

3 Direktes Messen von Spannung und Strom

3.1 Bedeutung der analogen Meßtechnik

Analoge Meßwertausgaben sind auch heute noch immer dann zweckmäßig, wenn der Mensch in einen technischen Prozeß eingebunden ist.

Müssen Trends oder Istwertabweichungen von Sollwerten z.B. erfaßt oder sogar registriert werden, sind analoge Meßwertabbildungen unerlässlich. Eine Digitaluhr bietet zwar die Möglichkeit die Uhrzeit schnell und exakt ablesen zu können aber, wenn es um das schnelle Erkennen von Differenzen z.B. Restzeiten geht, bietet die Analoguhr Vorteile.

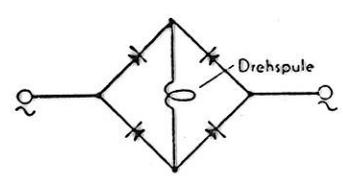
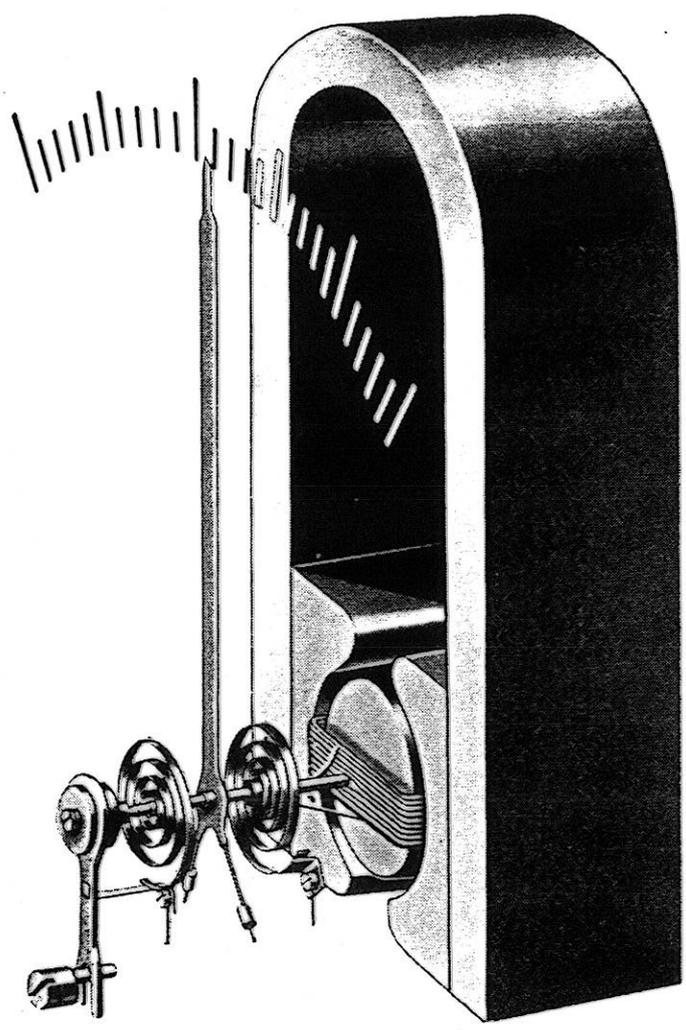
VORTEIL DER DIGITALMESSTECHNIK: EINFACHERE, KOMPLEXERE
WEITERVERARBEITUNG

3.2 Aufbau und Wirkungsweise eines Drehspulmeßinstrumentes

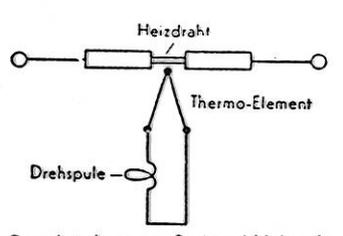
Beispiele für Meßwerke mit signalverarbeitenden Eigenschaften sind das Dreheisenmeßwerk zur Effektivwertmessung, das elektrodynamische Meßwerk zur Wirkleistungsmessung oder das Kreuzspulmeßwerk zur Widerstandsbestimmung über Quotientenbildung. Spezielle Meßwerke wurden auch konstruiert zur Bestimmung der Phase bzw. des Leistungsfaktors oder zur Bestimmung von Kapazitäten oder kleinen Zeiten über elektrische Ladungen. Schließlich war es bei Dreiphasen-Leistungmeßumformern üblich, das über elektrodynamische Meßwerke erzeugte Summendrehmoment durch das über einen Gleichstrom in einem Drehspulmeßwerk erzeugte Drehmoment zu kompensieren. Auf ähnliche Weise konnten auch kleine Meßdrehmomente bestimmt werden. Auffällig ist bei dem genannten Dreiphasen-Leistungmeßumformer, daß die Aufgabe der Meßsignalverarbeitung, nämlich die Addition von elektrischen Leistungen, wieder auf der nichtelektrischen Seite erfolgt. Die anteiligen Leistungen werden als Drehmomente abgebildet und in ihrer Wirkung an der gemeinsamen Achse addiert.



Drehspul-Meßwerk mit Außenmagnet



Grundschialtung des Drehspul-Meßwerks mit Gleichrichter



Grundschialtung des Drehspul-Meßwerks mit Thermoumformer

Das Drehspul-Meßwerk besteht aus einer Spule, die im homogenen Feld eines kräftigen Dauermagneten um einen Weicheisenkern drehbar gelagert ist. Im stromlosen Zustand wird sie durch zwei Spiralfedern, die gleichzeitig als Stromzuleitungen dienen, in der Null-Lage gehalten. Fließt Gleichstrom durch die Spule, so entsteht ein Drehmoment, das der Stromstärke verhältnismäßig ist. Die Spule mit Zeiger dreht sich so weit, bis die Gegenkraft der Spiralfedern dem Drehmoment der Spule das Gleichgewicht hält. Die Drehspule ist auf ein Aluminiumrähmchen gewickelt; in diesem entstehen bei der Drehung im Magnetfeld Wirbelströme, die das Meßwerk dämpfen.

Das Drehspul-Meßwerk ist das meißempfindlichste elektrische Meßwerk. Ströme in der Größenordnung von Milliardstel Ampere können damit gemessen werden. Durch Vorschalten eines Gleichrichters oder eines Thermoumformers sind auch Wechselströme bis zu hohen Frequenzen meßbar. Daher werden Wechselstrommessungen vielfach auf Gleichstrommessungen zurückgeführt, um so die hohe Empfindlichkeit des Meßwerks auszunutzen.

