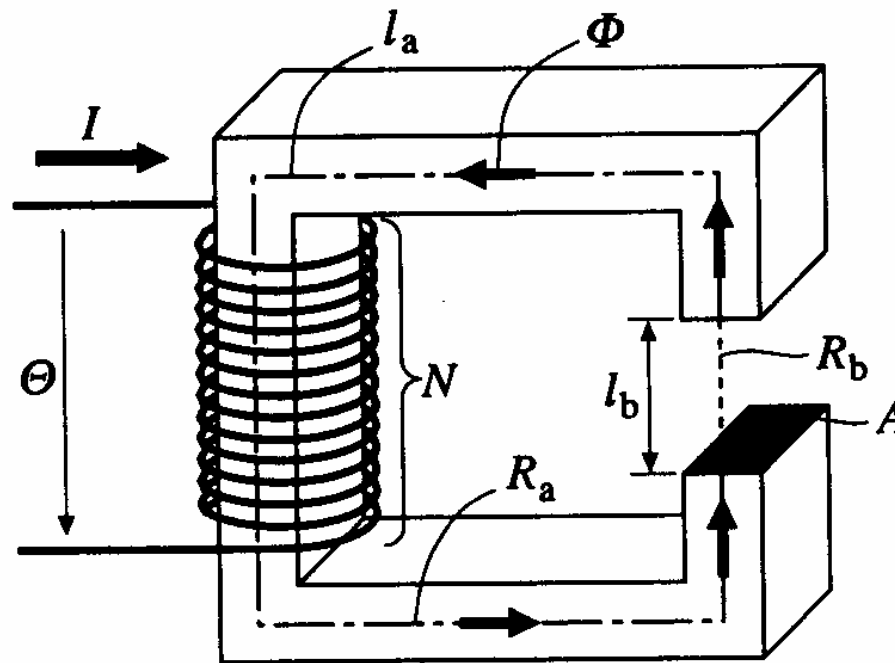


$$H \gg 0$$

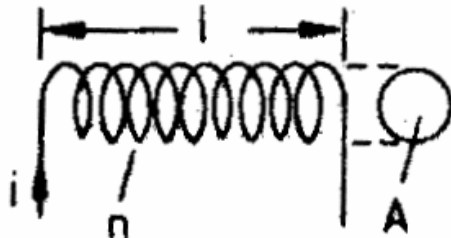
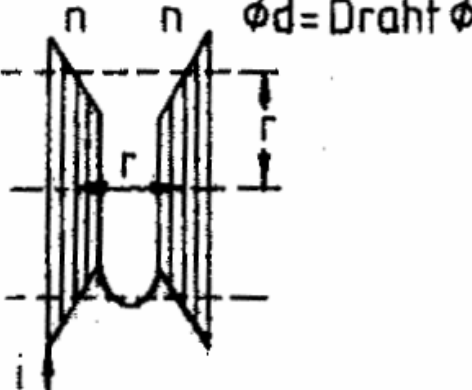
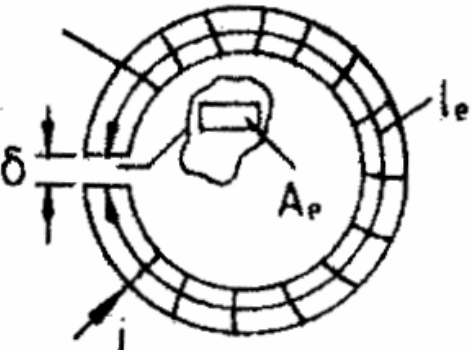


$$H = H_s$$

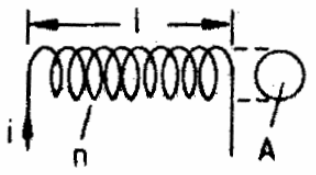
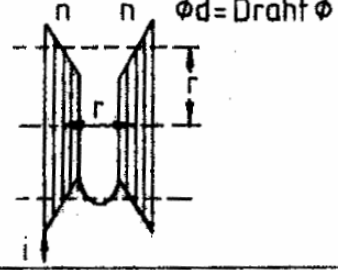
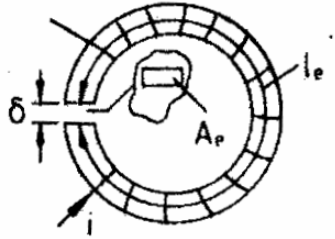
Magnetischer Kreis



Erzeugung magnetischer Felder

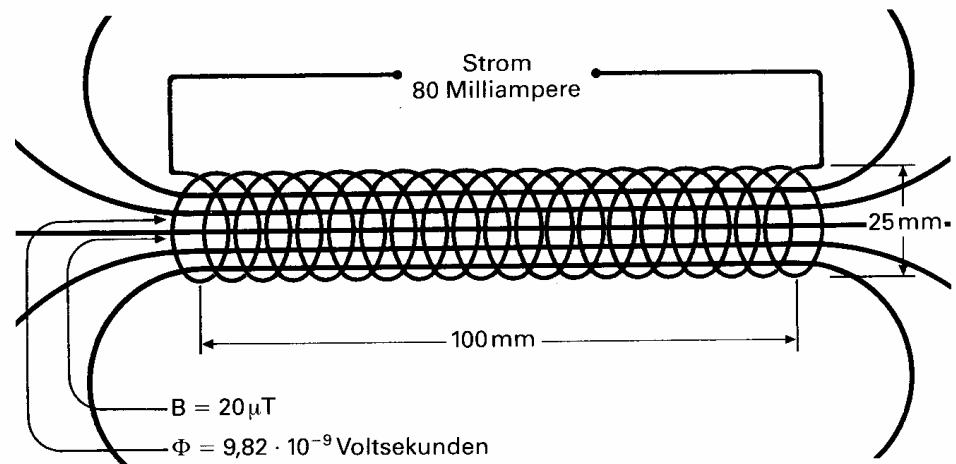
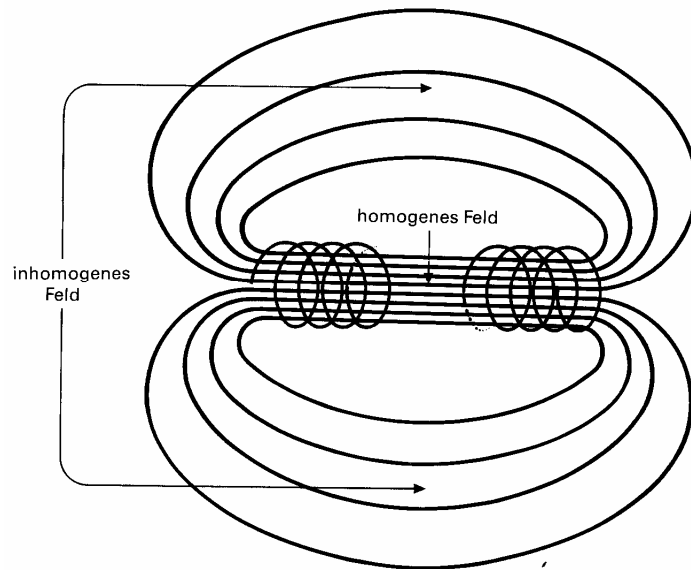
Langgestreckte Spule	Helmholtz-Spule	Ringkern-Spule
		
$\hat{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot \hat{I}}{l}$	$\hat{B} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{n \cdot \hat{I}}{r}$	$\hat{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot \hat{I}}{\delta + l_e / \mu_r}$

Erzeugung magnetischer Felder

Langgestreckte Spule	Helmholtz-Spule	Ringkern-Spule
		
$\hat{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot \hat{I}}{l}$	$\hat{B} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{n \cdot \hat{I}}{r}$	$\hat{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot \hat{I}}{\delta + l_e / \mu_r}$
$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$	$L = 2 \cdot r \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot \left(\ln \frac{2r}{d} + 0,4\right)$	$L = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A_e}{\delta + l_e / \mu_r}$
$L \cdot \hat{I} = \frac{\hat{B}^2 \cdot A \cdot l}{\mu_0 \cdot \hat{I}}$	$L \cdot \hat{I} = \frac{2r^3 \hat{B}^2 \left(\frac{5}{3}\right)^3 \left(\ln \frac{2r}{d} + 0,4\right)}{\mu_0 \cdot \hat{I}}$	$L \cdot \hat{I} = \frac{\hat{B}^2 \cdot A_e (\delta + l_e / \mu_r)}{\mu_0 \cdot \hat{I}}$
Für $A = A_e = 51 \text{ mm}^2$; $l = l_e = 60 \text{ mm}$; $\delta = 1,7 \text{ mm}$; $r = 8 \text{ mm}$; $\mu_r = 4000$; $d = 0,5 \text{ mm}$; $\hat{B} = 40 \text{ mT}$; $\hat{I} = 3 \text{ A}$		
$L \cdot \hat{I} = 1,3 \cdot 10^{-3} [\text{AH}]$	$L \cdot \hat{I} = 3,3 \cdot 10^{-3} [\text{AH}]$	$L \cdot \hat{I} = 36 \cdot 10^{-6} [\text{AH}]$
$\hat{U}_L = 4,08 \text{ kV}$	$\hat{U}_L = 10,36 \text{ kV}$	$\hat{U}_L = 113 \text{ V}$

