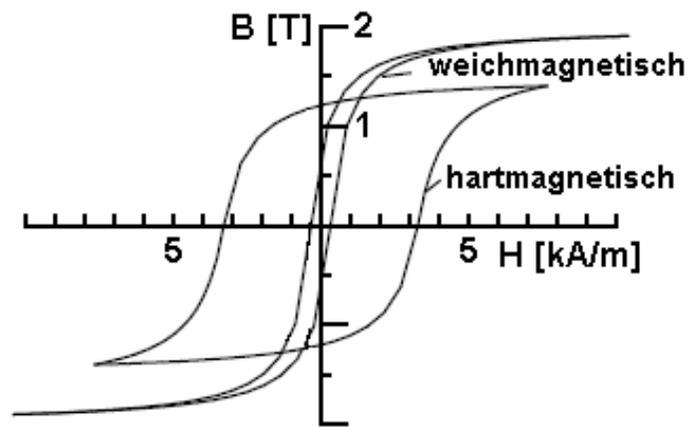
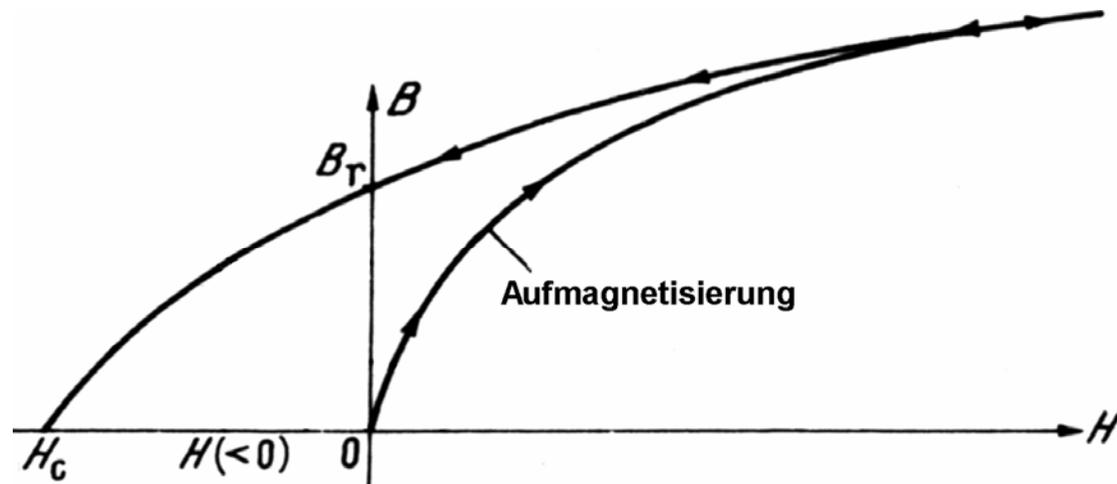
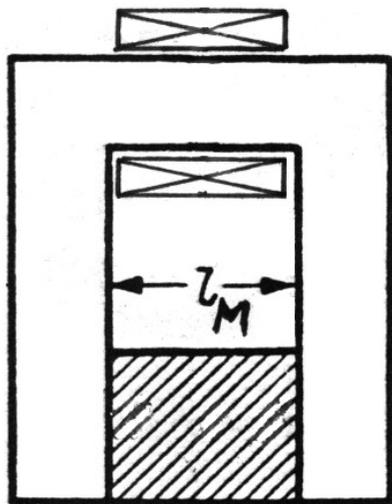


# Permanentmagnetische Werkstoffe I



Bisher: weichmagnetische Werkstoffe mit  $H_C < 1$  kA/m  
Hartmagnetische Werkstoffe (Dauermagnete):  $H_C > 1$  kA/m  
z. B. Kobaltlegierungen, Hartferrite, AlNiCo, SmCo, NdFeB  
Bedeutung:  
Dauermagnete liefern leistungslos magnetische Felder  
⇒ Einsatz in Drehspulinstrument, Messung von Weg, Winkel, Geschwindigkeit, in Elektromotoren!....

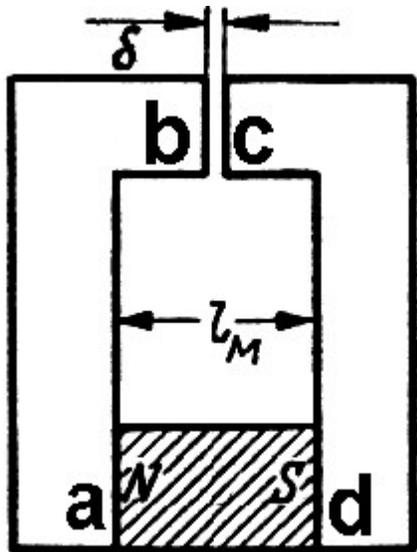
Herstellung: Aufmagnetisieren in einem starken Magnetfeld (Spule oder Weichmagnet)



Nach Erreichen Sättigungsmagnetisierung wird das Spulenfeld abgeschaltet ( $H = 0$ )  $\Rightarrow B = B_r$

Was passiert, wenn wir den Permanentmagneten aus den Schenkeln heraus nehmen ?

# Permanentmagnetische Werkstoffe II



Zunächst: PM nicht vollständig entfernen, Aufsagen des Schenkels  
 Durchflutungssatz, Aufteilung Integrationsweg in einzelne Abschnitte:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = \int_a^b \vec{H} d\vec{s} + \int_b^c \vec{H} d\vec{s} + \int_c^d \vec{H} d\vec{s} + \int_c^c \vec{H} d\vec{s} + \int_d^a \vec{H} d\vec{s} = 0$$

es fließt kein Strom !

Mit  $\mu_r \rightarrow \infty \Rightarrow$  im Eisen:  $B_E = \mu_0 \mu_r H_E \Rightarrow H_E = \frac{B_E}{\mu_0 \mu_r} \approx 0$

$$\Rightarrow \int_a^b \vec{H} d\vec{s} = \int_c^d \vec{H} d\vec{s} \approx 0$$

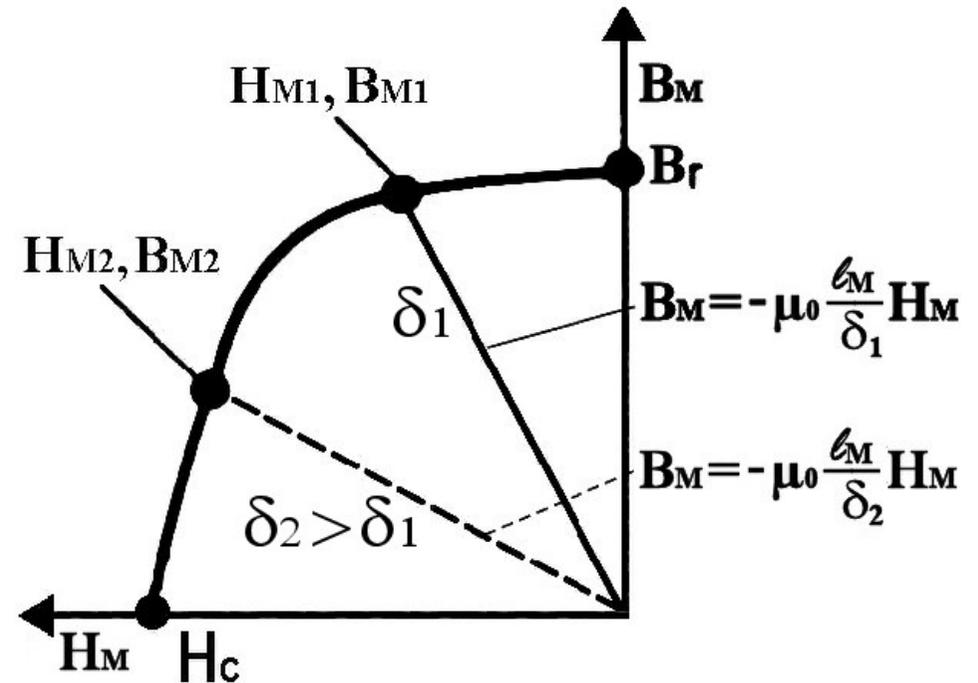
Es bleiben:  $\int_b^c \vec{H} d\vec{s} = H_L \delta$  und  $\int_d^a \vec{H} d\vec{s} = H_M l_M$

$$\Rightarrow H_L \delta + H_M l_M = 0 \Rightarrow H_L = -\frac{l_M}{\delta} H_M \quad | \cdot \mu_0$$

$$\Rightarrow B_L = -\mu_0 \frac{l_M}{\delta} H_M \quad \text{Luftspaltkennlinie}$$

Mit  $\Phi_L = \Phi_M$  und  $A_L = A_M \Rightarrow B_L = B_M$

$$\Rightarrow B_M = -\mu_0 \frac{l_M}{\delta} H_M$$



Luftspaltkennlinie schneidet die BH-Kurve des PM. Damit wird der Arbeitspunkt im IV. Quadranten bestimmt. Großer Luftspalt  $\delta \Rightarrow$  kleine magnetische Induktion  $\rightarrow$  Entmagnetisierung