Eine Sonderstellung unter allen Meßwerken nimmt das **lineare Drehspulmeßwerk mit Außenmagnet** ein. Der physikalische Meßeffect beruht auf der **selbständigen Kompensation** des durch einen proportionalen Meßstrom I in einer Drehspule elektrisch erzeugten Drehmomentes M_{el} mit einem über zwei Drehfedern mechanisch erzeugten Gegenmoment M_{mech} , das wiederum dem Ausschlagwinkel α der Drehspule proportional ist. $M_{el} = M_{mech}$

Das elektrisch erzeugte Drehmoment M_{el} ergibt sich aus der Kraft F_{el} , die auf einen vom Meßstrom I durchflosse-

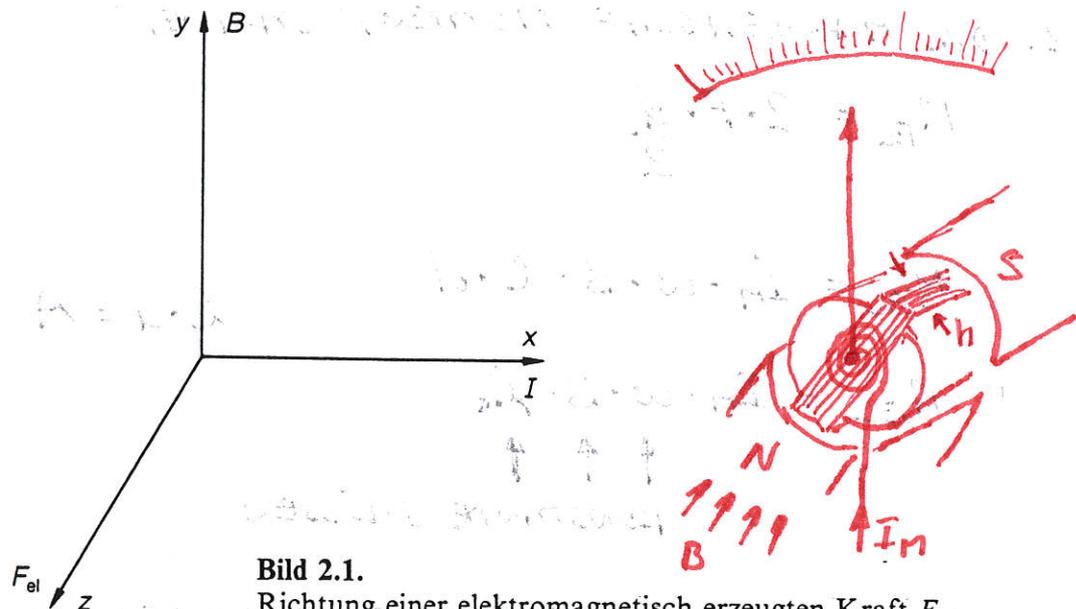


Bild 2.1.

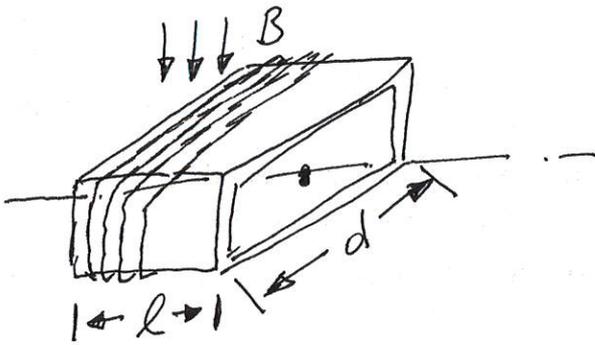
Richtung einer elektromagnetisch erzeugten Kraft F_{el} .

nen Leiter der Länge h (später ist h die wirksame Höhe der Drehspule) wirkt, der sich in einem Magnetfeld der magnetischen Induktion B befindet:

$$F_{el} = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot h = |\vec{I}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin(\vec{I}, \vec{B}) \cdot h.$$

Diese elektromagnetisch erzeugte Kraft F_{el} ist maximal, wenn Strom I und magnetische Induktion B aufeinander senkrecht stehen. Die Richtung der Kraft F_{el} ergibt sich nach Bild 2.1 entsprechend der Richtung z eines mathematisch rechtsdrehenden x, y, z -Koordinatensystems, wenn der Strom I in Richtung x und die magnetische Induktion B in Richtung y verläuft. Die Kraft F_{el} ragt in Bild 2.1 aus der durch I und B gebildeten Zeichenebene heraus.

GRUNDLAGE:



ALLE RAHMEN MIT
WICKLUNG

B = INDUKTION

w = WINDUNGSZAHL

I_M = MESSSTROM

d = RÄHRCHEN DURCH

l = RÄHRCHENHÖHE

α = ZEIGERLAUSSCHLAG
(FEDERAUSLENKUNG)

1. KRAFT AUF EINEN LEITER

$$F = I_M \cdot w \cdot B \cdot l$$

2. DAS MAGNETISCHE MOMENT LAUFET

$$M_{EL} = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2}$$

$$M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot l \cdot d$$

$$l \cdot d = A$$

$$M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot A$$

↑ ↑ ↑

KONSTANTE GRÖSSEN

3. PRINZIP DER SELBSTSTÄNDIGEN KOMPENSATION

MECHANISCHES MOMENT $M_{MECH} = C \cdot \alpha$

$$M_{EL} = M_{MECH}$$

$$I_M = C \cdot \alpha$$

↑

FEDERKONSTANTE

$$\alpha \sim I_M$$

SKALENGLEICHUNG

Bei linearen Drehspulmeßwerken (mit Außenmagneten) wird mit Hilfe eines im Magnetkreis angeordneten Permanentmagneten ein radialsymmetrisches Magnetfeld der Induktion B erzeugt. In diesem Feld können sich die Flanken einer drehbar gelagerten Spule (Drehspule) auf einer Kreisbahn bewegen (Bild 2.2). Innerhalb der Drehspule befindet sich ein Weicheisenkern, der den Luftspalt im Sinne einer optimalen Ausnutzung des verwendeten Magneten verkleinert. Außerdem ergibt sich bei ebenfalls kreisförmig ausgebildeten Polschuhen ein etwa konstanter Luftspalt und damit näherungsweise das gewünschte radialsymmetrische Magnetfeld. Solange sich die Flanken der Drehspule im Luftspalt befinden, ist die magnetische Induktion unabhängig von der Winkelstellung der Drehspule und konstant.

Bei einem Meßstrom I , einer magnetischen Induktion B , einer Windungszahl w der Drehspule, einem Rähmchendurchmesser d und einer Rähmchenhöhe h beträgt das elektrisch erzeugte Drehmoment M_{el}

$$M_{el} = 2 \cdot F_{el} \cdot \frac{d}{2} = I \cdot B \cdot d \cdot h \cdot w$$

GRUNDLAGE :

1. KRAFT AUF EINEN LEITER : $F = I_M \cdot w \cdot B \cdot L \Rightarrow L=h \Rightarrow F = I_M \cdot w \cdot B \cdot h$

2. DAS MAGNETISCHE MOMENT : $M_{el} = F \cdot \frac{d}{2} \cdot 2 = F \cdot d$



$$M_{el} = I_M \cdot w \cdot B \cdot h \cdot d \quad h \cdot d = A$$

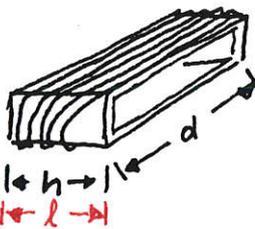
$$M_{el} = I_M \cdot w \cdot B \cdot A$$