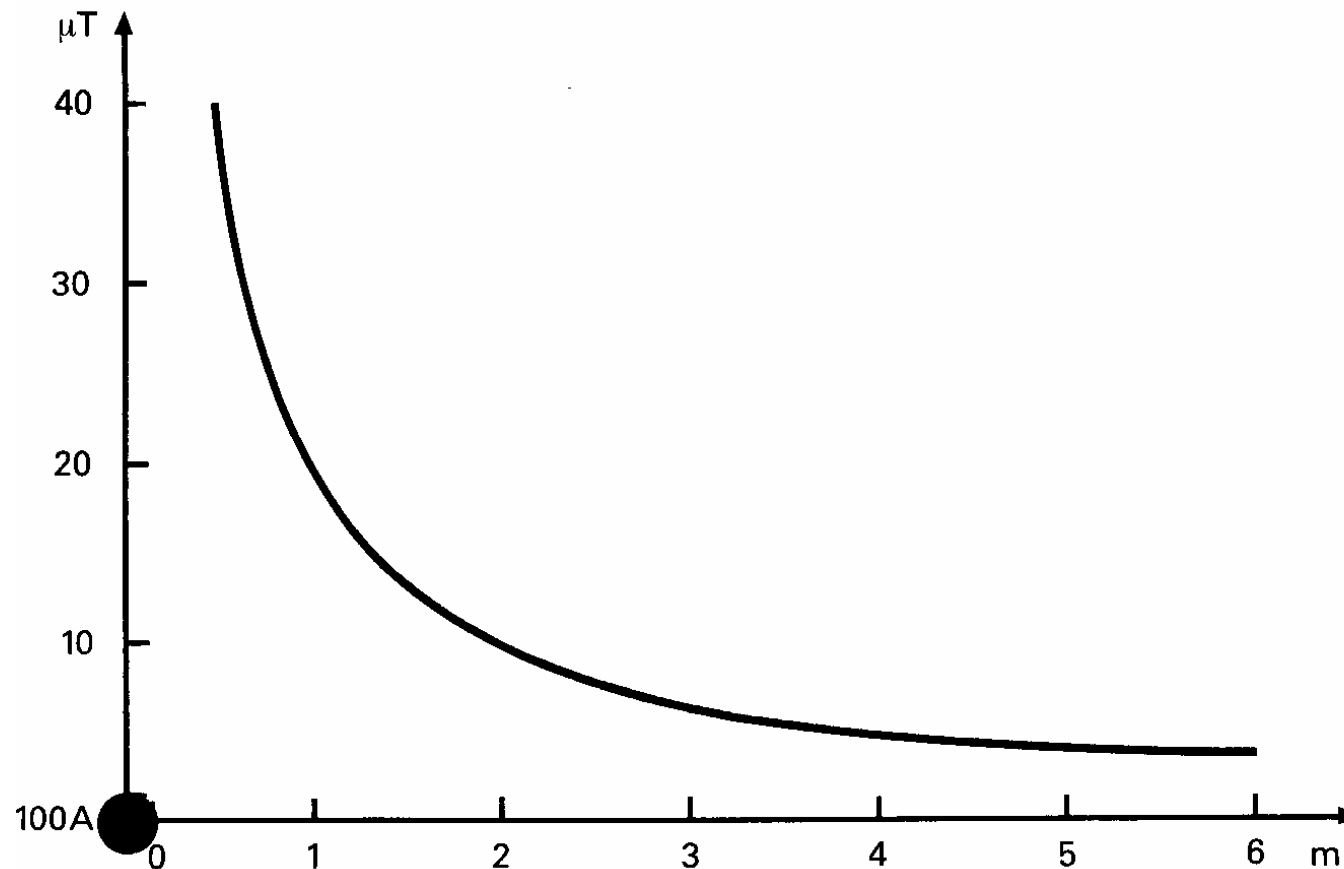
Zielvorgabe,
Beispiel

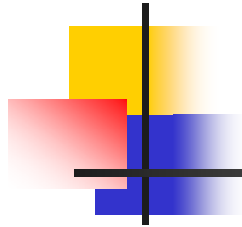
Magnetfeld einer Zylinderspule



Reichweite eines Magnetfeldes

(verursacht durch einen Gleichstrom von 100 A)

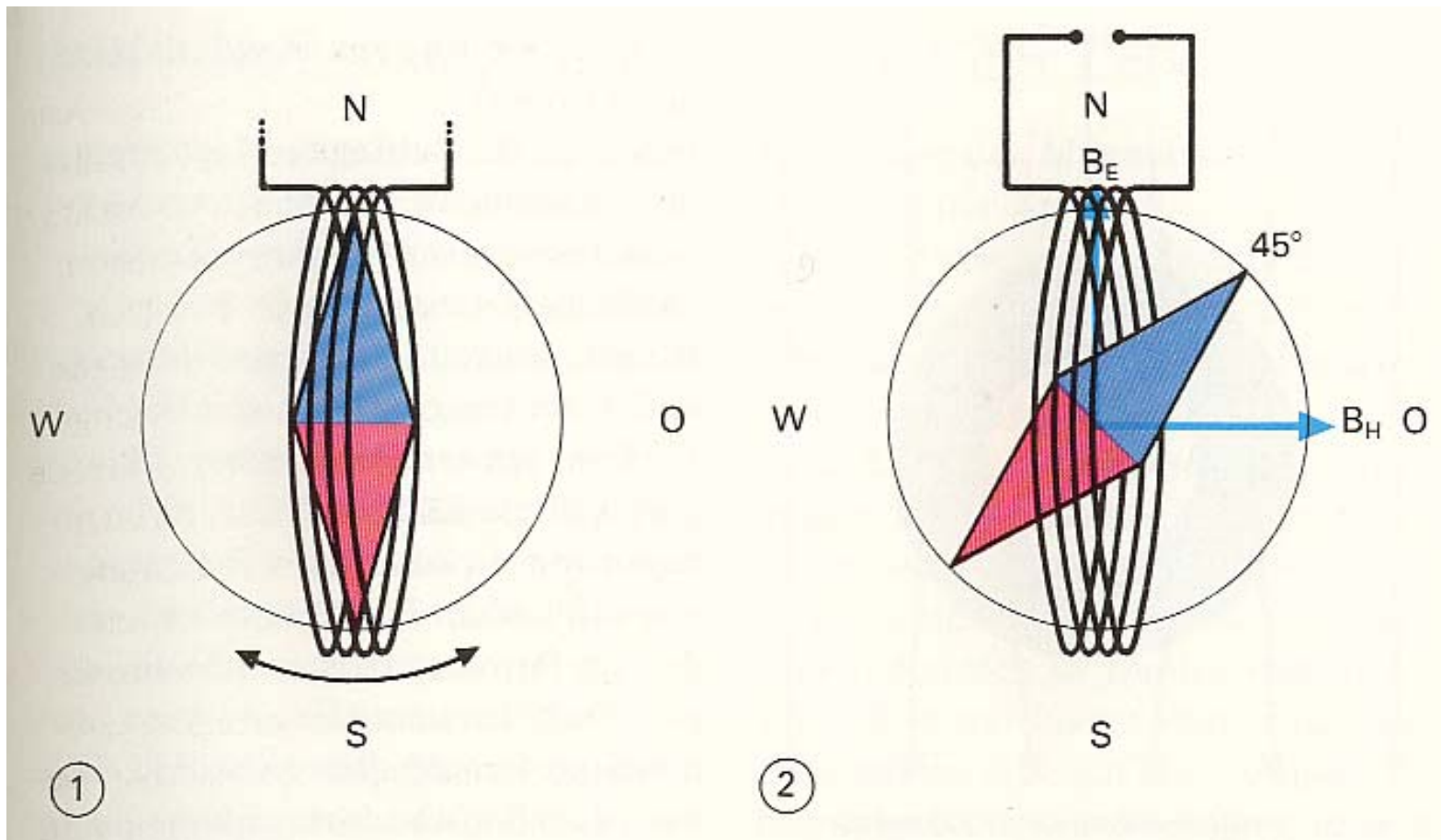




Erdmagnetisches Feld

- Einfachste Anordnung zur Messung der Horizontalkomponente: Kompassnadel und Spule
- Tangentenbussole
- Auslenkung der Magnetnadel um 45° , dann sind B_E und B_H gleich
- Geographische Lage von Deutschland:
 B_E ca. 20 Mikrottesla

