Grundlagen zur Messtechnik

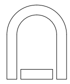
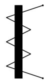
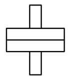
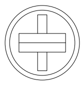
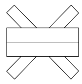
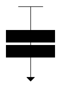
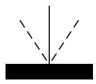
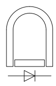
Elektrotechnisches Institut

2008

1 Elektrische Messgeräte

1.1 Kennzeichnung der Instrumente

1.1.1 Sinnbilder für die Arbeitsweise der Messgeräte

Drehspulmesswerk mit Dauermagnet, allgemein	
Dreheisenmesswerk	
Elektrodynamisches Messwerk, eisenlos	
Elektrodynamisches Messwerk, eisengeschlossen	
Elektrodynamisches Quotientenmesswerk, eisenlos	
Elektrostatisches Messwerk	
Vibrationsmesswerk	
Drehspulinstrument mit eingebautem Gleichrichter	

1.1.2 Sinnbilder für die Art des durch das Gerät gemessenen Stromes

Gleichstrom	—
Wechselstrom	∼
Gleich- und Wechselstrom	≂
Drehstrominstrument mit einem Messwerk	≋

1.1.3 Sinnbilder für die Gebrauchslage

Senkrechte Gebrauchslage	⊥
Waagerechte Gebrauchslage	⊓
Schräge Gebrauchslage, Neigungswinkel z.B. 60	∠ 60°

1.1.4 Zulässiger Anzeigefehler

Der zulässige Gebrauchsfehler gilt für ein Instrument einschließlich seiner Vor- und Nebenwiderstände. Die Fehlerklasse (Angabe an der Skala des Instruments) enspricht dabei dem positiven oder negativen Anzeigefehler in %.

Messgeräte bis zur Klasse 0,5 werden als Präzisionsmessgeräte bezeichnet, Geräte mit einer Fehlerklasse größer als 0,5 als Betriebsmessgeräte.

Die Angabe des Anzeigefehlers erfolgt in Prozent des Messbereich-Endwerts bei

- Instrumenten mit mechanischem Nullpunkt. Liegt der Nullpunkt innerhalb der Skala, so gilt als Messbereich-Endwert die Summe der absoluten Skalenendwerte.
- Zeigerfrequenzmessern

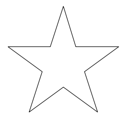
als Angabe des Anzeigefehlers in Prozent der Skalenlänge

- bei Instrumenten ohne mechanischen Nullpunkt (ausgenommen Zeigerfrequenzmesser)
- bei Instrumenten mit stark nichtlinearer Skala, z.B. Widerstandsmessgeräten

oder als Angabe des Anzeigefehlers in Prozent des richtigen Wertes bei Zungenfrequenzmessern.

1.1.5 Prüfspannung

Die Prüfspannung richtet sich nach der Nennspannung des Geräts bzw. nach der Spannung, für die das Gerät isoliert ist.

Prüfspannung (Effektivwert) 500V bei Instrumenten bis $U_N = 40\,\mathrm{V}$	
Höhere Prüfspannungen als $500\,\mathrm{V}$ werden in kV im Stern angegeben, z.B. $2\,\mathrm{kV}$ für $U_N = 40 \ldots 650\,\mathrm{V}$	

Bei Instrumenten zum Anschluss an Messwandler beträgt die Prüfspannung stets $2\,\mathrm{kV}$.

1.2 Wirkungsweise der Instrumente

1.2.1 Drehspulinstrument mit Dauermagnet für Gleichstrommessungen (lineare Skala)

Eine stromdurchflossene Rähmchenspule mit Federrückstellkraft ist in einem konstanten Magnetfeld drehbar gelagert. Das auf sie wirkende elektrisch erzeugte Drehmoment und damit der Ausschlag sind dem Strom proportional: $m \sim i$ (in Augenblickswerten).Bei Umkehr des Stromes ändert sich die Ausschlagsrichtung. Unterliegt der Strom $i = f(t)$ schnellen periodischen Änderungen, so ist der Ausschlag wegen der Massenträgheit des beweglichen Systems proportional dem Mittelwert des Drehmoments:

$$\overline{m} \sim \bar{i} = \frac{1}{T} \int\limits_0^T i \,\mathrm{d}t \tag{1.1}$$

Das Drehspulinstrument zeigt also bei welligem Gleichstrom den zeitlichen Mittelwert an. Die Erweiterung des Messbereiches bei Verwendung als Voltmeter erfolgt durch Vorwiderstände, bei Verwendung als Amperemeter durch Nebenwiderstände (Shunt). In Verbindung mit einem Gleichrichter wird das Drehspulsystem vornehmlich bei Vielfachinstrumenten auch zur Messung von Wechselstromgrößen herangezogen.

1.2.2 Dreheiseninstrument i.a. für Gleich- und Wechselstrommessungen

Ein mit dem Zeiger fest verbundenes Eisenstückchen wird entgegen der Federrückstellkraft in das Magnetfeld einer vom Strom durchfossenen Spule hineingezogen. Der Augenblickswert des Drehmoments ist eine Funktion des Stromes zum Quadrat: $m = f(i^2)$ (quadratische Abhängigkeit in der Skala, Ausschlag unabhängig von der Stromrichtung). Der zeitliche Mittelwert des Drehmoments ist bei Wechselstrom, welligem Gleichstrom und Gleichstrom eine Funktion des Strom-Effektivwerts zum Quadrat, der für die Stromwärmeverluste $V = RI^2$ maßgebend ist:

$$\overline{m} = f(I^2) \quad \text{mit} \quad I^2 = \frac{1}{T} \int\limits_0^T i^2 \,\mathrm{d}t \tag{1.2}$$

Die Erweiterung des Messbereiches bei Messungen von Wechselspannungen bis 500 V erfolgt durch Vorwiderstände, darüber hinaus durch Einschalten von Spannungswandlern, bei Messung von Wechselströmen durch Stromwandler.

1.2.3 Elektrodynamischer Leistungsmesser

Im magnetischen Feld der feststehenden, von i durchflossenen Stromspule dreht sich die Spannungsspule. In ihr fließt der Strom i_u der proportional der Spannung u ist. Das der Federrückstellkraft entgegenwirkende Drehmoment ist zu jedem Zeitpunkt proportional dem Produkt aus Strom und Spannung (gilt streng nur für das eisengeschlossene elektrodynamische Messwerk!):

$$m \sim i \qquad i_u \sim i \qquad u = p \tag{1.3}$$

also der Augenblicksleistung, wenn u die Spannung und i der Strom eines Verbrauchers bzw. Erzeugers sind. Bei periodischen Größen mit beliebiger Kurvenform wird wegen der Massenträgheit des beweglichen Systems der Mittelwert der Leistung angezeigt:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T u \cdot \,\mathrm{d}t \tag{1.4}$$

Bei sinusförmigem Verlauf der Größen, also mit

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \tag{1.5}$$

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \phi) \tag{1.6}$$

wird der Augenblickswert der Leistung

$$p = u \cdot i = 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \phi) = U \cdot I \cdot (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - \phi)) \tag{1.7}$$

Das Ergebnis besteht aus einem konstanten Anteil

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,\mathrm{d}t = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \tag{1.8}$$

und einem mit doppelter Frequenz pulsierendem Anteil, dessen zeitlicher Mittelwert gleich Null ist. U und I bezeichnen Effektivwerte, ϕ ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom.

Der Stromzeiger $\underline{I}$ kann in eine Wirkkomponente $\underline{I}_W$ die in Richtung der Spannung $\underline{U}$ liegt, und in eine gegenüber $\underline{U}$ um 90° gedrehte Blindkomponente $\underline{I}_b$ zerlegt werden. Mit I_W ergibt sich die Wirkleistung zu

$$P = U \cdot I_W = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \tag{1.9}$$

sie wird vom Wattmeter angezeigt. Der Leistungsfaktor ist durch

$$\cos(\phi) = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S} \tag{1.10}$$

gegeben (bei nicht sinusförmigen Größen wird er ebenfalls in dem auf der rechten Seite stehenden Bruch ausgedrückt, z.B. als Leistungsfaktor λ in der Stromrichtertechnik).

Als Blindleistung Q und Scheinleistung S werden definiert:

$$Q = U \cdot I_b = U \cdot I \cdot \sin(\phi) \tag{1.11}$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{1.12}$$

Der Vollausschlag a_max des Wattmeters wird bei Nennspannung U_N, Nennstrom I_N und Nennleistungsfaktor $\cos(\phi)$ (meist $cos(\phi) = 1$ erreicht. Die Wattmeterkonstante ist daher

$$c_W = \frac{U_N \cdot I_N \cdot \cos(\phi_N)}{a_{\max}} \tag{1.13}$$

mit $\frac{\text{Leistung}}{\text{Skalenteil}}$ als Einheit, z.B.

$$c_W = \frac{90\,\text{V} \cdot 25\,\text{A} \cdot 1}{150\,\text{Skt.}} = 15\,\frac{\text{W}}{\text{Skt.}} \tag{1.14}$$

Die Leistung bei einem Ausschlag um a Skalenteile ergibt sich dann zu

$$P = c_W \cdot a \tag{1.15}$$

Zur Erweiterung des Messbereiches werden dem Spannungspfad bis 500 V Widerstände vorgeschaltet, darüber hinaus wird er über Spannungswandler angeschlossen. Der Strompfad ist normalerweise für 5 A ausgelegt, eine Bereichserweiterung erfolgt durch Anschluss über Stromwandler. Die Wattmeterkonstante ist jetzt noch mit den entsprechenden Faktoren zu multiplizieren, im Beispiel ergibt sich bei Annahme einer Spannungswandlerübersetzung von 6000 V/100 V und einer Stromwandlerübersetzung von 25 A/5 A die Konstante der Leistungsmesseinrichtung zu

$$c = c_W \cdot \frac{25}{5} \cdot \frac{6000}{100} = 4500 \frac{W}{\text{Skt}} \tag{1.16}$$

1.2.4 Leistungsfaktormesser mit elektrodynamischem Kreuzspulenmesswerk

Im Feld der vom Wechselstrom i durchflossenen Spule ist ein Kreuzspulmesswerk drehbar gelagert. Es besteht aus zwei kreuzweise angeordneten und mechanisch miteinander starr verbundenen Drehspulen. In ihnen fließen die der Wechselspannung u proportionalen Ströme i_{u1} und i_{u2}, die in der Phasenlage gegeneinander verschoben sind.

