

Einführung in die Messtechnik

Elektrische Messtechnik

Wolfgang Kessel
Braunschweig



Spannungs- und Strommessung

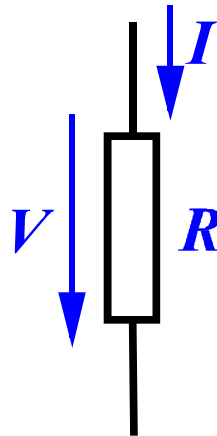
In elektrischen Schaltungen gibt stets zwei gleichzeitig wirksame Größen:

- elektrischen Strom I ;
- elektrische Spannung V .

BEISPIEL Ohmsches Gesetz

Fließt ein elektrischer Strom durch einen Widerstand, so entsteht zwischen seinen Enden eine elektrische Spannung V , die der Stromstärke I proportional ist. Die Proportionalitätskonstante ist eine Eigenschaft des jeweiligen Widerstandes, der Widerstandswert R .

$$V = R \cdot I$$



Schaltbild eines Widerstandes.

- I - eingespeister elektrischer Strom;
- V - zwischen den Enden entstehende elektrische Spannung;
- R - elektrischer Widerstand, Merkmal des Objekts;

Zwischen den Enden eines Widerstandes entstehende Spannung über dem eingespeisten Strom (Kennlinie) verschiedener (Ohmscher) Widerstände. Der Widerstandswert R ist gleich der Steigung der Kennlinie (Widerstandsgerade); der punktierte Pfeil zeigt die Richtung wachsenden Widerstandes.

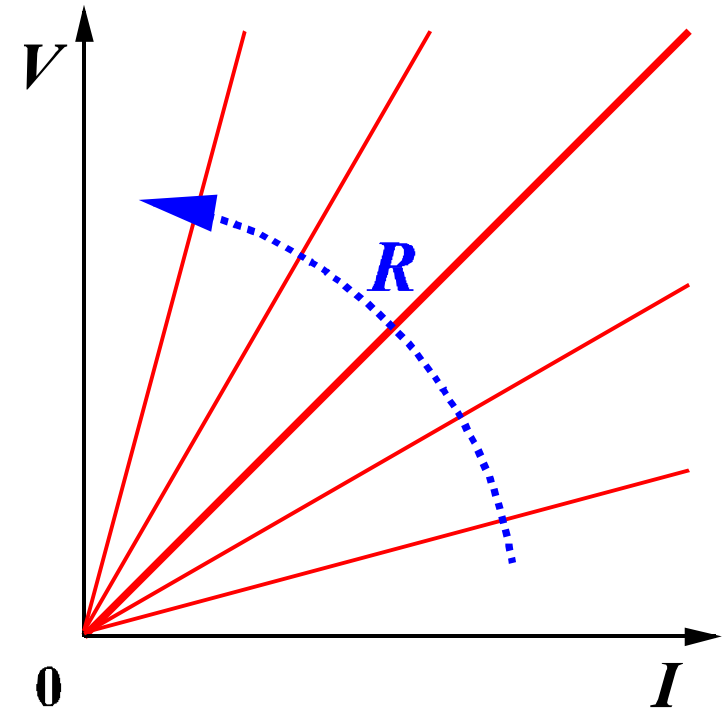
Das Ohmsche Gesetz wird häufig auch in der inversen Form ausgedrückt

$$I = L \cdot V$$

mit

$$L = 1/R - \text{Leitwert des Widerstandes.}$$

Das Ohmsche Gesetz gehört zu den wenigen Gesetzmäßigkeiten, für die bekannt ist, dass sie über einen sehr weiten Bereich einen linearen Zusammenhang liefern.



Allgemein hat ein Bauelement eine Spannung-Strom-Kennlinie (Spannung zwischen den Enden als eindeutige Funktion des eingespeisten Stromes)

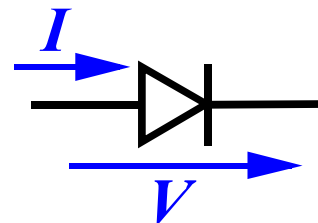
$$V = f(I)$$

oder eine Strom-Spannung-Kennlinie (Strom durch das Bauelement als eindeutige Funktion der an den Enden angelegte Spannung)

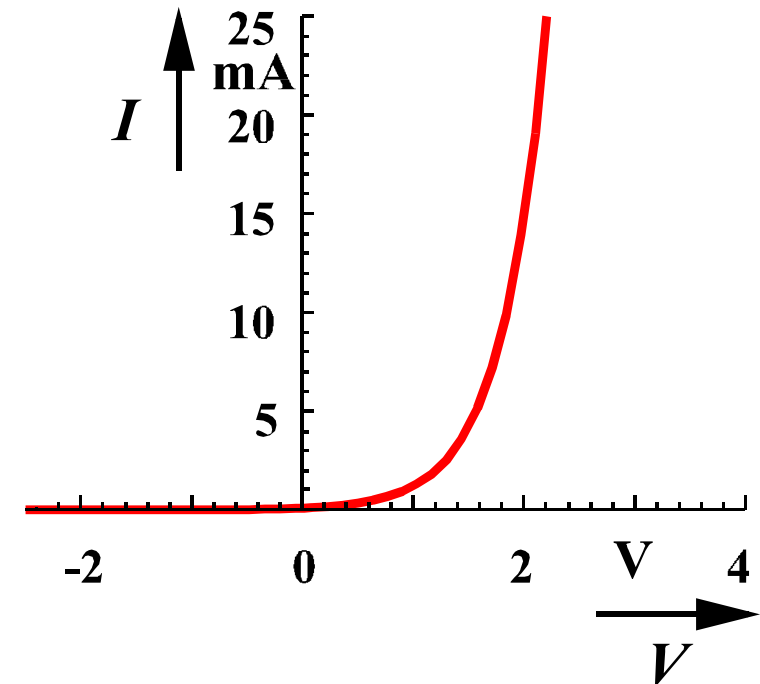
$$I = f(V)$$

BEISPIEL Diode

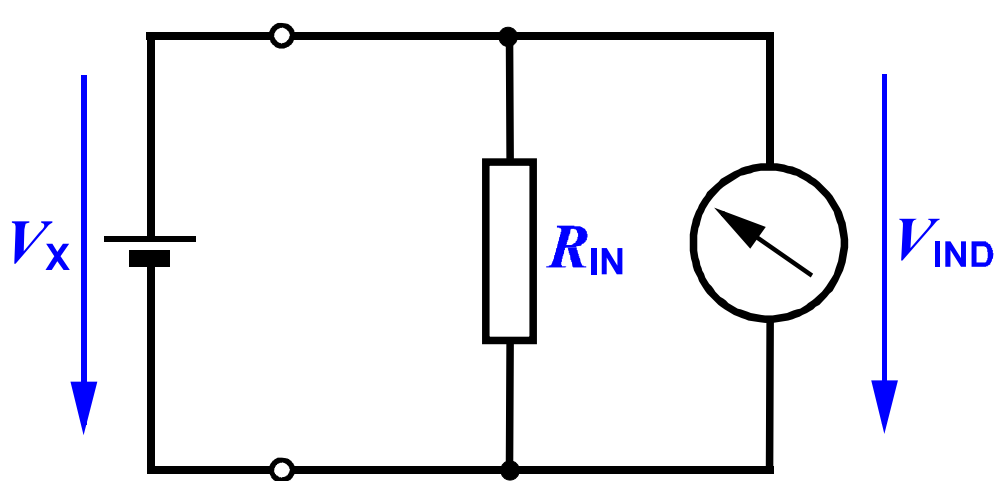
Eine Germanium- oder Silizium-Diode ist ein wichtiges elektrotechnisches Bauelement mit einer nicht-linearen Kennlinie.



