

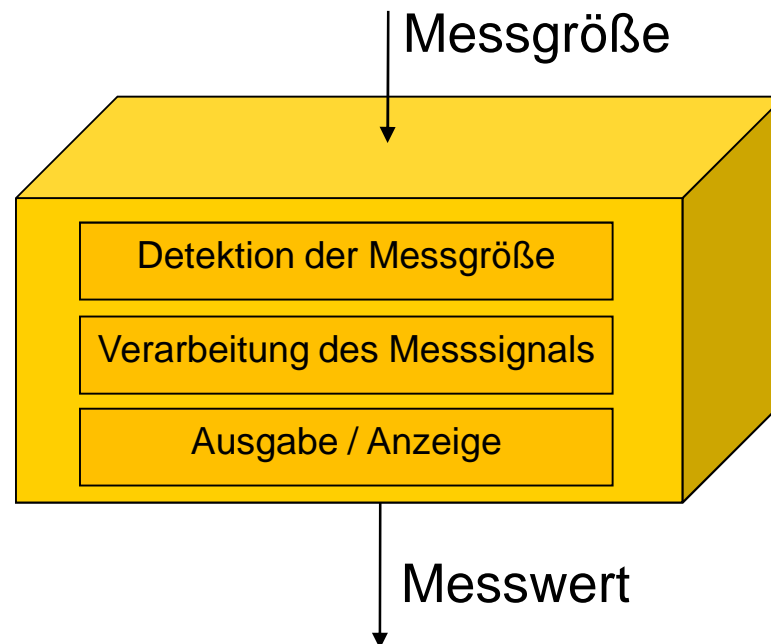
5 Elektromechanische Messwerke

Überblick

- Einführung, Motivation und Grundprinzip
- Drehspulmesswerk
- Galvanometer
- Elektrodynamisches Messwerk
- Dreheisenmesswerk
- Drehspul-Quotientenmesswerk
(Kreuzspulmesswerk)
- Drehmagnetmesswerk
- Elektrostatisches Messwerk
- Schaltzeichen und Symbole für direkt wirkende,
elektrische Messgeräte

Motivation und Grundlagen

- Grundfunktion eines Messgerätes



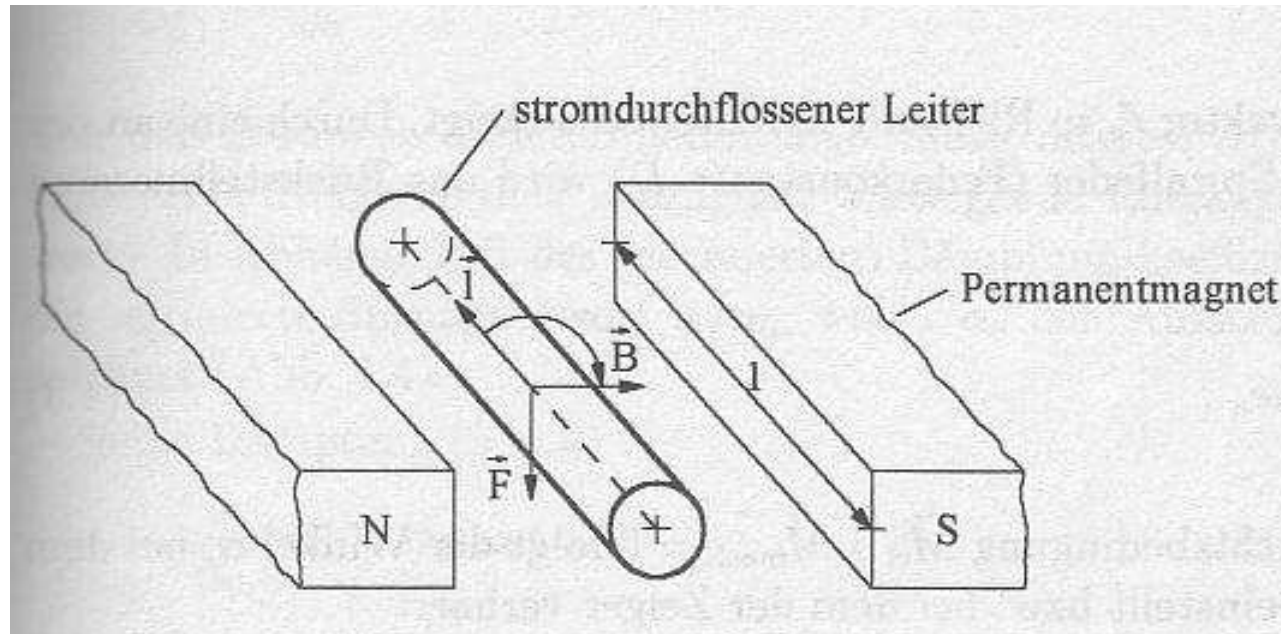
- elektromechanische, analoge Geräte
- elektronische, digitale Geräte