Das im magnetischen Feld der Stromspule $[i]$ auf eine von i_u durchflossene Drehspule ausgeübte Drehmoment ist eine Funktion der Größe dieser Ströme, ihrer gegenseitigen Phasenlage und der Winkelstellung α des Systems. Unter der Annahme, dass die Drehspulen 1 und 2 senkrecht aufeinander stehen, gleiche Windungszahlen besitzen, das Feld der Stromspule homogen ist und die Ströme i_{u1} bzw. i_{u2} gegenüber i um $\phi_1 = \phi + \gamma$ bzw $\phi_2 = \phi - \delta$ phasenverschoben sind (ϕ = gesuchter Phasenwinkel), wird:

$$M_1 = k \cdot I \cdot I_{u1} \cdot \cos(\phi + \gamma) \cdot \sin(\alpha) \tag{1.17}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= k \cdot I \cdot I_{u2} \cdot \cos(\phi - \delta) \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \\ &= k \cdot I \cdot I_{u2} \cdot \cos(\phi + \gamma) \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \tag{1.18}$$

Die Stromrichtungen in den beiden Drehspulen werden so gewählt, dass die Drehmomente M_1 und M_2 einander entgegenwirken. Die Gleichgewichtslage des Kreuzspulsystems ist somit durch $M1 = M2$ bestimmt.

Hieraus folgt:

$$\tan(\alpha) = \frac{I_{u2} \cdot \cos(\phi - \delta)}{I_{u1} \cdot \cos(\phi + \gamma)} \tag{1.19}$$

Das Verhältnis der Ströme ist eine Konstante des Instruments. Die Lage α der Kreuzspule und damit der Zeigerausschlag sind daher eine Funktion des gesuchten Phasenwinkels ϕ. Die Skala kann direkt in Werten des Leistungsfaktors geeicht werden. Im stromlosen Zustand des Instruments hat der Zeiger keine bestimmte Ruhelage, da das Kreuzspulsystem keine Federstellkraft besitzt.

Die Erzeugung der Phasenverschiebung zwischen i_{u1} und i_{u2} geschieht bei Leistungsfaktormessern für Wechselstrom durch eine Kunstschaltung aus ohmschen und induktiven Widerständen, z.B. so, dass $\delta \approx 90°$ ist.

Bei Leistungsfaktormessern für Drehstrom erfolgt dies durch Abgriff der die Ströme i_{u1} und i_{u2} bestimmenden Spannungen zwischen verschiedenen Potentialen des Dreileitersystems.

1.3 Messwandler

1.3.1 Stromwandler

Stromwandler sind besonders ausgelegte Transformatoren, deren Primärwicklung K-L von dem zu messenden Strom I_1 durchflossen wird und deren Sekundärwicklung k-l über den Strommesser und den gegebenenfalls mit ihm in Reihe geschalteten Strompfad eines Wattmeters kurzgeschlossen ist. Die resultierende Magnetisierungsdurchflutung

$$\underline{\Phi}_\mu = \underline{I}_1 \cdot w_1 + \underline{I}_2 \cdot w_2 \tag{1.20}$$

wird durch niedrige Induktion, luftspaltfreien Eisenweg und Verwendung von speziellen Blechsorten mit geringem Magnetisierungsbedarf klein gehalten, z. B. auf $0,5\,\%$ von $\underline{I}_1 \cdot w_1$. Unter diesen Voraussetzungen kann Θ_μ vernachlässigt werden und es besteht der Zusammenhang

$$I_2 \approx \frac{w_1}{w_2} \cdot I_1 = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \cdot I_1 \tag{1.21}$$

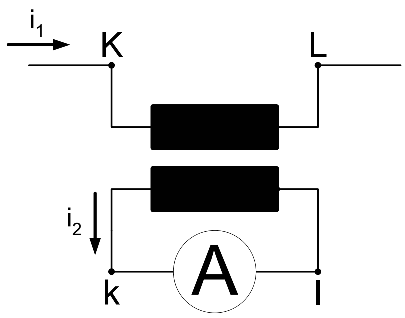


Abbildung 1: Stromwandler

I_2 ist dem Primärstrom proportional und bei Einhaltung der Nennbürde praktisch unabhängig von der Impedanz des Messkreises.

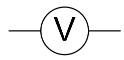
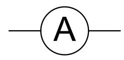
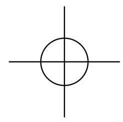
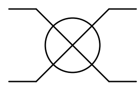
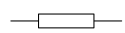
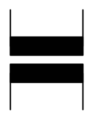
Der Wandler (sekundärer Nennstrom 5A) dient zur Anpassung der zu messenden Ströme an die gebräuchlichen Strom- und Leistungsmesser mit $I_N = 5\,\mathrm{A}$ bzw. $6\,\mathrm{A}$, gegebenenfalls auch zur Fernhaltung der Hochspannung von den Instrumenten. Durch Anzapfungen an der Primärwicklung und eine unterbrechungsfreie Umschaltung kann die Einstellung verschiedener Übersetzungsverhältnisse ermöglicht werden. **Die Sekundärseite des Stromwandlers darf grundsätzlich niemals geöffnet werden!** Beim Austausch von Instrumenten oder zu deren Schutz vor Überlastung ist sie kurzzuschließen. Nach Öffnen würde die volle Primärdurchflutung $I_1 \cdot w_1$ bei $I_2 = 0$ (statt normal nur ungefähr 0,5 % von $I_1 \cdot w_1$) magnetisierend wirken. Dadurch würden hohe Spannungsspitzen an den Sekundärklemmen, eine große Erhitzung des Blechpakets durch die Eisenverluste und ein bleibender Remanenzfehler infolge der starken Magnetisierung auftreten.

Bei Messungen an Hochspannung ist der Sekundärkreis des Stromwandlers zu erden (s. Bild in Abschnitt 2.2.3)!

1.3.2 Spannungswandler

Der Spannungswandler transformiert die zu messende Spannung auf die Werte der Instrumente (Voltmeter, Wattmeterspannungspfad mit $U_N = 100\,\mathrm{V}$ nach Normung) herab. Eine geringe Belastung des Wandlers mit z.B. nur 10 % der durch die Erwärmung bestimmten Grenzleistung gestattet die Vernachlässigung des vom Messgerätestrom hervorgerufenen Spannungsabfalls. Sekundär darf der Spannungswandler zwar geöffnet, jedoch niemals kurzgeschlossen werden (hoher Kurzschlussstrom!). Bei Messungen an Hochspannung ist der Sekundärkreis zu erden (s. Bild im Abschnitt 2.2.3).

1.4 Schaltzeichen[1]

Voltmeter	
Amperemeter	
Messwerk zur Produktbildung (Wattmeter mit Strom- und Spannungspfad)	
Messwerk zur Quotientenbildung (Leistungsfaktromesser)	
Vor- bzw. Nebenwiderstand	
Stromwandler	
Spannungswandler	

2 Messung elektrischer Größen

2.1 Messung des ohmschen Widerstandes

Die Messung der ohmschen Wicklungswiderstände elektrischer Maschinen wird vorgenommen zur

- Kontrolle der Fertigung

[1] nach DIN 40714 und DIN 40716

- Festlegung der Maschinendaten
- Bestimmung der mittleren Wicklungstemperatur über die Widerstandszunahme

Eine Genauigkeit der Widerstandsmessung bis auf 1 . . . 2 % genügt meistens, ausgenommen bei der Bestimmung von Übertemperaturen aus der Widerstandszunahme, die eine höhere Genauigkeiten verlangt. Je nach den gestellten Forderungen sind die Widerstände der Zuleitungen, der Messinstrumente und der Kontaktübergänge zu berücksichtigen. In Prüffeldern wird bis zu ungefähr 1 Ω herab die Wheatstone'sche Brückenschaltung, unter 1 Ω die Stromspannungsmessung angewendet. Bei jeder Messung ist wegen der starken Temperaturabhängigkeit des ohmschen Widerstands die Wicklungs- bzw. Raumtemperatur anzugeben. Alle Messungen werden mit Gleichstrom durchgeführt.

2.1.1 Stromspannungsmessung

Je nach Schaltung wird das Ergebnis durch den Eigenwiderstand des Strom- bzw. Spannungsmessers verfälscht. Eine Korrektur ist nur dann nicht erforderlich, wenn Drehspulinstrumente mit sehr geringem Eigenverbrauch verwendet werden.

- **Spannungsmesser vor dem Strommesser (siehe Abb. 2)**

  Das Voltmeter misst die Summe aus den Spannungen U_x am gesuchten Widerstand R_x und U_A am Amperemeter.

$$R = R_x + R_A = \frac{U}{I} = \frac{U_x + U_A}{I} \tag{2.1}$$

$$R_x = R - R_A = R \cdot \left(1 - \frac{R_A}{R}\right) \tag{2.2}$$

  Das Korrekturglied $\frac{R_A}{R}$ kann gegenüber 1 vernachlässigt werden, wenn der Widerstand R_x und damit R wesentlich größer als R_A sind.