Strom I durch eine Diode über der an den Enden angelegte elektrische Spannung V .



Spannungsmessung (Spannungsquelle $V = konst.$)



Schematischer Messaufbau einer Spannungsmessung.

V_X - zu messende elektrische Spannung;
 V_{IND} - angezeigte elektrische Spannung;
 R_{IN} - Eingangswiderstand des Spannungsmessgerätes.

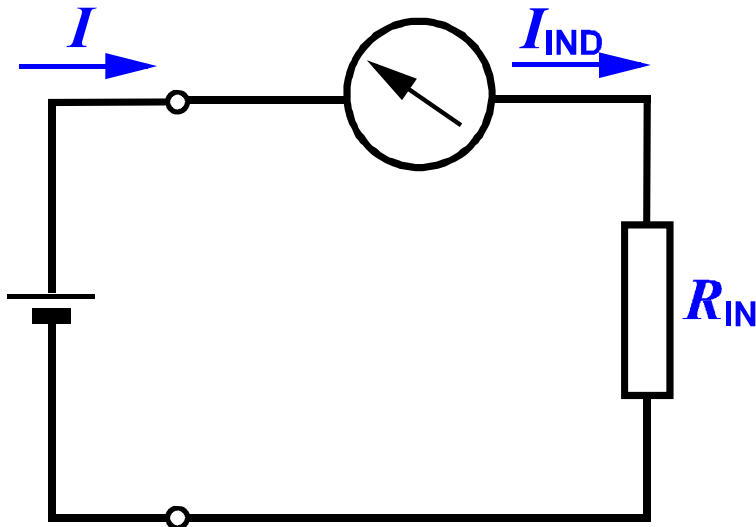
Modell der Auswertung

$$V_X = V_{IND}$$

Mögliche Abweichungen:

- Messabweichung des Messgerätes (Herstellerangabe, typisch **2,5%**);
- Thermospannungen ($|\delta V| \cong 10 \mu V$), unterschiedliche Leitermaterialien, unterschiedliche Temperaturen;
- Einstrahlungen ($|\delta V| \cong 100 \mu V \dots$), Leitungsschleifen, Abschirmung.

Strommessung (Stromquelle $I = \textit{konst.}$)



Schematischer Messaufbau einer Strommessung.

I_X - zu messender elektrische Strom;

I_{IND} - angezeigter elektrischer Strom;

R_{IN} - Eingangswiderstand des Spannungsmessgerätes.

Modell der Auswertung

$$I_X = I_{IND}$$

Mögliche Abweichungen:

- Messabweichung des Messgerätes (Herstellerangabe, typisch **2,5%**);
- Leckströme ($|\delta I| \cong \dots$), unzureichende Isolation;
- Einstrahlungen ($|\delta I| \cong \dots$), Leitungsschleifen, Abschirmung.

Kirchhoffschen Gesetze (Vernetzung von Schaltelementen)

I. Kirchhoffs Gesetz (Schaltungsknoten)

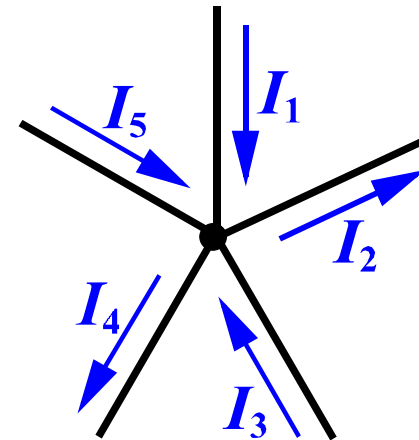
Die Summe der in einem Schaltungsknoten zusammenlaufenden elektrischen Ströme ist NULL (Kontinuitätsgleichung).

$$\sum_{1 \leq k \leq n} I_k = 0$$

mit

I_k - elektrischer Strom im Zweig k ;
einlaufende Ströme zählen positiv,
auslaufende Ströme negativ;

n - Anzahl der zusammenlaufenden Zweige.



Schaltungsknoten aus 5 Leitungszweigen:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

II. Kirchhoffsches Gesetz (Schaltungsmaschen)

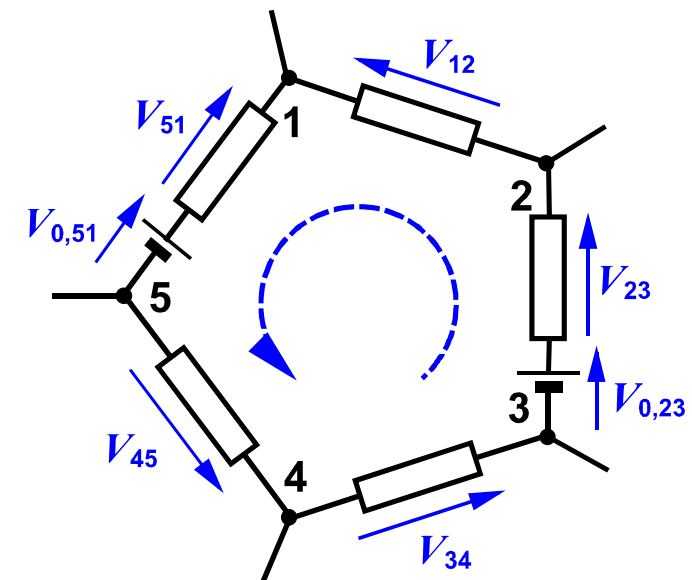
Die Summe der in einer Schaltungsmasche auftretenden elektrischen Spannungen ist gleich der Summe der in der Masche vorhandenen elektromotorischen Kräfte. (Energiesatz).

$$\sum_{\text{Zweige}} V_{j,j+1} = \sum_{\text{Zweige}} V_{0,k}$$

mit

$V_{j,j+1}$ - elektrischer Spannung im
Zweig zwischen Knoten j und $j+1$;
Spannungen in Richtung der
Ströme orientiert;

$V_{0,k}$ - elektromotorische Kraft im
Zweig k .



Schaltungsmasche aus 5 Leitungszweigen:

$$V_{12} + V_{23} + V_{34} + V_{41} - V_{51} = V_{0,23} - V_{0,51}$$

BEISPIEL Reihenschaltung von Widerständen

Eine Reihenschaltung (Hintereinanderschaltung) zweier Widerstände mit den Widerstandswerten R_1 und R_2 wirkt wie ein Widerstand mit dem Widerstandswert aus der Summe der beiden Einzelwerte $R = R_1 + R_2$.

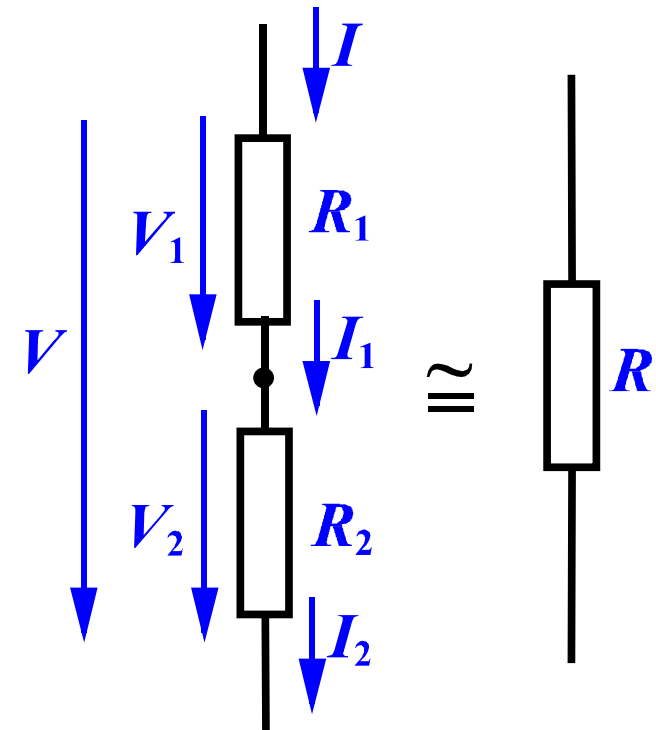
Ströme und Spannungen bei einer Serienschaltung zweier Widerstände.