Prinzip

Elektromechanische Geräte

- Drehmomentenwaage
 - Drehmoment \sim Messgröße (auslenkend)
 - Drehmoment \sim Rückstellkraft (rückholend)
 - beide Momente im Gleichgewicht = Anzeige
- physikalische Grundlagen:
 - Lorenzkraft
 - Induktions- u. Durchflutungsgesetz
 - Drehmoment- und Kräftegleichgewichtsbeziehungen
- Zeigerinstrumente \rightarrow Momentanwert
- Gegensatz: aufzeichnende Geräte (Schreiber)

Prinzip: Kraft auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

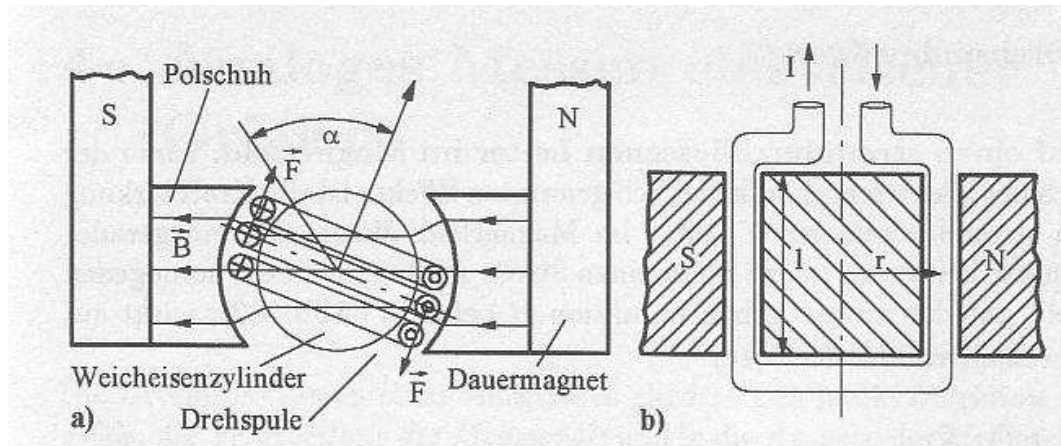


$$\vec{F} = I(\vec{\ell} \times \vec{B})$$

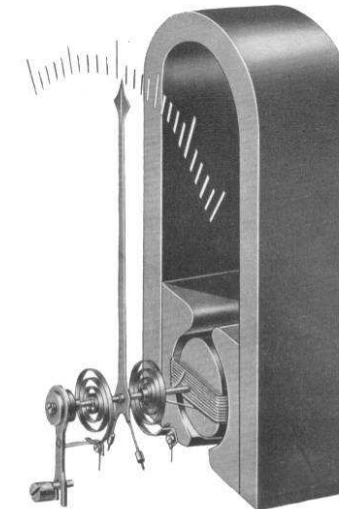
homogenes Magnetfeld, Lorentzkraft
 $\vec{\ell} \rightarrow$ positive Stromrichtung des Leiters

Drehspulmesswerk

Prinzip (statisches Verhalten):