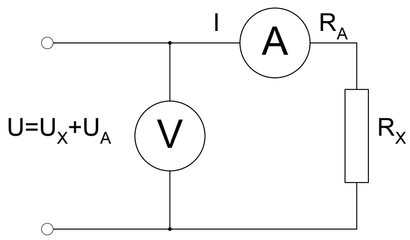


Abbildung 2: Spannungsmesser vor Strommesser

- **Spannungsmesser hinter dem Strommesser (siehe Abb. 3)**

  Das Amperemeter misst die Summe aus den Strömen I_X durch R_x und I_V durch das Voltmeter.

$$R = \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_x + I_V} \tag{2.3}$$

$$R_x = \frac{R \cdot R_V}{R_V - R} = \frac{R}{1 - \frac{R}{R_V}} \tag{2.4}$$

  Das Korrekturglied $\frac{R}{R_V}$ kann gegenüber 1 vernachlässigt werden, wenn der Widerstand R_x wesentlich kleiner als R_V ist.

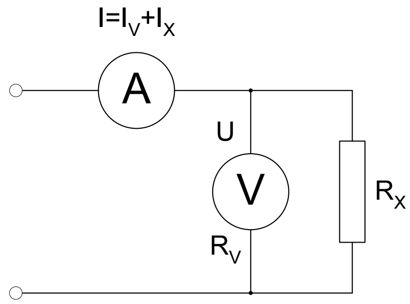


Abbildung 3: Strommesser vor Spannungsmesser

- **Messung mit getrenntem Abgriff (siehe Abb. 4)**

  Um die ohmschen Widerstände der Stromzuleitungen auszuschalten, ist bei kleinen Widerständen R_x ein getrennter Spannungsabgriff erforderlich. Bei Anzeigen in der Größenordnung von wenigen Millivolt können sich Thermospannungen bemerkbar machen, die durch zwei Messungen mit gleich großen, jedoch entgegengesetzt gerichteten Strömen eliminiert werden.

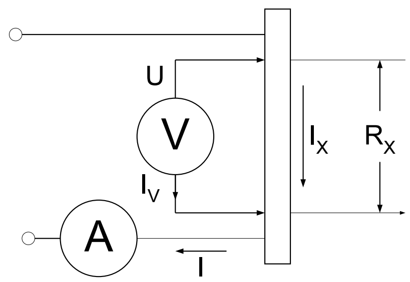


Abbildung 4: Messung mit getrenntem Abgriff

2.1.2 Wheatstone'sche Brückenschaltung

Das Schaltbild der Wheatstone-Brücke zeigt Abb. 5. Der Stellwiderstand R_3 wird solange geändert, bis das Messgerät stromlos ist. Bei dieser Nullmethode spielt die Absolutgenauigkeit des Instruments keine Rolle.

Nach Abgleich ist

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \tag{2.5}$$

also

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1} \tag{2.6}$$

Der gesuchte Wert ist das $\frac{R_2}{R_1}$-fache des eingestellten Widerstands R_3. Das Verhältnis ist zur Bereichserweiterung meistens in ganzen Zehnerpotenzen umschaltbar.

2.2 Messung der Wirkleistung bei Wechselstrom

2.2.1 Ohne Messwandler jedoch mit Vorwiderstand R im Spannungspfad

Der Potentialunterschied zwischen Strom- und Spannungsspule soll möglichst klein sein, er darf $150\,V$ nicht überschreiten. Die Spannungsklemme, die direkt an das Rähmchen angeschlossen ist

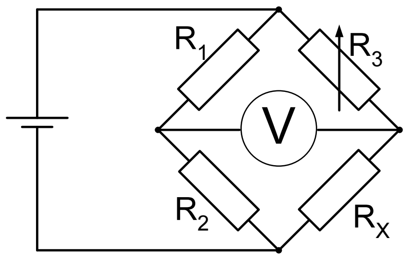


Abbildung 5: Wheatstone'sche Brückenschaltung

(Klemme u in der Abbildung), ist daher mit einer Klemme des Strompfades zu verbinden bzw. mit ihr an das gleiche Potential zu legen. Der Leistungsverbrauch des Wattmeterspannungspfades (R_u = ohmscher Widerstand einschließlich Vorwiderstand R_{uv}) und des Voltmeters (R_V) wird hier mitgemessen. Bei kleiner Leistung des Prüflings ist eine Korrektur des Messwerts P vorzunehmen

$$P_{\text{korr.}} = P - U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{R_V} \right) \tag{2.7}$$

gegebenenfalls auch eine Stromkorrektur. Der Leistungsverbrauch in R_u und R_V kann bei abgetrenntem Prüfling als Ausschlag des Wattmeters abgelesen werden.

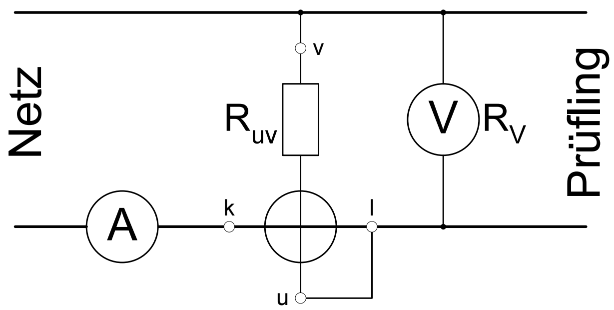


Abbildung 6: Leistungsmessung ohne Messwandler

2.2.2 Mit Stromwandler und Vorwiderstand im Spannungspfad (verwendbar bis 500 V)

Für gleiches Potential an Strom- und Spannungsspule sorgt die Potentialverbindung L-l (siehe Abbildung 7). Der Verbrauch von Voltmeter und Wattmeterspannungspfad wird mitgemessen.

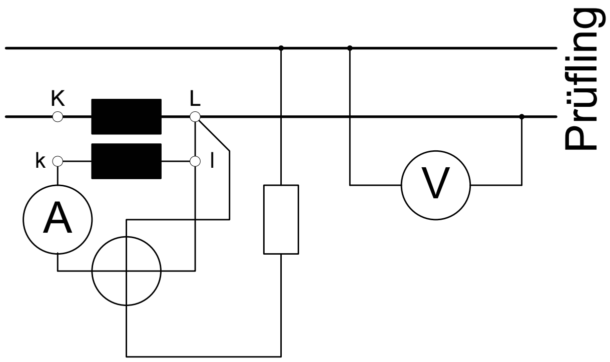


Abbildung 7: Leistungsmessung mit Stromwandler und Vorwiderstand

2.2.3 Mit Strom- und Spannungswandler (bei Spannungen über 500V)

Die Sekundärkreise der Messwandler liegen gemeinsam an einer Schutzerdung (Abbildung 8), die auch für Potentialgleichheit an Strom- und Spannungsspule des Wattmeters sorgt. Der Leistungsverbrauch von Voltmeter und Wattmeterspannungspfad geht hier ebenfalls in die Messung ein.

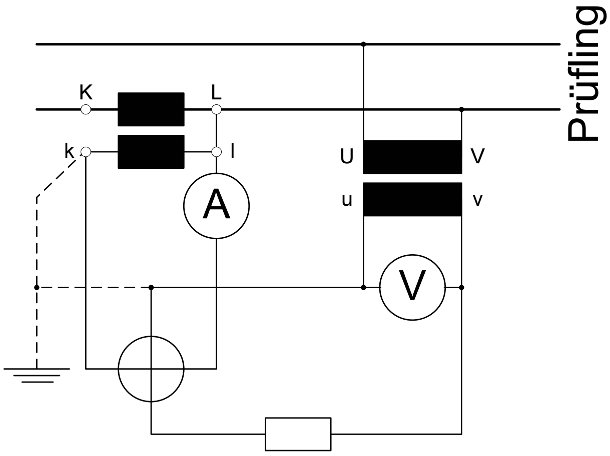


Abbildung 8: Leistungsmessung mit Stromwandler und Spannungswandler

2.3 Messung der Wirkleistung bei Drehstrom mit Sternpunktleiter

Bei beliebiger unsymmetrischer Last wird mit drei einzelnen Wattmetern oder einem Gerät mit drei gekoppelten Systemen gemessen. Die gesamte Wirkleistung ist die Summe der Leistungen der drei Stränge, entsprechend werden auch Schein- und Blindleistung gebildet. Der mittlere Leistungsfaktor errechnet sich bei sinusförmigem Verlauf der Spannungen und Ströme zu

$$\cos(\phi) = \frac{\sum P_{\text{str}}}{\sum S_{\text{str}}} = \frac{P}{S} \tag{2.8}$$

Bei symmetrischer Last genügt die Kenntnis von nur einer Strangleistung:

$$\cos(\phi) = \frac{3 \cdot P_{\text{str}}}{3 \cdot P_{\text{str}} \cdot I_{\text{str}}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L} \tag{2.9}$$

2.4 Messung der Wirkleistung bei Drehstrom ohne Sternpunktleiter

2.4.1 Verwendung eines einzigen Wattmeters bei symmetrischer Last

Bei Sternschaltung der Last mit zugänglichem Sternpunkt wird der Spannungspfad direkt an die Strangspannung gelegt. Ist dies nicht möglich, kann unabhängig von der Schaltung der Last aus drei genau gleichen ohmschen Widerständen R ein sogenannter künstlicher Sternpunkt gebildet werden. In den künstlichen Sternpunkt kann der Widerstand R_u des Wattmeterspannungspfades mit einbezogen werden. Jeder der beiden zusätzlichen Widerstände R muss gleich dem Gesamtwiderstand R_u, bestehend aus Vorwiderstand R_{uv} und Widerstand der Spannungsspule, sein. Die gesuchte Gesamtleistung P ist das dreifache des vom Instrument angezeigten Wertes.