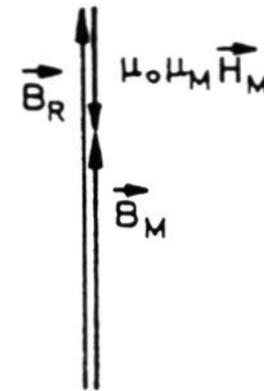
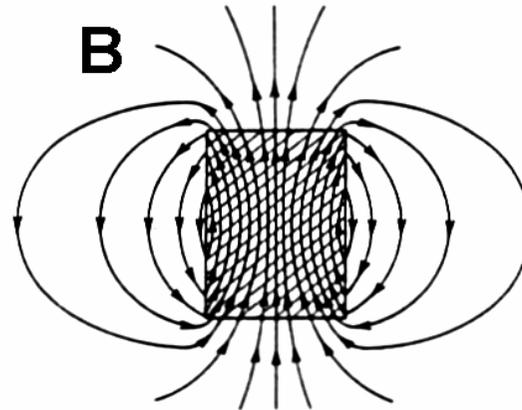
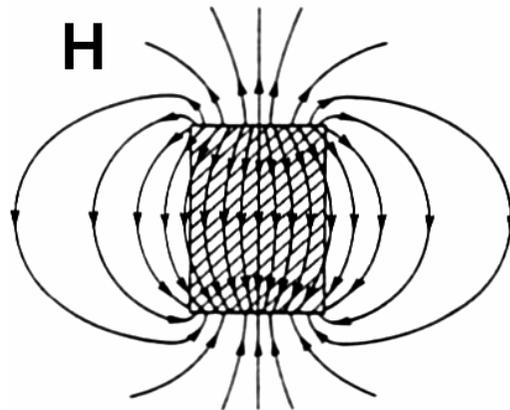
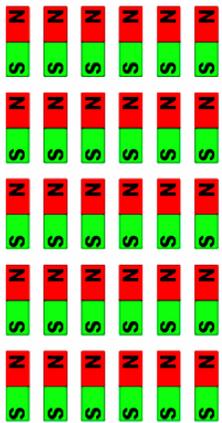
# Permanentmagnetische Werkstoffe III

Bei einem Luftspalt im Kreis entsteht im Innern des PM Gegenfeld von H:  $H_M = - \frac{\delta}{\ell_M} H_L$

=> Schwächung des Magneten (Entmagnetisierung)

Elementardipole im Innern heben sich gegenseitig auf. Es bleibt: „Nord- und Südpoloberfläche“

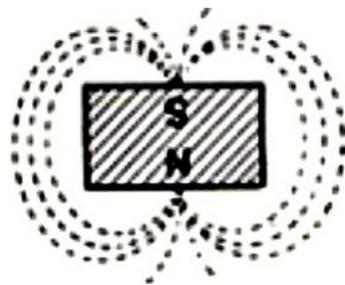
=> Gegenfeld  $H_M$  im Magnetinnern, mindert  $B_M$ , das B-Feld des Magneten im Außenraum



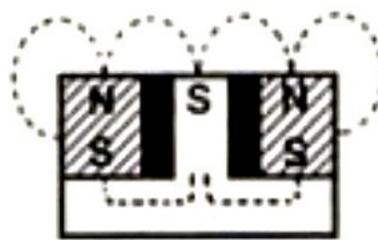
Um ein großes B-Feld zu erzielen, muss die Entmagnetisierung

$H_M = - \frac{\delta}{\ell_M} H_L$  klein sein => kurze Luftwege  $\delta$  der Feldlinien und / oder lange Magnetstäbe  $\ell_M$

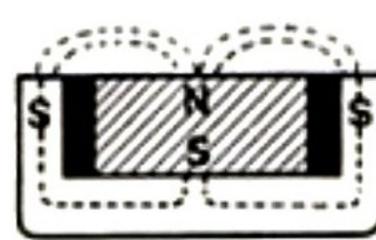
Haftmagnete:



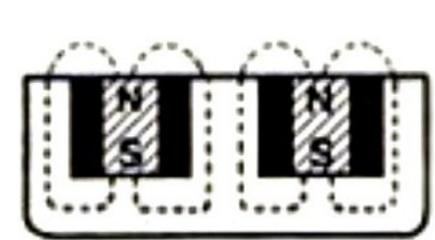
1



4,5



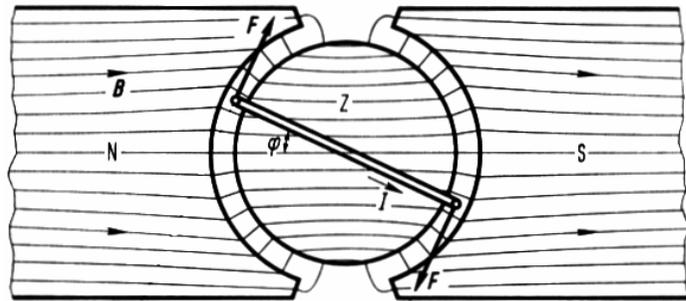
6



7

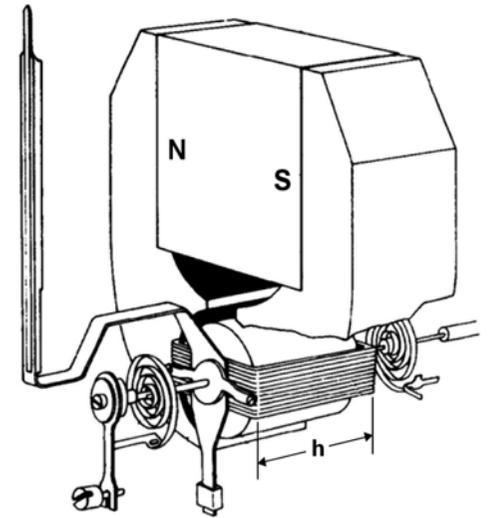
Haftkraftfaktoren

# Beispiele zum Einsatz der Lorentzkraft in der Messtechnik



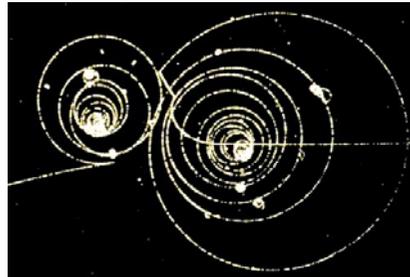
## Drehspulinstrument

Homogenes Magnetfeld im Luftspalt  
 Drehmoment  $M$ , Fläche  $A$ , Höhe  $h$ ,  
 Durchmesser Spule  $D$ , Strom  $I$ ,  
 Windungszahl  $N$ :  
 $M = B h D I N = B A I N$

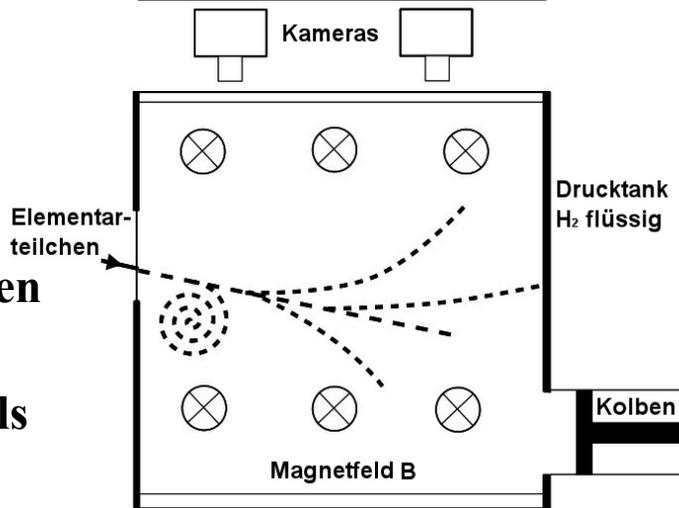


Spiralfeder: Rückstellkraft

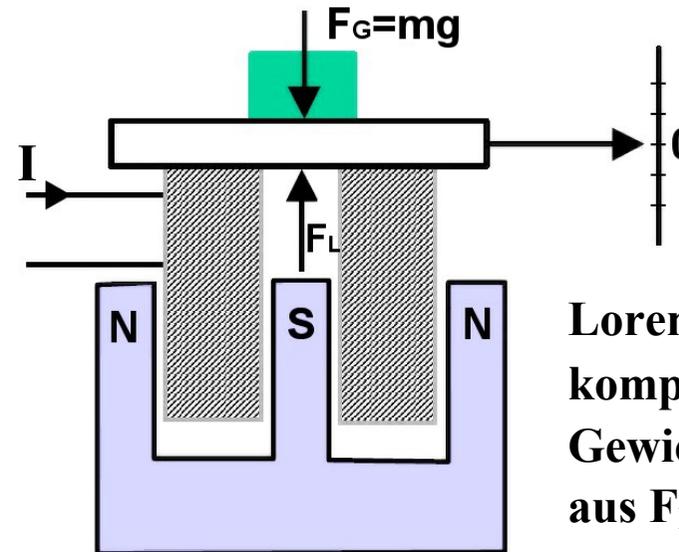
## Blasenkammer Teilchendetektor



$H_2$  flüchtig  
 Druck  $\downarrow$   
 $\Rightarrow$  Sieden  $H_2$   
 $\Rightarrow$  Blasen an  
 Teilchenbahnen  
 $p = q \rho B$   
 Teilchenimpuls



## Kompensationsmessverfahren mit Tauchspulen z. B. Kraft-, Druckmessung, sehr präzise



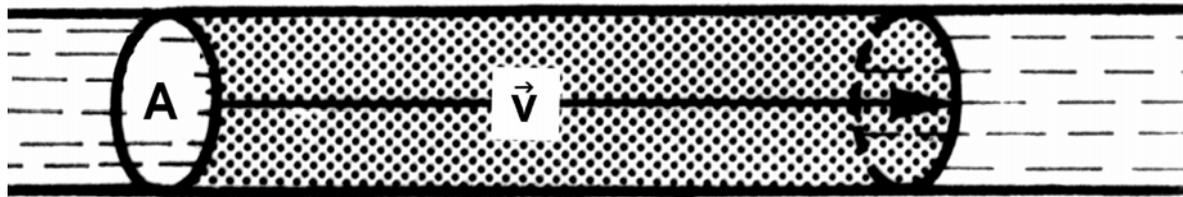
Lorentzkraft  $F_L$   
 kompensiert  
 Gewichtskraft  $F_G$   
 aus  $F_L = F_G \Rightarrow I \sim F_G$

