4. Messen elektrischer Größen

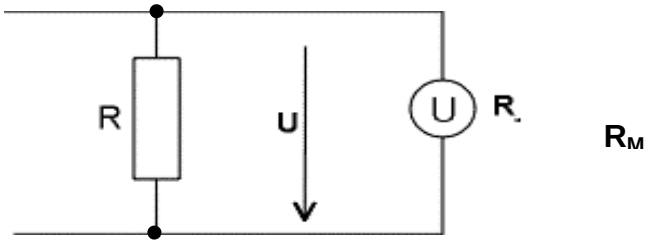
4.1 Messung elektrischer Grundgrößen

4.1.1 Spannungsmessung

➲ **Bei Spannungsmessungen wird der Spannungsmesser parallel zum Messobjekt geschaltet.**

Um den Einfluss des Messinstrumenteninnenwiderstandes R_M möglichst gering zu halten muss gelten:

R_M » R

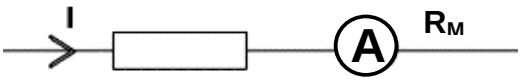


➲ Für die Praxis gilt: $R_M \approx 10\ R$

4.1.2 Strommessung

➲ **Bei Strommessungen wird der Strommesser direkt in Reihe zum Messobjekt geschaltet.**

Da der Strommesser auch einen Innenwiderstand R_M besitzt würde sich der Gesamtwiderstand vergrößern.
Um den Einfluss von R_M möglichst gering zu halten gilt: **R_M « R**



➲ Für die Praxis gilt: $R_M \approx \frac{1}{10} R$

4.1.3 Widerstandsmessung

➲ **Unterteilung in:**

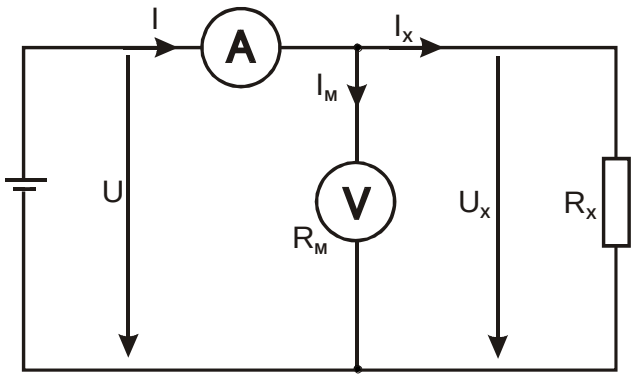
- **indirekte** R-Messung:
  Bestimmung des Widerstandes durch I und U – Messung (nach dem Ohmschen Gesetz)

- **direkte** R-Messungen:
  Ohmmeter, Messbrücken (Wheatstone-MB, Thomson-MB)

4.1.3.1 Indirekte R-Messung

➲ In der Messschaltung wird die Aufteilung von Strom und Spannung durch die Messgeräte geändert:

a) Stromfehlerschaltung

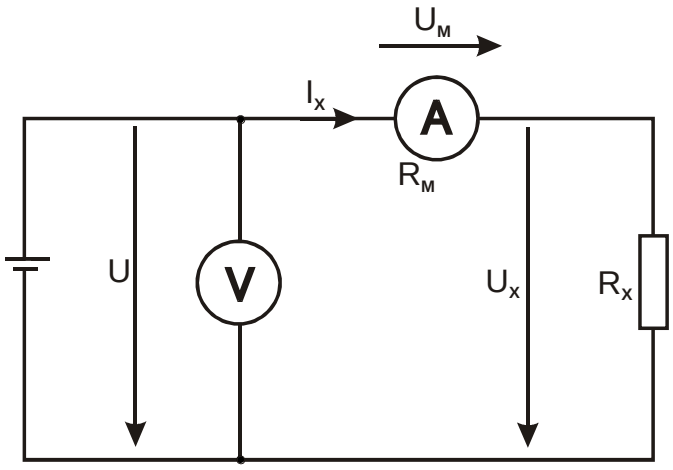


- die Spannung wird richtig gemessen
- Strommessung ist fehlerhaft, es wird auch der Strom der durch den Innenwiderstand des Spannungsmessers fließt gemessen

$I = I_X + I_M$ $U = U_X$

➲ **Anwendung wenn $R_X \ll R_{MU}$**
(Wenn der R sehr klein gegenüber dem Innenwiderstand des Spannungsmessers ist.)

b) Spannungsfehlerschaltung



- die Stromstärke durch den Widerstand wird genau gemessen
- die Spannungsmessung ist fehlerhaft, der Spannungsmesser misst die Summe der Spannungsabfälle am Strommesser und am Widerstand

$U = U_X + U_M$ $I = I_X$

➲ **Anwendung: $R_X \gg R_{MI}$**

4.1.3.2 Direkte R-Messungen

- Strommessverfahren/Spannungsmessverfahren

➲ Funktionsweise (beide Varianten)

- Nullpunkteinstellung durch einen Stellwiderstand R_V
- Skala in Ohmwerten geeicht
- geringe Genauigkeit

➲ a) Strommessverfahren

- Drehspulenmessinstrument mit großer Empfindlichkeit in Reihe mit unbekanntem Widerstand
- häufig in Vielfachmessgeräten angewandt, bevorzugtes Verfahren bei Ohmmeter
- besonders für größere Widerstände geeignet, damit die Batterie nicht unzulässig groß belastet wird

➲ b) Spannungsmessverfahren

- Drehspulenmesswerk mit hohen Innenwiderstand parallel zum Messobjekt
- für kleine Widerstände geeignet
- Verfahren wird in elektronischen Vielfachmessgeräten und Digitalmultimetern angewendet,
- dabei wird meist mit einer konstanten Stromquelle gearbeitet (Realisierung über elektronische Bauelemente z.B. Operationsverstärker)
- Skala nichtlinear

c) Widerstandsbestimmungen mit Messbrücken:

➲ Messbereiche: **Wheatstone**-Messbrücke 1 Ω bis 5 MΩ
Thomson-Messbrücke 0,01 mΩ bis 1 Ω

➲ Wheatstone-Messbrücke

Messprinzip:

- die Messung erfolgt mittels Brückenabgleich (I = 0)
- zwischen zwei Spannungsteilern liegt ein Spannungsmesser
- R2 ist ein umschaltbarer Festwiderstand zur Festlegung des Messbereiches, R3 und R4 sind gemeinsame Drehwiderstände oder als Schleifdraht mit Schleifer ausgeführt
- die Drehknöpfe sind mit einer Skala verbunden und werden solange bewegt, bis die Anzeige auf Null steht. (Widerstandswert sofort ablesbar)
- Messungen von Widerständen unter 1Ω sind nicht mehr genau, da die Zuleitungen das Messergebnis verfälschen

Ermittlung des unbekannten Widerstandes durch eine Verhältnisrechnung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4} \Rightarrow \frac{R_X}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \Rightarrow\Rightarrow\Rightarrow R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

➲ Thomson-Messbrücke

- Widerstände unter 1Ω werden mit der Thomson-Messbrücke gemessen

Messprinzip:

- Widerstand wird über 4 Leiter angeschlossen (Zuleitungen gehen hier nicht in die Messung mit ein)
- 2 Leiter dienen der Stromzuführung durch den Messwiderstand
- über 2 Leiter wird der Spannungsabfall am Messwiderstand abgegriffen
- die Brücke ist abgeglichen wenn:

$U_X = U_2$ ist und das Verhältnis $\frac{R_5}{R_6} = \frac{R_3}{R_4}$ ist.

Bei Abgleich: $R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$

- durch die zur Messung erforderliche hohe Stromstärke ist bei der Thomson-Messbrücke Netzanschluss erforderlich

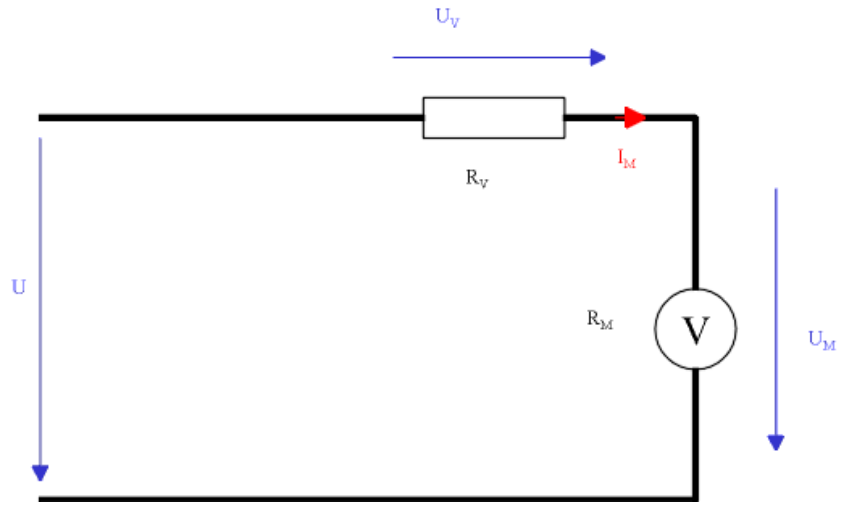
- Messungen bis **0,1 mΩ** sind möglich

4.2 Messbereichserweiterung

Sollen höhere Ströme oder Spannungen gemessen werden, als der Messbereich es zulässt, so muss der **Messbereich erweitert** werden.

a) Messbereichserweiterung bei Spannungsmessungen (U)

Grundprinzip:
Verwendung von Vorwiderständen, an denen die Differenzspannung zwischen Messspannung und zulässiger Messwerkspannung abfällt.



$$R_V = \frac{U_V}{I_M} = \frac{U - U_M}{I_M}$$

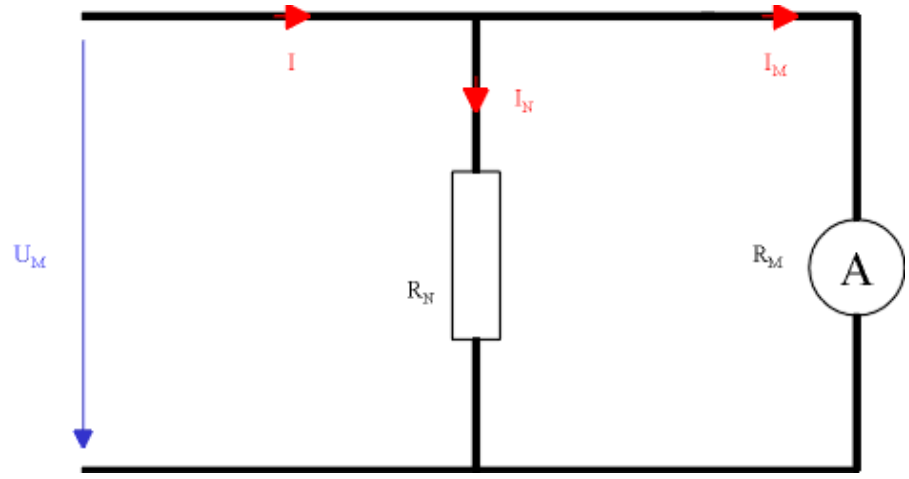
oder

$$R_V = R_M \cdot (n-1)$$

$$n = \frac{U}{U_M}$$

b) Messbereichserweiterung bei Strommessungen (I)