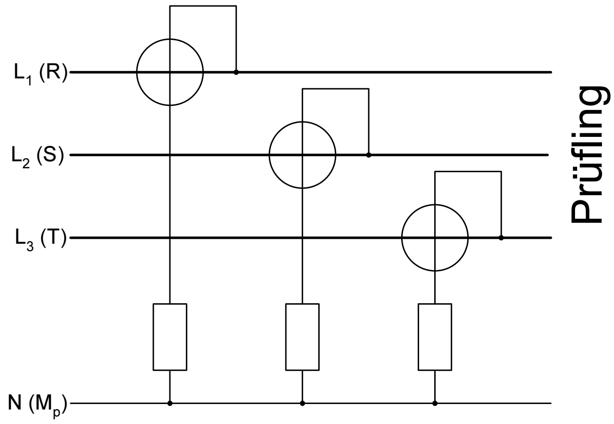


Abbildung 9: Leistungsmessung bei Drehstrom mit Sternpunkt

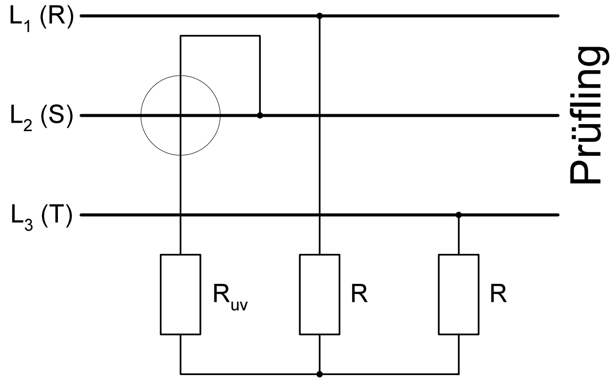


Abbildung 10

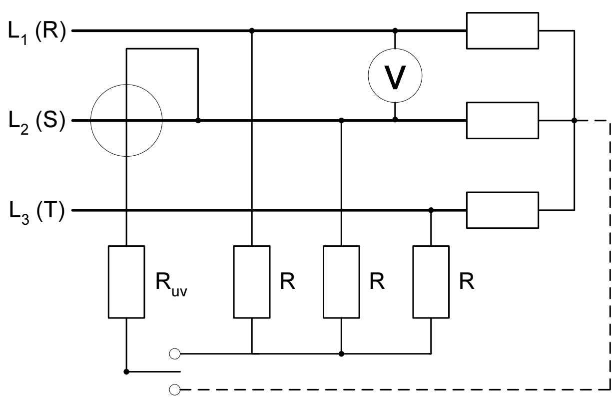


Abbildung 11

2.4.2 Verwendung zweier Wattmeter in Aronschaltung bei beliebiger unsymmetrischer Last

In zwei Zuleitungen werden die Strompfade der beiden Wattmeter geschaltet, die Spannungspfade liegen an den entsprechenden Leiterspannungen gegenüber der dritten Zuleitung. Für die Vorzeichenprobe nach Abschnitt 2.4.4 ist ein Tastschalter vorgesehen.

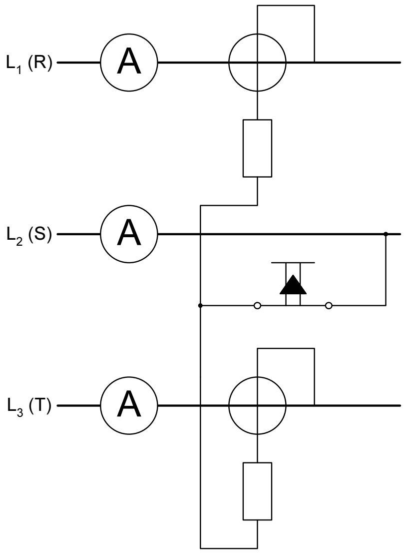


Abbildung 12: Aronschaltung

Der Leiter S kann als Rückleitung für die Ströme i_R und i_T angesehen werden. Die Summe der aus den Leiterspannungen und -strömen gebildeten Teilleistungen $p_1 = u_{RS} \cdot i_R$ bzw. $p_2 = u_{TS} \cdot i_T$ ergibt die Gesamtleistung (Beweis s. Abschnitt 2.4.3). Je nach Art der Last setzen sich die Messwerte zusammen zu

$$P = |P_1 \pm P_2| = c \cdot |a_1 \pm a_2| \tag{2.10}$$

Das richtige Vorzeichen kann unter gewissen Voraussetzungen nach einem in Abschnitt 2.4.4 beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Eine andere Möglichkeit ist, sich an die Stellung der die Ausschlagsrichtung der Wattmeter ändernden Umschalter zu halten. Die einmalige Festlegung der Stellung für positives Vorzeichen erfolgt bei $\cos(\phi) \approx 1,0$.

Die Gesamtleistung wird auch bei unsymmetrischer Last und Vorhandensein von Oberschwingungen genau gemessen.

Im folgenden sollen verschiedene Möglichkeiten zum Aufbau der Schaltung augezeigt werden.

- **Messschaltung mit drei Stromwandlern (Abbildung 13)**
- **Messschaltung mit zwei Stromwandlern und drei Amperemetern (Abbildung 14)**

  Das mittlere Amperemeter misst die Summe der Ströme i_R und i_T. Da bei Fehlen des Sternpunktleiters $i_R + i_T = -i_S$ ist, zeigt das Instrument den Effektivwert an. Besonders zu beachten ist bei dieser Schaltung die Lage der Potentialverbindungen.

- **Messschaltung mit zwei Spannungswandlern, zwei Stromwandlern und drei Amperemetern (Abbildung 15)**

  Die Sekundärkreise der Strom- und Spannungswandler liegen an einer gemeinsamen Schutzerdung, die auch die Aufgabe einer Potentialverbindung übernimmt.

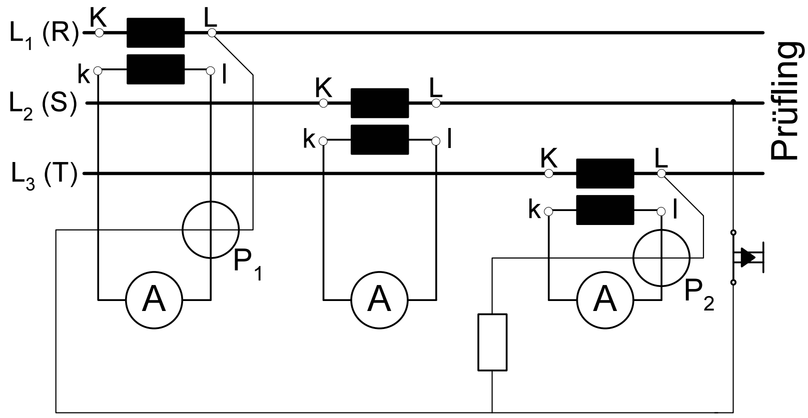


Abbildung 13: Messschaltung mit 3 Stromwandlern, verwendbar bis 500 V

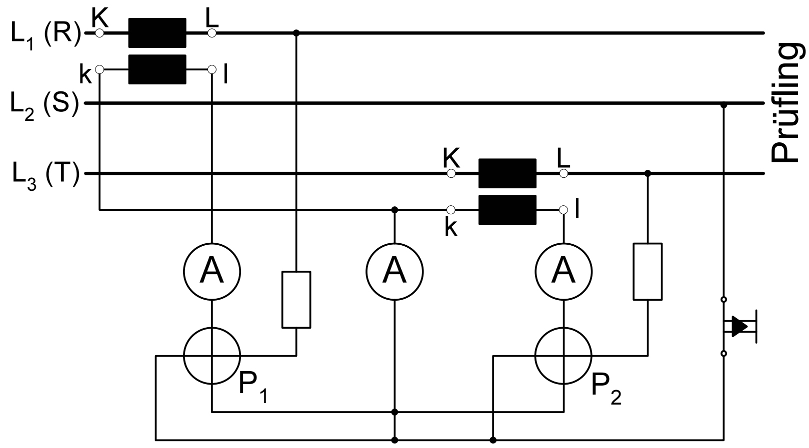


Abbildung 14: Messschaltung mit 2 Stromwandlern und 3 Amperemetern, verwendbar bis 500 V

2.4.3 Beweis für die Messung der Gesamtleistung

Der Augenblickswert der Gesamtleistung kann ausgedrückt werden in

$$p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T \tag{2.11}$$

Aus der Stromgleichung $i_R + i_S + i_T = 0$ bei Fehlen des Sternpunktleiters folgt:

$$i_S = -(i_R + i_T) \tag{2.12}$$

Nach Einsetzen in die Leistungsgleichung:

$$p = i_R \cdot (u_R - u_S) + i_T \cdot (u_T - u_S) \tag{2.13}$$

$$= i_R \cdot u_{RS} + i_T \cdot u_{TS} \tag{2.14}$$

Die Summe der in der Aronschaltung gemessenen Produkte ergibt somit in jedem Augenblick die Gesamtleistung.