↑ KONSTANTE GRÖSSEN

$$M_{mech} = C \cdot \alpha$$

$C = \text{FEDERKONSTANTE}$
 $\alpha = \text{AUSSCHLAGWINKEL}$



ALURAHMEN MIT WICKLUNG

$M_{el} = M_{mech}$

$I_M \sim \alpha$

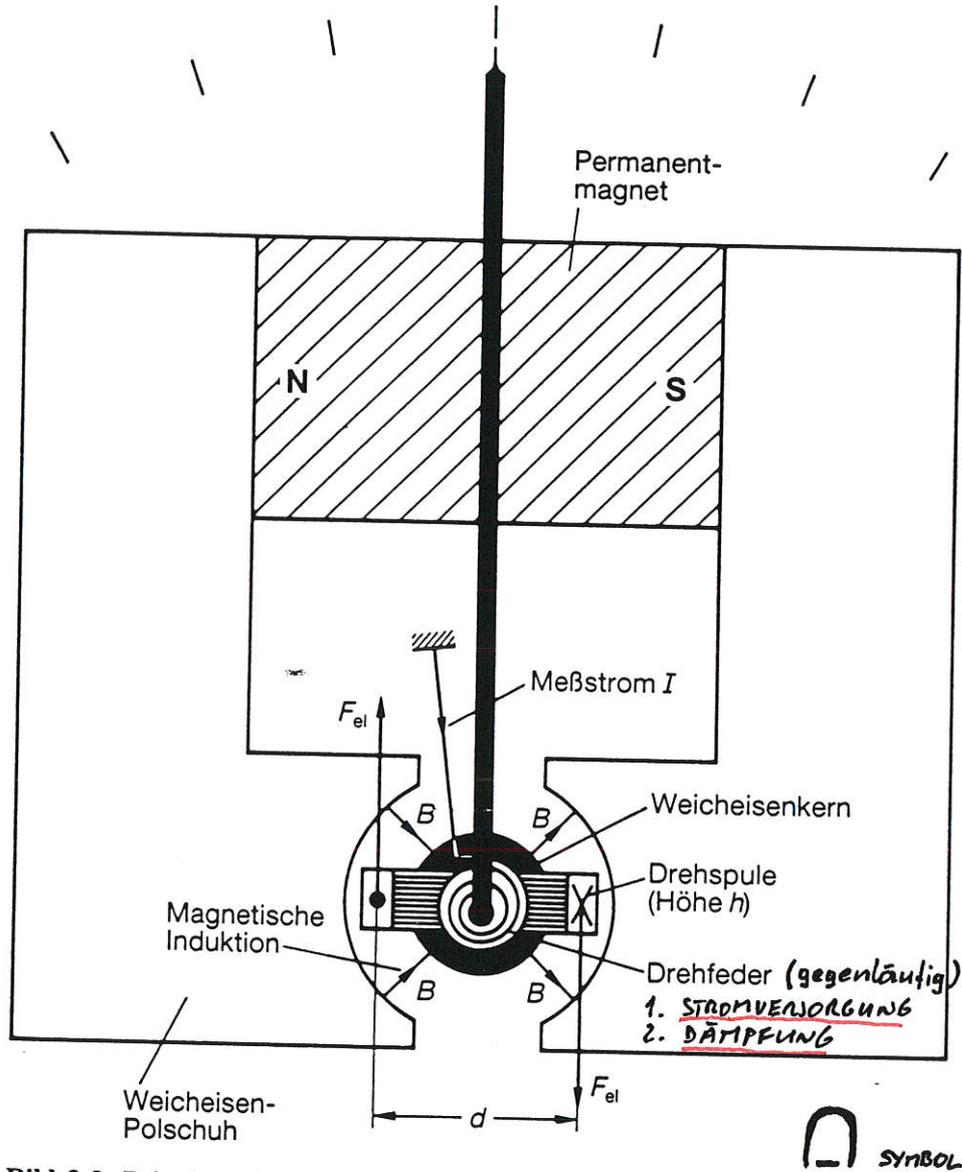


Bild 2.2. Prinzip eines linearen Drehpulmeßwerks.

Diesem Moment entgegen wirkt das in zwei Drehfedern mit der gemeinsamen Drehfederkonstanten (Richtmoment) D mechanisch erzeugte Moment M_{mech} , das dem Ausschlagwinkel α der Drehspule und des mit ihr fest verbundenen Zeigers proportional ist:

$$M_{\text{mech}} = D \cdot \alpha.$$

↑
KONSTANTE

oder

$$M_{\text{mech}} = C \cdot \alpha$$

C = FEDERKONSTANTE

Im eingeschwungenen Zustand (statisches Verhalten) errechnet sich der Skalenverlauf aus $M_{el} = M_{mech}$ zu

$$I \cdot B \cdot d \cdot h \cdot w = D \cdot \alpha$$

$$\text{oder } \alpha = \frac{1}{D} \cdot B \cdot d \cdot h \cdot w \cdot I.$$

Der Ausschlagwinkel α ist damit linear vom Meßstrom I abhängig und die Stromempfindlichkeit $d\alpha/dI$ ist konstant und beträgt

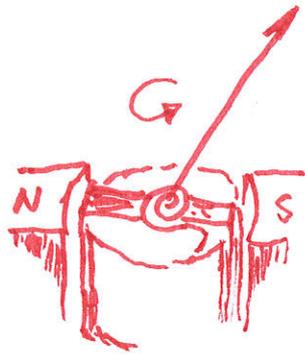
$$\frac{d\alpha}{dI} = \frac{Bdhw}{D}$$

da B, d, h, w und D konstant sind folgt:

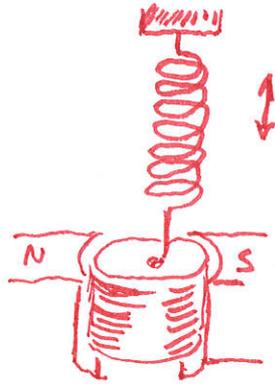
$$\alpha \sim I_M \quad \text{SKALENGLEICHUNG}$$

AUS DER SKALENGLEICHUNG KANN GEFOLGERT WERDEN:

1. DAS MESSGERÄT HAT EINE LINEARE SKALENEINTEILUNG
2. DIE POLARITÄTSABHÄNGIGKEIT DES MESSGERÄTES



ROTATORISCH



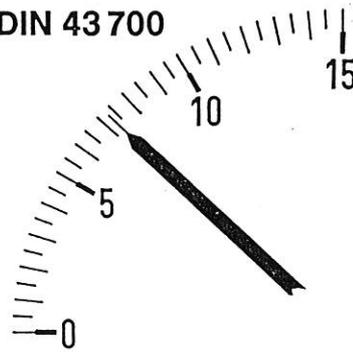
TRANSLATORISCH

Drehspul-Meßgeräte

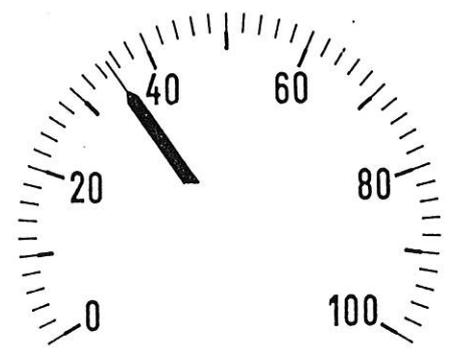
Skalen- und Zeigerausführungen

Quadratische Meßgeräte nach DIN 43 700

Normalausführung: Grobfeinteilung mit
Schneiden-Balkenzeiger nach DIN 43 802



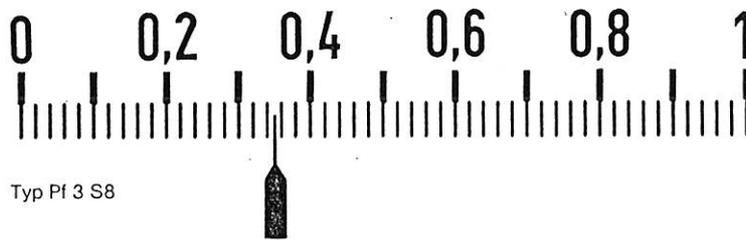
Quadrantskala Typ Pqs 0 S5



Kreisskala Typ Pq 0 S5-250

Rechteckige Meßgeräte mit Quer- oder Hochskala nach DIN 43 700

Normalausführung: Grobfeinteilung mit Schneiden-Balkenzeiger nach DIN 43 802



Typ Pf 3 S8

Schmalprofil-Meßgeräte

Normalausführung:

Quer- oder Hochskala mit Balkenzeiger,
Pff 144 x 36 mit Messer-Balkenzeiger



Typ Pff 96 x 24, Querskala



Typ Pff 144 x 36, Querskala

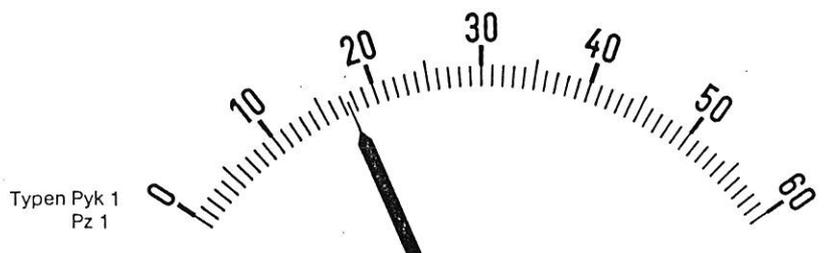


Typ Pff 00, Querskala

Weitwinkel-Meßgeräte

Normalausführung:

Grobfeinteilung mit Schneiden-Balkenzeiger



Typen Pyk 1
Pz 1

3.2.1 Konstruktive Gesichtspunkte

Schon bei der Darstellung des physikalischen Meßeffectes wurde von einer rotatorischen Konstruktion mit Drehspule und Drehfeder ausgegangen, deren Drehmomente sich kompensieren. Prinzipiell wäre jedoch eine translatorische Konstruktion mit Tauchspule und gestreckter Schraubenfeder möglich gewesen, deren Kräfte sich bei einer bestimmten Auslenkung der Feder kompensieren. Eine rotatorische Ausführung mit Drehspule ist nicht nur wegen der kompakteren Konstruktion vorzuziehen, sondern vorwiegend wegen der einfacheren Realisierbarkeit reibungsarmer Lagerungen. Für die Lagerung der Drehspule mit Zeiger werden vorwiegend Spitzenlagerungen oder Spannbandlagerungen verwendet; nur in Ausnahmefällen kommen Zapfenlagerung oder Tragbandlagerung in Betracht. Spitzenlagerungen mit Lagersteinen findet man sehr häufig. Die Fertigung von Spitzenlagern wird gut beherrscht. Es verbleibt immer ein sehr kleines äußeres Reibungsmoment, das beim Bau von Meßwerken mit höheren Genauigkeitsanforderungen störend war.

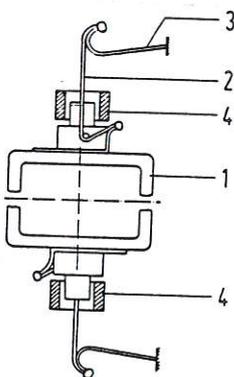
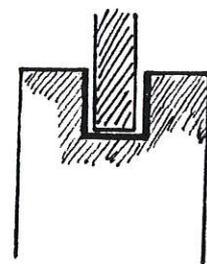


Bild 2.2: Spannbandlagerung

- | | |
|-------------|---------------------|
| 1 Drehspule | 3 Spannfeder |
| 2 Spannband | 4 Abfangvorrichtung |



SPITZENLAGERUNG

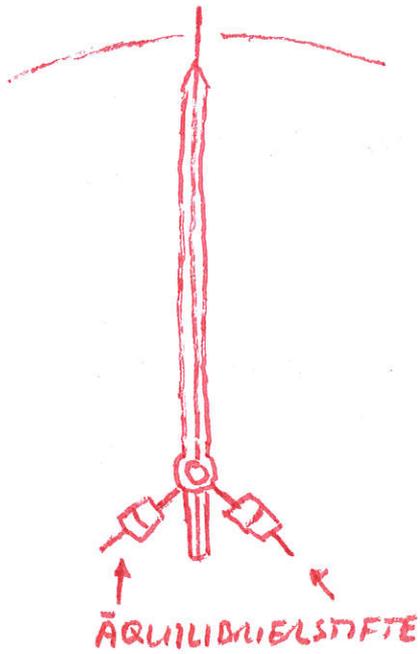


ZAPFENLAGERUNG

Ohne äußere Reibung lassen sich Spannbandlagerungen realisieren; die innere Reibung ist vernachlässigbar klein. Spannbandgelagerte Meßwerke besitzen hohe Schwingungs- und Stoßfestigkeit. Die Fertigung der gelöteten Spannbandlager ist vergleichsweise schwieriger. Während das mechanische *Gegendrehmoment* bei spitzengelagerten Meßwerken durch zwei gegensinnig belastete Spiralfedern erzeugt wird, fungieren die beiden Spannblätter bei spannbandgelagerten Meßwerken gleichzeitig als Torsionsfedern zur Erzeugung des Rückstellmoments. Die Stromzuführung zur Wicklung der Drehspule erfolgt ebenfalls über die beiden Spiralfedern bzw. über die beiden Spannblätter. Im Falle der Spannbandlagerung erfüllen die Spannblätter also die Aufgaben der Lagerung, der Torsionsfedern und der Stromzuführung (Multifunktionalität). Die Drehspule selbst ist gewöhnlich mit lackisoliertem Kupferdraht von 0,02 bis 0,3 mm Durchmesser bewickelt. Die Wicklung wird vom Rähmchen getragen, das in der Regel aus Aluminium gefertigt ist und eine Kurzschlußwindung darstellt. Bei Bewegung des Rähmchens wird durch die im Rähmchen induzierte Spannung und dem daraus resultierenden Kurzschlußstrom ein der Winkelgeschwindigkeit proportionales Bremsmoment erzeugt, das zur Dämpfung des Einstellvorgangs benötigt wird (Induktionsdämpfung). In ähnlicher Weise verursacht ein an die Drehspule angeschlossener äußerer Widerstand ein zusätzliches Dämpfungsmoment, das der Summe von Innen- und Außenwiderstand umgekehrt proportional ist.

Vorwiegend im Zusammenhang mit anderen Meßwerkstypen sind als Dämpfungsmaßnahmen Wirbelstromdämpfung (ähnlich der Induktionsdämpfung) oder Luftkammerdämpfung möglich [2.1].

Der Lageeinfluß auf die Anzeige von Meßwerken bei unterschiedlichen Gebrauchslagen kann durch genaue Äquili-



ÄQUILIBRIESTIFTE

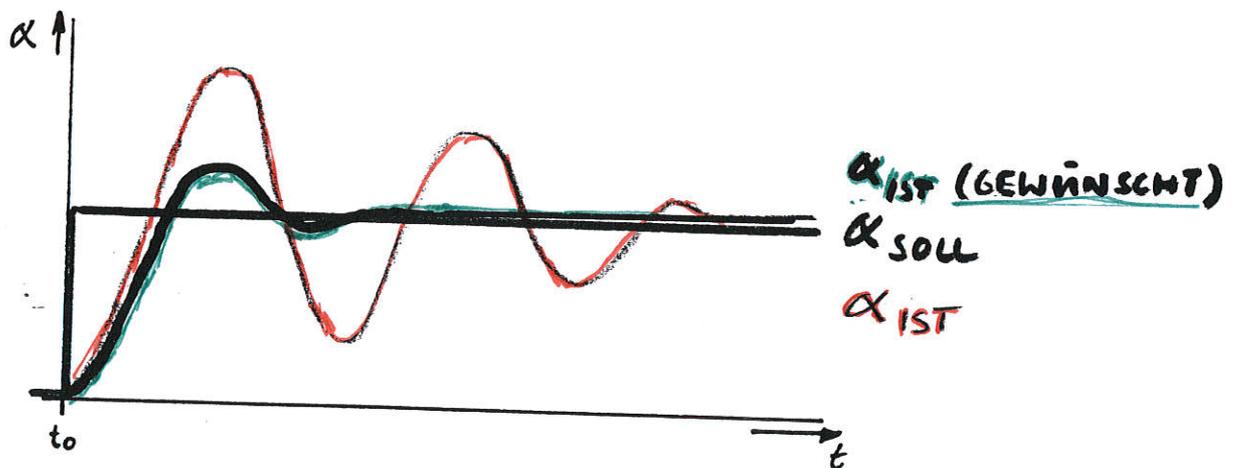
ÄQUILIBRASTIK = KUNST DES GLEICH
GEWICHT HALTENS

brierung mit Hilfe der auf Äquilibrierstifte aufgedrehten Äquilibriergewichte stark vermindert werden. Das Gewicht des Zeigers bestimmt im wesentlichen das Trägheitsmoment des beweglichen Organs und begrenzt damit die erreichbare Kreisfrequenz der ungedämpften Eigenschwingung des Meßwerks.