Tangentenbussole



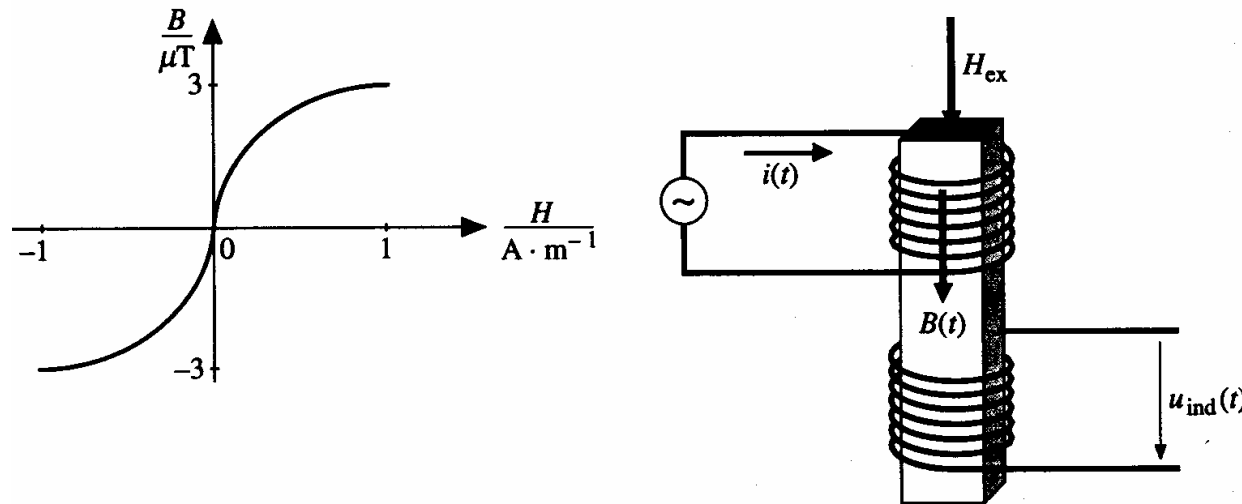


Messung mittels Induktionsspule

- Gleichfelder
- (Hochfrequente) Wechselfelder
 - Kleine Spule als Messsonde mit $2\pi rN \ll \lambda$
 - Kurzschluss-Ring mit Stromwandler

$$U_i = 2\pi f A N B_{normal}$$

Kernsondenmagnetometer (Fluxgate Magnetometer)



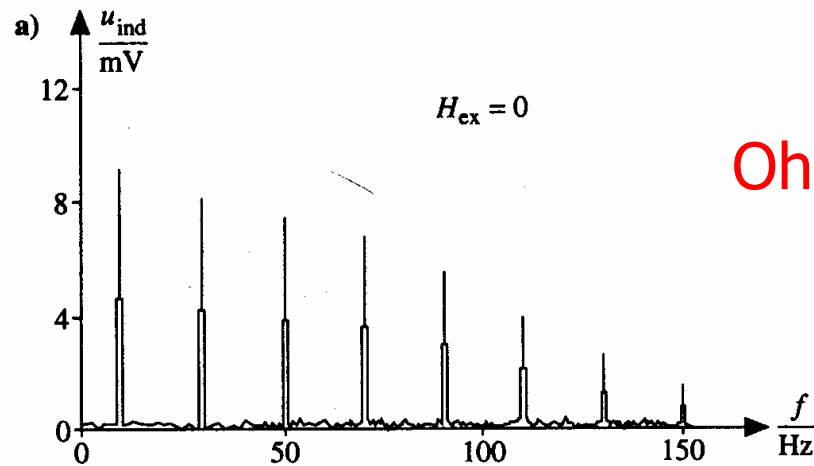
$$H(t) = H_{ex} + H_0 \cdot \sin(\omega t).$$

$$B(t) \sim \mu_0 [H_{ex} \cdot \sin(\omega t) + (H_{ex} \cdot H_0 \cdot \sin(\omega t))^3].$$

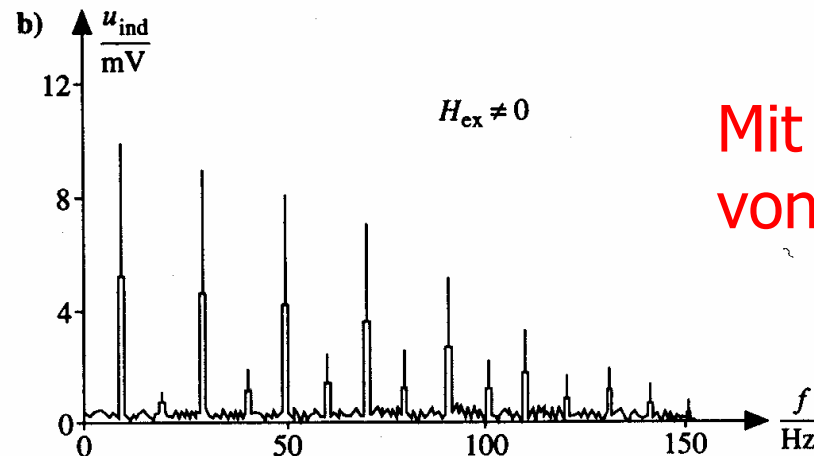
$$u_{ind}(t) \sim \left[H_0 \cdot \left(1 + 3H_{ex}^2 + \frac{3}{4}H_0^2 \right) \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \right. \\ \left. + 3H_{ex}H_0^2 \cdot \omega \cdot \sin(2\omega t) - \frac{3}{4}H_0^3 \cdot \omega \cdot \cos(3\omega t) \right]$$

Kernsondenmagnetometer:

Harmonische Analyse der Sekundärspannung

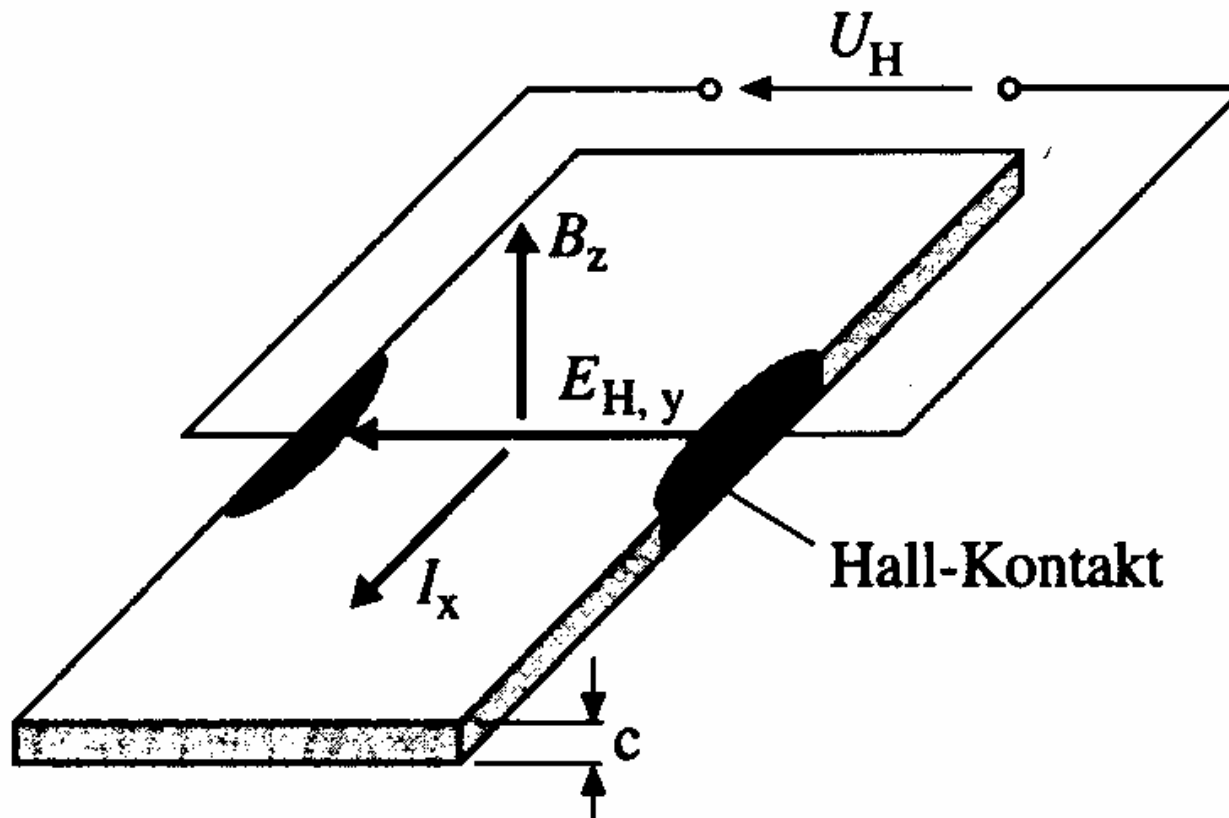


Ohne magnetisches Gleichfeld



Mit magnetischem Gleichfeld
von 4,4 A/m

Hall - Element





Hall - Effekt

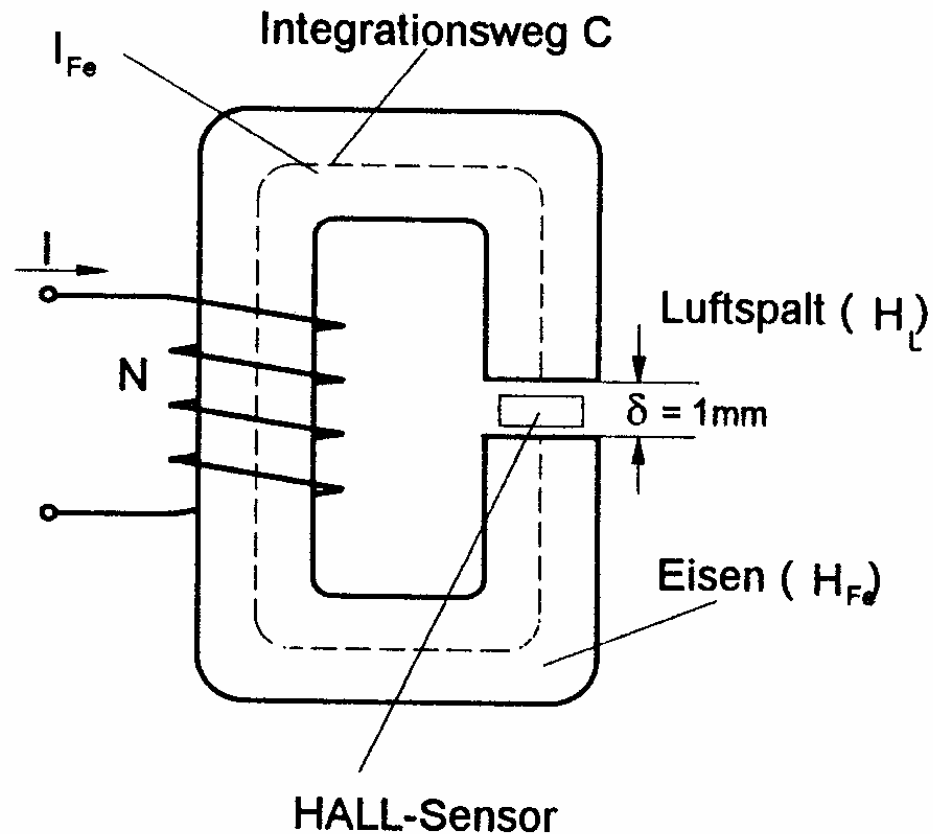
$$U_{Hall} \propto B \cdot I_{steuer} \cdot \frac{1}{c}$$