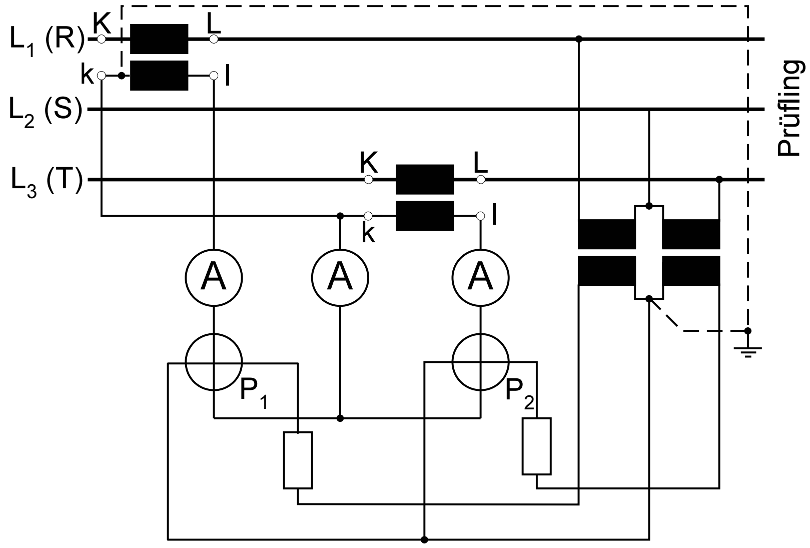


Abbildung 15: Schaltung mit 2 Spannungswandlern, 2 Stromwandlern und 3 Amperemetern, verwendbar bis 500 V

2.4.4 Vorzeichenkontrolle bei Symmetrie und sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung

Die einzelnen Wattmeter messen die Leistungen

$$P_1 = U_{SR} \cdot I_R \cdot \cos(\Phi_1) \tag{2.15}$$

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_T \cdot \cos(\Phi_2) \tag{2.16}$$

wobei Φ der Phasenwinkel zwischen Leiterspannung und -strom ist. Unter der Annahme einer Last mit ohmschem und induktivem Anteil wird

$$\Phi_1 = \phi + \alpha \tag{2.17}$$

$$\Phi_2 = \phi - \beta \tag{2.18}$$

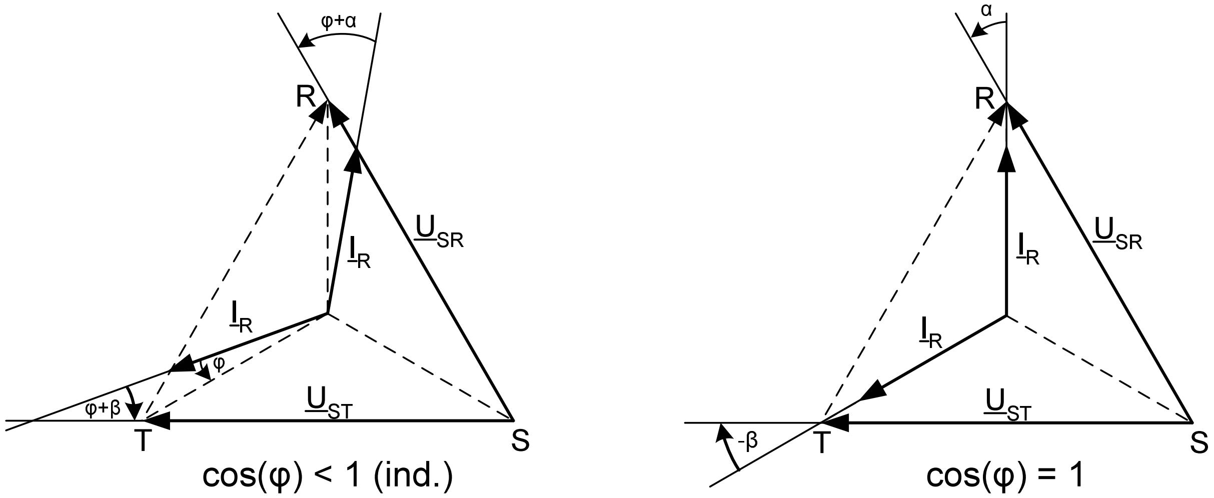


Abbildung 16: Zeigerdiagramme bei Leistungsmessung

Die Winkel α und β ergeben sich für den Fall der reinen Wirklast ($\phi = 0$) zu $\alpha = \beta = 30°$. Somit ist

$$P_1 = U_{SR} \cdot I_R \cdot \cos(\phi + 30°) \tag{2.19}$$
$$P_2 = U_{ST} \cdot I_T \cdot \cos(\phi - 30°) \tag{2.20}$$

Die Vorzeichen der Wattmeteranzeigen a und damit der Summanden P_1, P_2 werden in Abhängigkeit von ϕ durch $\cos(\Phi)$ bestimmt:

$$\frac{P_1}{U_{SR} \cdot I_R} = a_1 \cdot \frac{c}{U_{SR} \cdot I_R} = \cos(\phi + 30°) = f_1(\phi) \tag{2.21}$$
$$\frac{P_2}{U_{ST} \cdot I_T} = a_2 \cdot \frac{c}{U_{ST} \cdot I_T} = \cos(\phi - 30°) = f_2(\phi) \tag{2.22}$$

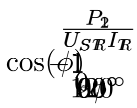


Abbildung 17

Aus Abbildung 17 ist zu entnehmen, dass bei $\phi < 60°$ die Wattmeteranzeigen mit gleichem Vorzeichen, bei $\phi > 60°$ mit verschiedenem Vorzeichen zu versehen sind. Zur Vorzeichenprobe wird die Verbindung der beiden Spannungspfade vom Leiter S abgetrennt, an den Wattmetern liegen nun die Spannungen $\frac{U_{TR}}{2}$. In diesem Fall ist bei einer Last mit ohmschem und induktivem Anteil

$$\Phi_1 = \phi - \alpha \tag{2.23}$$
$$\Phi_2 = \phi + \beta \tag{2.24}$$

Die Winkel α und β ergeben sich auch hier aus einer Betrachtung bei $\phi = 0°$ zu $\alpha = \beta = 30°$. Die Vorzeichen der Wattmeteranzeigen sind in Abhängigkeit von ϕ bestimmt durch:

$$a_1 \cdot \frac{2 \cdot c}{U_{TR} \cdot I_R} = \cos(\phi - 30°) = f_2(\phi) \tag{2.25}$$
$$a_2 \cdot \frac{2 \cdot c}{U_{RT} \cdot I_T} = \cos(\phi + 30°) = f_1(\phi) \tag{2.26}$$

Gegenüber dem ersten Diagramm ist in Abbildung 19 der Verlauf der beiden Kurven vertauscht. Aus dem Vergleich folgt als Regel für die Vorzeichenkontrolle:

Wird die Verbindung der beiden Spannungspfade vom Leiter S abgetrennt (Tastschalter in den Schaltbildern des Abschnitts refsubsubsec:aronschaltung) und es bleiben hierbei die Ausschläge

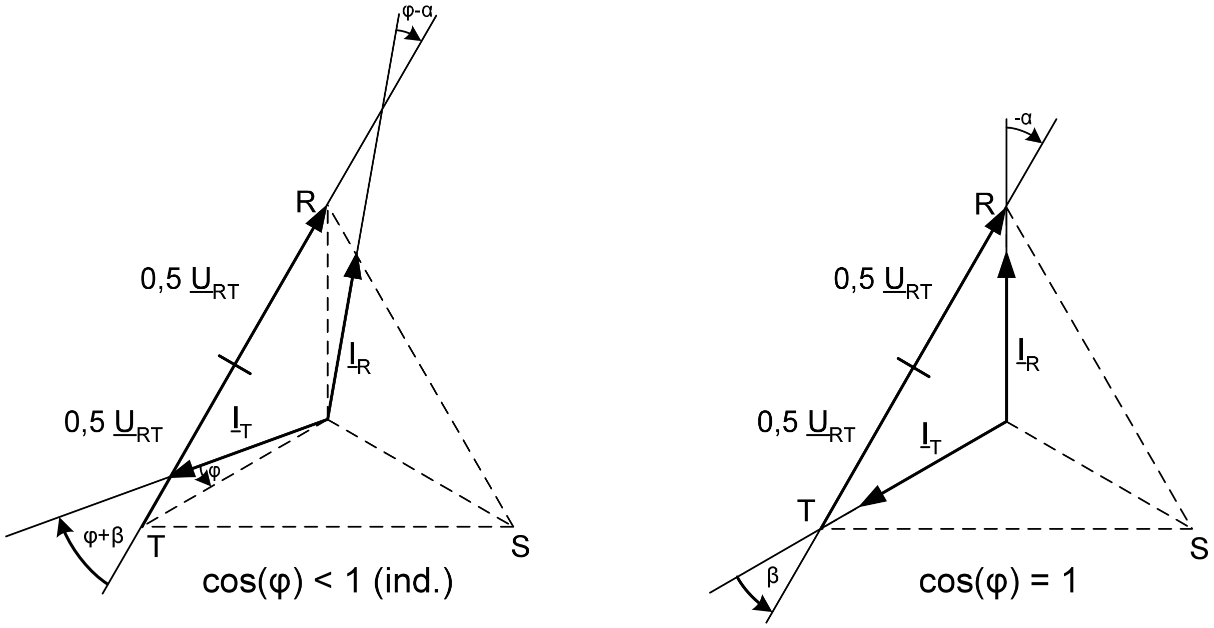


Abbildung 18: Zeigerdiagramme bei Vorzeichenkontrolle

beider Wattmeter positiv, dann sind die Leistungen P_1 und P_2 mit gleichem Vorzeichen einzusetzen. Ändert sich jedoch das Vorzeichen beider Ausschläge, so haben die Leistungen verschiedene Vorzeichen.