Die Skalen der Betriebsmeßinstrumente werden gewöhnlich in schwarz auf weiß lackierten Untergrund aufgedruckt. Nur für die früher üblichen Feinmeßinstrumente wurden Messerzeiger und Spiegelskalen angewendet, um den Parallaxenfehler auszuschalten.

Verbleibt als wesentliches Konstruktionselement für Drehspulmeßwerke der permanentmagnetische Kreis.

DYNAMIK DES MESSWERKES :



DIE DYNAMIK DES DREHSPULMESSWERKES IST VON DER DÄMPFUNG ABHÄNGIG

DIE DÄMPFUNG HÄNGT AB VON :

1. FEDER-AUSWAHL
2. LUFT-KAMMER-DÄMPFUNG
3. WIRBELSTROMDÄMPFUNG

DER VERWENDETEU METHODE AB

(DIE WIRBELSTRÖME WIRKEN NACH DER LENZ'SCHEN REGEL DEM MAGNETFELD ENTGEGEN $U_{IND.} = -\frac{d\Phi}{dt}$)

3.3 Aufbau und Wirkungsweise eines Dreheisenmeßinstrumentes

Dreheisenmeßwerk. Das Dreheisenmeßwerk verwendet eine feststehende Spule, in deren Feld zwei Eisenplättchen magnetisiert werden (Bild 2.6). Das eine ist befestigt, das andere ist beweglich und durch eine Feder in der Ruhelage gehalten. Die entstehenden Magnete haben gleichgerichtete Pole. Sie stoßen sich infolgedessen mit einer Kraft ab, die proportional dem Produkt ihrer magnetischen Momente ist. Das Moment jedes Plättchens hängt von dem durch die Spule fließenden Strom I ab. Der Ausschlag α des Instruments ist damit proportional zu I^2 und mit k als Proportionalitätsfaktor kann geschrieben werden

$$\alpha = kI^2.$$

Das Dreheiseninstrument bewertet das Quadrat des durchgehenden Stromes und seine Kennlinie verläuft nach (2.11) zunächst quadratisch. Durch geeignet gestaltete Plättchen kann aber auch ein linearer Zusammenhang zwischen Strom und Ausschlagwinkel erreicht werden.

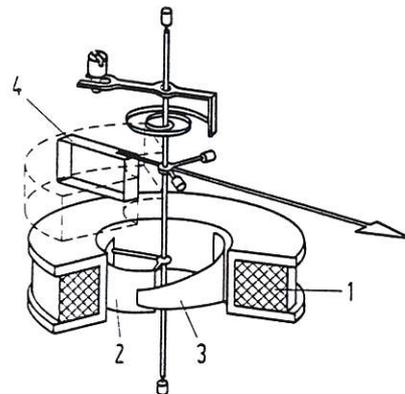


Bild 2.6: Rundspul-Dreheisenmeßwerk

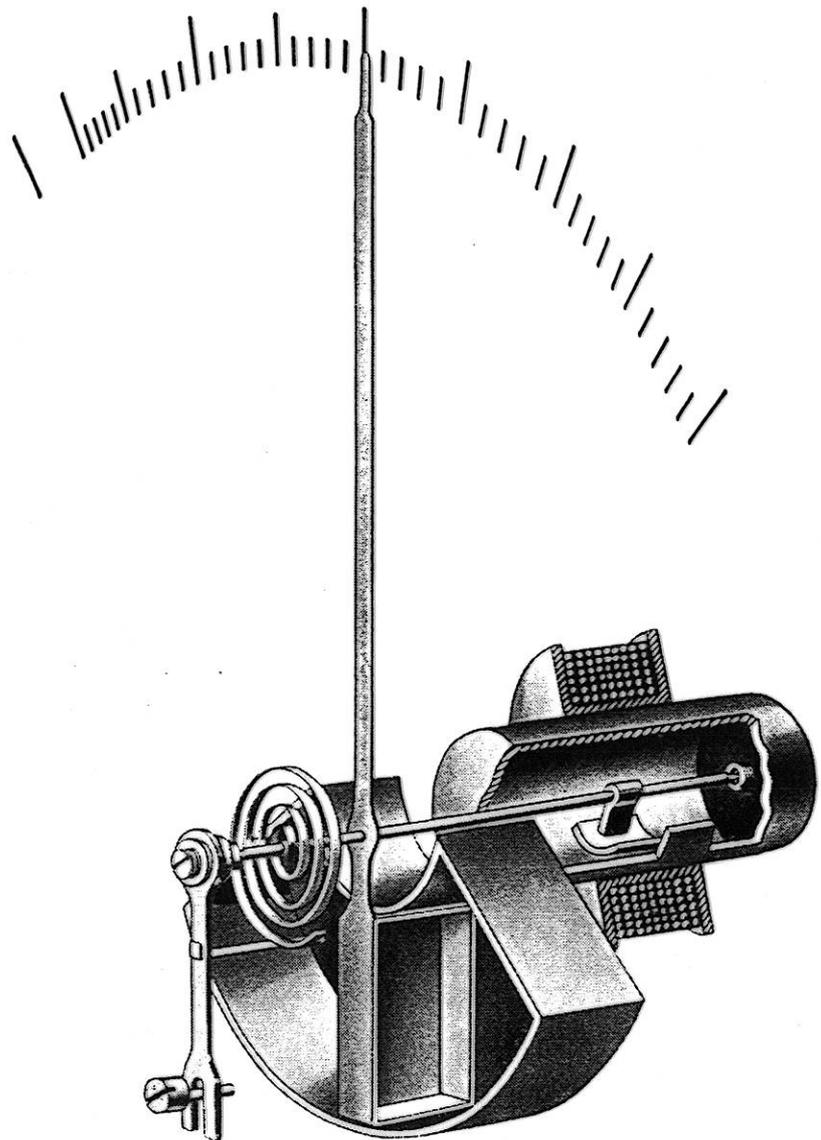
- 1 Feldspule
- 2 bewegliches Eisenplättchen
- 3 feststehendes Eisenplättchen
- 4 Flügel zur Luftdämpfung

Beim Dreheiseninstrument wird wie beim Drehmagnetinstrument das benötigte Magnetfeld von dem zu messenden Strom erzeugt. Der Eigenverbrauch ist daher größer als beim Drehspulinstrument. Die Wirbelstromdämpfung ist nicht ausreichend; eine Luftdämpfung wird benötigt.