# Durchflussmessung I

**Durchflussmessung:** Bestimmung des Volumenstroms (Volumen/Zeiteinheit) einer Flüssigkeit

**Motivation:** Verrechnung Durchfluss, Überwachung von Anlagen, Dosierung (Chemie)...

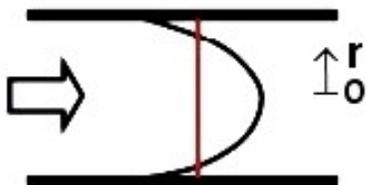
**Durchfluss:**  $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \dot{V} = \int_A \vec{v} \cdot d\vec{a} \stackrel{\text{Mittelwertsatz}}{=} \bar{v} \int_A da = \bar{v} A$        $\bar{v}$ : mittlere Strömungsgeschwindigkeit



**Reynoldszahl Re** zeigt an, welches Strömungsprofil vorliegt

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\eta}$$

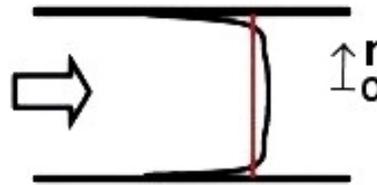
**Laminar (Re < 2300)**



$$v(r) = v_{\max} [1 - (r/R)^2]$$

$$\frac{\bar{v}}{v_{\max}} = 0,5$$

**Turbulent (Re > 2300)**



$$v(r) = v_{\max} (1 - r/R)^{1/n}$$

$$\frac{\bar{v}}{v_{\max}} = 0,8 \dots 0,9 \quad n = 6 \dots 9$$

**D** : Rohrdurchmesser

$\rho$  : Dichte der Flüssigkeit

$\eta$  : Viskosität

Geschwindigkeitsverteilung  
rotationssymmetrisch  
in geraden Rohrstücken

Die induktive Durchflussmessung liefert auch bei turbulenten Strömungen gute Messwerte für den Durchfluss!

## Durchflussmessung II

### Elektromagnetische / induktive Durchflussmessung (Prinzip)

Lorentzkraft auf geladene Teilchen:  $\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$

$\Rightarrow$  Feldstärke  $\vec{E} = \vec{F}_L / q = \vec{v} \times \vec{B}$  mit  $\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow E = v B$

$\Rightarrow$  Spannung an Elektroden:  $U = \int_0^D \vec{E} d\vec{s} = \int_0^D v \cdot B \cdot ds = B D \bar{v}$

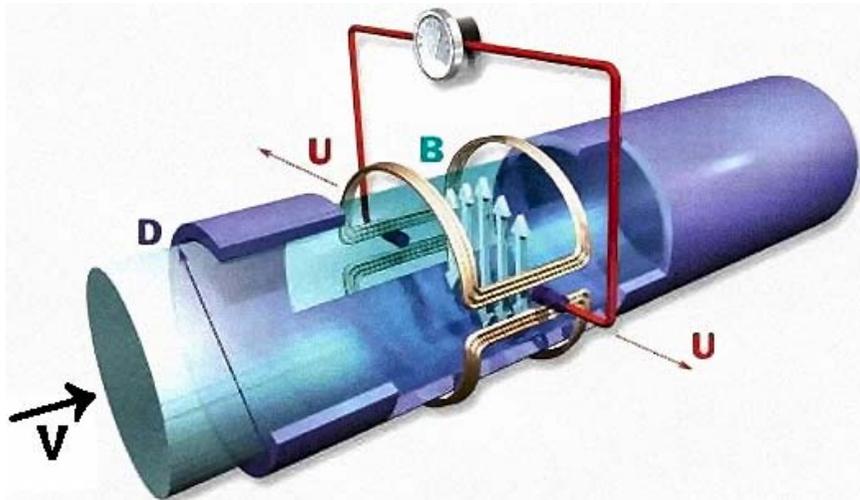
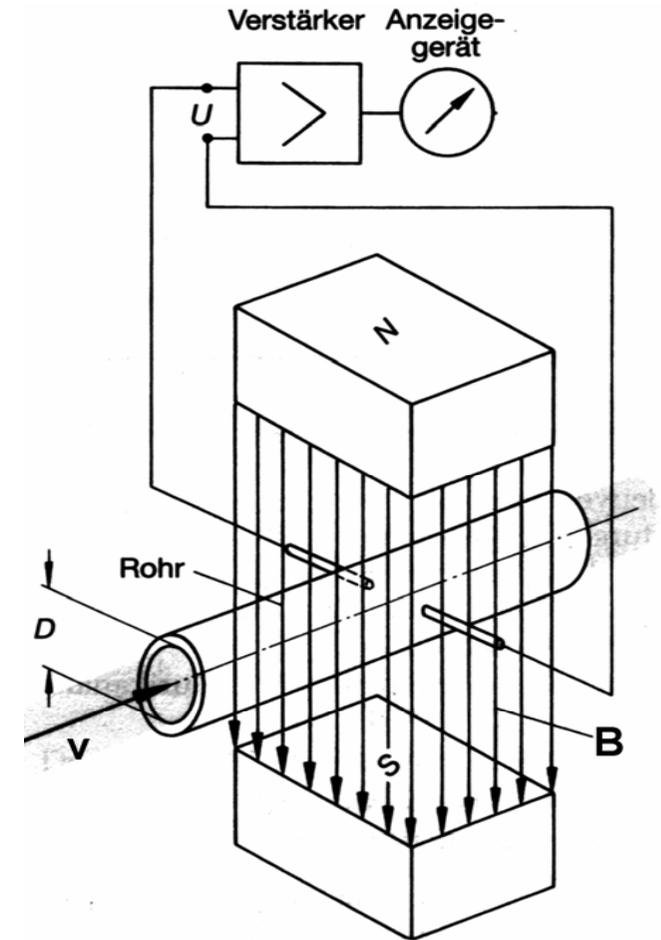
$\Rightarrow \bar{v} = \frac{U}{Bd}$   $\bar{v}$  unabhängig von Strömungsprofil !

$\Rightarrow$  Durchfluss  $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \dot{V} = \bar{v} A$

Beispiel:  $D = 10 \text{ cm}$ ,  $B = 0,1 \text{ T}$

$\Rightarrow U/\bar{v} = 1 \text{ mV/m/s} \Rightarrow$  sehr kleine Signale (störanfällig)

- 1) frequenzselektiv messen, Wechselstrom durch Spule
- 2) gepulstes Gleichfeld, Messung Störung in Pausen



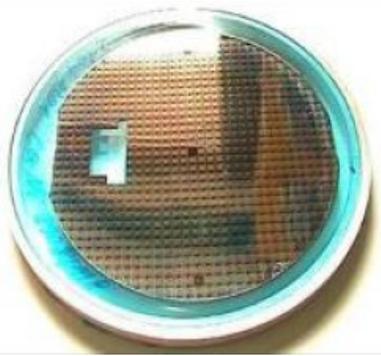
Messung schon mit destilliertem Wasser

Resultat ist unabhängig von der Leitfähigkeit des Wassers !

keine beweglichen Teile, konstanter Rohrquerschnitt  
hochpräzise Messung, aber teuer !

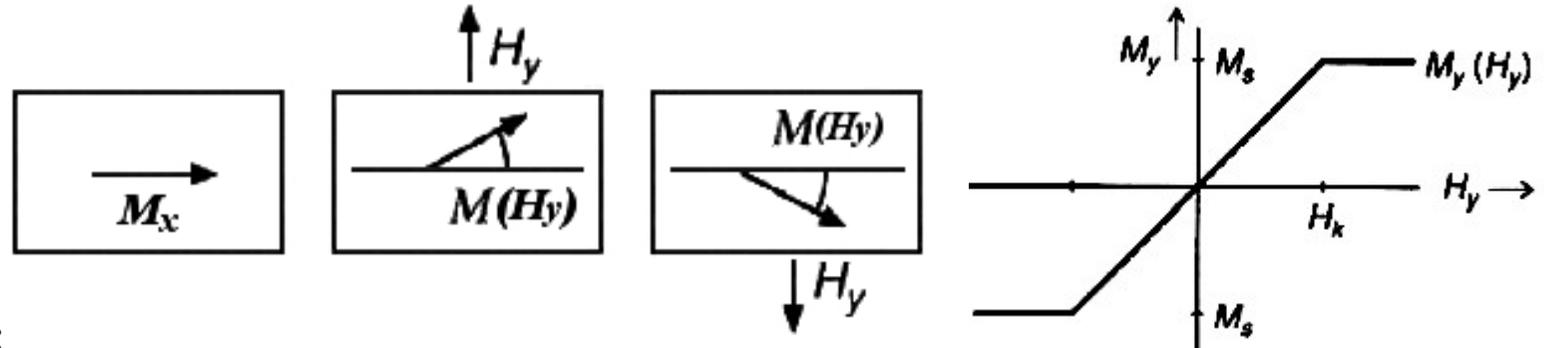
Ausführungen mit PM oder mit gepulster Spule

# Anisotroper magneto-resistiver Widerstand (AMR)



**Ha**

**Herstellung:** auf Silizium Wafer 50 nm dicke NiFe-Schicht aufstäuben  
gleichzeitig an lange Achse Magnetfeld **Ha** anlegen => Magnetisierung  $M_x$