Grundprinzip:
Zur Messbereichserweiterung bei Strommessern wird ein Nebenwiderstand parallel zum Messwerk geschaltet (Shuntwiderstand)



$$R_N = \frac{U_M}{I_N} = \frac{U_M}{I - I_M}$$

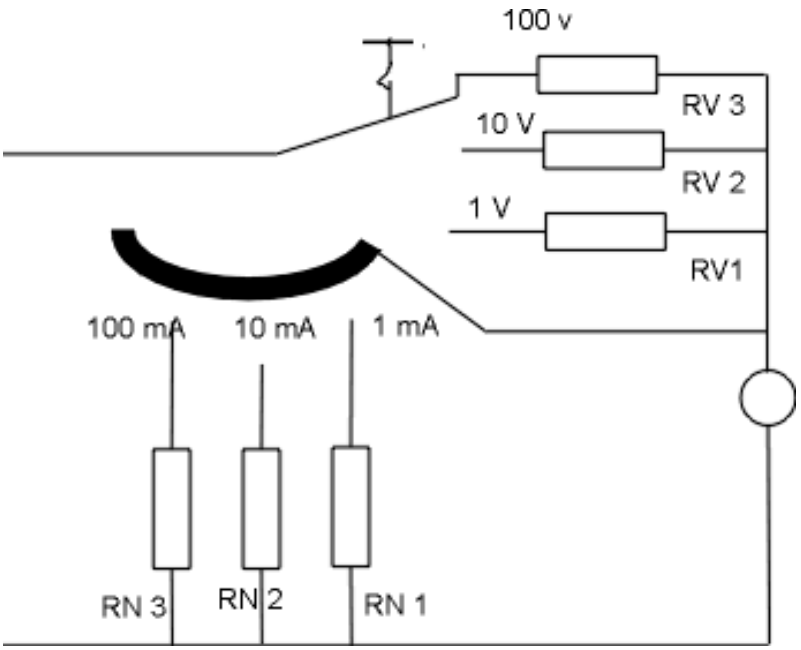
oder

$$R_N = \frac{R_M}{n-1}$$

$$n = \frac{I}{I_M}$$

c) Strom- und Spannungserweiterungen bei Vielfachmessern

Kombination der Varianten a und b.



4.3 Aufbau und Wirkungsweise von Drehspulenmesswerken

- **Das Messprinzip beruht auf der Kraftwirkung auf eine stromdurchflossene Spule, die sich in einem Magnetfeld bewegt.**

- zwischen den beiden Polschuhen eines Außenmagneten besteht ein Magnetfeld, das durch den Einbau eines zylindrischen Weicheisenkerns im Luftspalt so verläuft, dass alle Feldlinien zum Kreismittelpunkt zeigen.
- die Feldliniendichte ist damit weitgehend konstant
- im Luftspalt befindet sich die auf einem Aluminiumrahmen gewickelte Drehspule, die starr mit dem Zeiger verbunden ist
- die beweglichen Teile werden in zwei Lagern geführt
- die beiden Federn erzeugen das Rückstellmoment und dienen gleichzeitig der Stromzuführung
- bei Drehspulenmesswerken ist der Ausschlag proportional der Stromstärke
- die Richtung des Ausschlages ist abhängig von der Stromrichtung
- das Drehspulenmesswerk ist ohne Zusatz (Gleichrichter) nur für Gleichstrommessungen geeignet
- die Schwingungsdämpfung erfolgt nach dem Induktionsprinzip
- Sowohl in der Spule als auch im Aluminiumwickelrahmen wird bei einer Drehbewegung zusätzlich eine Spannung induziert. Dadurch fließt im Alu-Rahmen ein Induktionsstrom der eine Kraft erzeugt und die Bewegung hemmt.

➲ Eine besonders bei kleinen Bauformen angewendete Art des Drehspulenmesswerkes ist das **Kernmagnetmesswerk**

- der Dauermagnet befindet sich im Kern
- ein äußerer Weicheisenring schließt die magnetischen Feldlinien
- statt einer Spitzenlagerung wird häufig die Spannbandlagerung verwendet
- das Spannband ist zugleich Lager, die Rückstellfeder dient der Stromzuführung

➲ **Kenngrößen von Drehspulenmesswerken**

- nur für Gleichstrommessungen, andere physikalische Größen werden in Gleichstrom umgeformt
- Genauigkeitsklasse ab 0,05
- Eigenverbrauch sehr gering $P_E \geq 1$ mW
- Empfindlichkeit ist hoch $E \geq \frac{1mm}{\mu A}$
- Kennwiderstand $r_k = 100 \frac{K\Omega}{V}$
- Einsatz Betriebsmessgeräte (z.B. Vielfachmesser)

➲ Drehspulenmesswerke mit Gleichrichter

Um mit einem Drehspulenmesswerk Wechselspannungen und Wechselströme messen zu können, muss vor dem Messwerk ein Gleichrichter geschaltet werden.

➲ **Beachte:**
Drehspulenmesswerke zeigen (ohne Gleichrichtung) stets den arithmetischen Mittelwert an!

➲ Der arithmetische Mittelwert ist der Durchschnittswert, er hat den gleichen Flächeninhalt wie der Kurvenverlauf eines Wechselstromes.

➲ Ohne Berücksichtigung der Polarität (**nach Gleichrichtung**) wird der arithmetische Mittelwert zum Gleichrichtwert I_{gr}.

➲ In der Wechselstromtechnik wird meist der Effektivwert gemessen.

➲ Der Gleichrichtwert I_{gr} (arithmetisches Mittelwert nach Gleichrichtung) ist etwas kleiner als der Effektivwert I_{eff}, es besteht bei sinusförmigen Vorgängen ein konstanter Quotient von 1,11 zwischen Gleichrichtwert und Effektivwert.