...mit Außenmagnet



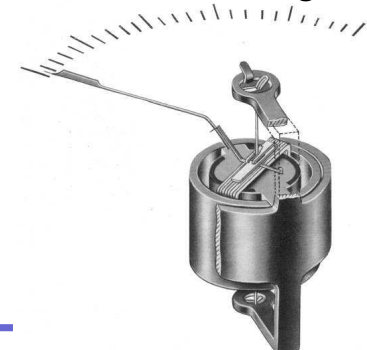
elektromagnetisches Moment: $\vec{M}_{el} = 2Nr \times \vec{F}$

mechanisches Rückstellmoment: $\vec{M}_{mech} = -D\alpha\vec{e}_a$

Drehmomentwaage
(Gleichgewichtsbedingung) $\vec{M}_{el} + \vec{M}_{mech} = 0$

→ Zeigerausschlag
(im Gleichgewicht): $\alpha = \frac{2NlBr}{D} I = S_i I$

... mit Kernmagnet



MESSTECHNIK I

Temperaturgang

- wichtig: Änderung des Widerstandes der Stromspule mit der Temperatur (Strom)
- vernachlässigbar bei Strommessung, nicht zu vernachlässigen bei Spannungsmessung (wenn Spannung aus Strom und R_M bestimmt wird)

$$R_M(T) \approx R_{M,0} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad \alpha = 0,004\text{K}^{-1}$$

- Abhilfe:
 - großer temperaturunabhängiger Vorwiderstand
 - Vorwiderstand mit negativem T-Koeffizienten $-\alpha$

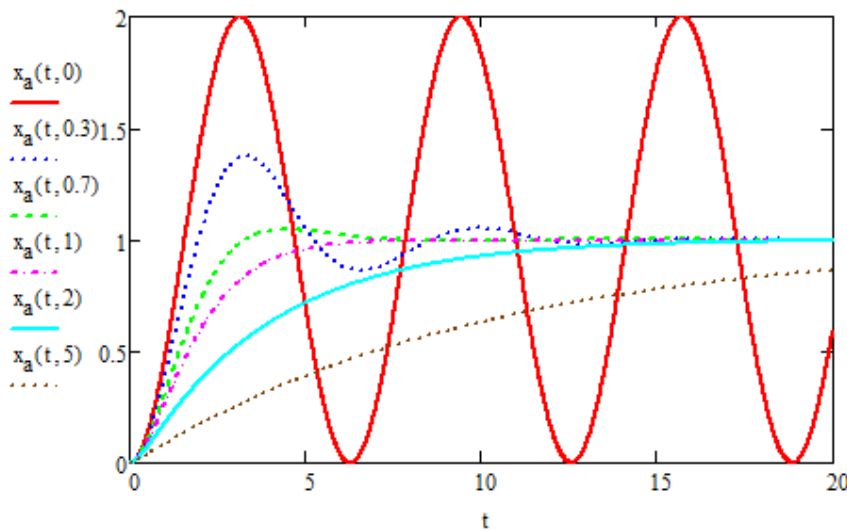
Drehspulmesswerk

Dynamisches Verhalten

- Sprungantwort des Messwerks ?
- Frequenzgang (Übertragungsfunktion) ?

Differentialgleichung: $T^2 \ddot{\alpha} + 2DT \dot{\alpha} + \alpha = M_{el}(t)$

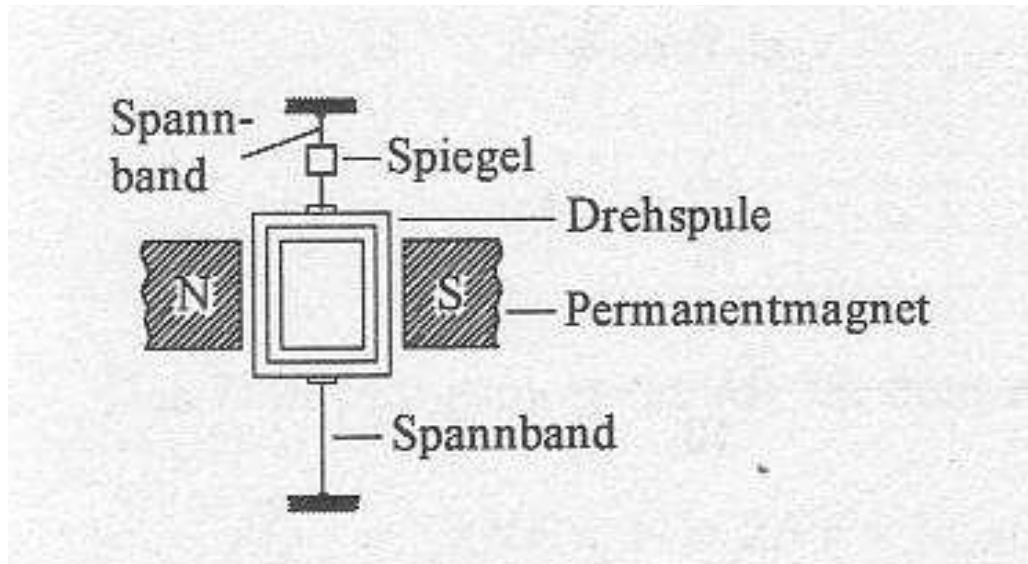
aus Kapitel 4:



1. Einschwingverhalten von Dämpfungsgrad und Zeitkonstante des Messwerks abhängig !

2. Übertragungsfunktion: Tiefpass \rightarrow Messwerk zeigt zeitlichen Mittelwert der Wechselfspannung an (Gleichanteil)

Galvanometer



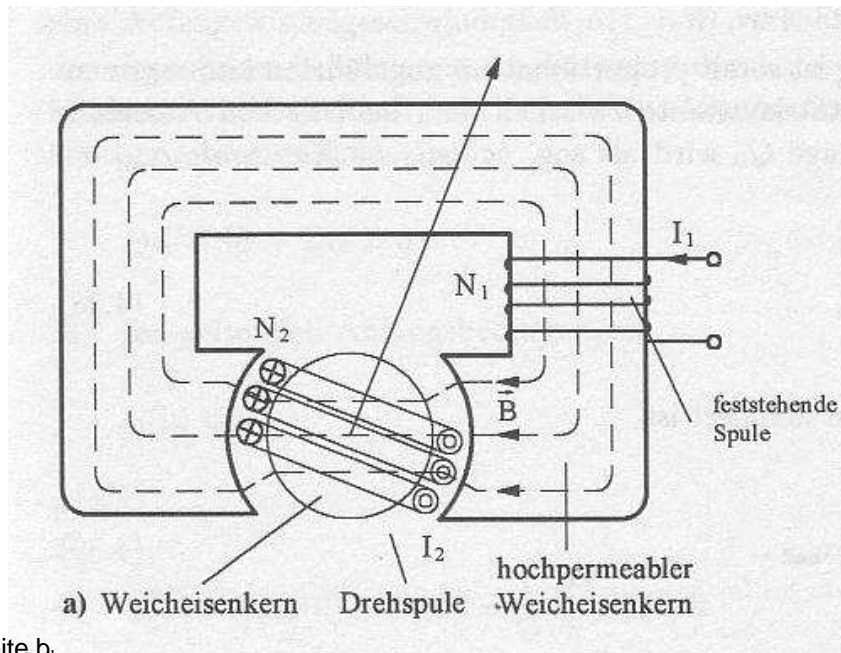
- sehr hohe Stromempfindlichkeit
- Spiegel-, Lichtzeiger-galvanometer
- z.B. zum Feststellen der Stromlosigkeit von Brücken

- Festlegung der dynamischen Eigenschaften durch Wahl eines Abgleichwiderstands im Stromkreis

Elektrodynamisches Messwerk

„Dynamometer“

Prinzip:



Luftspaltbreite b_L

magnetischer Fluss der Feldspule im Luftspalt:
abgeleitet vom Drehspulmesswerk:

magn. Feldstärke durch I_1
der „Feldspule“

$$\oint_S \vec{H} ds = N_1 I_1$$

$$B_L = \frac{N_1 I_1 \mu_0}{2b_L}$$

$$\alpha = \frac{2N_2 \ell B_L r}{D} I_2 = \frac{\mu_0 r \ell N_1 N_2}{b_L D} I_1 I_2 = k I_1 I_2$$

Elektrodynamisches Messwerk

- Gleichstrom: $\alpha \sim I_1 I_2$, bzw. $\alpha \sim IU$
- Verhalten bei Wechselstrom:

Ansatz: $i_1(t) = \hat{I}_1 \cos(\omega t)$; $i_2(t) = \hat{I}_2 \cos(\omega t + \varphi)$