I_1, I_2 - Ströme in den Widerständen;

V_1, V_2 - Spannungen zwischen den Enden der Widerstände;

I - Strom, der in die Schaltung eingespeist wird;

V - Spannung zwischen den Enden der Schaltung.



Physikalische Zusammenhänge

$$I = I_1 = I_2$$

I. Kirchhoffsches Gesetz;

$$V = V_1 + V_2$$

II. Kirchhoffsches Gesetz;

$$V_1 = R_1 \cdot I_1$$

Kennlinie des Widerstandes **1**;

$$V_2 = R_2 \cdot I_2$$

Kennlinie des Widerstandes **2**;

$$V = R \cdot I$$

$$R = R_1 + R_2$$

Gesamtwiderstand.

$$I_1, I_2$$

- Ströme in den Widerständen

$$V_1, V_2$$

- Spannungen zwischen den Enden der Widerstände;

$$R_1, R_2$$

- Widerstandswerte;

$$I$$

- Strom durch die Schaltung;

$$V$$

- Spannung zwischen den Enden der Schaltung.

BEISPIEL Parallelschaltung von Widerständen

Eine Parallelschaltung zweier Widerstände mit den Leitwerten $1/R_1$ und $1/R_2$ wirkt wie ein Widerstand mit dem Leitwert aus der Summe der beiden Einzelwerte

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2.$$

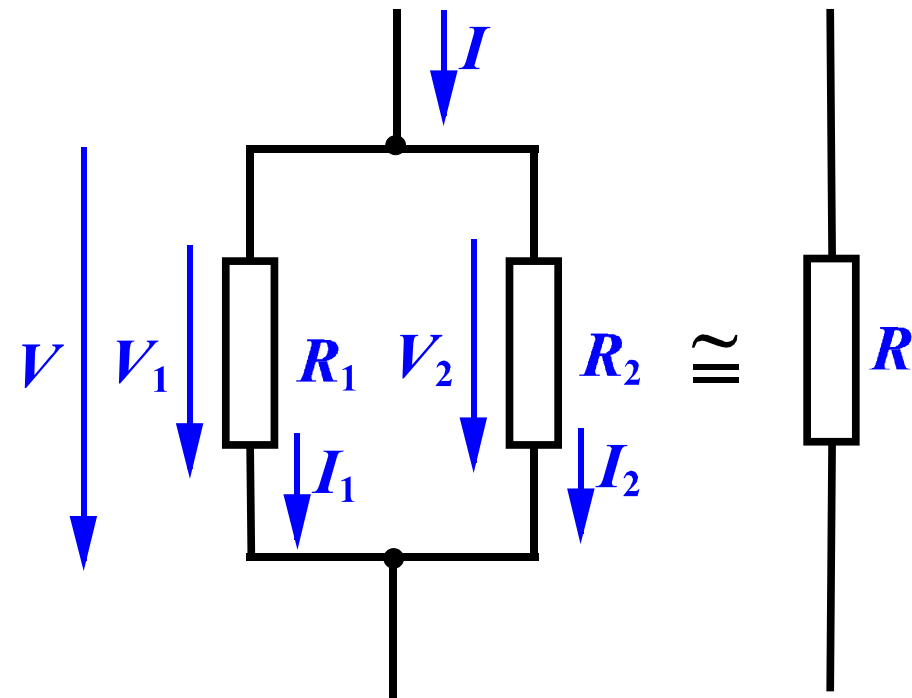
Ströme und Spannungen bei einer Parallelschaltung zweier Widerstände.

I_1, I_2 - Ströme in den Widerständen;

V_1, V_2 - Spannungen zwischen den Enden der Widerstände;

I - Strom, der in die Schaltung eingespeist wird;

V - Spannung zwischen den Enden der Schaltung.



Physikalische Zusammenhänge

$$I = I_1 + I_2$$

I. Kirchhoffsches Gesetz;

$$V = V_1 = V_2$$

II. Kirchhoffsches Gesetz;

$$I_1 = V_1/R_1$$

Kennlinie des Widerstandes **1**;

$$I_2 = V_2/R_2$$

Kennlinie des Widerstandes **2**;

$$I = V/R$$

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 \quad \text{Gesamtwiderstand.}$$

- I_1, I_2 - Ströme in den Widerständen
- V_1, V_2 - Spannungen zwischen den Enden der Widerstände;
- R_1, R_2 - Widerstandswerte;
- I - Strom durch die Schaltung;
- V - Spannung zwischen den Enden der Schaltung.

BEISPIEL Potentiometer-Schaltung

Die Potentiometer-Schaltung (Teilerschaltung für elektrische Spannungen) verwendet die Serienschaltung zweier Widerstände R_1 und R_2 zur Teilung einer elektrischen Spannung V .

$$I_{\text{OUT}} = 0 \Rightarrow V_{\text{OUT}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{IN}}$$

Potentiometer-Schaltung zur Teilung einer elektrischen Spannung.

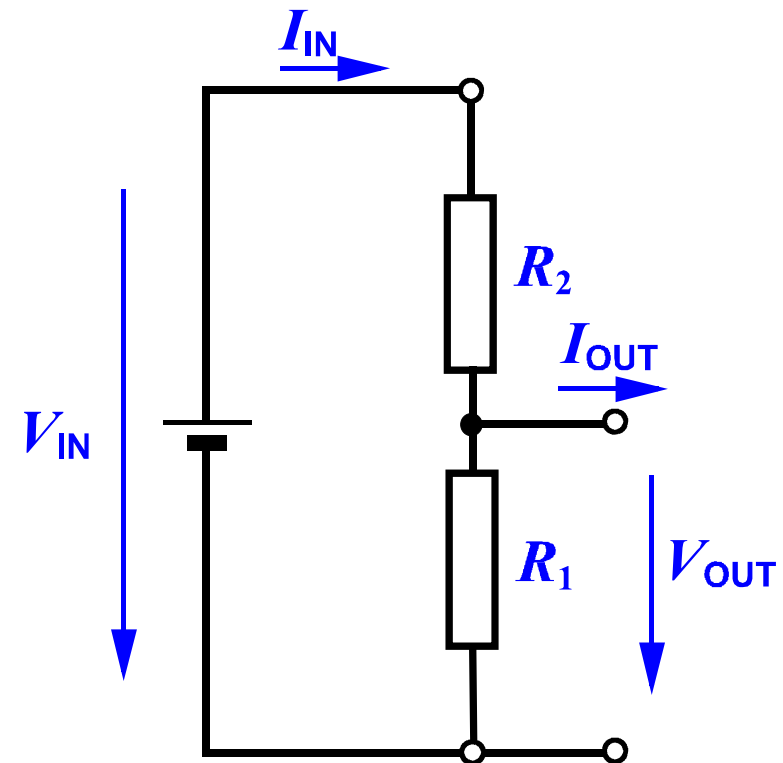
V_{IN} - Eingangsspannung;

V_{OUT} - Ausgangsspannung;

R_1, R_2 - Teilwiderstände der Schaltung;

I_{IN} - Eingangsstrom;

I_{OUT} - Ausgangsstrom.