➲ Soll der Effektivwert direkt abgelesen werden, wird das in der Skala berücksichtigt.

$$\mathbf{I_{eff} = 1{,}11 * I_{gr}}$$

➲ **Die Anzeige bei Drehspulenmessgeräten mit Gleichrichter ist nur bei Sinusgrößen richtig, die Skalen sind in Effektivwerten kalibriert!**

4.4 Aufbau und Wirkungsweise von Dreheisenmesswerken

- auch Weicheisenmesswerk genannt

➲ **Aufbau**
- der Messstrom fließt durch eine fest eingebaute Ringspule
- in deren Inneren befindet sich eine feste und eine bewegliche Weicheisenplatte
- die drehbare Platte ist mit dem Zeiger starr verbunden
- das Rückstellmoment wird durch eine Feder erzeugt
- Die Dämpfung erfolgt durch Luftkammerdämpfung

➲ **Wirkungsweise**

Das vom Messstrom erzeugte Magnetfeld magnetisiert die beiden Weicheisenplatten gleichsinnig.
Die dadurch entstehenden Kräfte sind entgegengerichtet und die Platten stoßen sich ab.
Die Abstoßkräfte steigen mit der Stromstärke und liefern das Messmoment (Zeigerausschlag)

Da beide Platten gleichzeitig ummagnetisiert werden ist die abstoßende Kraft unab hängig von der Feldlinienrichtung.

- Messung von Gleich- und Wechselströmen bei Wechselstrommessungen wird der Effektivwert angezeigt
- Dreheisenmesswerke sind unempfindlich gegenüber Erschütterungen und sind überlastbar
- Einsatz: Betriebs- und Schalttafelinstrumente in der Starkstromtechnik

➲ **Kenngrößen** von Dreheisenmesswerken

- Messen von Gleich- u. Wechselspannungen bzw. – strömen
- Genauigkeitsklasse 0,5 bis 5
- Eigenverbrauch ist hoch; bei Spannungsmessern 1VA bis 4 VA, bei Strommessern 0,7 VA bis 2VA
- Empfindlichkeit ist gering. Messwerk ist robust und überlastbar
- kleinste Messbereiche: bei Strommesser ca. 30 mA, bei Spannungsmessern etwa 6 V

4.5 Aufbau und Wirkungsweise elektrodynamischer Messwerke

➲ **Aufbau**

- Aufbau ähnelt dem eines Drehspulenmesswerkes
- wesentlichster Unterschied : **der Dauermagnet wird durch einen Elektromagneten ersetzt**
- dieser besteht aus einer feststehenden Spule mit oder ohne Eisenkern
- die Stromzuführung erfolgt über die beiden Rückstellfedern
- das Messwerk arbeitet mit Luftdämpfung (Wirbelstromdämpfung würde wegen der auftretenden Verluste zu Messfehlern führen, Eisenmantel der festen Spule aus lamelliertem Blech)

➲ **Wirkungsweise** elektrodynamischer Messwerke

- eine Drehspule liegt im Feld eines Elektromagneten
- die magnetischen Wirkungen der Ströme durch die feste und durch die Drehspule multiplizieren sich
- werden beide Ströme gleichzeitig umgepolt, ändert sich die Richtung des Zeigerausschlages nicht – deshalb ist das Messwerk auch für Wechselstrom geeignet

Merke: Elektrodynamische Messwerke zeigen das Produkt zweier Ströme an. Elektrodynamische Messwerke werden wegen ihrer Produktbildung **ausschließlich als Leistungsmesser verwendet**.

- die feste Spule ist der Strompfad
- die Drehspule ist der Spannungspfad
- bei Sinusspannungen ist die Leistungskurve ebenfalls eine Sinuskurve mit doppelter Frequenz. – durch die Trägheit des Instrumentes wird der Mittelwert, d. h. die Wirkleistung angezeigt.

➲ **Kenngrößen** elektrodynamischer Messwerke:

- Leistungsmessungen im Gleich und Wechselstromkreis
- Genauigkeitsklasse meist 1,5 (eisengeschlossene Messwerke)
- Eigenverbrauch im Spannungspfad ab 0,1 W, im Strompfad 0,5 – 2 W
- Empfindlichkeit ist gering
- kleinster Messbereich ca. 3 W (eisenlos), 30 W (eisengeschlossen)
- Dauerüberlastung in jedem Pfad nach VDE max. 20%

➲ Grundschaltungen zur Leistungsmessung ↗ Folie 1

➲ Messen der Gesamtleistung im Vierleiternetz ↗ Folie 2

- grundsätzlich 3 Leistungsmesser, die jeweils die Außenleiterleistung angeben
- die Messwerke können auch innerhalb eines Messgerätes auf eine gemeinsame
- Achse wirken
- bei symmetrischer Last genügt die Messung an einem Außenleiter , dabei ist die Messwerksskala mit dem 3-fachen Wert zu kalibrieren

➲ Messen der Leistung im 3-Leiternetz ↗ Folie 3

- im 3-Leiternetz ist die Leistungsmessung mit der „**Aronschaltung**“ möglich (2 Leistungsmesser)
- die Strompfade liegen in 2 verschiedenen Außenleitern
- die Spannungspfade sind zwischen diesen Außenleiter und dem dritten Außenleiter geschaltet
- beide Messsysteme wirken auf eine gemeinsame Achse – dadurch wird die Gesamtleistung angezeigt

4.6 Aufbau und Wirkungsweise von Zählern (Induktionszähler)

Eingesetzt zur Messung der elektrischen Arbeit

➲ Elektrische Arbeit W ist das Produkt aus W = U·I·t

➲ **Prinzipaufbau**:

- Induktionsmesswerk mit einer Aluminiumscheibe
- durch die Form des Drehorgans ist eine besondere Anordnung der Spannungs- und Stromspule notwendig
- die beiden magnetischen Flüsse sind um 90° versetzt, so dass die Wirbelströme in der Scheibe einen Antriebsmoment erzeugen
- zur Hemmung der Drehbewegung dient eine Wirbelstrombremse mit Dauermagnet
- das Bremsmoment steigt mit zunehmender Drehzahl
- sind Antriebs- u. Bremsmoment gleich groß, stellt sich eine Konstante Drehzahl ein

Merke: Die Drehzahl der Zählerscheibe ist proportional dem Antriebsmoment, d. h. der elektrischen Leistung.