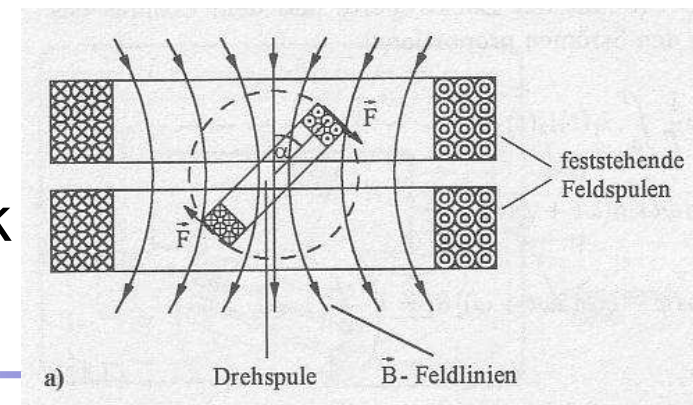
$$\alpha = k \overline{i_1(t) i_2(t)}$$

$$\rightarrow \alpha = k I_{1,\text{eff}} I_{2,\text{eff}} \cos(\varphi)$$

$$\alpha = k \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) i_2(t) dt$$

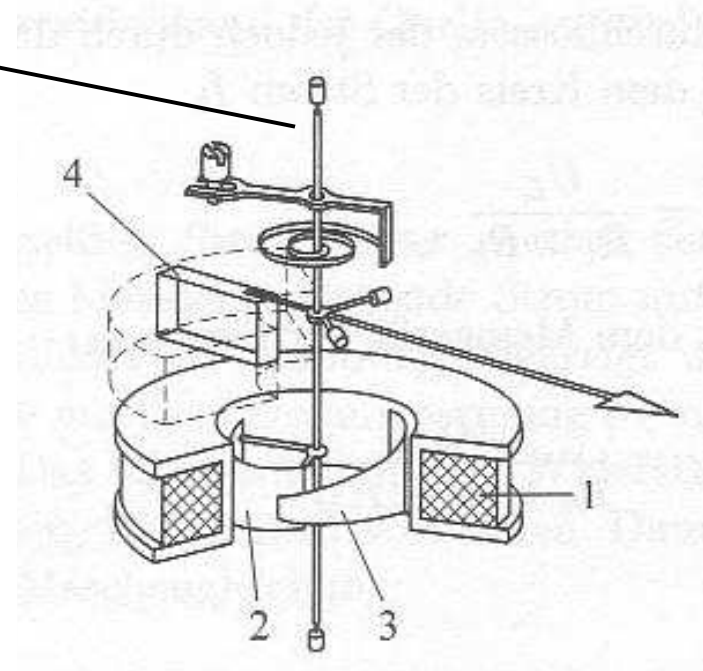
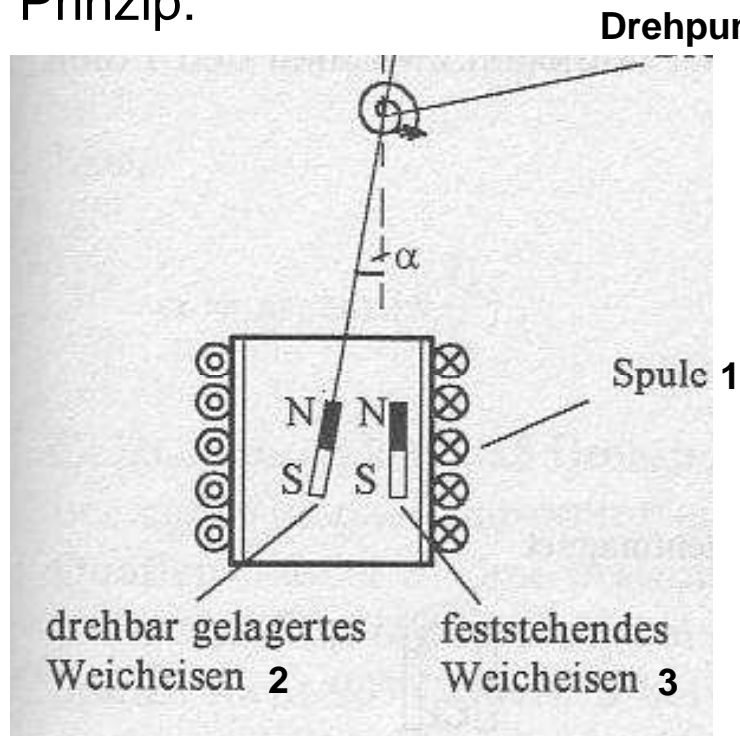
- Bauformen:
 - eisengeschlossenes Messwerk
 - eisenloses Messwerk

eisenloses Messwerk



Dreheisenmesswerk

Prinzip:



4: Vorrichtung zur Luftdämpfung

- Kraft zwischen zwei Magnetpolen
- zwei Eisenplättchen werden gleichsinnig durch Spule magnetisiert

Dreheisenmesswerk

- statische Eigenschaft (Zeigerausschlag):

$$E_{\text{magn}} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{in der Spule gespeicherte Energie})$$

L: Selbstinduktion der Spule)

Ansatz: $dE_{\text{mech}} = -dE_{\text{el}}$

$$\vec{M}_{\text{el}} = \frac{dE_{\text{magn}}}{d\alpha} \vec{e}_a = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 \vec{e}_a$$

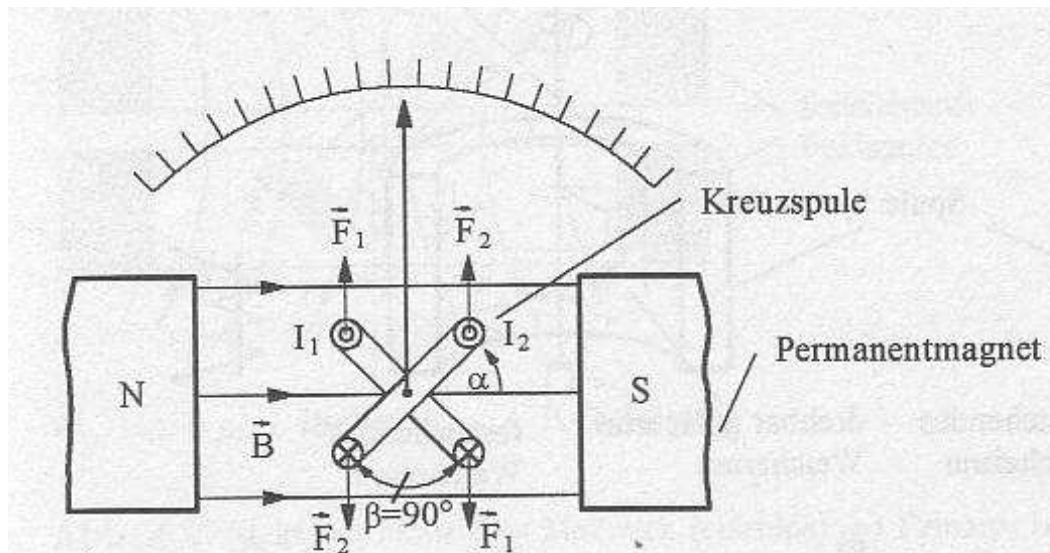
$$M_{\text{mech}} = -D\alpha \vec{e}_a \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{1}{2D} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = k(\alpha) I^2$$

- Linearisierung: $\frac{dL}{d\alpha} \sim \frac{1}{\alpha} \rightarrow \alpha = k_1 \sqrt{I^2} = k_1 |I|$

- dynamisches Verhalten: $\bar{\alpha} = k_1 \sqrt{i(t)^2} = k_1 \cdot I_{\text{eff}}$

Kreuzspulmesswerk

Prinzip:



Ansatz:

$$\vec{F}_1 = N_1 I_1 (\vec{l} \times \vec{B})$$

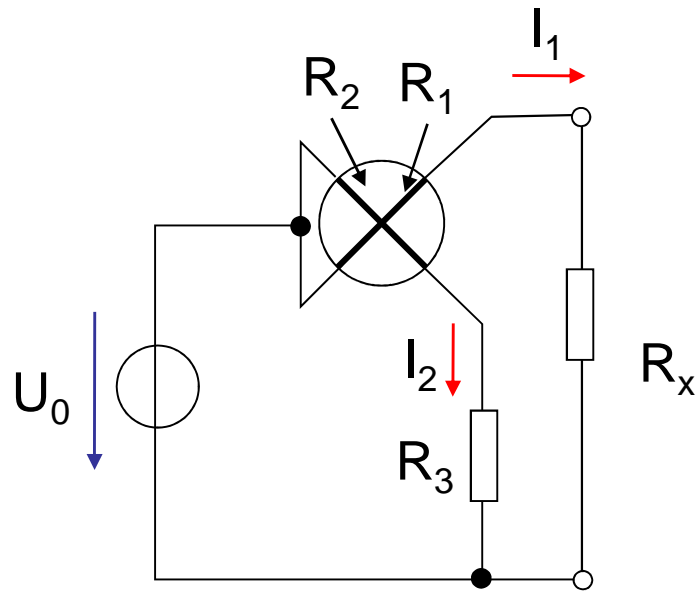
$$\vec{F}_2 = N_2 I_2 (\vec{l} \times \vec{B})$$

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 = 0$$

$$\rightarrow \alpha = \arctan \left(k \frac{I_2}{I_1} \right)$$

- geeignet zur direkten Messung von ohmschen Widerständen

Beispiel: direkte Messung von ohmschen Widerständen



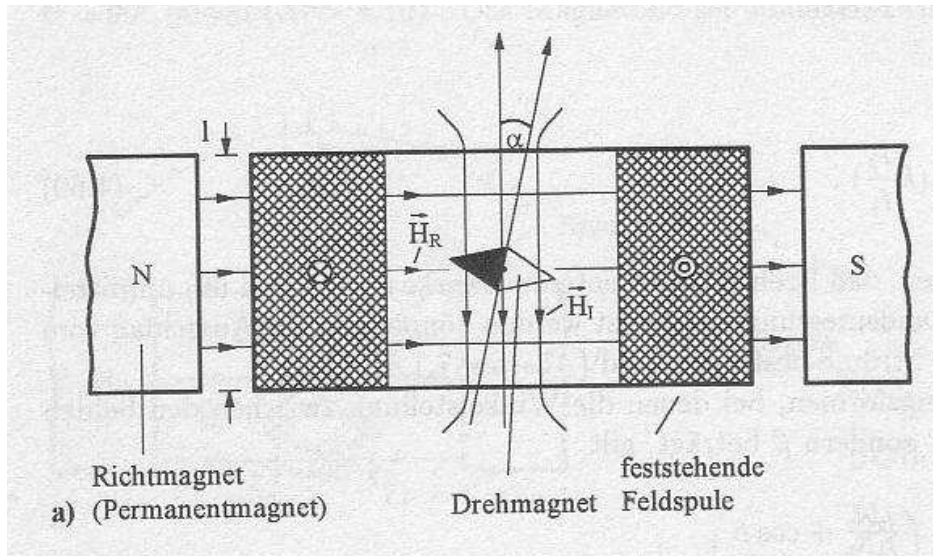
$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$R_x = R_3 \frac{1}{k} \tan(\alpha)$$

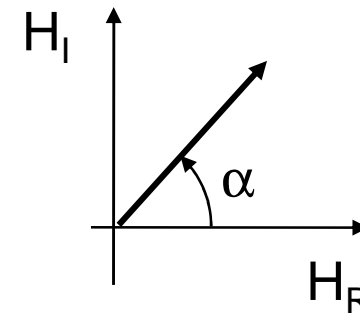
$$\begin{aligned} R_x &\gg R_1 \\ R_3 &\gg R_2 \end{aligned}$$

Drehmagnetmesswerk

Prinzip:



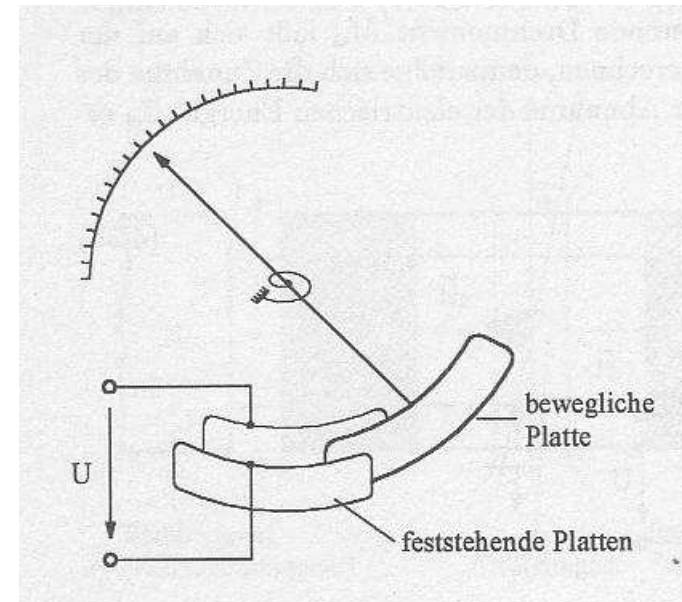
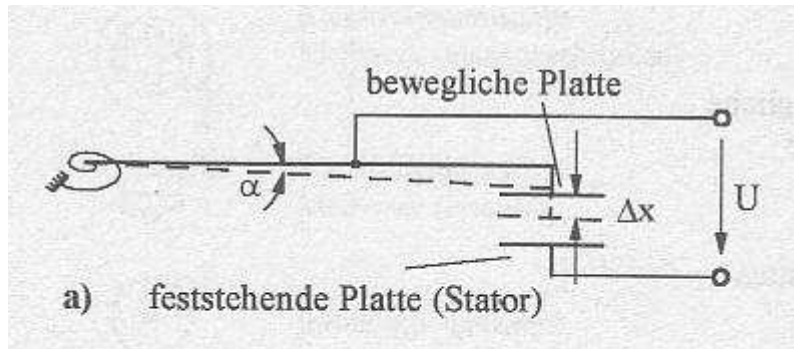
$$\oint_S \vec{H}_I d\vec{s} = NI$$



$$\tan \alpha = \frac{H_I}{H_R} = \frac{N}{l H_R} I$$

- H_R und H_I überlagern sich vektoriell
- bewegliche Magnet zeigt in Richtung des resultierenden Feldes

Elektrostatishes Messwerk



Ansatz:

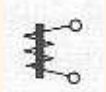
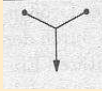

$$dE_{\text{mech}} = -dE_{\text{el}}$$

$$M_{\text{el}} = \frac{1}{2} u^2 \frac{dC}{d\alpha}; \quad M_{\text{mech}} = -D\alpha$$

$$M_{\text{el}} + M_{\text{mech}} = 0$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{dC}{d\alpha} u^2 = k(\alpha) u^2$$





Schaltzeichen und Symbole für direkt wirkende, elektrische Messgeräte



Art des Messwerks			
Drehspulmesswerk		Drehspulmesswerk mit Gleichrichter	
Dreheisenmesswerk		elektrodynamisches Messwerk (eisengeschlossen)	
Kreuzspulmesswerk		elektrodynamisches Messwerk (eisenlos)	
Drehmagnetmesswerk		Induktionsmesswerk	
elektrostatisches Messwerk		Hitzedrahtmesswerk	
Bimetallmesswerk		Vibrationsmesswerk	

Schaltzeichen und Symbole für direkt wirkende, elektrische Messgeräte

Art des Messgröße			
Gleichstrom		Wechselstrom	
Gleich- und Wechselstrom		Drehstrom (ein Messwerk)	
Gebrauchslage des Messgeräts			
senkrecht		waagrecht	
schräg (Winkelangabe beachten)		Nenngebrauchsbereich	

Schaltzeichen und Symbole für direkt wirkende, elektrische Messgeräte

Sicherheit / Prüfspannung			
Prüfspannungszeichen (500V)		Prüfspannungszeichen (2 kV)	
Achtung		Prüfspannung nicht ermittelt	

Genauigkeitsklasse			
Klasse 1 für Gleichstrom		Klasse 1,5 für Wechselstrom	

Lernziele Kapitel 5

- Grundprinzip elektromechanische Messwerke
- Aufbau und Prinzipien
- Dynamische Eigenschaften
- Wichtige Beispiele:
 - Drehspulmesswerk
 - Galvanometer
 - Elektrodynamisches Messwerk
 - Dreheisenmesswerk
- Schaltzeichen und Symbole für Messwerke