Hall – Koeffizienten ausgewählter Materialien

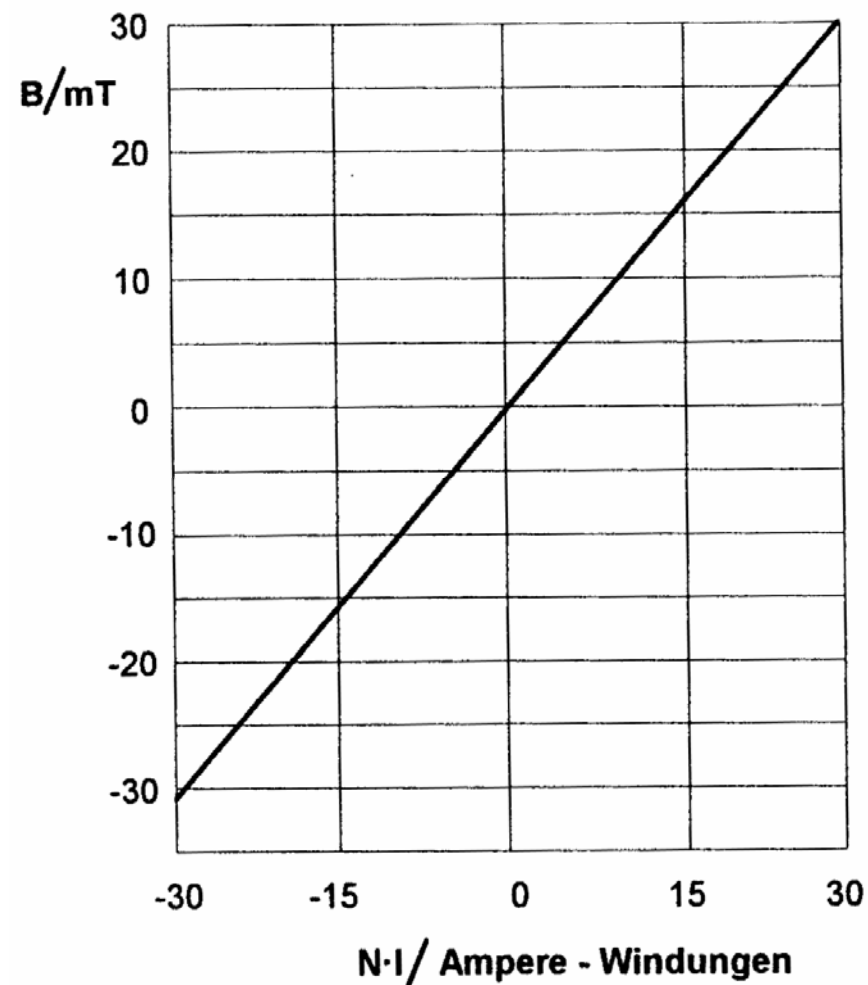
Material	n in cm^{-3}	R_H in cm^3/As
Ge	$2 \cdot 10^{13}$	310000
Si	10^{15}	6200
GaAs	10^{15}	6200
InAs	$5 \cdot 10^{16}$	124
InSb	10^{17}	62

Messung der magnetischen Flußdichte im Luftspalt eines Eisenkernes

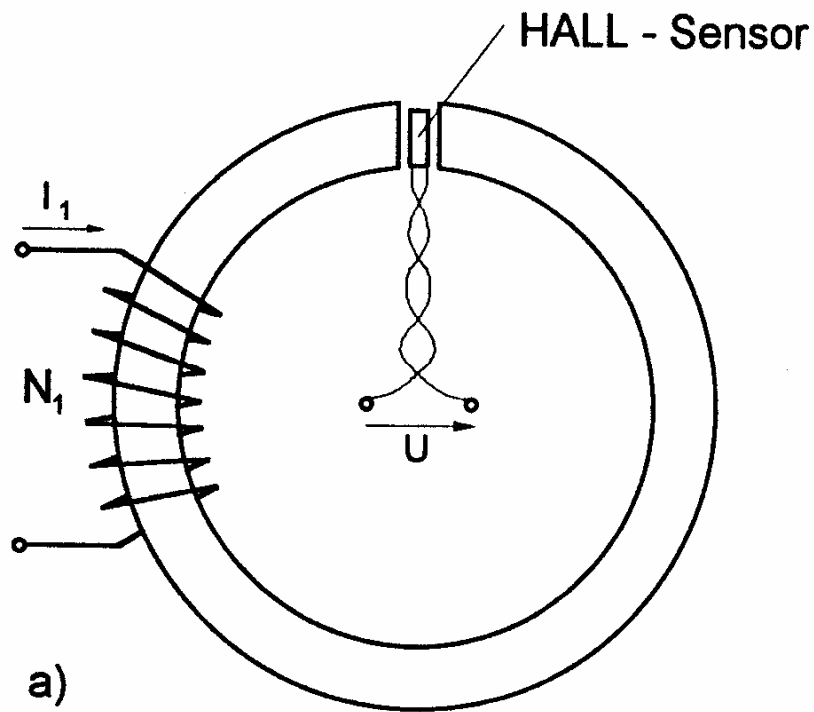




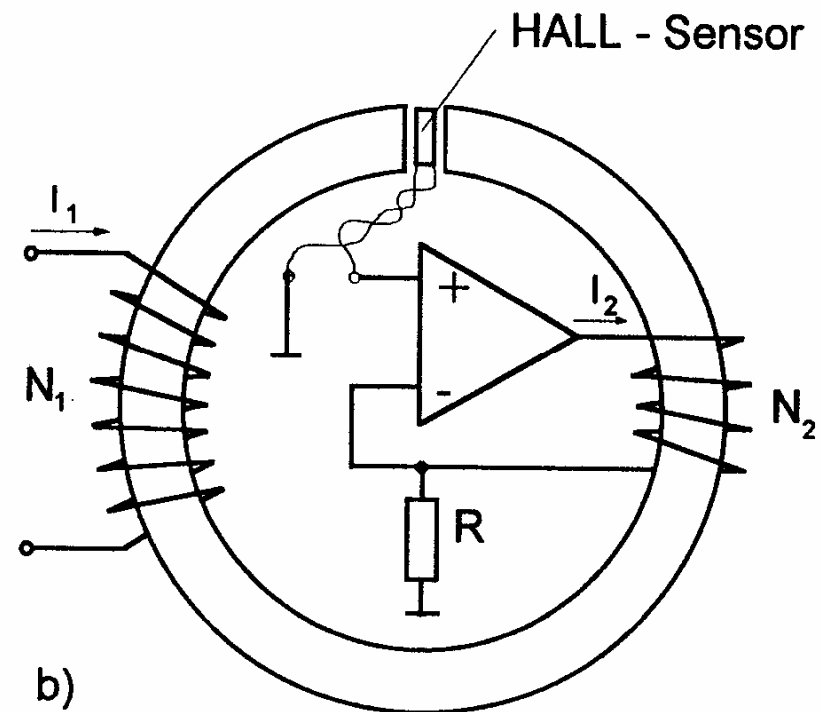
Linearer Zusammenhang zwischen Stromstärke I (Durchflutung $N \cdot I$) und der Flußdichte B