- Das Bremsmagnet hat außerdem die Aufgabe, die Scheibe bei Wegfall des Antriebsmomentes still zu setzen, sonst würde durch die Trägheit des Drehorganes eine Fehlanzeige erfolgen (dreht weiter).

- am Zähler kann die gelieferte elektrische Arbeit abgelesen werden

➲ **Kenngrößen** von Induktionszählern

- Messgröße ist die elektrische Arbeit in kWh bei Wechselstrom
- Genauigkeitsklasse häufig 1,5 bzw 2,5
- **Eigenverbrauch** ca. 1W bis 3W
- Anlauf des Zählers bei 0,3% des I_N (Nennstromes)
- Dauerbelastung 400%.... 600% von I_N

Zählerkonstante: C_Z

- die Zählerkonstante gibt an, wieviel Umdrehungen der Zählerscheibe einer kWh entsprechen
- übliche Zählerkonstanten sind z.B. 60, 120, 600

- für kurze Zeitspannen, kann man die elektrische Arbeit aus der Anzahl der Zählerumdrehungen und Umrechnung mit der **Zählerkonstante** ermitteln

$$W = \frac{n}{C_Z}$$

- mit Hilfe der Zeit kann auch die Leistung berechnet werden

$$P = \frac{n}{C_Z \cdot t}$$

➲ Angaben auf dem Zählerschild

↗ Folie 4

4.7 Anwendung und Wirkungsweise von digitalen Messgeräten

- Digitalmultimeters (DMM) sind Vielfachmessgeräte, die mit zuschaltbaren Adaptern (Anpassern) fast alle elektrischen und nichtelektrischen Größen messen

➲ **wesentliche Baugruppen** eines Digitalmultimeters

a) Analogteil zur Signalaufbereitung

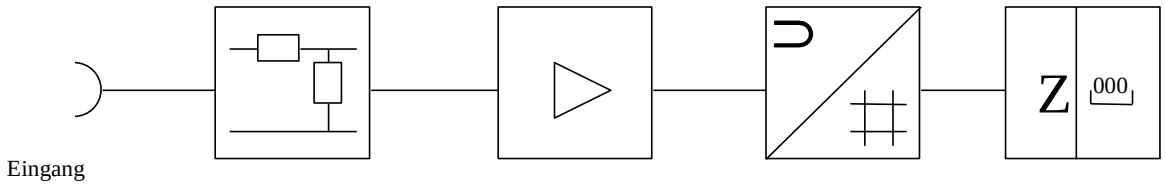
- das Analogteil unterscheidet sich kaum von den Eingangsschaltungen analog arbeitender Messgeräte, jedes elektrische Messsignal wird in eine nahezu proportionale Gleichspannung (z. B. 0 V....2) umgewandelt.

b) Analog/Digital-Umsetzung (ADU)

- es wird das analoge Eingangssignal in ein entsprechendes digitales Signal umgewandelt

c) Digitalteil

- die digitale Messwertverarbeitung wird mit einer Programmablaufsteuerung (Mikroprozessor) zentral gesteuert.



Eingang

Anpassschaltung

Analogteil
z.B.
Verstärker, Abschwächer, Bereichsum-schalter, Konverter

Analog/Digital-Umsetzer (ADU)

Digitalteil
z.B:
Zähler, Speicher, Rechner, Ziffernanzeige, Steuerlogik

➲ Messen mit dem Digitalmultimeter (DMM)

- es gibt u.a. 7-Segment-Anzeigen und 14-Segment-Anzeigen
- oft ist ein erweitertes Anzeigefeld mit Zeichen z. B.: für Polarität, Messbereich und weiteren Sonderfunktionen vorhanden
- zum Schutz des Messgerätes ist wie bei den analogen Messmitteln immer mit dem höchsten Messbereich zu beginnen

➲ **Ziffernumfang**

- der Ziffernumfang ist der Bereich, der von der Anzeige maximal dargestellt werden kann
- oft findet man auch den Hinweis 3½-stellige Anzeige (dieser Begriff ist zwar gebräuchlich aber ungenau)

Ziffernumfang	0 - 999	0 -1 999	0 - 9 999	0 - 1 9999
Angabe mit „Stellen“	3	3½	4	4½

➲ Messen von Gleichspannungen

- häufig sind Gleichspannungen mit störenden Wechselspannungen überlagert (z. B. Rauschen, induktive Einkopplungen usw.)
- man spricht hierbei von Serientaktstörspannungen
- zur Unterdrückung dieser Störgrößen sind einige DMM mit Tiefpassfiltern ausgestattet
- Tiefpassfilter lassen nur Gleichspannungen und sehr niederfrequente Wechselspannungen passieren

➲ Messen von Wechselspannungen und Wechselströmen

- für das Messen von Effektivwerten bei Wechselspannungen ist im DMM ein Messwandler eingebaut