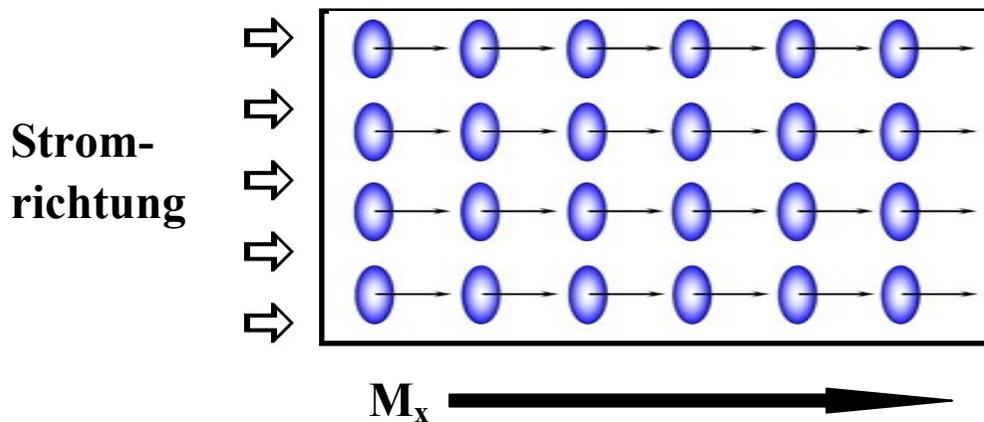


**Drehung Magnetisierung:**

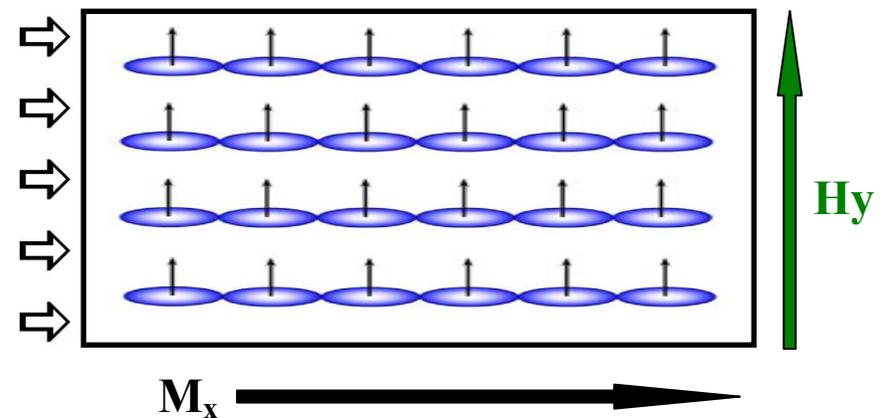
Durch ein quer wirkendes Magnetfeld  $H_y$  lässt sich die Magnetisierung  $M$  reversibel drehen

**Änderung des elektrischen Widerstands durch Drehung Magnetisierung:**

Die Magnetisierung des Werkstoffs (81Ni, 19Fe) verformt die Elektronenwolken um die Atomkerne zu Ellipsen. Diese drehen sich mit der Magnetisierungsrichtung => Änderung des Widerstands  $R$

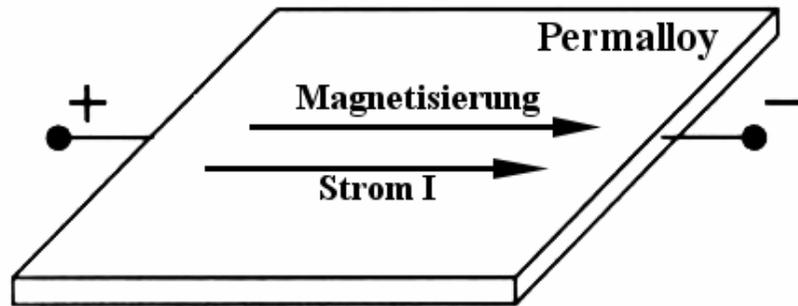


kein äußeres Feld  $H_y$  =>  $R$  groß



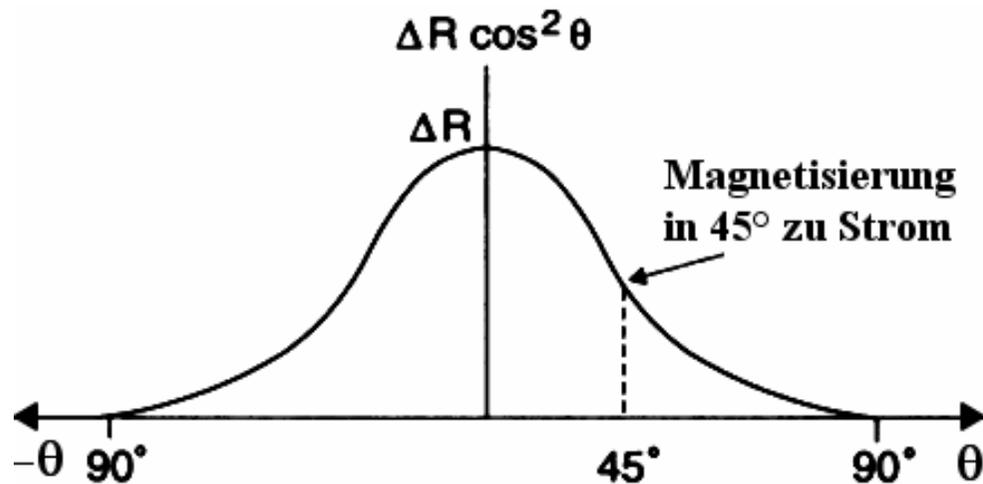
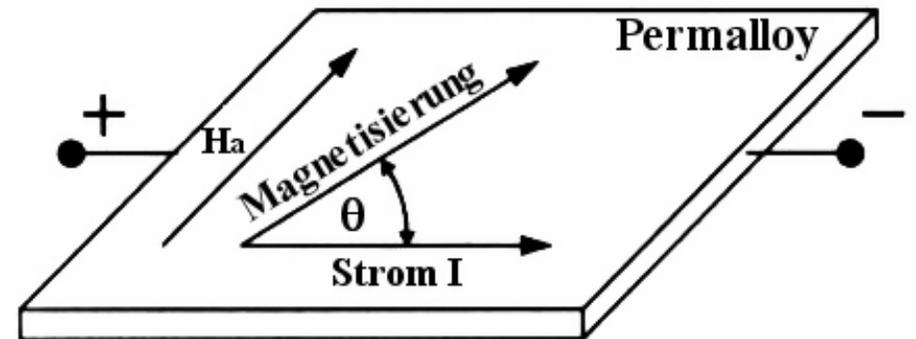
Drehung  $M$ , äußeres Feld  $H_y$  =>  $R$  klein

# Anisotroper magneto-resistiver Sensor I



Magnetfeldabhängiger Widerstand  
 dünner Film aus Permalloy (Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>)  
 bei der Abscheidung starkes Magnetfeld  
 => Vorzugsrichtung Magnetisierung M

Falls Strom I  $\parallel$  Magnetisierung  $R = R_{\max}$   
 Äußeres Magnetfeld  $H_a$  dreht Richtung Magnetisierung  
 => R wird kleiner (Hindernis für Strom geringer)



Der Widerstand R hängt vom Relativwinkel  $\theta$   
 zwischen dem Strom und der Magnetisierung ab  
 Widerstandsänderung:  $\Delta R(\theta) = (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \theta$

Linearisierung:

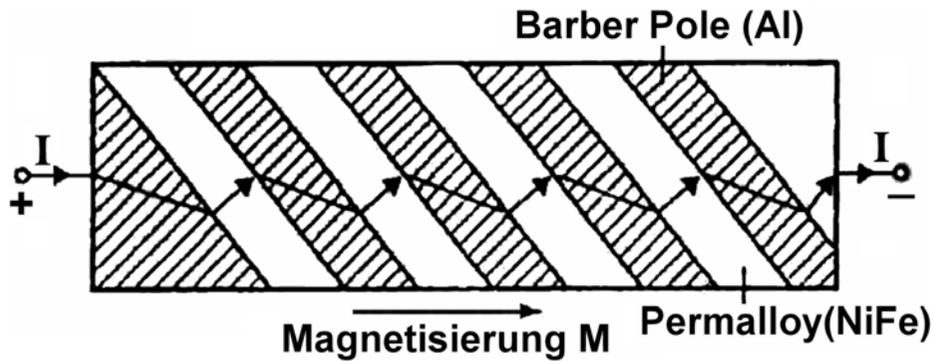
Strom I in  $45^\circ$ -Richtung zur Magnetisierung

- 1) Linearisierung  $\Delta R \sim H_a$
- 2) Richtungserkennung des äußeren Felds  $H_a$