Strommessung mit Hall - Sonde

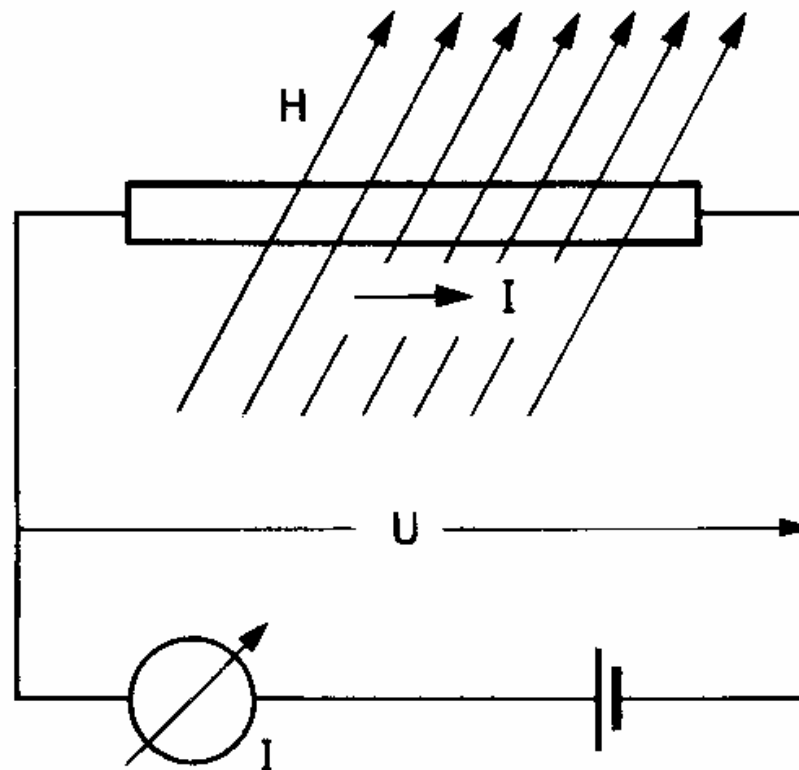


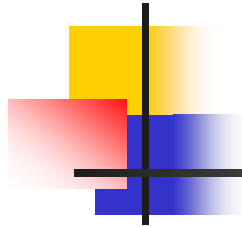
Direkte Messung



Kompensationsmessung

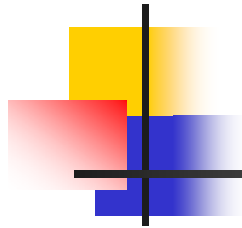
Nachweis des magnetoresistiven Effektes





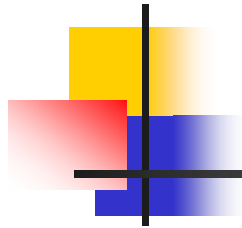
Einfacher magnetoresistiver Sensor (1)

- Schmäler, sehr dünner Streifen aus ferromagnetischem Material
- Nullpunkt (ohne Feld) ist nicht exakt reproduzierbar
- Hystereseeffekte
- Vorzugsrichtung der inneren Magnetisierung → „leichte“ Achse



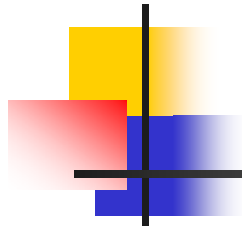
Einfacher magnetoresistiver Sensor (2)

Ohne äußeres Feld liegt jetzt der Zustand vor, in dem der Sensorstreifen seinen größten, mit R_0 bezeichneten Widerstand hat. Jedes in Y-Richtung wirkende Feld H_Y führt zu einer Drehung der Magnetisierung aus der X-Achse und hat eine entsprechende Widerstandsabnahme zur Folge. Der kleinste Widerstand wird bei einer Drehung in die Y-Richtung, also um 90° , erreicht. Da der Widerstand auf Felder in der Y-Richtung reagiert, nennt man diese auch die „empfindliche“ Richtung.



Einfacher magnetoresistiver Sensor (3)

Für eine Drehung um 90° in die Y-Richtung wird ein Magnetfeld H_Y von der Mindeststärke H_0 benötigt. H_0 ergibt sich aus der Summe von zwei Feldern, und zwar dem Anisotropiefeld H_k und dem Entmagnetisierungsfeld H_d . H_k wird zur Überwindung der einaxialen Anisotropie, H_d zur Überwindung der geometrieabhängigen Entmagnetisierung benötigt.



Einfacher magnetoresistiver Sensor (3)

Für eine Drehung um 90° in die Y-Richtung wird ein Magnetfeld H_Y von der Mindeststärke H_0 benötigt. H_0 ergibt sich aus der Summe von zwei Feldern, und zwar dem Anisotropiefeld H_k und dem Entmagnetisierungsfeld H_d . H_k wird zur Überwindung der einaxialen Anisotropie, H_d zur Überwindung der geometrieabhängigen Entmagnetisierung benötigt.



Einfacher magnetoresistiver Sensor (4a)

Verwendet man für die ferromagnetische Schicht z. B. Permalloy (80% Fe, 20% Ni), dann gilt für den Betrag der Anisotropiefeldstärke $H_k \approx 250 \text{ A/m}$. Die Entmagnetisierungsfeldstärke H_d hingegen errechnet sich aus



Einfacher magnetoresistiver Sensor (4b)

$$H_d = \frac{d}{b} \cdot \frac{J_s}{\mu_0} . \quad (1)$$

Hierin bedeuten

d = Dicke des Sensorstreifens,

b = Breite des Sensorstreifens,

J_s = Sättigungspolarisation; für Permalloy gilt $J_s \approx 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$,

μ_0 = magnetische Feldkonstante (Induktionskonstante);

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A m}} .$$

Durch entsprechende Wahl der Abmessungen d und b läßt sich H_d und damit über H_0 die für eine Drehung der Magnetisierung um 90° erforderliche Mindestfeldstärke in einem großen Bereich einstellen. (In allen Fällen wird vorausgesetzt, daß für die Länge l des Streifens $l \gg b$ gilt.)



Einfacher magnetoresistiver Sensor (5)

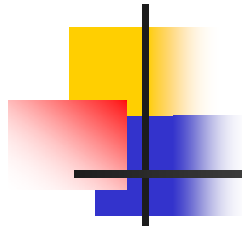
Bezeichnet man den Winkel zwischen der sich bei einem bestimmten Wert für H_Y einstellenden Magnetisierungsrichtung und der Richtung des Stroms mit Θ , dann ergibt sich die Abhängigkeit des Sensorwiderstands R vom Winkel Θ aus

$$R = R_0 - \Delta R_{\max} \sin^2 \Theta . \quad (2)$$

Hierin sind

R_0 = Widerstand des Sensorstreifens für $\Theta = 0$
(größter Widerstandswert),

ΔR_{\max} = maximal mögliche Widerstandsänderung:
 $\Delta R_{\max} = R_0 - R_{\Theta = 90^\circ} .$



Einfacher magnetoresistiver Sensor (6)

Bezeichnet man den Winkel zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Richtung der „leichten“ Achse mit φ , dann gilt für die Abhängigkeit dieses Winkels von der in Y-Richtung wirksamen Feldstärke H_Y

$$\sin \varphi = \frac{H_Y}{H_0} . \quad (3)$$

(H_0 war die Mindestfeldstärke, die zur Drehung der Magnetisierung um 90° erforderlich ist.)



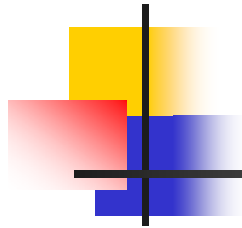
Einfacher magnetoresistiver Sensor (7)

Da im vorliegenden Fall die „leichte“ Achse und der Stromfluß dieselbe Richtung haben, sind die Winkel Θ und φ gleich. Es ergibt sich daher aus den Gleichungen (2) und (3) die Abhängigkeit des Widerstands R von der zu messenden Feldstärke H_Y zu

$$R = R_0 - \Delta R_{\max} \frac{H_Y^2}{H_0^2}.$$

Mit $R_0 - R = \Delta R$ erhält man

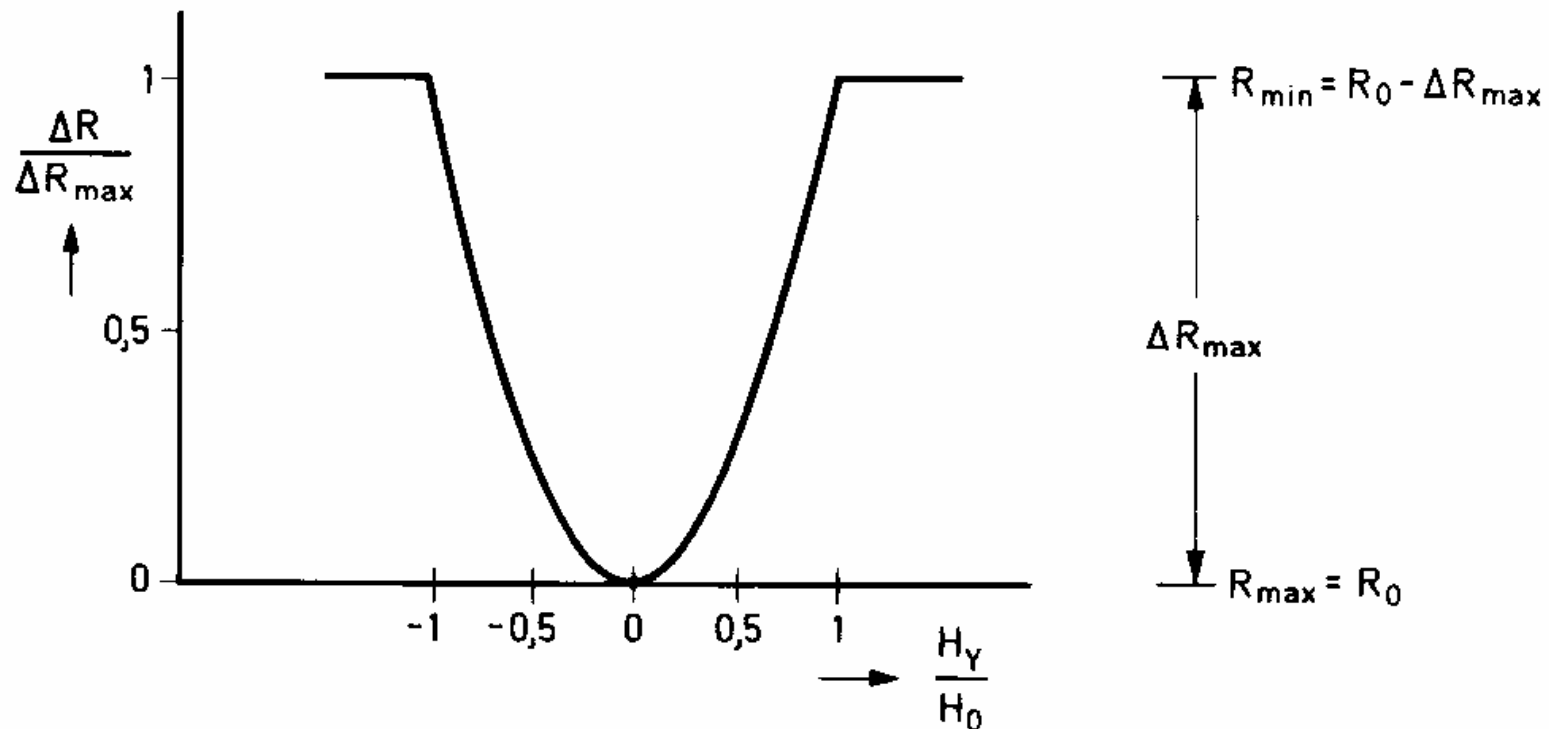
$$\frac{\Delta R}{\Delta R_{\max}} = \frac{H_Y^2}{H_0^2}.$$