Physikalische Zusammenhänge

$$V_{\text{IN}} = V_1 + V_2$$

$$I_1 = I_2 = I_{\text{IN}}$$

II. Kirchhoffsches Gesetz;

I. Kirchhoffsches Gesetz;

$$V_1 = R_1 \cdot I_{\text{IN}}$$

$$V_2 = R_2 \cdot I_{\text{IN}}$$

Kennlinie des Widerstandes **1**;

Kennlinie des Widerstandes **2**.

$$V_{\text{OUT}} = V_2$$

$$\begin{aligned} V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}} &= V_2/(V_1 + V_2) \\ &= R_2/(R_1 + R_2) \end{aligned}$$

I_1, I_2 - Ströme in den Widerständen

V_1, V_2 - Spannungen zwischen den Enden der Widerstände;

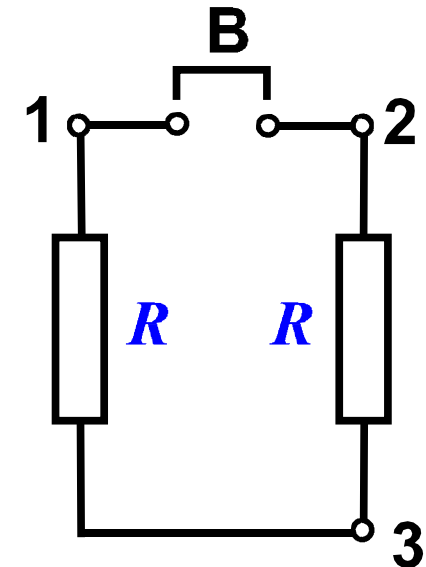
R_1, R_2 - Widerstandswerte;

BEISPIEL Kelvin-Varley-Widerstandsteiler

Mit einer Kelvin-Varley-Widerstandsteiler-Schaltung können ganzzahlige Verhältnisse von Widerstandswerten hergestellt werden.

Schematischer Aufbau eines Kelvin-Varley-Widerstandsteilers aus zwei Widerständen; bei offenem Bügel **B** sind die Widerstände in Reihe geschaltet (Anschlüsse 1 und 2), bei geschlossenem Bügel **B** sind die Widerstände parallel geschaltet (Anschlüsse 1 und 3).

B - Kurzschlussbügel;
1,2,3 - Anschlussklemmen.



Physikalische Zusammenhänge

$$R_{\text{SERIE}} = 2 \cdot R \quad \text{Serienschaltung;}$$

$$1/R_{\text{PARALLEL}} = 2/R \quad \text{Parallelschaltung;}$$

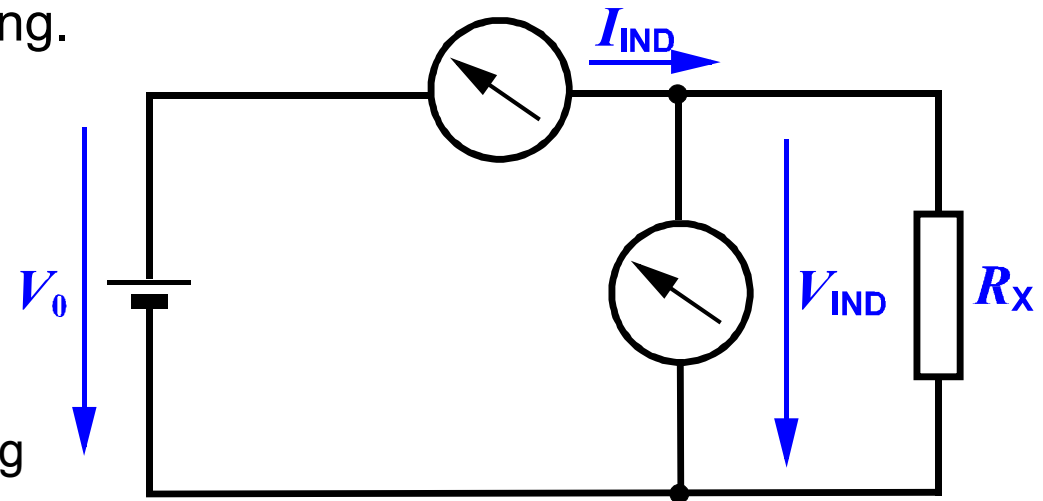
$$R_{\text{SERIE}}/R_{\text{PARALLEL}} = 4 \quad \text{Widerstandsverhältnis}$$

$$R_{\text{SERIE}} \cdot R_{\text{PARALLEL}} = R^2 \quad \text{Widerstandsprodukt.}$$

R - Widerstandswert.

BEISPIEL Ermittlung einer Kennlinie

a) Simultane Strom-Spannung-Messung.



Schematischer Aufbau bei der Ermittlung einer Kennlinie nach der Methode der simultanen Strom-Spannung-Messung.

R_X - Widerstand,

Beispiel eines Bauelementes;

V_{IND} - angezeigte elektrische Spannung;

I_{IND} - angezeigter elektrischer Strom;

V_0 - Versorgungsspannung.

Physikalische Zusammenhänge

$$V_X = V_{\text{IND}}$$

$$I_{\text{IND}} = I_X + I_V$$

$$V_{\text{IND}} = R_V \cdot I_V$$

$$\begin{aligned} I_X &= I_{\text{IND}} - I_V \\ &= I_{\text{IND}} - r \cdot I_X \end{aligned}$$

- I_V - Strom durch das Spannungsmessgerät;
- R_V - Widerstandswert des Spannungsmessgerätes;
- $r = R_X/R_V$ - Widerstandsverhältnis;

II. Kirchhoffsches Gesetz;

I. Kirchhoffsches Gesetz;

Kennlinie des Spannungsmessgerätes;

Physikalische Zusammenhänge

$$I_X = \frac{I_{\text{IND}}}{1 + r}$$

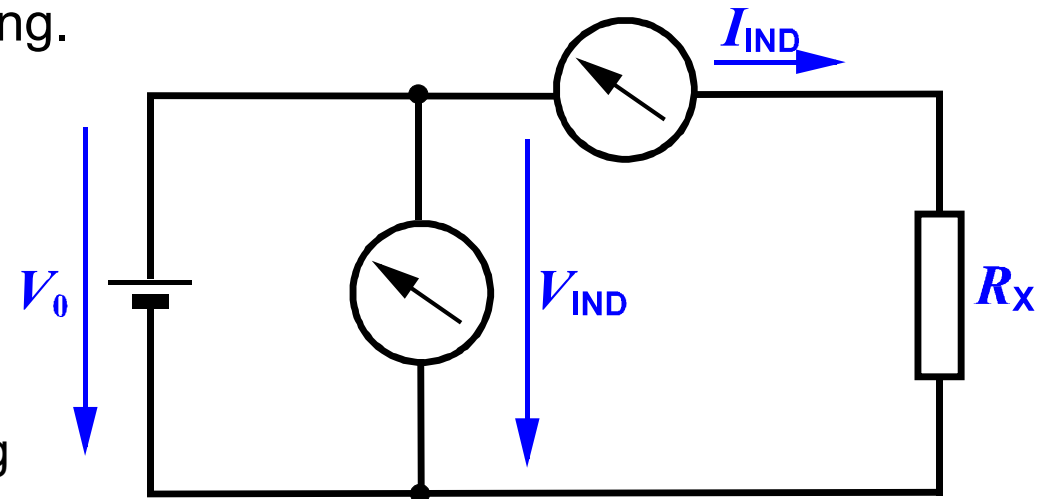
$$R_X = \frac{V_X}{I_X} = \frac{V_{\text{IND}}}{I_{\text{IND}}} \cdot (1 + r)$$

$$P_X = V_X \cdot I_X = \frac{V_{\text{IND}} \cdot I_{\text{IND}}}{1 + r}$$

R_X - zu ermittelnder Widerstand;

P_X - zu ermittelnder Leistung.

b) Simultane Spannung- Strom-Messung.



Schematischer Aufbau bei der Ermittlung einer Kennlinie nach der Methode der simultanen Spannung- Strom-Messung.