- es gibt Wandler mit „**Mittelwertbildung“** und Wandler mit „**Echteffektivwertberechnung**“

a) Wandler mit „**Mittelwertbildung**“

- die anliegende Wechselspannung wird mittels Gleichrichter gleichgerichtet und der Gleichrichtwert (arithmetischen Mittelwert nach Gleichrichtung) gemessen
- der nachfolgende Verstärker ist so eingestellt, dass der Effektivwert angezeigt wird.
- die Verstärkung ist nicht veränderbar
- es wir ein konstanter Faktor zugrunde gelegt, der nur für sinusförmige Spannungsverläufe gilt ($I_{eff} = 1{,}11 \cdot I_{gr}$ (siehe 4.1))
- werden andere als sinusförmige Wechselspannungen gemessen steigt der Messfehler an

b) Wandler mit „**Echteffektivwertberechnung**“ (True RMS)

- der Wandler errechnet für jedes Messsignal den echten Effektivwert (d. h. den geometrischen (quadratischen) Mittelwert)
- dadurch ist die Kurvenform der zu messenden Spannung unwichtig
- die Messung ist damit weitgehend fehlerfrei

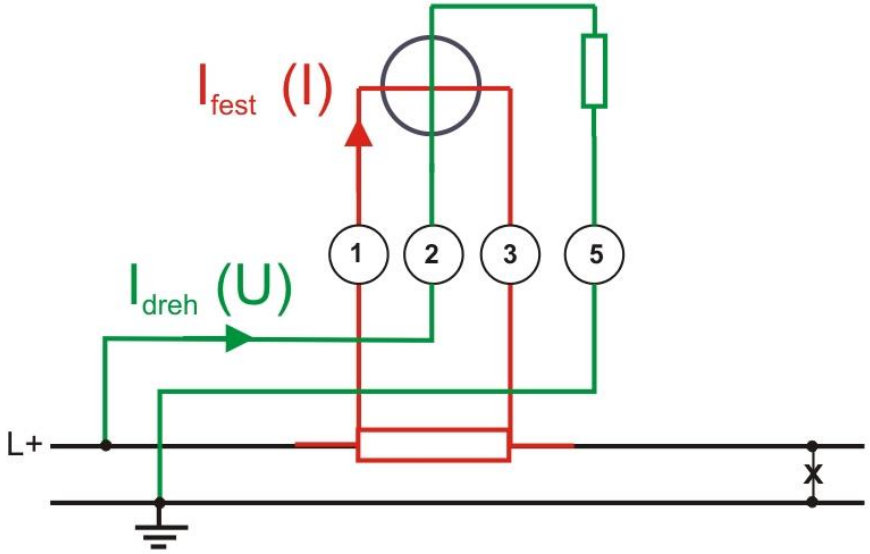
Literatur

Lehrbücher für die Berufsausbildung der Verlage „Westermann“ und „Europa Verlag“
Grundlagen und Fachkunde:
- Elektrotechnik
- Industrieelektronik und Informationstechnik
- Elektronik
- Mechatronik
- Tabellenbücher Friedrich und Westermann