- o DIE FEDERN HABEN HIERDEI NUR MECHANISCHEN ANFORDERUNGEN STAND ZU HALTEN
- o DA BEIDE PLÄTTCHEN GLEICH MAGNETISIERT WERDEN, IST DIE STROMRICHTUNG UNWESENTLICH
- o DER AUSSCHLAG BZU. BEREICH IST VON DER FORM DER PLÄTTCHEN BZU. VOM ABSTAND DER PLÄTTCHEN ZUEINANDER ABHÄNGIG

H&B

Dreheisen-Meßwerk



Innerhalb einer Ringspule sind zwei Eisenkerne angeordnet. Der eine ist an dem Spulenkörper, der andere an einer drehbaren Achse befestigt. Fließt der zu messende Strom durch die Spule, so entsteht ein Feld, das durch den feststehenden Eisenkern beeinflusst wird. Auf den beweglichen Eisenkern wirkt dann eine Kraft, die ihn zur Stelle größter Kraftliniendichte zu verschieben sucht. Die Achse mit dem Eisenkern wird so weit gedreht, bis die zunehmende Spannung der Spiralfeder dem Drehmoment des Eisenkernes das Gleichgewicht hält. Das Meßwerk hat Luftdämpfung.

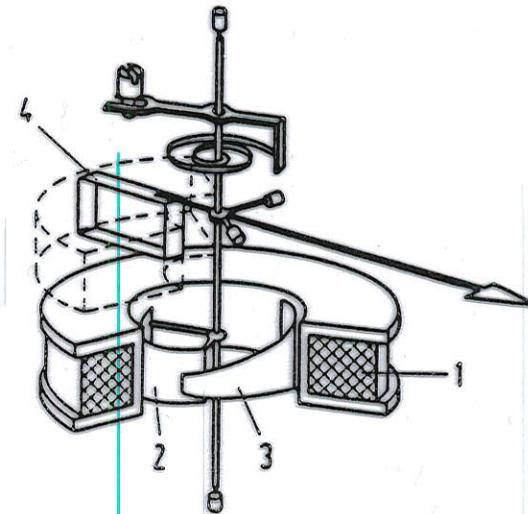
Durch geeignete Form der Eisenkerne kann eine dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechende Skalenteilung erreicht werden. Nahezu gleichmäßige Skalenteilungen, z. B. bei Präzisions-Instrumenten, sind ebenso möglich wie im interessierenden Bereich gedehnte und im übrigen gedrängte Skalenteilungen, z. B. bei Betriebs-Instrumenten. Die Magnetisierung der Eisenkerne folgt auch einem raschen Wechsel der Stromrichtung, so daß außer Gleichstrom auch Wechselstrom bis 1000 Hz gemessen werden kann. Je nach Art der Spulenwicklung werden die Instrumente als Strom- oder Spannungsmesser ausgeführt.

Das Dreheiseninstrument bewertet das Quadrat des durchgehenden Stromes und seine Kennlinie verläuft nach (2.11) zunächst quadratisch. Durch geeignet gestaltete Plättchen kann aber auch ein linearer Zusammenhang zwischen Strom und Ausschlagwinkel erreicht werden.



Bild 2.6: Rundspul-Dreheisenmeßwerk

- 1 Feldspule
- 2 bewegliches Eisenplättchen
- 3 feststehendes Eisenplättchen
- 4 Flügel zur Luftdämpfung



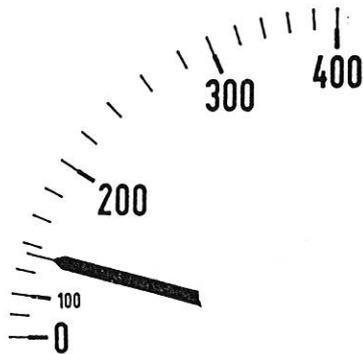
Beim Dreheiseninstrument wird wie beim Drehmagnetinstrument das benötigte Magnetfeld von dem zu messenden Strom erzeugt. Der Eigenverbrauch ist daher größer als beim Drehspulinstrument. Die Wirbelstromdämpfung ist nicht ausreichend; eine Luftdämpfung wird benötigt.

Dreheisen-Meßgeräte

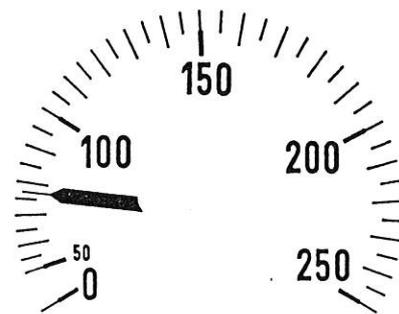
Skalen- und Zeigerausführungen

Quadratische Meßgeräte nach DIN 43 700

Normalausführung: Grobfeinteilung mit
Schneiden-Balkenzeiger nach DIN 43 802



Quadrantskala
Typ Aqs 0 S5



Kreisskala
Typ Aq 0 S5-250

Rechteckige Meßgeräte mit Quer- oder Hochskala nach DIN 43 700

Normalausführung:

Grobfeinteilung mit Schneiden-
Balkenzeiger nach DIN 43 802
(Af 00 S5 mit Balkenzeiger)



Typ Af 0 S5



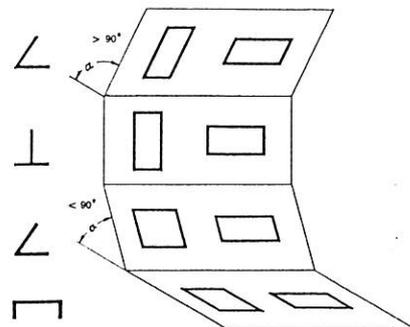
Typ Af 96x48
für zweifache Überlast

Schmalprofil-Meßgeräte

Normalausführung: Querskala mit Balkenzeiger



Typ Af 1



Bestell-Nummern für eine andere als die
senkrechte Gebrauchslage Seite E 11/7

4.) $M_{MAGN.} \sim B \cdot I_M$

1.) $B = \mu_0 \cdot H$

$\mu_0 =$ MAGNET. FELD KONSTANTE

2.) $H = \frac{I \cdot N}{l}$

$\mu_0 =$ PERMIABILITÄT $\left[\frac{Vs}{Am} \right]$

3.) $B = \mu_0 \cdot \frac{I_M \cdot N}{l}$

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

$H =$ MAGNET. FELDSTÄRKE $\left[\frac{A}{m} \right]$

5.) Da μ_0, N und l konstant sind folgt:

$B =$ INDUKTION (MAGNET. FLUSSDICHTE) $[T]$

6.) $M_{MAGN.} \sim \mu_0 \cdot \frac{I_M \cdot N}{l} \cdot I_M$

7.) $M_{MAGN.} \sim I_M^2$

Da $M_{MECH} \sim \alpha$ folgt:

$\alpha \sim I_M^2$

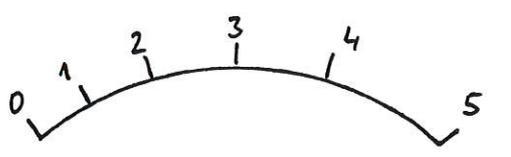
SKALENGLEICHUNG

AUS DER SKALENGLEICHUNG FOLGT: 1. DIE SKALA IST NICHT LINEAR

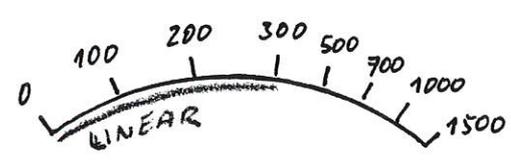
2. POLARITÄTSUNABHÄNGIGKEIT

DIE LINEARISIERUNG DER MESSGERÄTESKALEN ERFOLGT DURCH

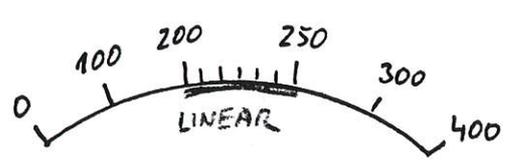
- FORM DER PLÄTCHEN
- FORM DER SPULE
- EINE EXZENTRISCHE WELLE



TYPISCHE-SKALA



ÜBERLAST-SKALA



VOLLTAUFE

EINSATZBEREICHE VON DREHSPUL- UND DREHEISEN MW AM BEISPIEL DER VERLUSTLEISTUNG:

	P_M
	$10^{-4} \dots 10^{-2} W$
	$0,5 \dots 3 W$

DA EINE GROSSE INDUKTION B ERZEUGT WERDEN MUSS

3.4 Temperaturkompensation

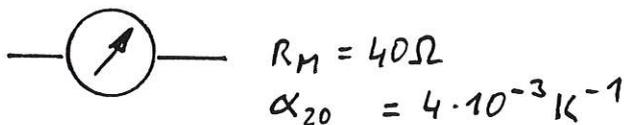
Temperatureinfluß. Die Meßwerke benutzen Bauteile wie Spulen, Dauermagnete und Federn, deren Eigenschaften sich mit der Temperatur ändern. Dabei sind die Einflüsse auf die Federkonstante und auf die Induktion eines Dauermagneten entgegengerichtet oder gering und können so vernachlässigt werden. **Bedeutsamer** ist die **Erhöhung des elektrischen Widerstandes** einer Kupferspule von R_0 auf $R(T)$ bei einer Temperaturzunahme von T_0 auf T . Da der Temperaturkoeffizient α selbst noch von der Temperatur abhängt, gilt die folgende Beziehung nur angenähert:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad \text{mit } \alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}. \quad (\text{KUPFER}) \quad (2.12)$$

Diese Temperaturänderung bleibt ohne Einfluß, solange nur Ströme gemessen werden. Sie ist jedoch bei Spannungsmessern zu berücksichtigen, bei denen der durch das Meßwerk fließende Strom mit einem festen Wert des Spulenwiderstands multipliziert und als Spannung interpretiert wird. Hier nimmt bei zunehmendem Spulenwiderstand der Strom ab und täuscht so eine kleinere Spannung vor. Um diesen Einfluß zu verringern, wird der Spule ein größerer, temperaturunabhängiger Widerstand vorgeschaltet. Noch effektiver ist, einen Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizienten zu verwenden. Das Meßwerk wird dann so ausgelegt, daß sich die Widerstandszunahme der Spule und die Widerstandsabnahme des Vorwiderstandes gegenseitig aufheben.

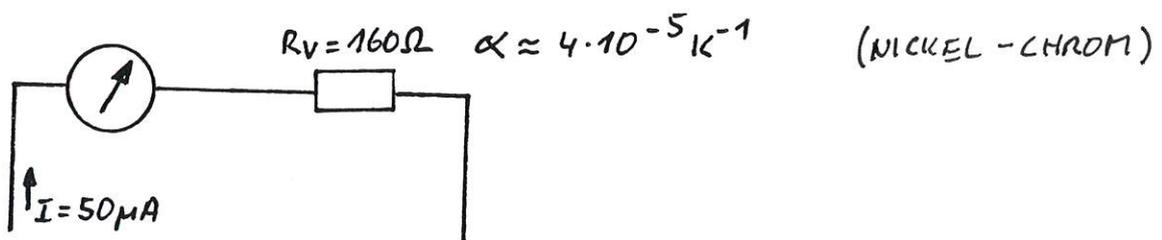
NTC

BEI SPANNUNGSMESSERN ZU BERÜCKSICHTIGEN DA $U_M = R_M \cdot I$ IST



IN DIESEM ZUSTAND IST
DAS MESSWERK SEHR
TEMPERATURABHÄNGIG
DURCH DIE KUPFERSPULE

DURCH VORSCHALTEN EINES PRÄZISIONSWIDERSTANDES WIRD
FOLGENDES ERREICHT:



$$R(T) = R_{(T_0)} [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

FÜR $T = 30^\circ\text{C}$ FOLGT:
 $T_0 = 20^\circ\text{C}$

$$R_{M(T)} = 40\Omega \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot 10\text{K}] \quad \left| \begin{array}{l} R_{M(T)} = 41,6\Omega \\ R_{M(T_0)} = 40\Omega \end{array} \right. \quad \Delta R = 1,6\Omega$$

$$R_{M(T)} = 41,6\Omega$$

$$R_{V(T)} = 160\Omega \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1} \cdot 10\text{K}] \quad \left| \begin{array}{l} R_{V(T)} = 160,06\Omega \\ R_{V(T_0)} = 160\Omega \end{array} \right. \quad \Delta R = 0,06\Omega$$

$$R_{V(T)} = 160,06\Omega$$

FÜR R_M GILT: DIE TEMPERATUR HAT EINEN RELATIV GROSSEN EINFLUSS

FÜR R_V GILT: DIE TEMPERATUR HAT EINEN RELATIV GERINGEN EINFLUSS

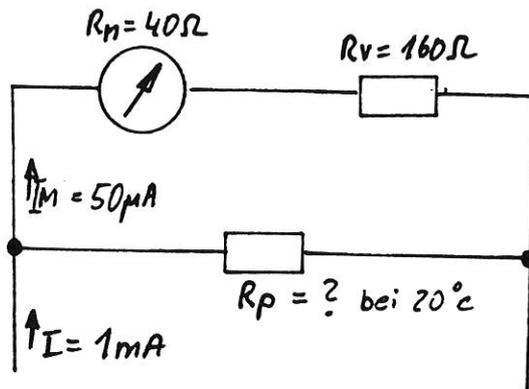
SCHALTET MAN DEM MESSWERK DEN VORWIDERSTAND VOR ERGIBT SICH FOLGENDES:

$$R_{\text{GES}(T)} = 201,66\Omega \quad \text{BEI } 30^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{GES}(T_0)} = 200\Omega \quad \text{BEI } 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta R = 1,66\Omega$$

DIE TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES MESSWERKS GEHT NICHT MEHR SO GROSS EIN (RELATIV).



$$R_p \Rightarrow \frac{I_m}{I_p} = \frac{R_p}{R_m + R_v} \Rightarrow R_p = \frac{I_m \cdot (R_m + R_v)}{I_p}$$

$$R_p = \frac{50 \mu\text{A} \cdot (160 \Omega + 40 \Omega)}{0,95 \text{ mA}}$$

$$\underline{\underline{R_p = 10,5 \Omega}}$$

VORTEILE DIESER SCHALTUNG:

1. GERINGERE TEMPERATURABHÄNGIGKEIT
2. BESSERE AUSWAHL DES R_p

NACHTEILE DIESER SCHALTUNG:

1. GERINGERE EMPFINDLICHKEIT
2. GRÖßERER EINGANGSWIDERSTAND BEI DER STROM-MESSUNG

3.5 Messen von Gleichstrom- und Gleichspannung, Meßbereichserweiterung

Strommessung.