Im Fall von Unsymmetrie ist ein Bereich vorhanden, in dem bei Öffnen des Prüftasters nur ein Ausschlag das Vorzeichen ändert. Hier ist das obige Kriterium nicht anwendbar.

2.4.5 Bestimmung des Leistungsfaktors bei Symmetrie und sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung

Nach Abschnitt 2.4.3 sind Größe und Vorzeichen der Wattmeterausschläge eine Funktion des Phasenwinkels, sie können also zur Bestimmung von ϕ herangezogen werden. Mit

$$P_1 = U_L \cdot I_L \cdot \cos(\phi + 30°) \tag{2.27}$$

$$P_2 = U_L \cdot I_L \cdot \cos(\phi - 30°) \tag{2.28}$$

wird

$$P_2 + P_1 = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\phi = P \tag{2.29}$$

$$P_2 - P_1 = U_L \cdot I_L \cdot \sin(\phi) = \frac{Q}{\sqrt{3}} \tag{2.30}$$

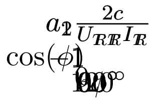


Abbildung 19

Hieraus

$$\tan(\phi) = \sqrt{3} \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} = \sqrt{3} \cdot \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} = \sqrt{3} \cdot \frac{1 - \frac{a_1}{a_2}}{1 + \frac{a_1}{a_2}} \tag{2.31}$$

$$\cos(\phi) = \frac{1 + \frac{a_1}{a_2}}{2\sqrt{1 - \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_1}{a_2}^2}} = f\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \tag{2.32}$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{1 + \frac{a_1}{a_2}}{2\sqrt{1 - \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_1}{a_2}^2}}\right) = f\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \tag{2.33}$$

$$\sin(\phi) = \frac{\sqrt{3} \cdot (1 - \frac{a_1}{a_2})}{2\sqrt{1 - \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_1}{a_2}^2}} = f\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \tag{2.34}$$

Abbildung 20 können der Phasenwinkel ϕ, ferner $\cos(\phi)$ und $\sin(\phi)$ in Abhängigkeit vom Verhältnis der Wattmeterausschläge $\frac{a_1}{a_2} = \pm 1 \ldots 0$ entnommen werden.

2.4.6 Bestimmung des Leistungsfaktors

Die folgende Berechnung ist nur bei symmetrischen sinusförmigen Spannungen, jedoch unsymmetrischen sinusförmigen Strömen möglich.

Neben der Leistung werden eine Leiterspannung U_L und die drei Leiterströme I_R, I_S und I_T gemessen. Als Mittelwert des Leistungsfaktors errechnet sich:

$$\cos(\phi) = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \frac{I_R + I_S + I_T}{3}} \tag{2.35}$$

2.5 Messung der Blindleistung bei Drehstrom

Vorausgesetzt werden Symmetrie und sinusförmiger Verlauf von Spannungen und Strömen.

Der Strompfad des Wattmeters wird z. B. in die Zuleitung S gelegt, dem Spannungspfad wird die bei $\cos(\phi) = 1$ gegenüber I_S um 90° phasenverschobene Leiterspannung U_{TR} zugeführt ($U_{TR} = \sqrt{3} U_{\text{str}}$). Aus der vom Wattmeter angezeigten Leistung $c \cdot a$ ergibt sich die Drehstrom-Blindleistung zu

$$Q = \sqrt{3} \cdot c \cdot a \tag{2.36}$$

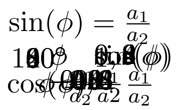


Abbildung 20: Diagramm für den Phasenwinkel ϕ, $\cos(\phi)$ und $\sin(\phi)$

Zwischen Strom- und Spannungsspule tritt in der Schaltung ohne Messwandler die Leiterspannung auf, sie darf daher nur für $U_L = 150\,V$ verwendet werden. Bei Einschaltung eines Stromwandlers ist die Anbringung einer Potentialverbindung möglich (siehe Abbildung 21, die Spannungsbeanspruchung wird hier in den Wandler verlegt.

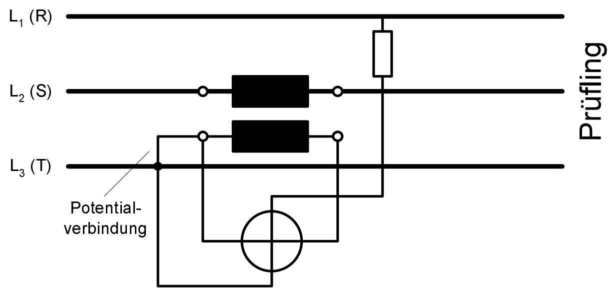


Abbildung 21: Potentialverbindung eines Stromwandlers

3 Messung mechanischer Größen

3.1 Messung der Drehzahl

Messgerät bzw. Messmethode	**Eigenschaften, Anwendungsmöglichkeiten**	**Fehler**
Drehpendelgerät	stetige Anzeige	0,5 % des Skalenendwerts
Wirbelstrom-Drehzahlmesser	stetige Anzeige	0,5 % des Skalenendwerts
Umdrehungszähler	für Stichproben bei konstanter Drehzahl	0,1 % des Skalenendwerts
Tachometerdynamo mit Gleich- oder Wechselspannung	für Anschluss anzeigender Instrumente, für Abgabe des Drehzahlistwerts bei Regelungen und Steuerungen	
Stroboskopische Messung	leistungslos	2 %
Schlupfmessung	bei geringem konstanten Schlupf von Drehfeldmaschinen	
Elektronische Impulszählung	leistungslos, sehr genau	entsprechend der Impulszahl pro Umdrehung

3.2 Messung des Drehmoments

Die Eigenschaften verschiedener Bremsverfahren zur Messung des Drehmoments werden kurz beschrieben. Als Beispiel für das Auftreten stabiler und instabiler Messpunkte wird ihre Eignung für die Aufnahme der Kennlinie $M = f(n)$ der Asynchronmaschine untersucht.

3.2.1 Schnurscheibe (Pronyscher Zaum)

Die Bremsenergie wird an der Reibungsfläche der Scheibe in Wärme umgesetzt (siehe Abbildungen 22 und 23).

Dabei gilt für Abbildug 22:

$$\begin{aligned} F_F &= \text{von der Federwaage aufgebrachte und angezeigte Kraft} \\ F_S &= \text{Zugkraft durch Gewichtsschale und Schnur} \\ F_G &= \text{Zugkraft durch aufgelegte Gewichte} \\ D &= \text{Durchmesser der Scheibe} \\ M_a &= \text{Antriebsdrehmoment} \\ M_b &= \text{Bremsdrehmoment} \end{aligned} \tag{3.1}$$

F_F wirkt den beiden anderen Zugkräften entgegen, es muss daher bei der Berechnung des Drehmomentes M_b subtrahiert werden:

$$M_b = \frac{D}{2}(F_G + F_S + F_F) \tag{3.2}$$

- **Vorteile**
  - Einfacher Aufbau
  - Für kleine bis mittlere Leistungen verwendbar

- Genauigkeit nur von den Toleranzen der Abmessungen und Gewichte abhängig

- **Nachteile**
  - Erhitzung der Reibungsfläche kann zum Durchbrennen der Schnur führen
  - Nicht für Dauermessungen geeignet

- **Fehlerquellen**
  - Luftreibung und Kühlmittelreibung an der Scheibe

Die Reibung zwischen Schnur und Scheibe ist von der Drehzahl praktisch unabhängig. Stabile Arbeitspunkte der Antriebskennlinie $M_a = f(n)$ mit der Bremskennlinie $M_b = f(n)$ ergeben sich nur für $\frac{\mathrm{d}M_b}{\mathrm{d}n} > \frac{\mathrm{d}M_a}{\mathrm{d}n}$.

Mit diesem Verfahren kann also bei Prüfung eines Asynchronmotors nur im Bereich zwischen Leerlauf und Punkten knapp unterhalb des Kippmoments gemessen werden (siehe Abbildung 23).

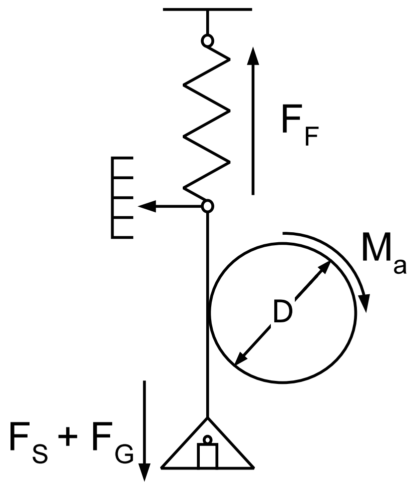


Abbildung 22: Schnurscheibe

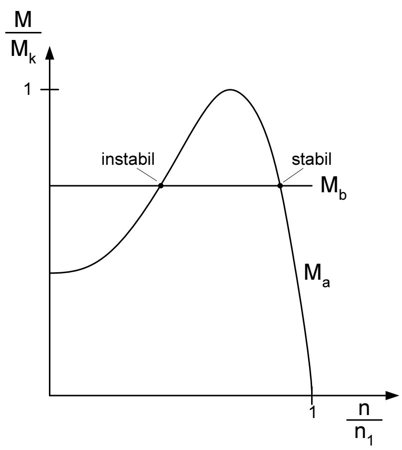


Abbildung 23: Belastung mit Schnurscheibe

3.2.2 Wirbelstrombremse

Der spezifische ohmsche Widerstand der Metallscheibe und die Höhe des Gleichfeldes Φ bestimmen die bei Rotation auftretenden Wirbelströme und damit die Bremskennlinie $M = f(n)$. Das erforderliche bremsende Drehmoment $M_b = F \cdot l$ kann mit Gewichten in einer am Hebelarm hängenden Waagschale (l konstant) oder mit einem Laufgewicht (l veränderlich) aufgebracht werden. Die waagerechte Lage des Armes wird unter Beobachtung einer Wasserwaage oder eines Zeigers mit Hilfe der Erregung eingestellt. Liegt der Schwerpunkt des Waagesystems der Wirbelstrombremse angenähert in der Drehachse, so dass die Neigung des Balkens keinen Fehler verursacht, kann die Messung durch Verwendung einer anzeigenden Tafel- oder Federwaage vereinfacht werden.