R_x - Widerstand,

Beispiel eines Bauelementes;

V_{IND} - angezeigte elektrische Spannung;

I_{IND} - angezeigter elektrischer Strom;

V_0 - Versorgungsspannung.

Physikalische Zusammenhänge

$$I_X = I_{\text{IND}}$$

$$V_{\text{IND}} = V_X + V_I$$

I. Kirchhoffsches Gesetz;

II. Kirchhoffsches Gesetz;

$$V_I = R_I \cdot I_{\text{IND}}$$

Kennlinie des Strommessgerätes;

$$\begin{aligned} V_X &= V_{\text{IND}} - V_I \\ &= V_{\text{IND}} - r \cdot V_X \end{aligned}$$

$$V_I$$

- Strom durch das Spannungsmessgerät;

$$R_I$$

- Widerstandswert des Spannungsmessgerätes;

$$r = R_I / R_X$$

- Widerstandsverhältnis;

Physikalische Zusammenhänge

$$V_X = \frac{V_{\text{IND}}}{1+r}$$

$$R_X = \frac{V_X}{I_X} = \frac{V_{\text{IND}}}{I_{\text{IND}}} \cdot (1+r)^{-1} \cong \frac{V_{\text{IND}}}{I_{\text{IND}}} \cdot (1-r)$$

$$P_X = V_X \cdot I_X = \frac{V_{\text{IND}} \cdot I_{\text{IND}}}{1+r}$$

R_X - zu ermittelnder Widerstand;

P_X - zu ermittelnder Leistung.

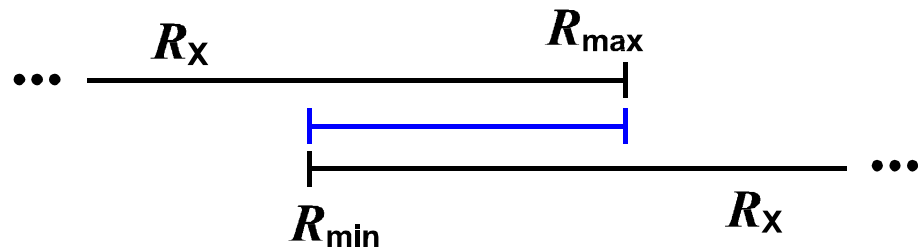
VERGLEICH Spannung-/Strom-richtige Messung

Um Kennlinien mit einer vorgegebenen maximal zulässigen Messabweichung bezüglich des Einflusses der Eingangswiderstände zu ermitteln, müssen die Messgeräte geeignet ausgewählt sein. Ob eine auf den angezeigten Wert bezogene (relative) maximal zulässige Messabweichung e_{MPE} überschritten wird oder nicht, ergibt sich aus dem Widerstandsverhältnis

Spannung-richtige Messung $r = \frac{R_x}{R_V} \leq e_{\text{MPE}} \Rightarrow R_x \leq R_{\text{max}} = e_{\text{MPE}} \cdot R_V$

Strom-richtige Messung $r = \frac{R_I}{R_x} \leq e_{\text{MPE}} \Rightarrow R_x \geq R_{\text{min}} = \frac{R_I}{e_{\text{MPE}}}$

Spannung-richtige Messung



Strom-richtige Messung

Bereiche der Spannung- resp. Strom-richtigen Messung mit vorgegebener maximal zulässiger Messabweichung; Messgeräte so auswählen, dass im Bereich der Überdeckung wechselseitige Prüfungen möglich sind.

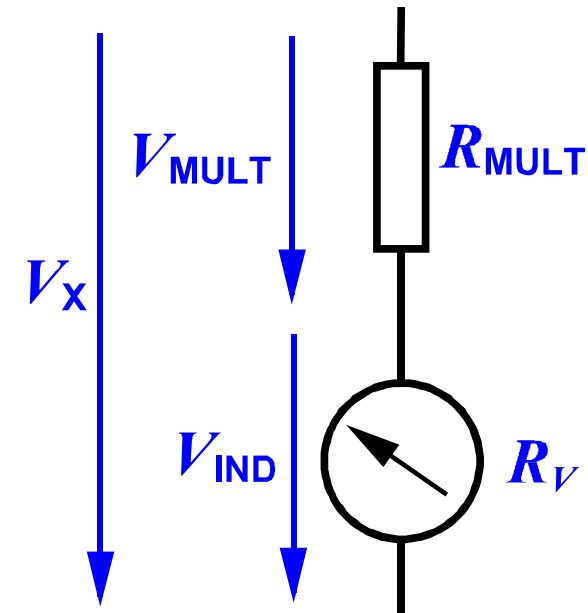
Erweiterung des Messbereiches

Spannungsmessgerät - Vorwiderstand (engl. multiplier)

Erweiterung des Messbereiches eines Spannungsmessgerätes durch einen Vorwiderstand.

R_V - Eingangswiderstand des Messgerätes;

R_{MULT} - Vorwiderstand.



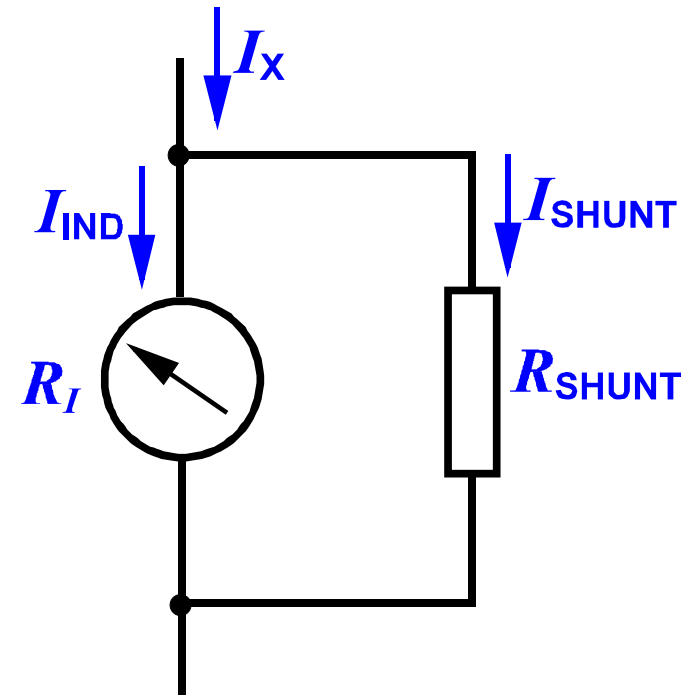
$$V_{IND} = \frac{R_V}{R_V + R_{MULT}} \cdot V_X \quad \Rightarrow \quad V_X = \left(1 + \frac{R_{MULT}}{R_V} \right) \cdot V_{IND}$$

Spannungsmessgerät - Nebenwiderstand (engl. shunt)

Erweiterung des Messbereiches eines Strommessgerätes durch einen Nebenwiderstand.

R_I - Eingangswiderstand des Messgerätes;

R_{SHUNT} - Nebenwiderstand.