Erhöhung der Empfindlichkeit durch Brückenschaltung

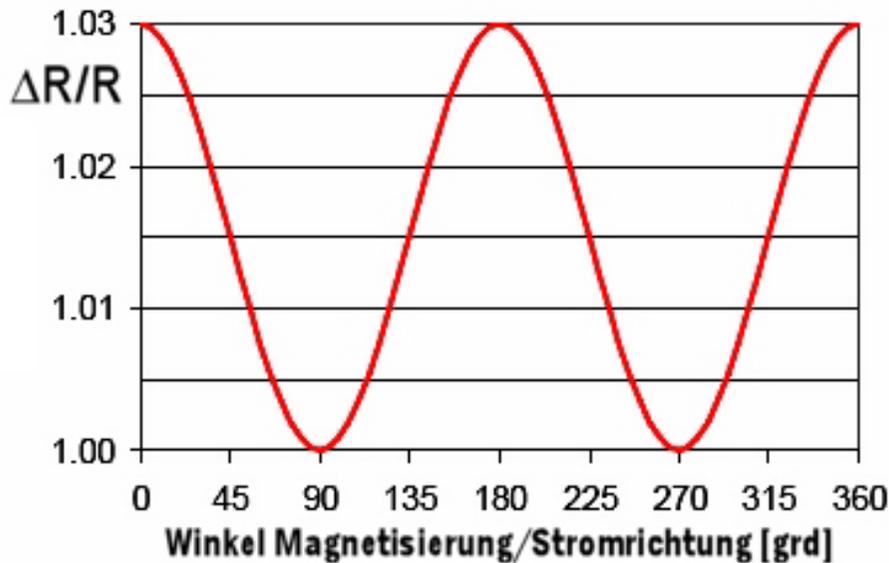
=> AMR-Sensoren typisch 100-fach empfindlicher als Hall-Sensoren, Messung kleiner Felder

# Anisotroper magneto-resistiver Sensor II



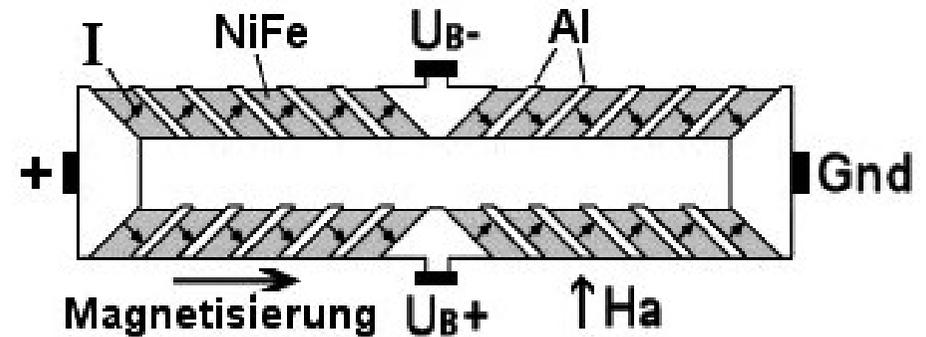
Erzeugung 45°-Richtung:

Barber-Pole: Al-Streifen in 45°-Richtung aufgedampft  
Strom sucht kürzesten Weg (45°) durch NiFe-Streifen



$$\Delta R(\theta) = (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \theta$$

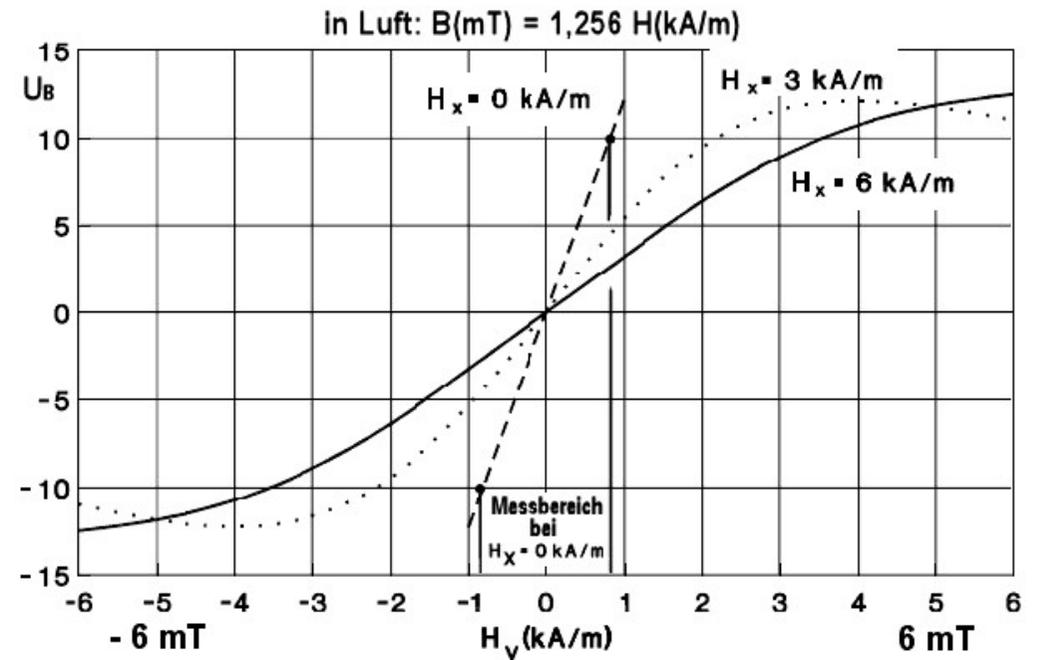
Nur 3 % Änderung  $\Delta R/R$  bei AMR-Sensor



Brückenschaltung

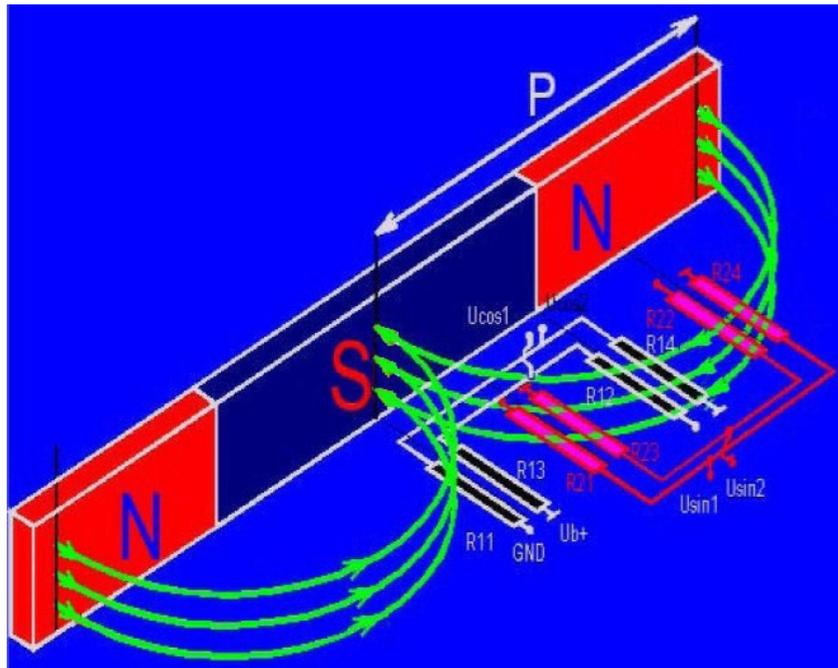
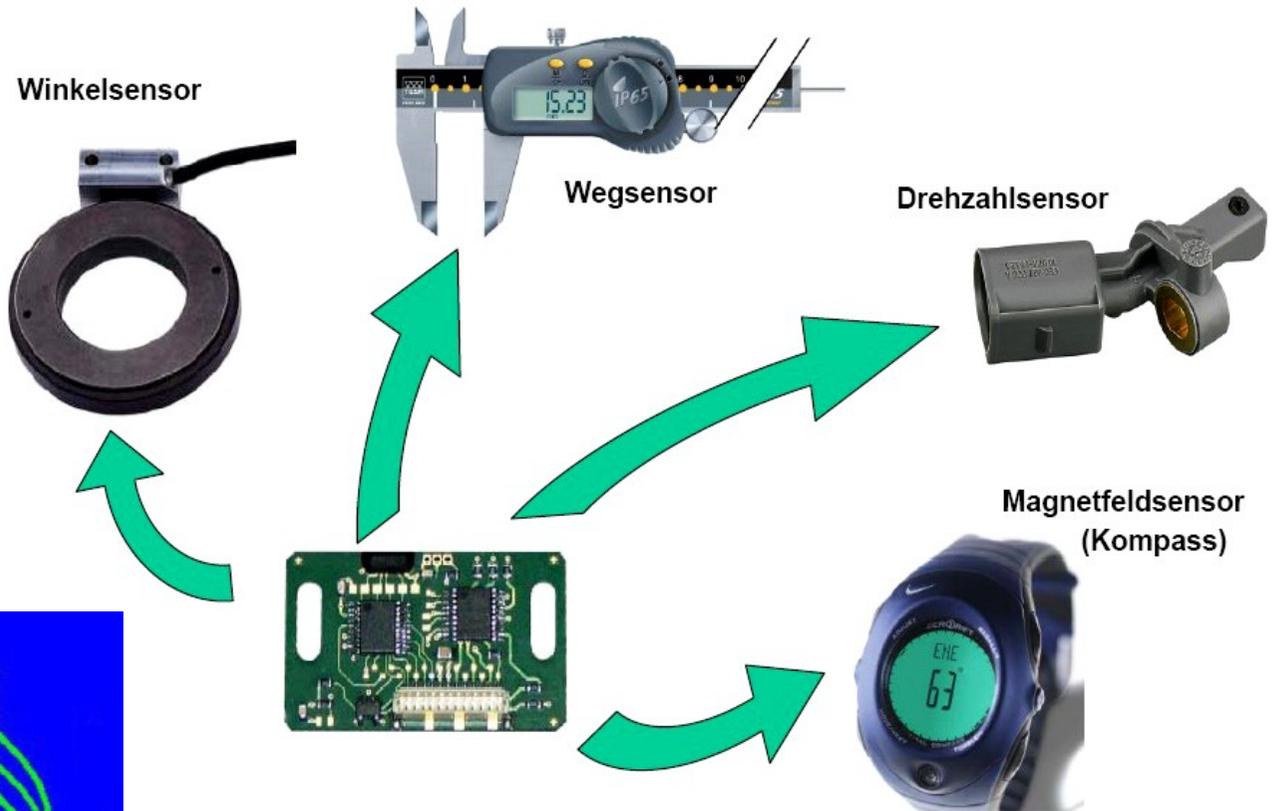
Messbereich AMR-Sensor:  $\mu T - mT$