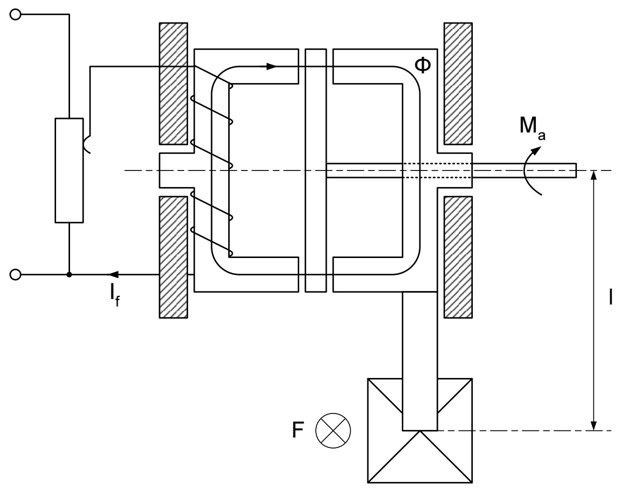


Abbildung 24: Wirbelstrombremse

- **Vorteile**
  - Einfacher Aufbau
  - Für kleine bis mittlere Leistungen verwendbar
  - Kontinuierliche Einstellung des Bremsmoments möglich
  - Geeignet für Dauerprüfungen
- **Fehlerquellen**
  - Luftreibung an der Scheibe
  - Lagerreibung
  - Neigungsfehler des Waagesystems

Stabile Arbeitspunkte, gekennzeichnet durch $\frac{\mathrm{d}M_b}{\mathrm{d}n} > \frac{\mathrm{d}M_a}{\mathrm{d}n}$ liegen im Anlauf- und im Arbeitsbereich der Kennlinie $M = f(n)$ eines Asynchronmotors. Der schleifende Schnitt der Kennlinien in der Nähe des Kippmoments M_K macht dessen Messung unsicher und schwierig.

3.2.3 Pendelbremsmaschine

Der Ständer einer elektrischen Belastungsmaschine ist drehbar gelagert, das im Inneren erzeugte Drehmoment wird durch ein außen angebrachtes abgeglichen. Zur Anwendung kommen praktisch nur Gleichstrommaschinen. Das am Ständer angreifende Drehmoment M_b kann mit

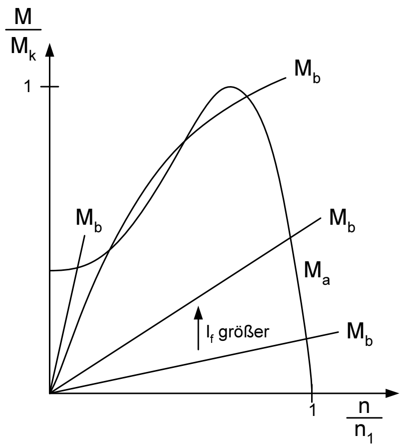


Abbildung 25: Kennlinie bei Belastung mit Wirbelstrombremse

Hebelarm und Gewichten, durch eine Feder- oder eine Hebelwaage gemessen werden. Letztere wird direkt in Nm geeicht. Für Stillstandsmessungen wird der Läufer im Ständer arretiert. Die Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik der Pendelbremsmaschine hängt unter anderem von der Art der Belastung im Ankerkreis ab.

3.2.4 Belastung mit ohmschem Widerstand

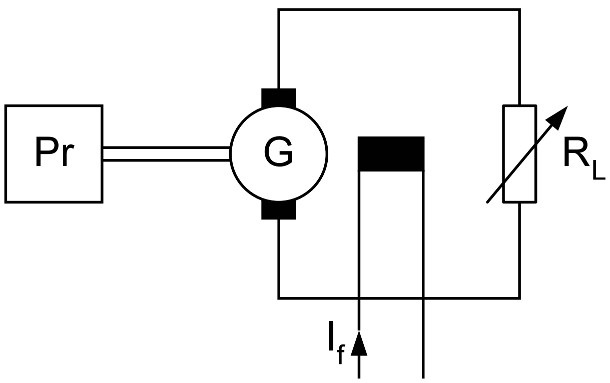


Abbildung 26: Belastung mit ohmschen Widerstand

Die im Läufer der Pendelmaschine induzierte Spannung $U_i = c\Phi \cdot \Omega$ liegt an der Reihenschaltung aus dem Widerstand R_A des Ankerkreises und dem Belastungswiderstand R_L. Mit $c\Phi \cdot \Omega = R \cdot I_A$ worin $R = R_A + R_L$ ist, wird $M_b = c\Phi \cdot I_A = \frac{(c\Phi)^2}{R} \cdot \Omega$. Bei konstantem Erregerstrorn und damit konstantem magnetischem Fluss steigt das Drehmoment linear mit der Drehzahl an: $M_b \sim n$; bei konstanter Drehzahl wächst das Drehmoment mit der Erregung. Das Verhalten der Einrichtung ist daher demjenigen einer Wirbelstrombremse ähnlich. Eine weitere Verstellmöglichkei bietet hier der Lastwiderstand R_L.

- **Vorteile**
  - Bremsendes Drehmoment über I_f und R_L feinstufig einstellbar
  - Verwendbar bis zu großen Bremsleistungen.
- **Nachteile**

- Bremsleistung wird in Wärme umgesetzt

- **Fehlerquellen**
  - Tangentialkomponente der ausströmenden Kühlluft
  - Reibung in den Gehäuselagern
  - Neigungsfehler duch Unbalancen

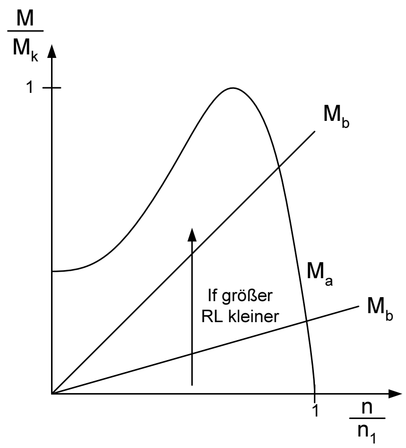


Abbildung 27: Kennlinie bei Belastung mit einem ohmschen Widerstand

3.2.5 Anschluss an einen Leonardsatz

An der mit dem Prüfling gekuppelten Pendelmaschine liegt die Spannung U der Leonard-Gleichstrommaschine. Für den Betrieb der Bremsmaschine als Generator mit der Drehzahl n gilt:

$$n = \frac{U + R_A \cdot I_A}{2\pi \cdot c\Phi} = \frac{U}{2\pi \cdot c\Phi} + \frac{R_A}{2\pi \cdot (c\Phi)^2} \cdot M_b \tag{3.3}$$

$M_b = c\Phi \cdot I_A$ =bremsendes Drehmoment.

Bei konstant gehaltenem Erregerfluss Φ der Pendelmaschine wird

$$n = k_1 \cdot U + k_2 \cdot M_b \tag{3.4}$$

Wegen der sehr kleinen Konstanten ändert sich die Drehzahl n in Abhängigkeit vom Drehmoment M_b nur gering. Durch Verstellen der Spannung U über die Erregung der Leonard-Gleichstrommaschine ergibt sich ein Feld von Kennlinien (Abbildung 29), deren Schnittpunkte mit der Charakteristik der Asynchronmaschine in allen Betriebsbereichen stabile Arbeitspunkte darstellen.