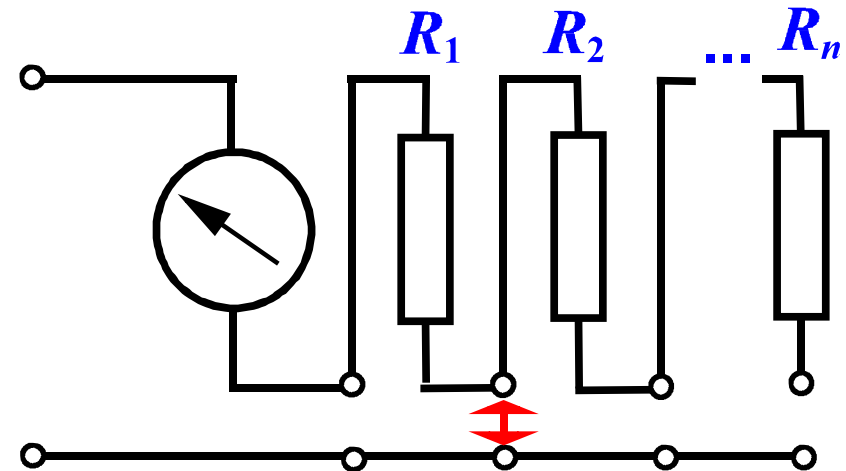


$$I_{IND} = \frac{R_{SHUNT} + R_I}{R_I} \cdot I_x \quad \Rightarrow \quad I_x = \left(1 + \frac{R_I}{R_{SHUNT}} \right) \cdot I_{IND}$$

Messbereich-Umschaltung

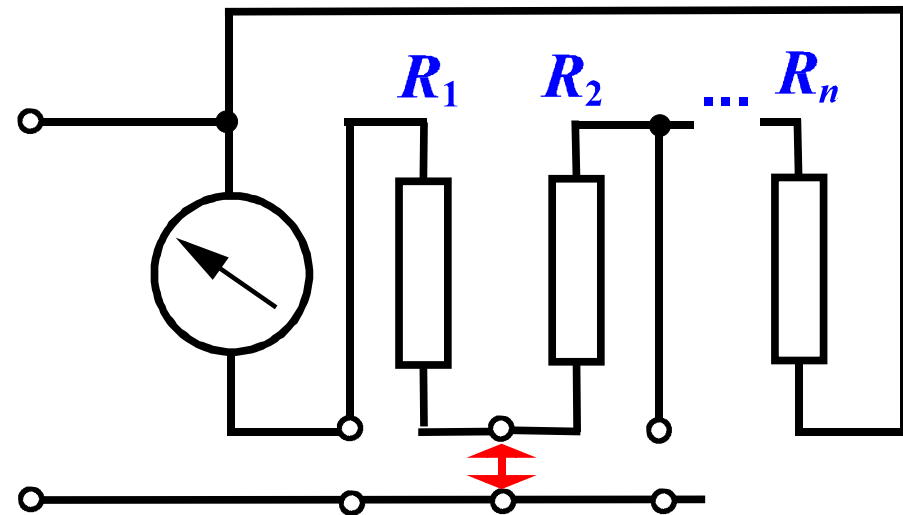
Spannungsmessgerät

Messbereich-Umschaltung bei einem Spannungsmessgerät;
 R_i - Vorwiderstände.



Strommessgerät

Messbereich-Umschaltung bei einem Strommessgerät;
 R_i - Nebenwiderstände.



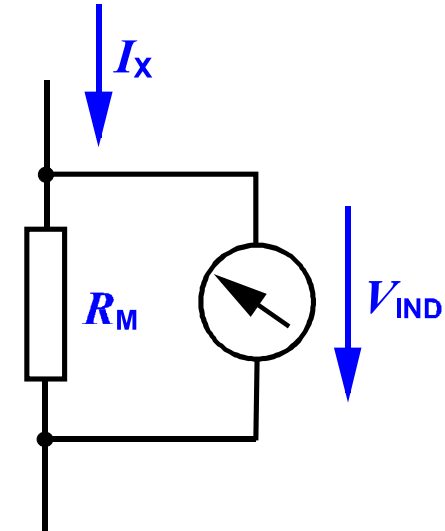
Strommessung mit einem Spannungsmessgerät

Strommessung mit einem Spannungsmessgerät.

I_X - zu messender Strom;

R_M - Messwiderstand;

V_{IND} - angezeigte Spannung.



Modell der Auswertung

$$I_X = \frac{V_{IND}}{R_{M,eff}}$$

mit

$$\frac{1}{R_{M,eff}} = \frac{1}{R_M} \cdot (1 + r)$$

$$r = R_M / R_V$$

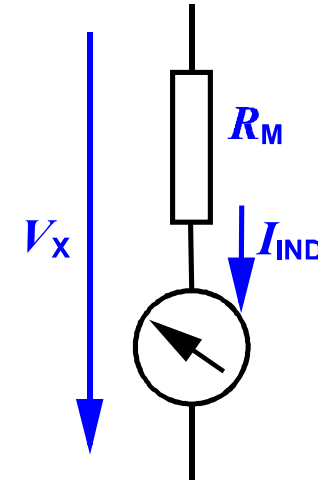
Spannungsmessung mit einem Strommessgerät

Spannungsmessung mit einem Strommessgerät.

V_X - zu messender Spannung;

R_M - Messwiderstand;

I_{IND} - angezeigter Strom.



Modell der Auswertung

$$V_X = R_{M,eff} \cdot I_{IND}$$

mit

$$\frac{1}{R_{M,eff}} = \frac{1}{R_M} \cdot (1 + r)$$

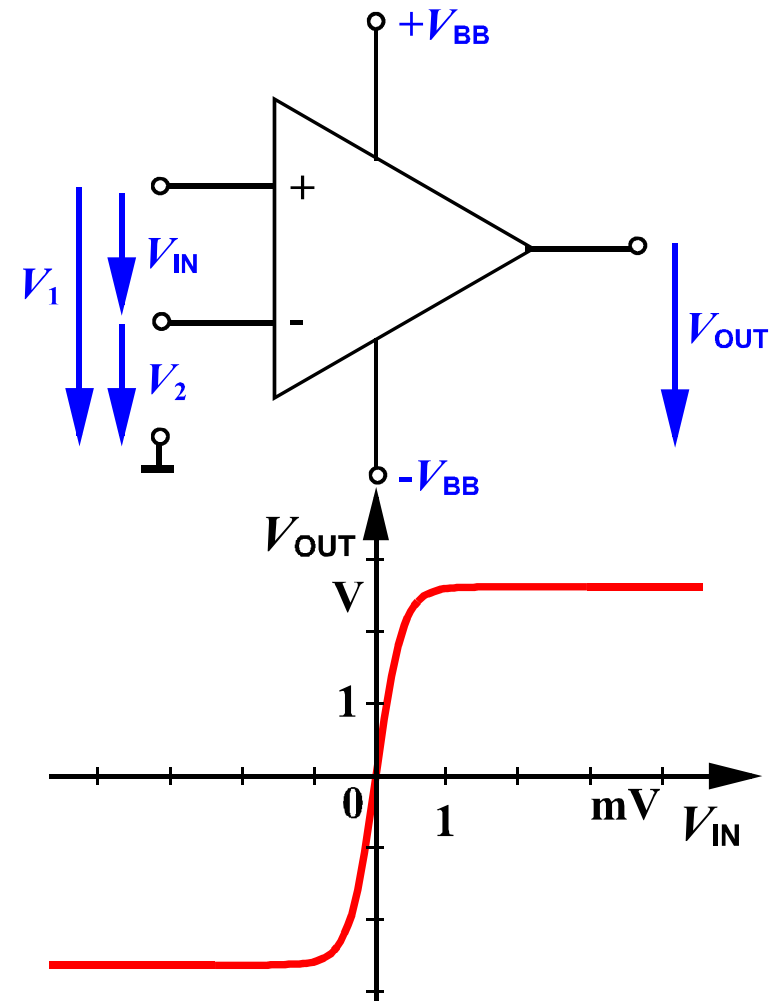
$$r = R_I / R_M$$

Operationsverstärker als Messgerät

Ein Operationsverstärker ist eine elektronische Schaltung, die mit einer Hilfsquelle (Hilfsenergie) eine elektrische Spannungsdifferenz verstärkt.

Schaltbild und schematische Kennlinie eines Operationsverstärkers.

- V_1 - Spannung am positiven Eingang;
- V_2 - Spannung am negativen Eingang;
- V_{IN} - Eingangsspannung;
- V_{OUT} - Ausgangsspannung;
- $\pm V_{BB}$ - positiver/negativer Punkt der Versotkungssapannung;
- V_{SAT} - Sättigungsspannung.