Beschränkung Messbereich: Sättigung

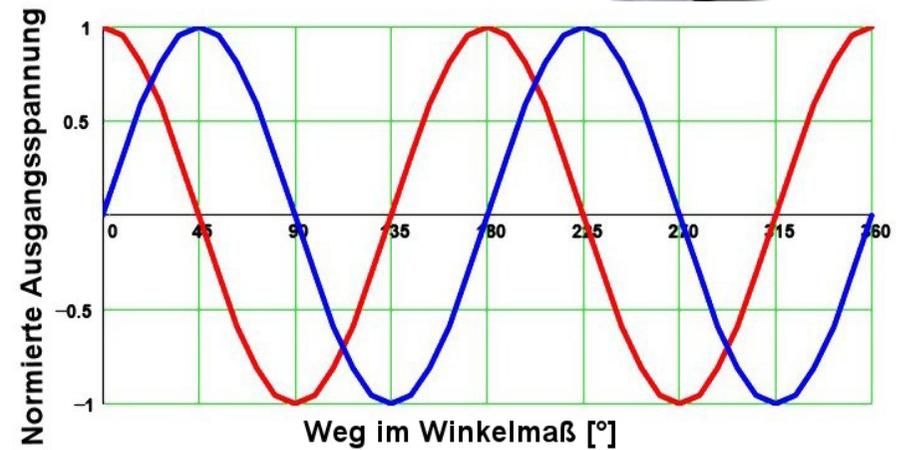


Empfindlichkeit durch PM in x-Richtung ändern

# AMR Sensor / Anwendungen



**Wegmessung mit zwei AMR-Sensoren an einem magnetisch codierten Maßstab**

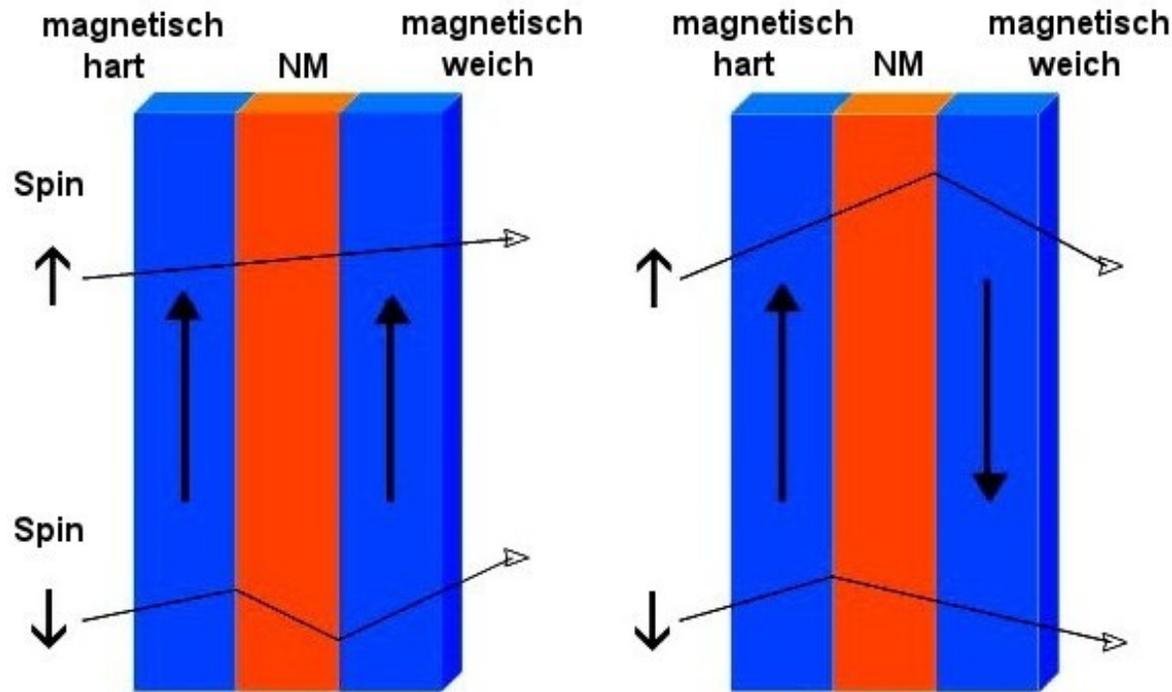


**Erkennung Bewegungsrichtung durch sin-/cos-Signal der zwei Sensoren bei Bewegung längs des Maßstabs**

# Giant MagnetoResistance (GMR)

Entdeckt 1988 von P. Grünberg und A. Fert

Nobelpreis Physik 2007



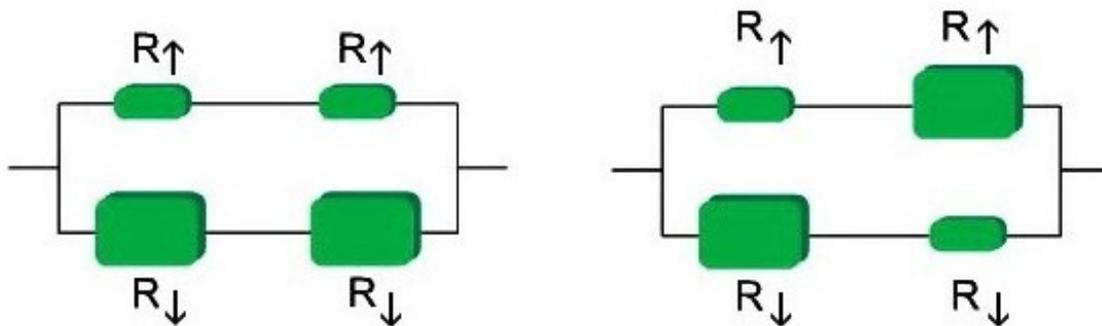
Riesenmagnetwiderstand

Magnetische und nichtmagnetische Schichten, Dicke:  $\sim 5$  nm

Eine Schicht ist weichmagnetisch, sie wird durch äußeres Feld gedreht. Die andere Schicht ist hartmagnetisch

Der elektrische Widerstand hängt von der relativen Magnetisierung der Schichten ab

R abhängig von Spinrichtung und relativer Magnetisierung



$\downarrow$  e<sup>-</sup>-Spin  $\uparrow$  Magnetisierung  $\Rightarrow$  R groß