Einfacher magnetoresistiver Sensor (8)

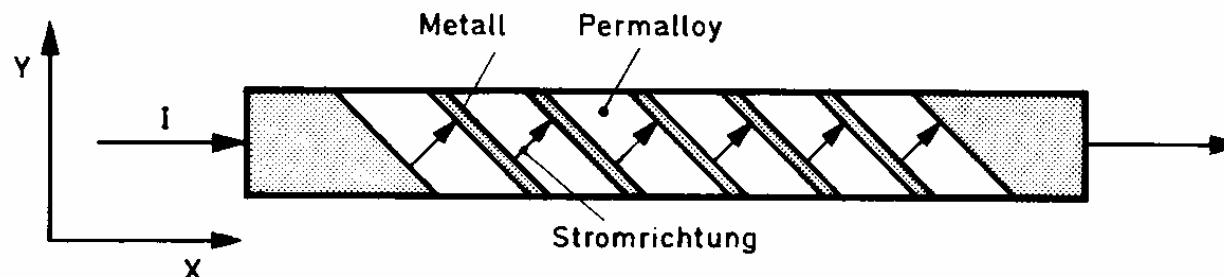
Es besteht also ein quadratischer Zusammenhang zwischen der Feldstärke H_Y und der durch diese verursachten Widerstandsänderung ΔR . Dies bedeutet, daß das Vorzeichen von H_Y aus dem Meßwert nicht erkennbar ist und daß die Nichtlinearität der Übertragungskennlinie, besonders für kleine H_Y -Werte, groß ist.

Einfacher magnetoresistiver Sensor (9)



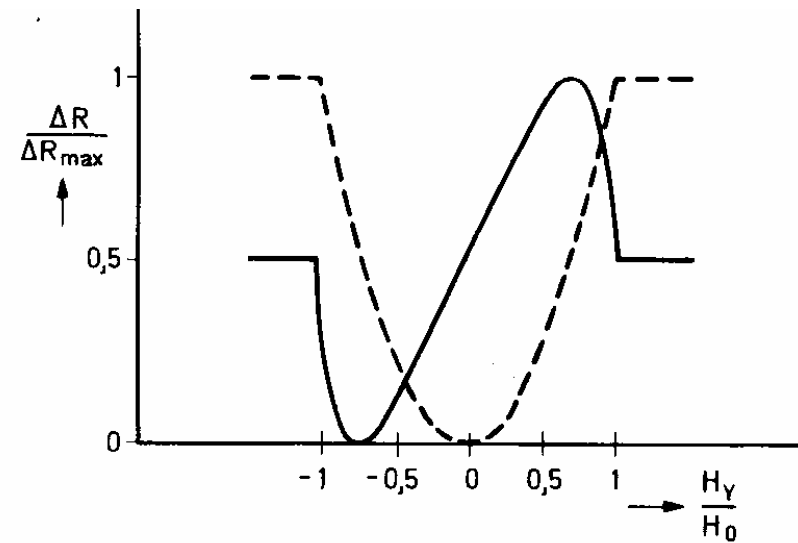
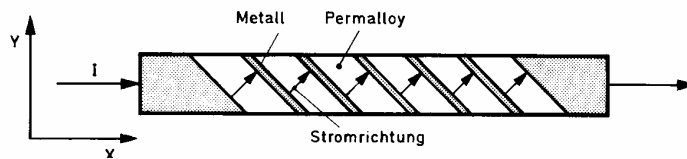
Quadratischer Zusammenhang → Linearisierung

Kennlinien-Linearisierung durch Barber-Pole (1)



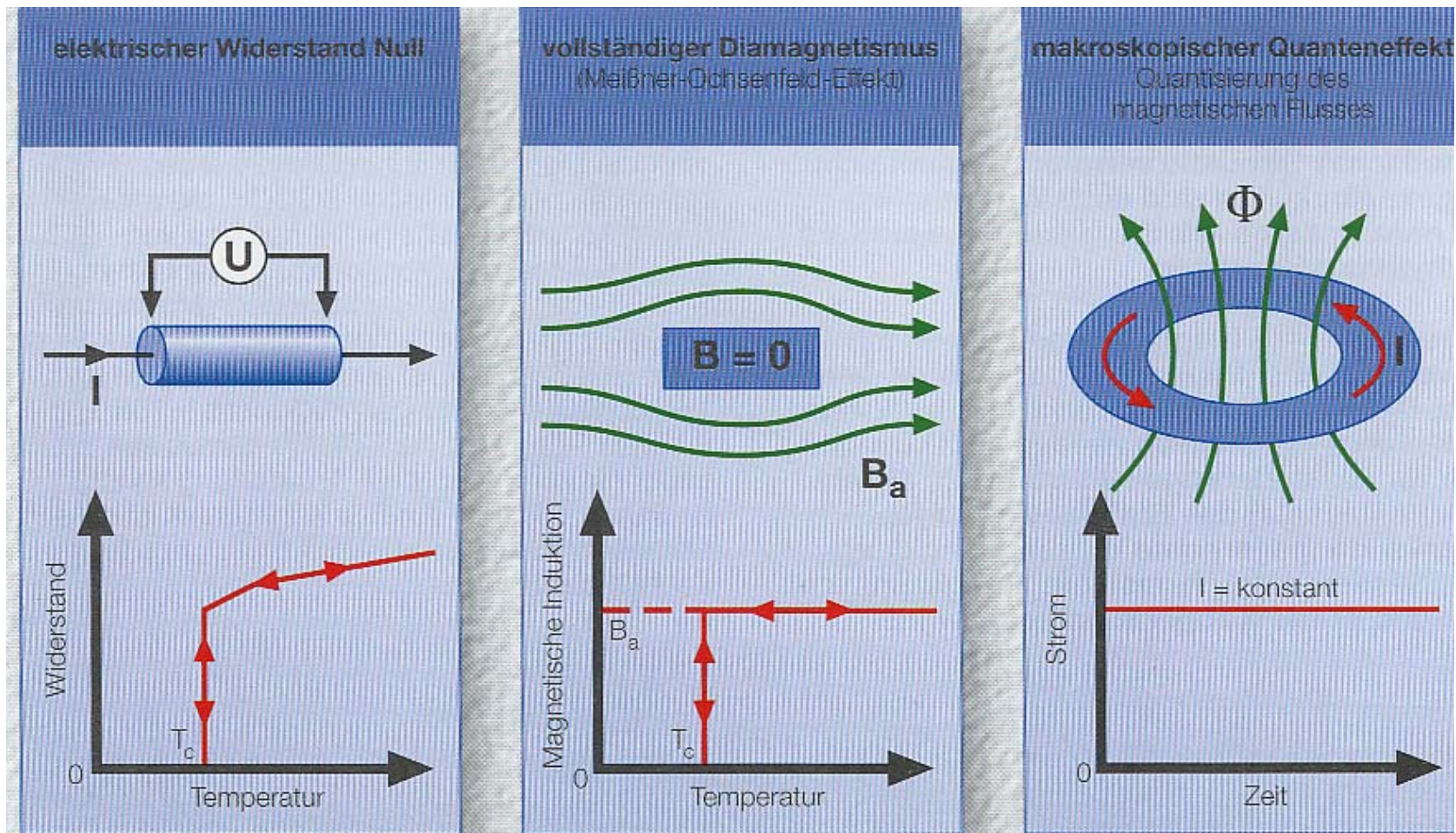
- Drehung des Stromes durch den Sensorstreifen um 45° gegen Längsrichtung („leichte“ Achse) durch Barber-Pole
- Barber-Pole: schmale Metallstreifen hoher Leitfähigkeit
- Strom durch das hochohmige ferromagnetische Material wählt kürzesten Weg zwischen Metallstreifen, also $+45^\circ$ gegen „leichte“ Achse