- **Vorteile**
  - Günstiger Verlauf der Kennlinien, z. B. beim Asynchronmotor Messung in allen Betriebsbereichen möglich
  - Aus dem Netz werden nur die Verluste der Maschinen bezogen, die Bremsleistung wird zurückgeliefert
  - Verwendbar bis zu großen Leistungen
  - Geeignet für Dauerprüfungen

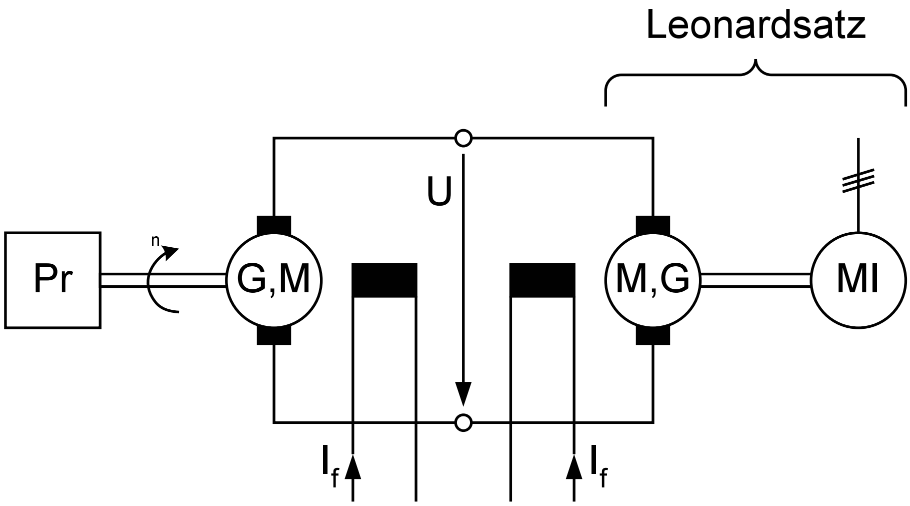


Abbildung 28: Anschluss an Leonardsatz

- **Nachteile**
  - Großer Aufwand an Maschinen
- **Fehlerquellen**
  - siehe Abschnitt 3.2.4

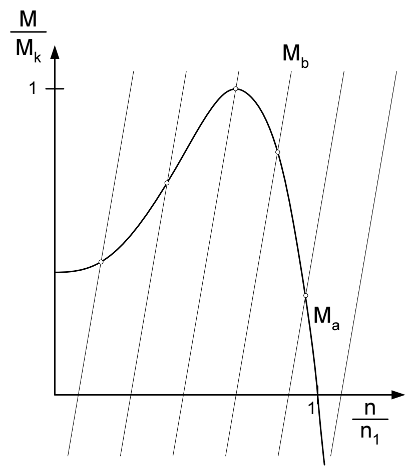


Abbildung 29: Kennlinie bei Belastung mit einem Leonardsatz

3.2.6 Pendelwaage

Bei kleinen und kleinsten Maschinen ist es günstiger, statt der Bremsmaschine den Prüfling selbst in eine Waage zu setzen. Dem am Ständer angreifenden Reaktionsmoment M_r hält die Kraft F (aufgelegte Gewichte, Laufgewicht) über den Hebelarm das Gleichgewicht. Die Eigenreibung des Prüflings, die bei kleinen Motoren relativ groß sein kann, wird auf diese Weise mitgemessen. Zum Bremsen können alle im vorhergehenden genannten Verfahren (Schnurscheibe, Wirbelstrombremse, Gleichstrommaschine) angewendet werden.

- **Vorteile**

    - Für kleinste Motoren anwendbar
    - Erfassung der Eigenreibung des Prüflings

- **Nachteile**
    - Umständliche Montage und Justierung der Pendelwaage

- **Fehlerquellen**
    - Lagerreibung der Pendelwaage
    - Ungenügende Justierung und Tarierung der Einrichtung

3.2.7 Torsionsmessung

Die Größe der Winkelverdrehung einer zwischen Prüfling und Bremsmaschine eingesetzten Torsionswelle wird elektrisch erfasst und auf ein Anzeigeinstrument übertragen.

3.2.8 Hochlaufmessung (Ytterbergverfahren)

Beim Hochlauf einer unbelasteten Maschine ist das Beschleunigungsmoment

$$M \approx J \cdot \frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} \sim \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \tag{3.5}$$

Das Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl kann während des Hochlaufs als der Differentialquotient einer drehzahlproportionalen Tachodynamospannung nach der Zeit aufgenommen werden.

- **Vorteile**
    - keine Bremsmaschine erforderlich
    - keine Verfälschung der Messergebnisse durch Erwärmung
    - keine Bremsverluste

- **Nachteile**
    - Geringe Genauigkeit des Messverfahrens

4 Messung der Temperatur

4.1 Messung der Änderung des ohmschen Widerstandes

Die spezifischen Widerstände von Kupfer und Aluminium sind im Bereich der üblichen Maschinentemperaturen lineare Funktionen der Temperatur t. Bei Extrapolation des geradlinigen Verlaufs bis zur Abszisse ergibt sich als fiktive Temperatur

$$\text{für Kupfer:} \quad \vartheta_u = -235^\circ\,C \tag{4.1}$$

$$\text{für Aluminium:} \quad \vartheta_u = -230^\circ\,C \tag{4.2}$$

Der ohmsche Widerstand R_w im warmen Zustand (ϑ_w) verhält sich zu R_k bei der Temperatur ϑ_k des kalten Metalls wie

$$\frac{R_w}{R_k} = \frac{\vartheta_w - \vartheta_u}{\vartheta_k - \vartheta_u} \tag{4.3}$$

Als Übertemperatur θ wird die Differenz zwischen der Temperatur ϑ_w und einem Bezugswert, z.B. $\vartheta_{k'}$ bezeichnet:

$$\theta = \vartheta_w - \vartheta_k \tag{4.4}$$

Sie errechnet sich unter Verwendung des temperaturabhängigen ohmschen Widerstandes für Kupfer zu

$$\theta = \frac{R_w - R_k}{R_k} \cdot (235 + \vartheta_k) = \left(\frac{R_w}{R_k} - 1 \right) \cdot (235 + \vartheta_k) \tag{4.5}$$

Weist das Kühlmittel im Zeitpunkt der Messung des warmen Widerstandes die Temperatur $\vartheta_{\text{Kü}}$ auf, dann beträgt die Übertemperatur bezogen auf die Kühlmitteltemperatur (VDE 0530, Par. 36) für Kupfer

$$\theta = \left(\frac{R_w}{R_k} - 1 \right) \cdot (235 + \vartheta_k) - (\vartheta_{\text{Kü}} - \vartheta_k) \tag{4.6}$$

Bei Annahme von $\vartheta_k = 20^\circ C$ ergibt sich für eine Temperaturzunahme um $1^\circ C$ das Widerstandsverhältnis

$$\frac{R_w}{R_k} = \frac{21 + 235}{20 + 235} = 1 + \frac{1}{255} \approx 1 + 0,004 \tag{4.7}$$

die Widerstandszunahme je $1^\circ C$ beträgt also ungefähr 4 Promille. Unterliegen Teile des Prüflings verschieden hohen Erwärmungen (z. B. eine Wicklung), so wird mit diesem Verfahren die mittlere Übertemperatur gemessen.

4.2 Messung mit Thermoelement

Am Verbindungspunkt zweier verschiedener Metalle tritt eine thermoelektrische Spannung auf, deren Größe sich einmal nach der Temperatur der Übergangsstelle richtet, zum anderen nach dem Platz, den die beiden Metalle innerhalb der Spannungsreihe einnehmen. Diese Spannungsreihe ordnet die Metalle nach der Größe und dem Vorzeichen der bei einem Temperaturunterschied von $100^\circ C$ auf Platin als Nullpunkt bezogenen Thermospannungen.

Besteht ein geschlossener Kreis aus zwei Leitern verschiedenen Materials, so ist die in ihm auftretende resultierende Spannung gleich der Differenz der thermoelektrischen Spannungen an den beiden Übergangsstellen. Die sogenannte "warme Lötstelle"liegt an dem Punkt des Prüflings, dessen Übertemperatur gemessen werden soll. Bei der Anbringung ist auf einen guten Wärmekontakt und auf die Abschirmung gegen äußere Einflüsse (Kühlluftstrom) zu achten. Die Verbindungsstelle kann z.B. zur Verbesserung des Wärmeübergangs auf ein Kupferplättchen gelötet und mit wärmeisolierendem Material abgedeckt werden. Die an der Bezugstemperatur (Umgebungsluft) liegende "kalte Lötstelle"kann von den Klemmen des Spannungsmessers gebildet werden (Vorsicht bei Instrumenten mit wärmeabstrahlender Beleuchtungseinrichtung).

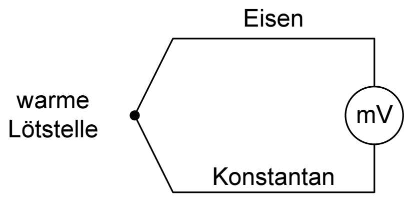


Abbildung 30: Thermoelemtent

Besser ist es, auch hier die beiden Metalle direkt zu verbinden und das Millivoltmeter im obigen Schaltbild in die Eisen- oder Konstantanleitung zu legen. Bei Messungen gegenüber $\vartheta_k = 0^\circ C$ wird die kalte Lötstelle in Wasser mit schmelzendem Eis gehängt.

Die im Kreis des Thermoelements auftretende resultierende thermoelektrische Spannung sei U_{th}, aus ihr errechnet sich die gesuchte Übertemperatur. Der vom Voltmeter angezeigte Wert U muss unter Berücksichtigung des Instrumentenstromes I und der ohmschen Widerstände des Messkreises korrigiert werden

$$U_{\text{th}} = U + I \cdot R_L = U \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_V}\right) \tag{4.8}$$

mit

$$\begin{aligned} R_L &= \text{ohmscher Widerstand des Thermoelemts} \\ R_V = \frac{U}{I} &= \text{Innenwiderstand des Voltmeters} \end{aligned}$$

Ein wichtiges Element ist das Eisen-Konstantan-Thermoelemten. Die thermoelektrische Spannung dieses Elements ist zwischen $0^\circ\,C$ und $150^\circ\,C$ von der Temperaturdifferenz θ zwischen den beiden Lötstellen praktisch linear abhängig. Eine Spannungszunahme um 1 mV entspricht einem Temperaturanstieg um $18,5^\circ\,C$. Hieraus folgt:

$$\frac{\theta}{[^\circ\,C]} = 18,5 \frac{U_{\text{th}}}{[mV]} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_V}\right) \tag{4.9}$$

4.2.1 Messung mit Flüssigkeitsthermometer

Zur Erreichung eines guten Wärmekontaktes wird die Thermometerkugel mit Metallfolie umgeben. Äußere Einflüsse (Kühlluftstrom) werden durch Umwickeln des Schaftes mit wärmeisolierendem Material ferngehalten.