Eigenschaften eines Operationsverstärkers

$$V_{\text{OUT}} = V_{\text{SAT}} \cdot \tanh(a \cdot V_{\text{IN}})$$

$$A_0 = a \cdot V_{\text{SAT}}$$

$$I_{\text{IN}} \cong 0$$

mit

V_{OUT} - Ausgangsspannung;

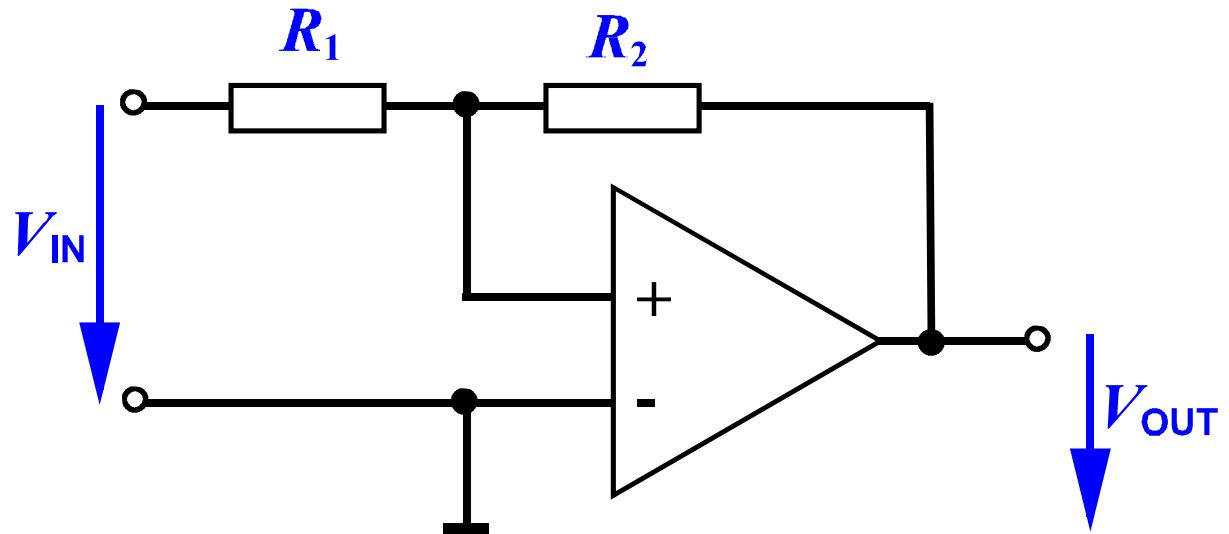
V_{IN} - Eingangsspannung;

V_{SAT} - Sättigungsspannung;

A - Leerlauf-Verstärkung (engl. amplification), $\cong 1000 \dots 100\,000$;

I_{IN} - Eingangsstrom.

Schaltung als Verstärker.



$$V_{\text{OUT}} \cong A \cdot V_{\text{IN}}$$

mit

$$A = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_{\text{IN}} = R_1$$

$$R_{\text{OUT}} = R_2$$

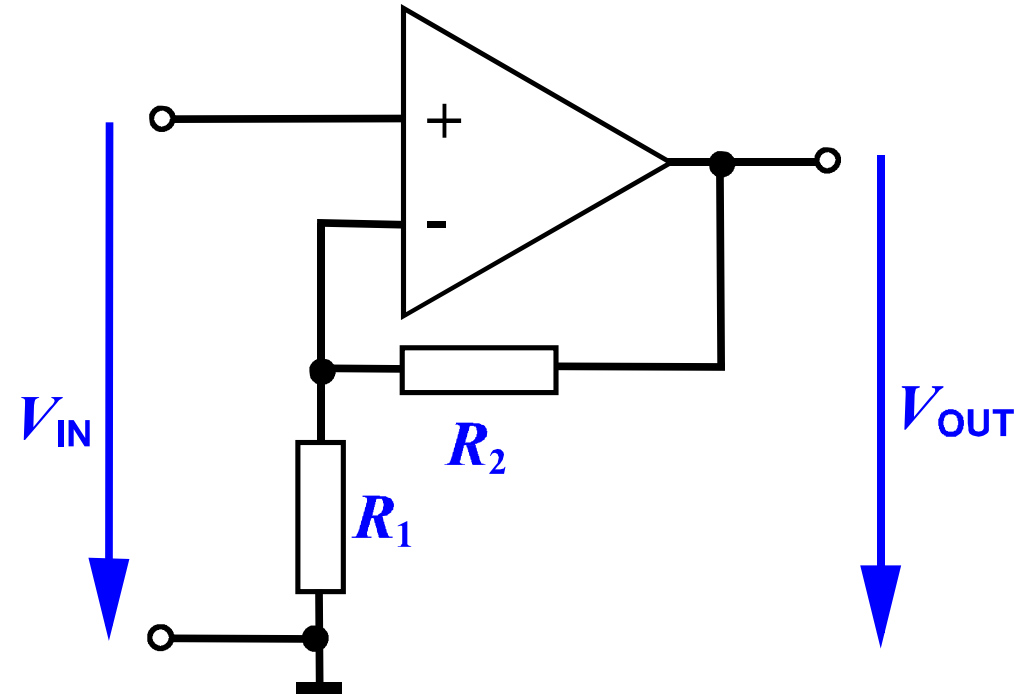
Schaltbild: Operationsverstärkers als Verstärker.

R_1 , R_2 - Widerstände des Rückkopplungszweiges;

V_{IN} - Eingangsspannung;

V_{OUT} - Ausgangsspannung.

Schaltung als Impedanzwandler.



Schaltbild: Operationsverstärkers als Impedanzwandler.

R_1 , R_2 - Widerstände des Rückkopplungszweiges;

V_{IN} - Eingangsspannung;

V_{OUT} - Ausgangsspannung.

mit

$$V_{OUT} \cong A \cdot V_{IN}$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_{IN} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{OUT} = R_1 + R_2$$

Spannungs-/Stromquellen

Spannungs- /Stromquellen (galvanische Elemente (Batterien), Thermoelemente u.ä.) zeigen ein gleichartiges Verhalten. Sie bestehen schaltungstechnisch gesehen aus

- einer elektromotorischen Kraft (EMK, eigentliche Energiequelle), die an den Klemmen die Leerlaufspannung V_{OPEN} bereitstellt, und
- einem Innenwiderstand R_{OUT} , der nach außen als Ausgangswiderstand wirkt.

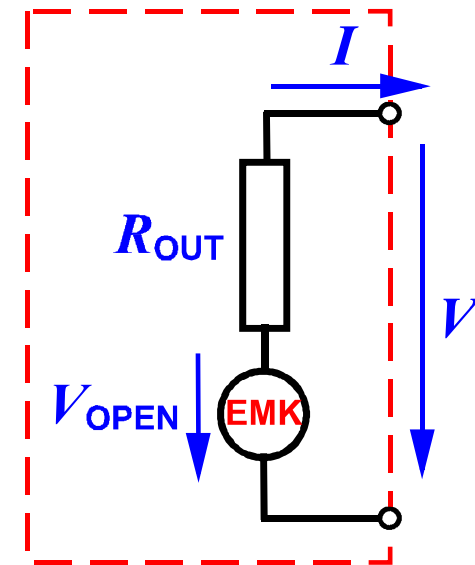
Schematischer Aufbau einer Spannungsquelle.

V - Klemmenspannung ;

V_{OPEN} – Klemmenspannung der unbelasteten Spannungsquelle (EMK);

R_{OUT} – Ausgangs- (Innen-)widerstand der Spannungsquelle;

I - Strom aus der Quelle.