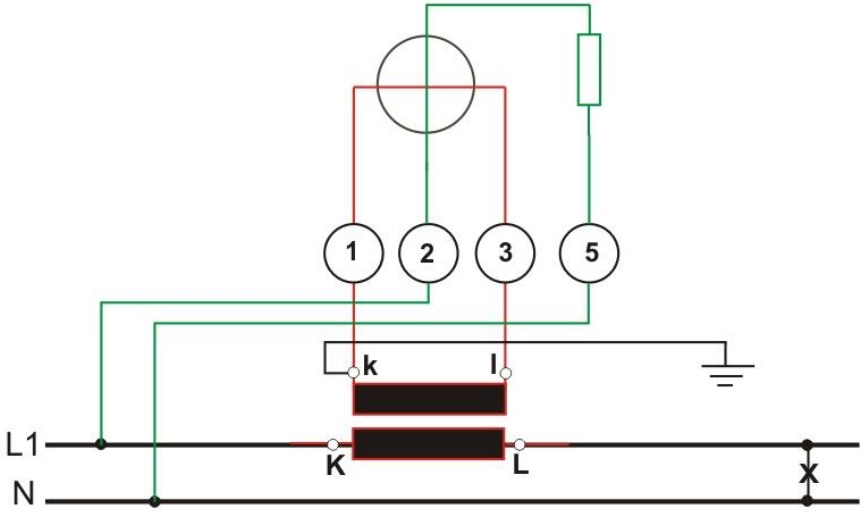
Bartak – „Elektrische Messgeräte“

Folien zum Kapitel MT_2

Grundschaltungen zur Leistungsmessung nach DIN 43807



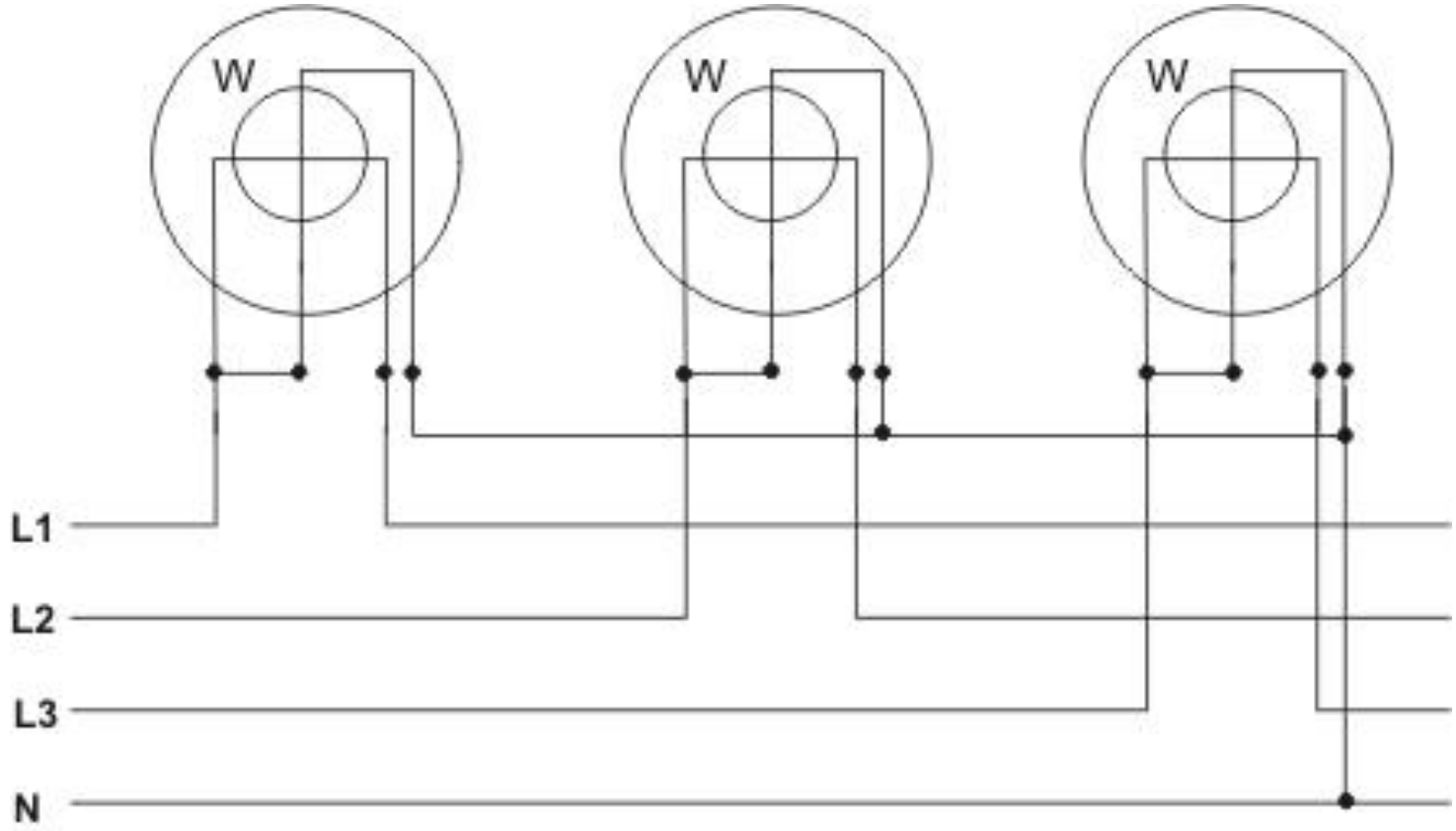
Gleichstrom



Einphasen-Wechselstrom
(mit Stromwandler)

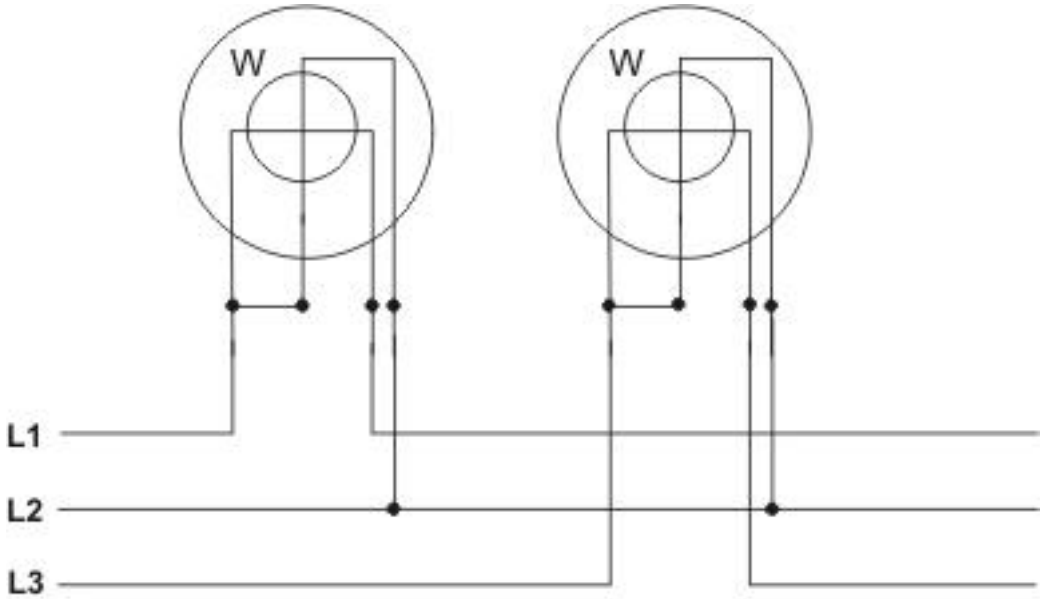
Folie 1 MT_2

Gesamtleistung im Vierleiternetz



Drei-Leistungsmesser-Schaltung

Gesamtleistung im Dreileiternetz



Zwei-Leistungsmesser-Schaltung
(Aronschaltung)

Angaben auf dem Zählerschild



Zulassungszeichen zur Eichung

Zählerkonstante

Nennfrequenz

Schaltungsnummer

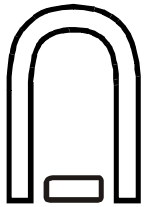
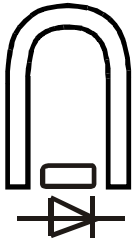
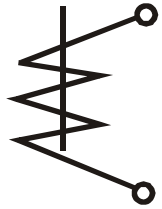
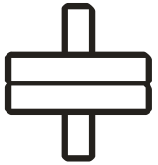
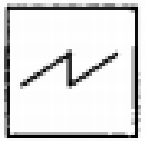
Typen-angabe