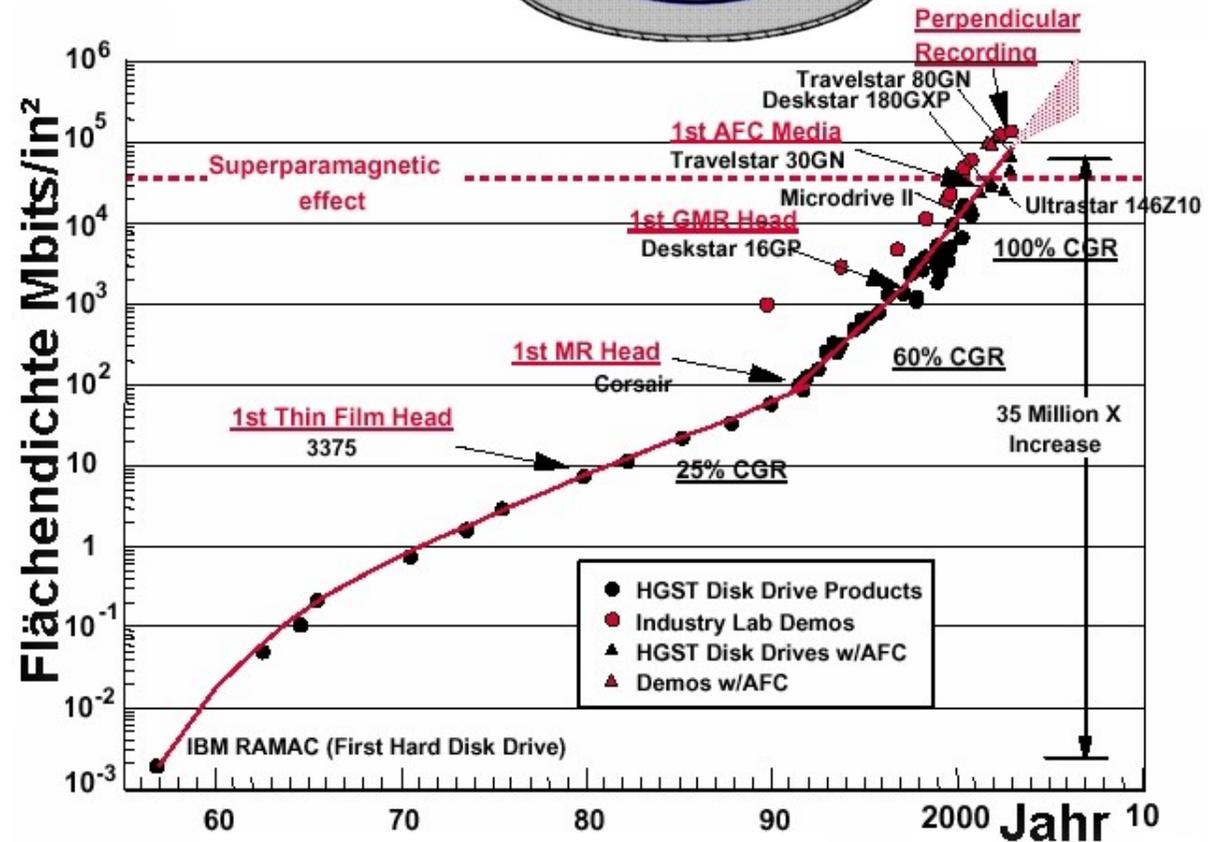
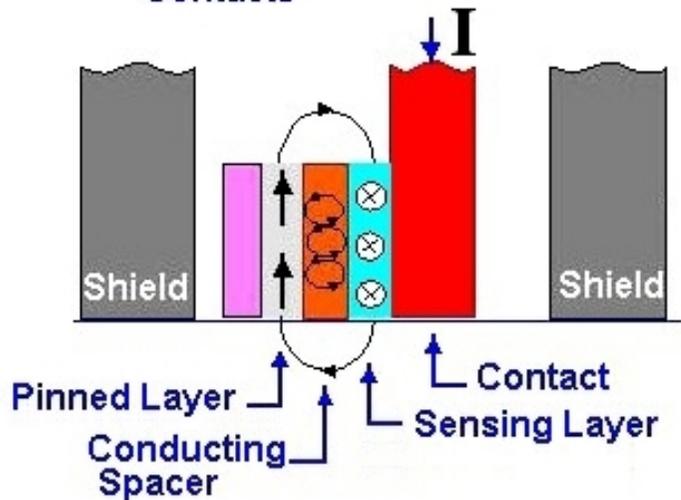
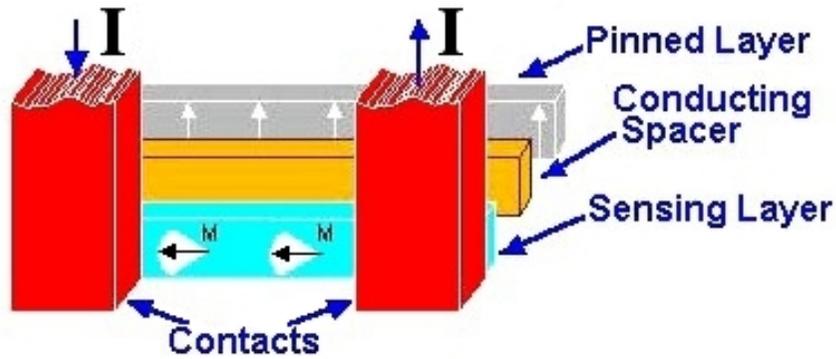
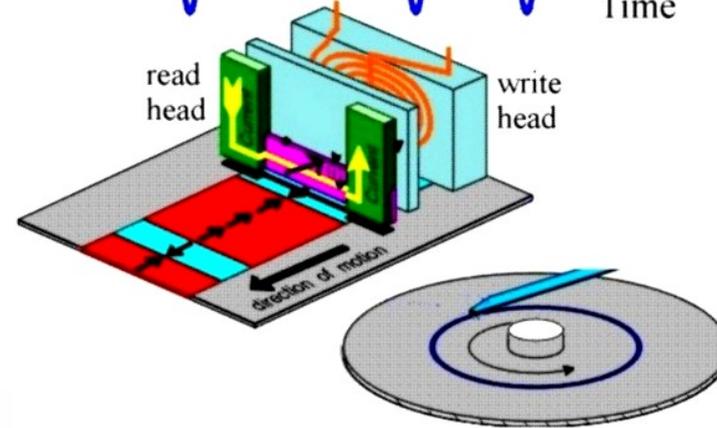
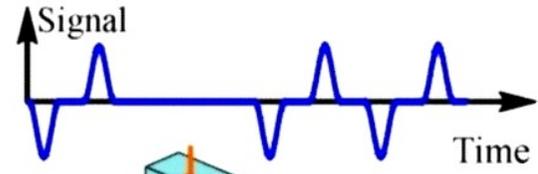
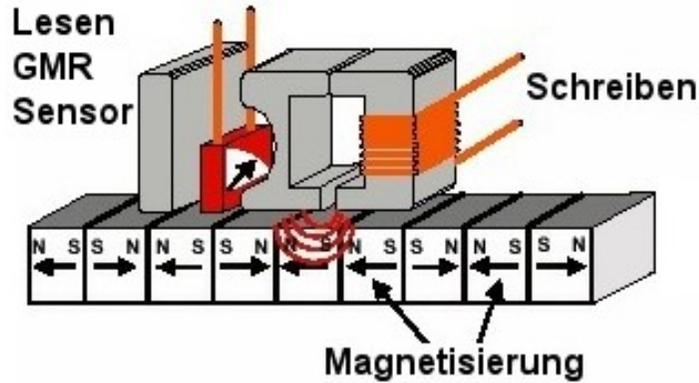
$\uparrow$  e<sup>-</sup>-Spin  $\uparrow$  Magnetisierung  $\Rightarrow$  R klein

GMR-Sensoren sehr empfindlich auf ein äußeres Magnetfeld:  $\Delta R/R \approx 50$  %

Sensitec: Messbrücke (4 GMR), linearer Bereich 0,1 – 0,4 mT, Empfindlichkeit 130 mV/V/mT  
Weiterhin: Cherry, Honeywell, Infineon Technologies, NVE, NXP Semiconductors, Rheintacho

# GMR in der Speichertechnik

Schreib-  
Lesekopf  
für  
Harddisk

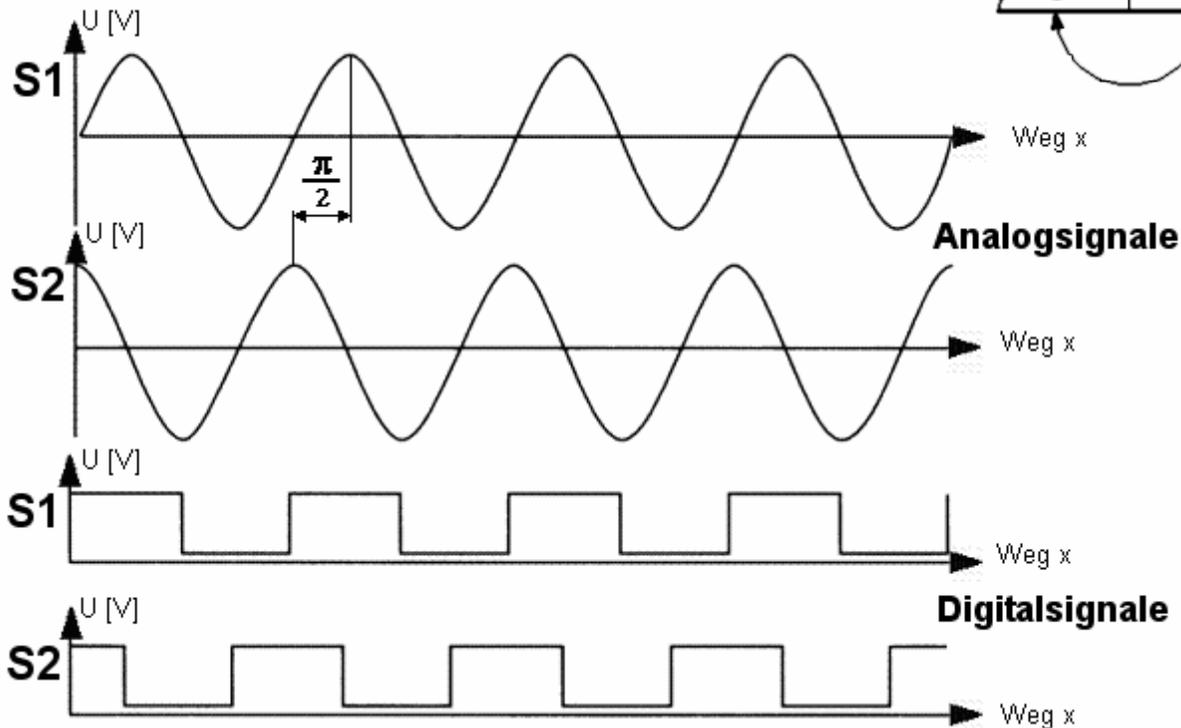
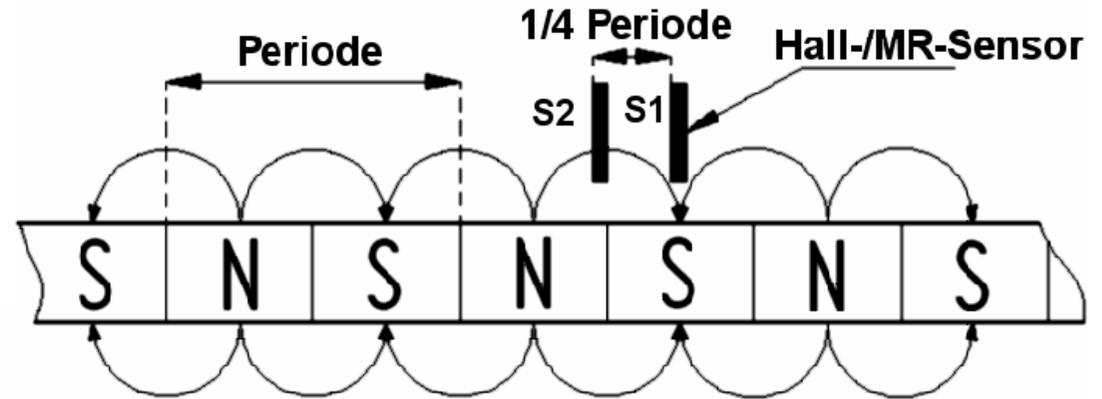