Kennlinien-Linearisierung durch Barber-Pole (2)

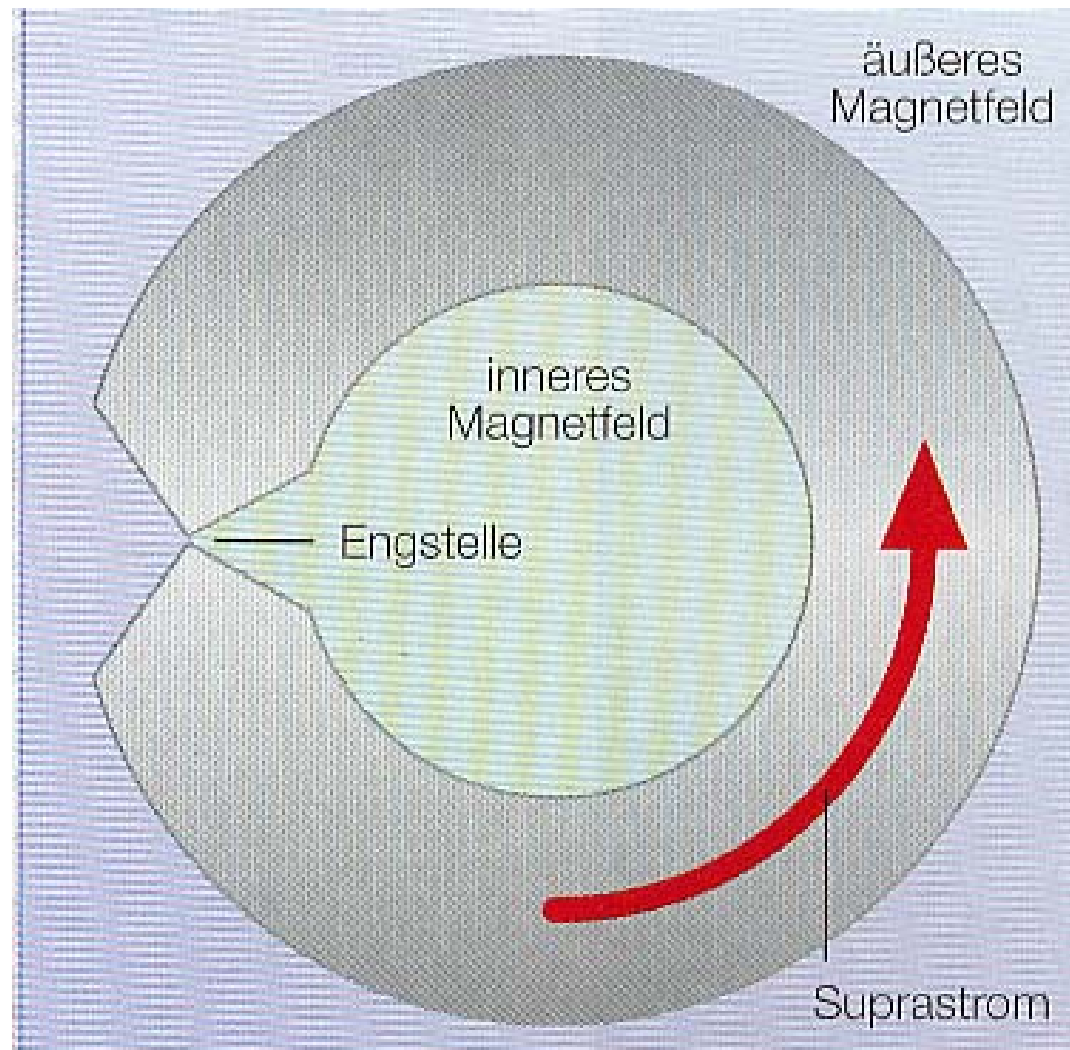


$$\frac{\Delta R}{\Delta R_{\max}} = \frac{1}{2} + \frac{H_Y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_Y}{H_0}\right)^2}$$

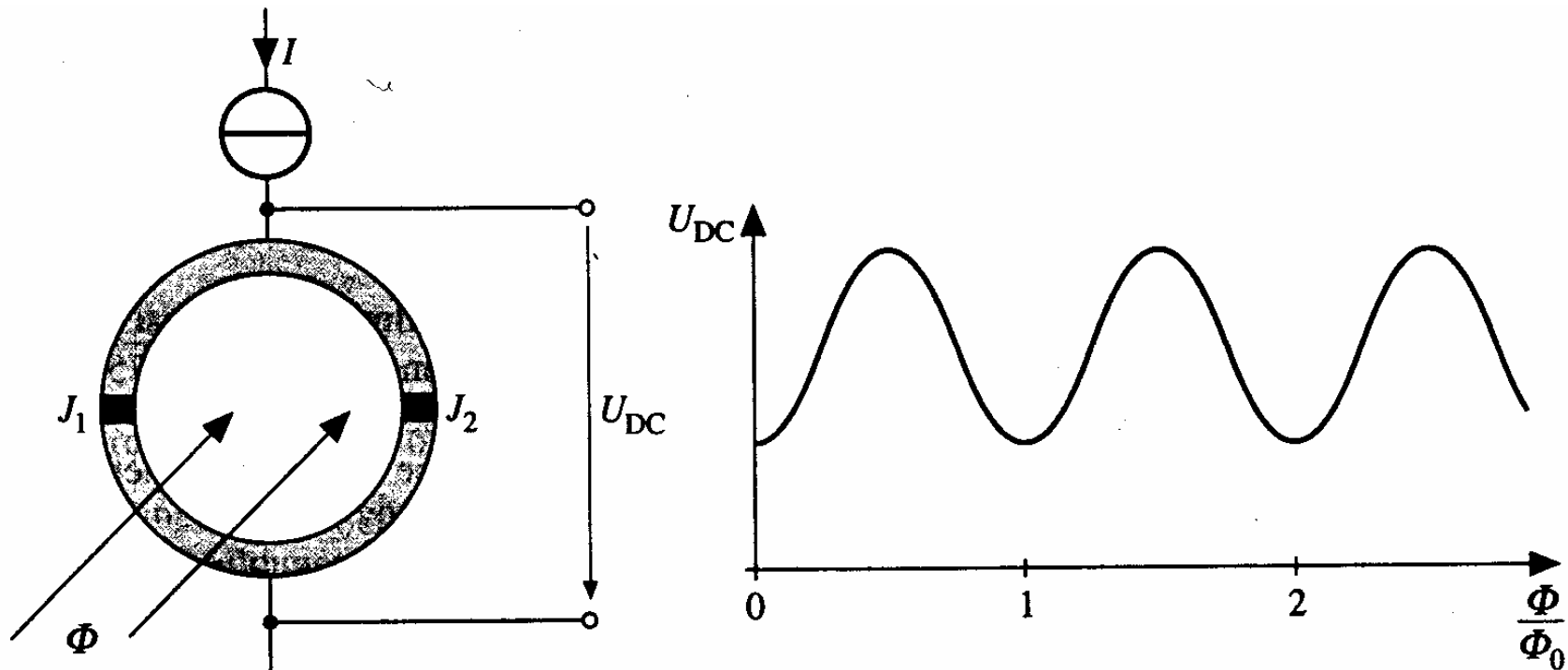
Grundeigenschaften supraleitender Materialien



Schematischer Aufbau eines SQUIDS

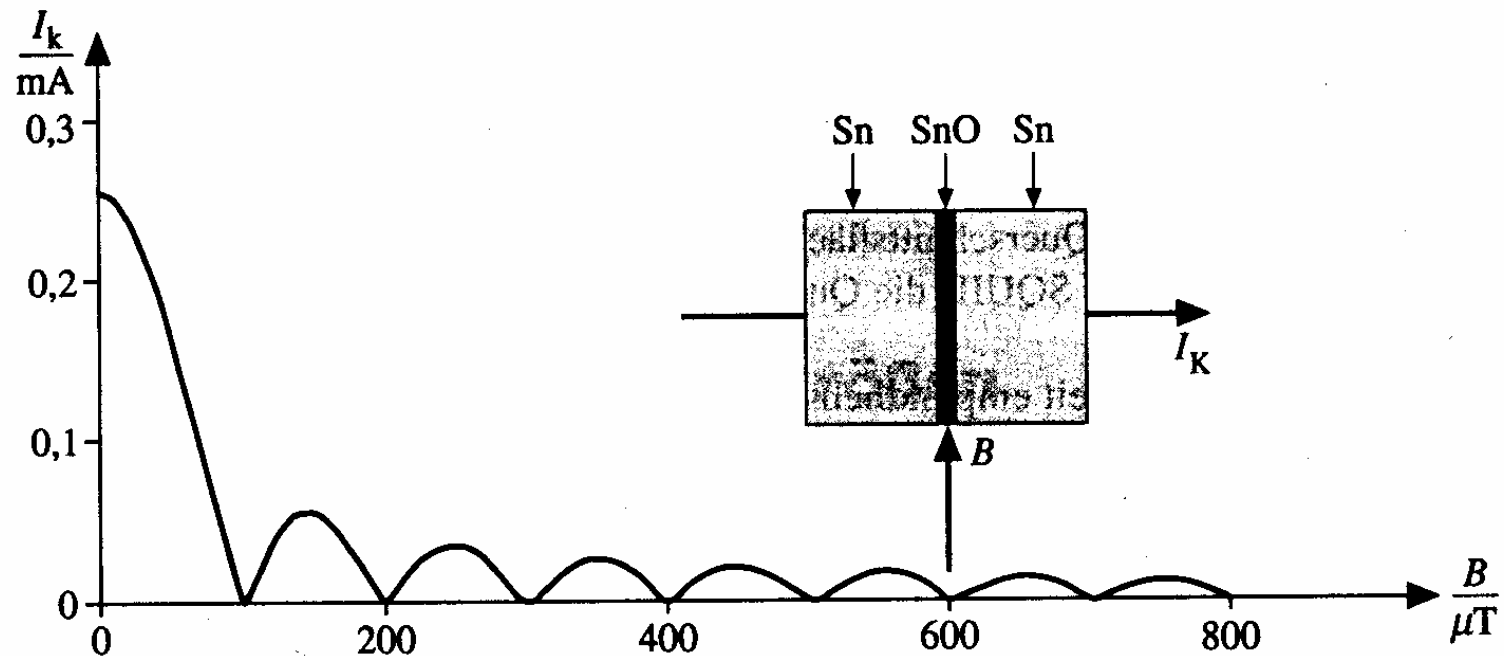


Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)