Nennspannung

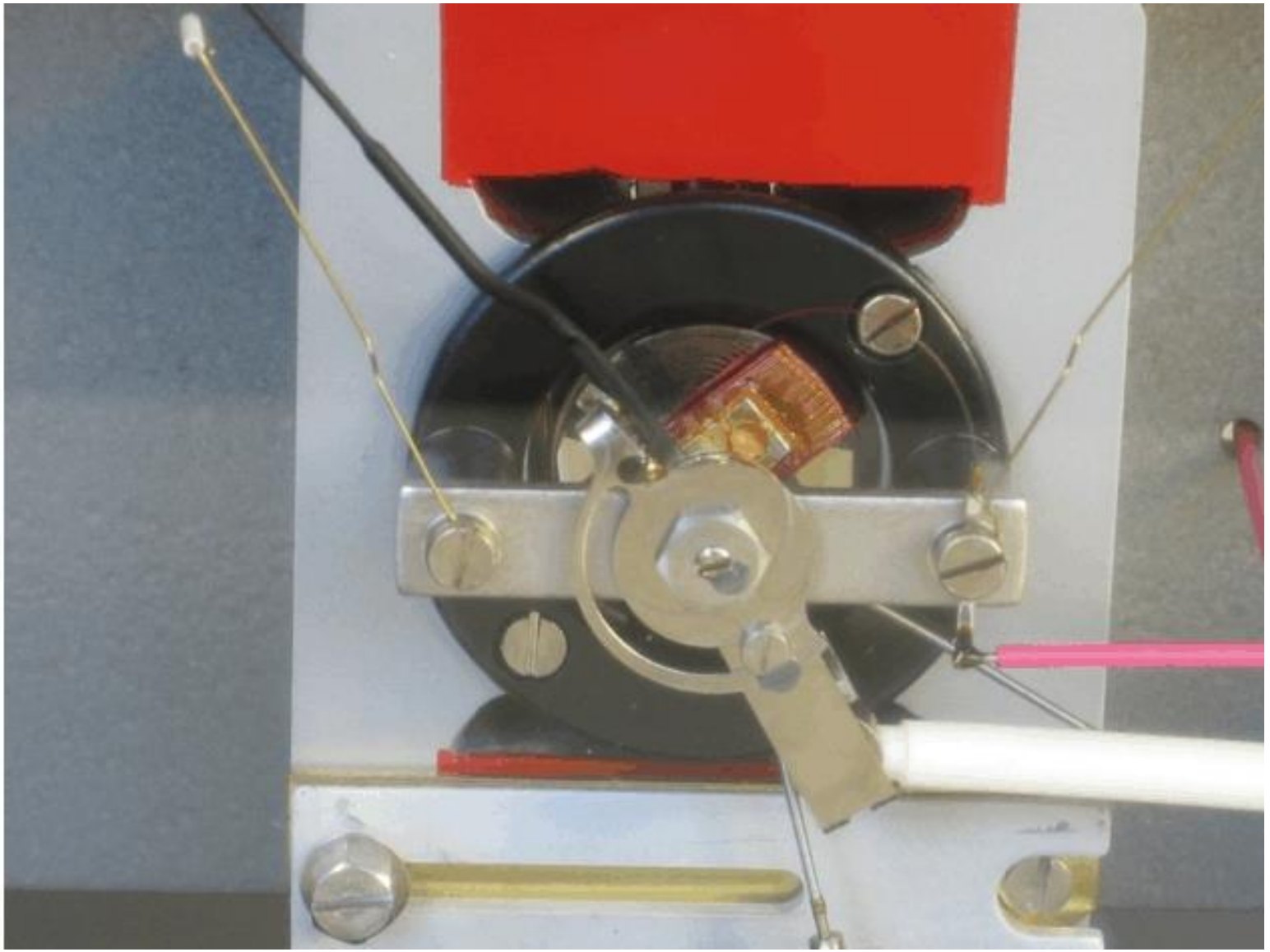
Fabrikations-nummer

Nennstrom

Folie 4 MT_2

Mess-instrument	Drehspulmessinstrument		Dreheisen-messinstrument	Elektro-dynamisches Messinstru-ment	Digitale Mess-instrumente mit/ohne Gleichrichter	Oszilloskop
	ohne Gleichrichter	mit Gleichrichter				
Sinnbilder						
Art der Messgröße	Gleichstrom, Gleich-spannung	sinusförmige Wechsel-spannung u. Wechselstrom	Gleich-, Misch-, Wechsel-spannung u. -ströme	Leistung	Gleichstrom u. –spannung/ sinusförmiger Wechselstrom u. –spannung	Gleich- , Misch- u. Wechsel-spannung
Möglicher Einsatz-bereich	1 µA bis 10 A 1 mV bis 1000 V	0,1 mA bis 10 A 1 V bis 1000 V	10 mA bis 100 A 1 V bis 100 V	250 mW bis 2,5 kW	100 mA bis 10 A 100 µV bis 1000 V	2 mV bis 300 V
Frequenz-bereich	0 Hz	25 Hz bis 100 Hz	10 Hz bis 100 Hz	10 Hz bis 1kHz	0 Hz bis 25 kHz	0 Hz bis GHz
Anzeige	arith-metischer Mittelwert	Effektivwert bei Sinusform	Effektivwert	Wirkleistung	arithmetischer Mittelwert, Effektivwert (für Sinusform)	Zeitverlauf des Momentan-wertes

Folie 5 MT_2: Übersicht Messinstrumente mit Sinnbildern und technischen Angaben



Drehspulenmesswerk

Folie 6 MT_2: Drehspulmesswerk



Folie 7 MT_2: analoge Labormessgeräte



Folie 8 MT_2: Wheatstone-Messbrücke



Folie 9 MT_2: Wechselstromzähler mit Läuferscheibe und Bremseinrichtung



Folie 10 MT_2: Beispiel Zählerschrank



Folie 11 MT_2: digitale Labormessgeräte