# Wegmessung und Richtungserkennung mit Magnetfeldsensoren

Band aus permanentmagnetischem Material mit wechselnder Feldrichtung magnetisiert

Die Abfolge der Dipole auf dem Band ergibt die Maßverkörperung

Kleinstmögliche Abstände der Dipole:  $\sim \mu\text{m}$



Distanz Magnetfeldsensoren:  $\frac{1}{4}$  Periode

Bewegung Sensor nach rechts:  
ansteigende Flanke S2 vor Flanke S1

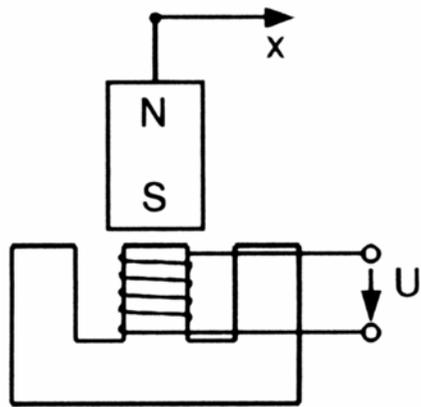
Bewegung Sensor nach links:  
ansteigende Flanke S1 vor Flanke S2

Abfolge der Anstiegsflanken  
 $\Rightarrow$  Bewegungsrichtung

Wegmessung: Zählen der Impulse, da Periodenabstand bekannt  $\Rightarrow$  zurückgelegter Weg

# Induktive Weg-/Drehzahlmessung

## Induktiver Wegaufnehmer



Permanentmagnet induziert durch Linearbewegung  $x(t)$  Spannung

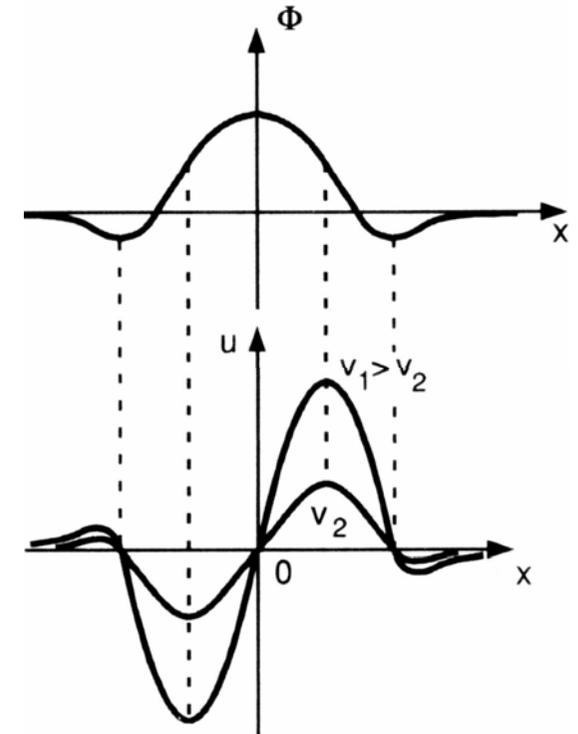
$$U_{\text{ind}} \propto - \frac{d\Phi}{dt}$$

an induktivem Aufnehmer

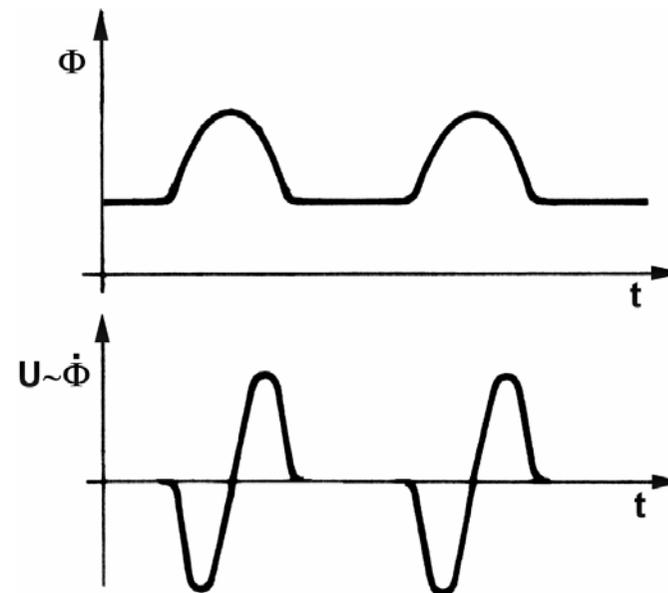
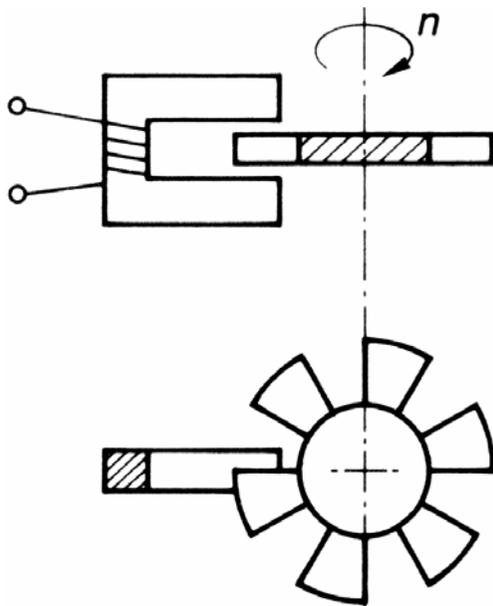
**Achtung:**

Amplitude  $U_{\text{ind}}$  ist abhängig von  $\dot{x}$

$\Rightarrow U_{\text{ind}}$  zu klein bei kleinen  $\dot{x}$



## Induktive Drehzahlmessung

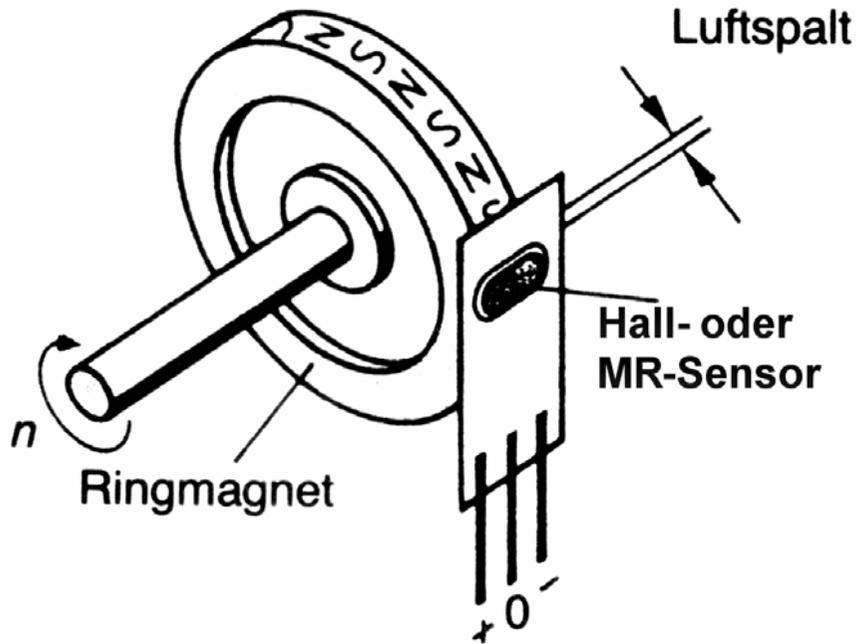


Bei geringer Drehzahl wird das Induktionssignal

klein und breit  $U_{\text{ind}} \propto - \frac{d\Phi}{dt}$

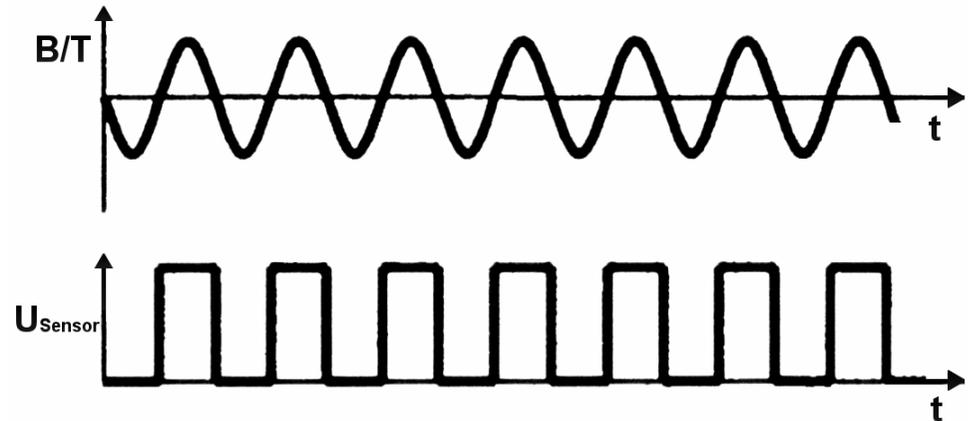
- 1) unter Detektionsschwelle
- 2) Überlappung mit Folgesignal

# Drehzahlmessung mit Hall- oder MR-Sensor



**Besser als induktive Messung !**

**Höhe der Amplitude wird nur durch Stärke des Magnetfelds und den Luftspaltabstand bestimmt**



**Anzahl der Polpaare => Anzahl der Flusswechsel z, bei z Flusswechsel => eine Radumdrehung**