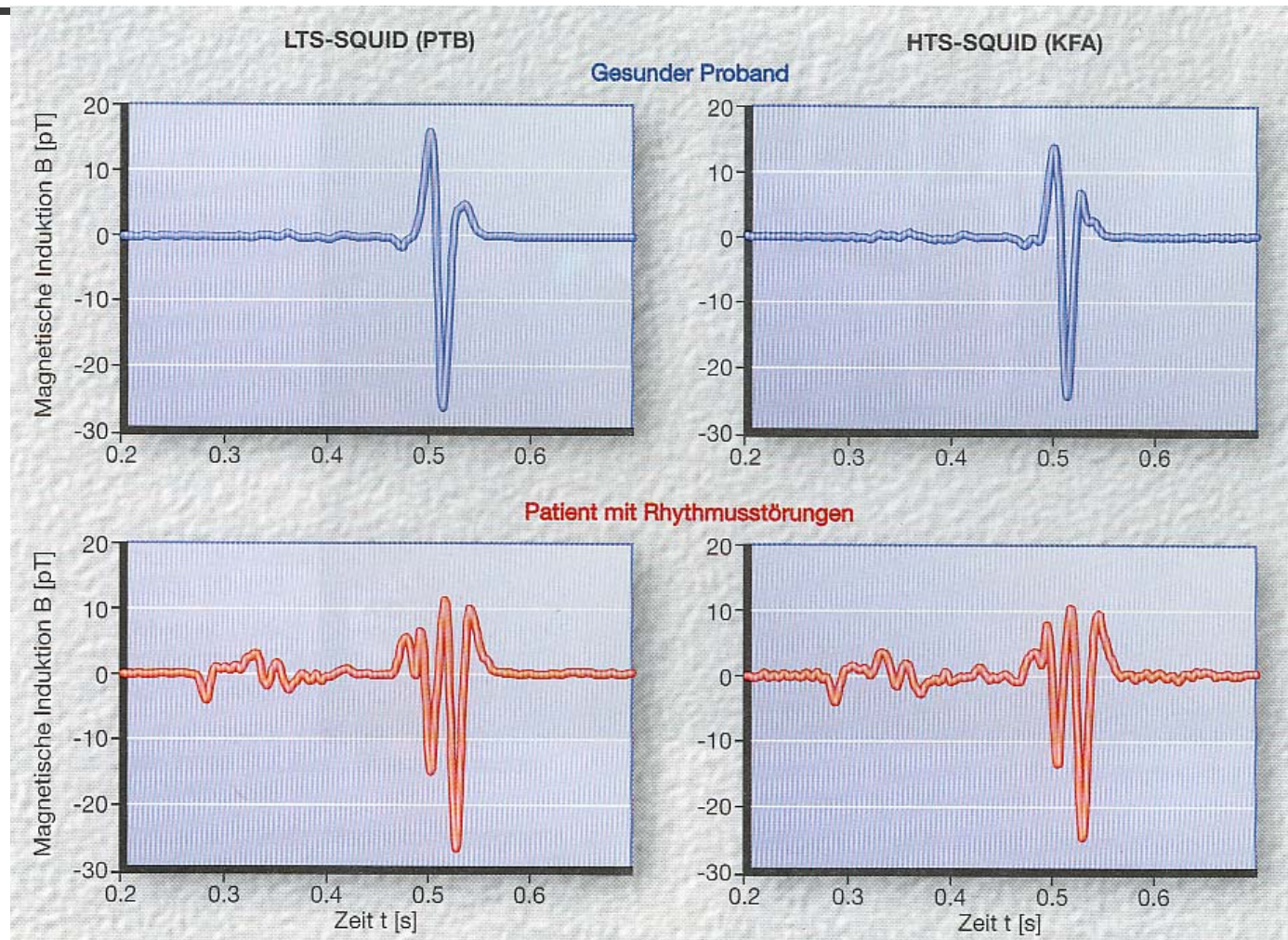
SQUID mit zwei Tunnelkontakten J_1 und J_2

Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)



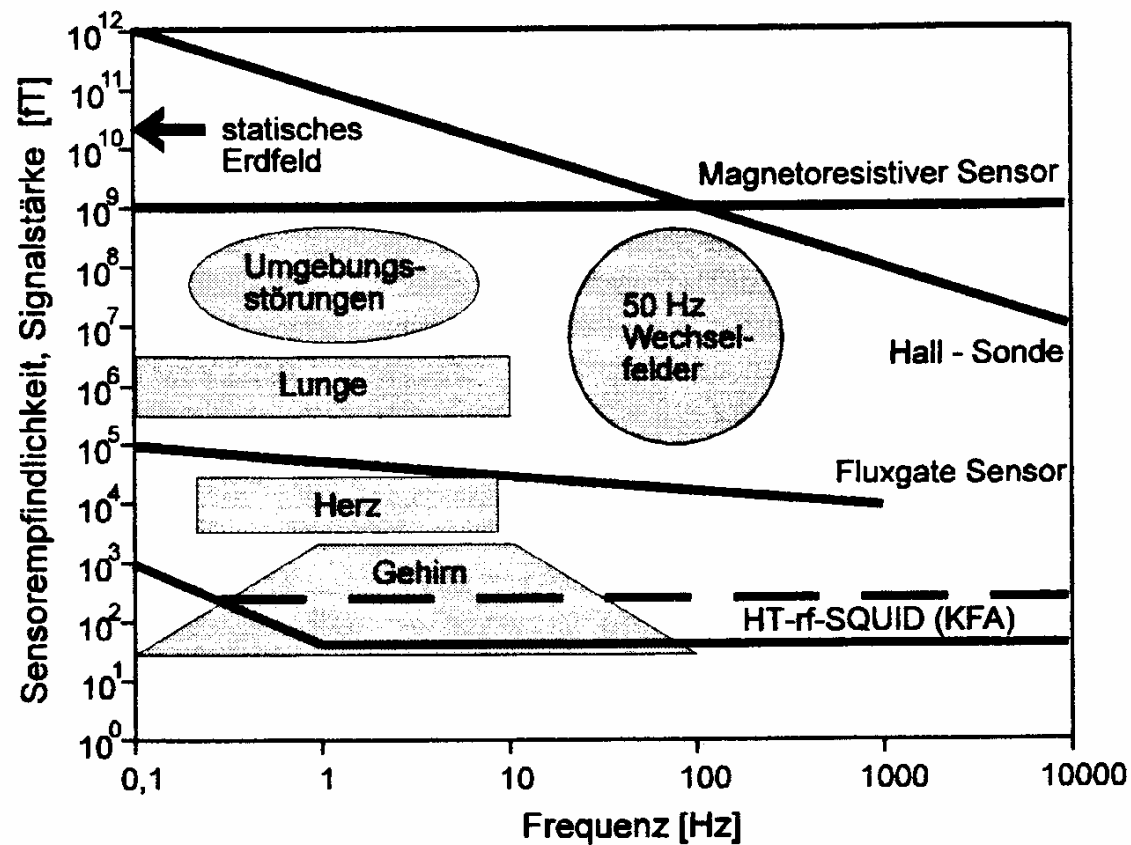
Abhängigkeit des kritischen Stromes
von der magnetischen Flußdichte

Medizinische Anwendungen: Magnetokardiogramme



Quelle: Sonderdruck aus dem Jahresbericht 1996 des Forschungszentrums Jülich

Vergleich SQUID mit weiteren Magnetfeldsensoren



Erklärung zur Abbildung:

HT: High Temperature

LT: Low Temperature

angegebene Werte für HT-rf-SQUID:

----- ohne Flußkonzentrator

— mit Flußkonzentrator



SQUID - Gradiometer

Magnetfeldempfindlichkeit	< 300	fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Bandbreite	1 - 30	Hz
Anstiegsgeschwindigkeit	10^5	Φ_0/sec *
Dynamik	~ 140	dB

* $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Vs}$ ist das magnetische Flußquant



Literatur

Heidelberg: Hüthig, 1998