Im einfachsten Fall besteht ein Stromkreis aus einer Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung U_L , dem Innenwiderstand R_i und einem Lastwiderstand R_b (Bild 2.7). Um den über den Lastwiderstand fließenden Strom zu messen, ist der Kreis aufzutrennen und das Strommeßgerät mit dem Widerstand R_M ist in Reihe mit dem Lastwiderstand anzuschließen. Meßgerät und Lastwiderstand werden vom gleichen Strom durchflossen, der jedoch durch das Meßgerät beeinflusst ist. Ohne Meßgerät fließt in dem Kreis der Strom I_b

$$I_b = \frac{U_L}{R_i + R_b} \quad (2.13)$$

und mit dem Meßgerät der Strom I_M

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_b + R_M} \quad (2.14)$$

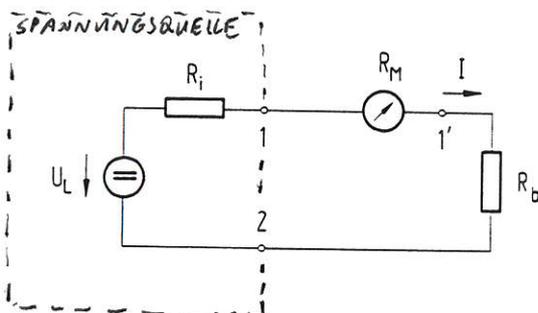


Bild 2.7: Zur Messung des über den Verbraucher R_b fließenden Stroms wird das Meßgerät in Reihe zum Verbraucher angeschlossen

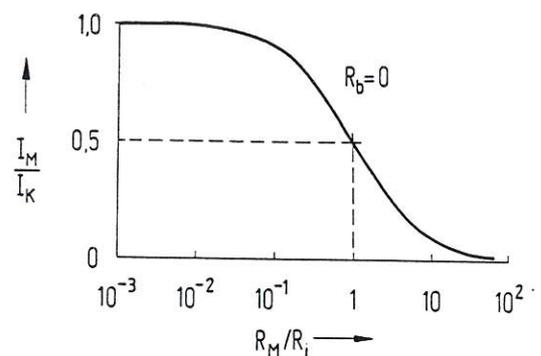


Bild 2.8: Um den Kurzschlußstrom I_K zu messen, muß der Widerstand R_M des Meßgeräts klein sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

Der wahre Wert I_b des Stromes wird nur dann angezeigt, wenn R_M gegenüber $R_i + R_b$ zu vernachlässigen ist. Daraus folgt für die Strommessung die Regel:

Der Widerstand des Strommessers soll möglichst niedrig sein;
Ströme sind niederohmig zu messen.

Ist der Kurzschlußstrom I_K der Quelle zu messen,

$$I_K = \frac{U_L}{R_i}, \quad (2.15)$$

so ist der Lastwiderstand $R_b = 0$ und die Quelle wird nur mit dem Meßinstrument belastet. Dieses zeigt den Strom I_M an

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_M}$$

Das Verhältnis aus angezeigtem Strom und Kurzschlußstrom

$$\frac{I_M}{I_K} = \frac{U_L R_i}{U_L (R_i + R_M)} = \frac{1}{1 + \frac{R_M}{R_i}} \quad (2.16)$$

ist in Abhängigkeit von R_M/R_i in Bild 2.8 dargestellt. Für $R_M \ll R_i$ ist $I_M/I_K = 1$. Ist der Meßwerkwiderstand gleich dem Innenwiderstand der Quelle, so wird nur der halbe Kurzschlußstrom angezeigt.

Spannungsmessung.

Die im vorausgegangenen Abschnitt vorgestellten Strommesser werden zur Spannungsmessung verwendet, indem der über das Meßgerät fließende Strom mit dessen Widerstand multipliziert und das Ergebnis direkt als Spannung angezeigt wird. Im einfachsten Fall ist die Spannung einer Quelle mit der Leerlaufspannung U_L und dem Innenwiderstand R_i festzustellen (Bild 2.9). Das Meßgerät mit dem Widerstand R_M wird an die Klemmen der Quelle ange-

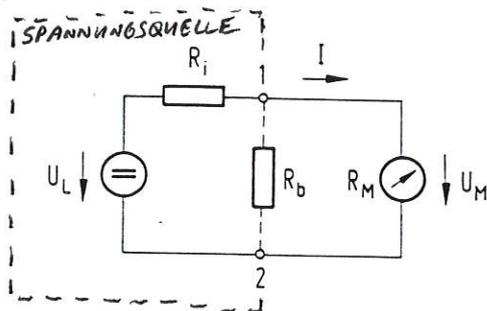


Bild 2.9: Zur Messung der an dem Verbraucher R_b abfallenden Spannung wird das Meßgerät parallel zum Verbraucher angeschlossen

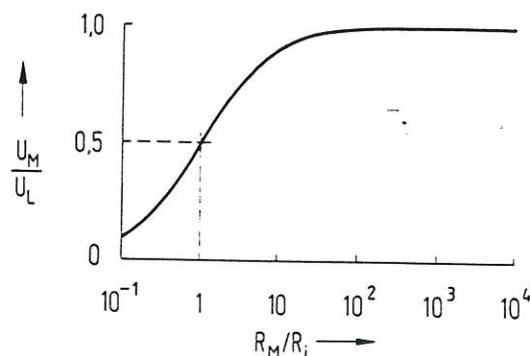


Bild 2.10: Um die Leerlaufspannung U_L zu messen, muß der Widerstand R_M des Meßgeräts groß sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

geschlossen, R_b ist nicht vorhanden. Damit fließt jetzt der Strom I und für den Kreis gilt die Maschengleichung:

$$IR_i + IR_M - U_L = 0. \tag{2.17}$$

Angezeigt wird die Spannung $U_M = IR_M$. Eingesetzt in die letzte Gleichung ergibt dies die Beziehung

$$U_M = U_L - IR_i. \tag{2.18}$$

Das Instrument zeigt also nur die um den Spannungsabfall am Innenwiderstand verminderte Leerlaufspannung U_L an. Diese wird nur dann richtig gemessen, wenn der Term IR_i zu vernachlässigen ist. Um dies zu erreichen, muß der über das Meßwerk fließende Strom niedrig und der Widerstand dementsprechend hoch sein. Wir erhalten die folgende Regel:

Der Widerstand eines Spannungsmessers soll möglichst groß sein; Spannungen sind hochohmig zu messen. !

Das Verhältnis aus angezeigter Spannung und Leerlaufspannung

$$\frac{U_M}{U_L} = \frac{I R_M}{I(R_i + R_M)} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_M}} \quad (2.19)$$

ist nur für $R_M \gg R_i$ gleich 1 (Bild 2.10). Bei $R_i = R_M$ wird die halbe Leerlaufspannung angezeigt.

Liegt zwischen den Klemmen 1 und 2 von Bild 2.9 der Verbraucher R_b , so zeigt das Meßinstrument die am Verbraucher liegende Spannung an. Um sie nicht zu beeinflussen, muß der Widerstand des Meßwerkes groß gegenüber dem des Verbrauchers sein.

Messung des Innenwiderstandes.

Aus den bisherigen Ausführungen gehen die folgenden drei Verfahren zur Messung des Innenwiderstandes hervor:

- a) Messung der Leerlaufspannung und des Kurzschlußstromes und Bestimmung des Innenwiderstandes nach der Gl. (2.15) $R_i = U_L / I_K$.
- b) Messung des von der Quelle gelieferten Stromes bei Veränderung des Widerstandes R_M des Strommessers; wird der halbe Kurzschlußstrom angezeigt, so gilt $R_i = R_M$.
- c) Messung der von der Quelle gelieferten Spannung bei Veränderung des Widerstandes R_M des Spannungsmessers; wird die halbe Leerlaufspannung angezeigt, so gilt $R_i = R_M$.