MEAS11.PPT/F33/2003-11-04/Ke

Kennlinie der Spannungsquelle
(II. Kirchhoffsches Gesetz)

$$V = V_{\text{OPEN}} - R_{\text{OUT}} \cdot I$$

Kurzschlussstrom (maximaler Strom)

$$I_{\text{SHORT}} = \frac{V_{\text{OPEN}}}{R_{\text{OUT}}}$$

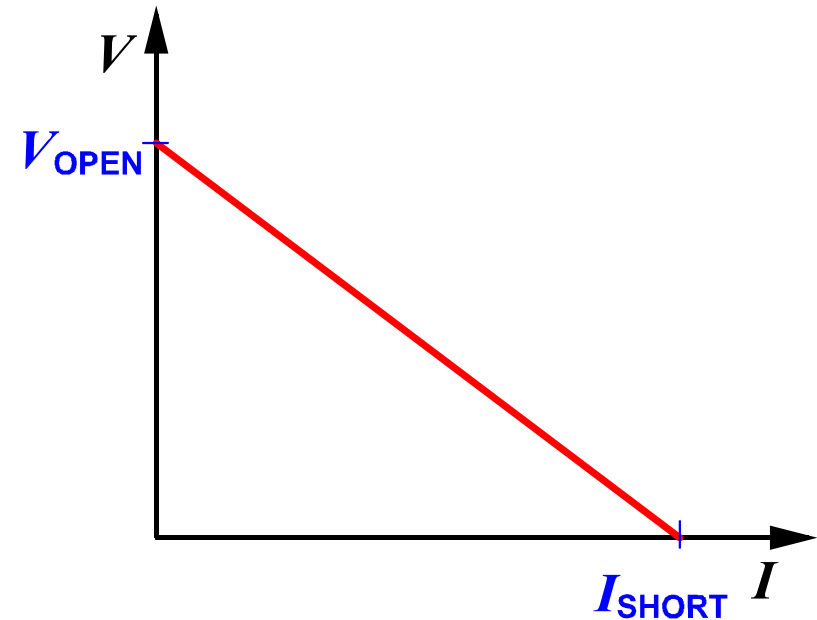
Kennlinie als Stromquelle

$$I = I_{\text{SHORT}} - L_{\text{OUT}} \cdot V$$

Ausgangsleitwert

$$L_{\text{OUT}} = \frac{1}{R_{\text{OUT}}}$$

Jede Spannungsquelle ist einer
Stromquelle äquivalent und umgekehrt.



Klemmenspannung V einer Spannungsquelle über dem entnommenen Strom I .

V_{OPEN} – Klemmenspannung der unbelasteten Spannungsquelle (EMK, engl. open circuit voltage) ;

I_{SHORT} – Kurzschluss-Strom (engl.: short circuit current).

Wird eine Spannungsquelle mit einem Lastwiderstand beschaltet, so sind durch die Parameter der Spannungsquelle und dem Lastwiderstand die Spannungen und Ströme vollständig bestimmt. In der Messtechnik unterscheidet man drei Beschaltungsfälle

- Spannungsanpassung

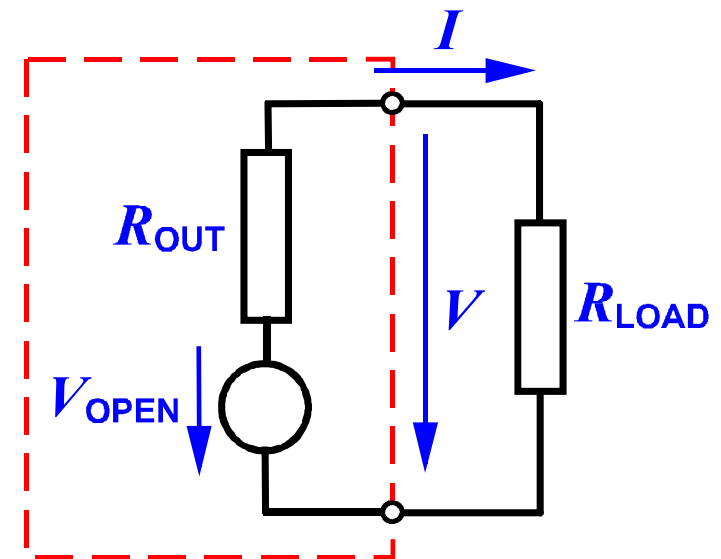
$$R_{\text{OUT}} \ll R_{\text{LOAD}} \Rightarrow V \cong V_{\text{OPEN}}$$

- Stromanpassung

$$R_{\text{OUT}} \gg R_{\text{LOAD}} \Rightarrow I \cong I_{\text{SHORT}}$$

- Leistungsanpassung,
maximale Leistungsübertragung an die Last

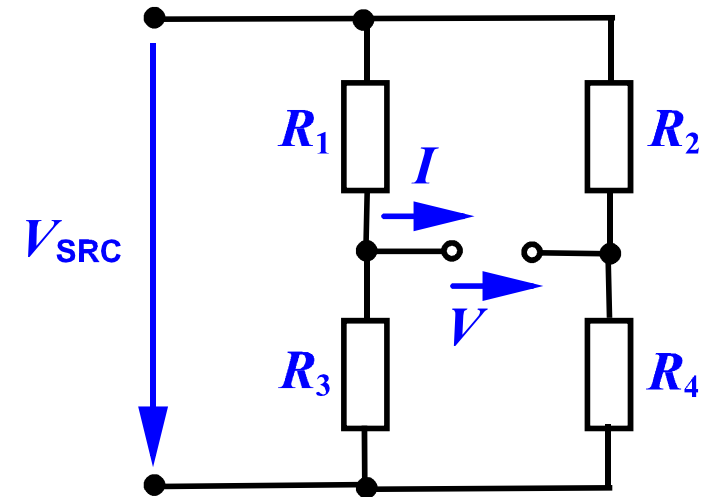
$$R_{\text{OUT}} = R_{\text{LOAD}}$$



Wheatstonesche Brückenschaltung

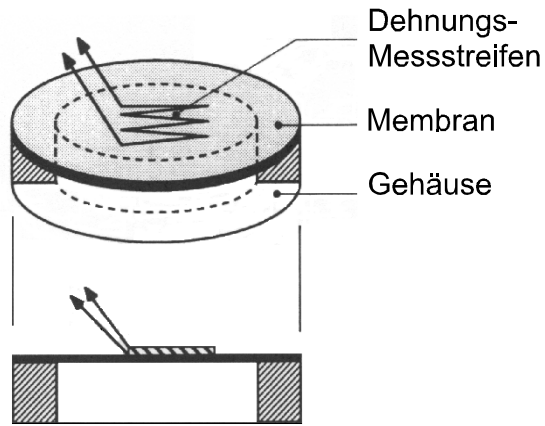
In den Brückenarmen in der Mitte wird ein empfindliches Spannungsmessgerät geschaltet. Durch Wahl geeigneter Widerstandswerte (Schaltwiderstände oder Potentiometer) kann erreicht werden, dass die Spannung im Brückenarm Null ist, also auch kein Strom fließt. Die beiden Brückenarme sind zwei Potentiometerschaltungen, die von der gleichen Spannungsquelle versorgt werden. Tritt im Brückenarm keine Spannung auf, sind die Spannungen an gegenüberliegenden Widerständen gleich, also

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \Rightarrow R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

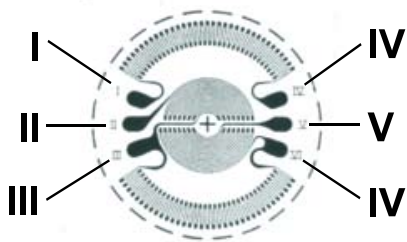


BEISPIEL Druckmesszelle mit Dehnungsmessstreifenumformer

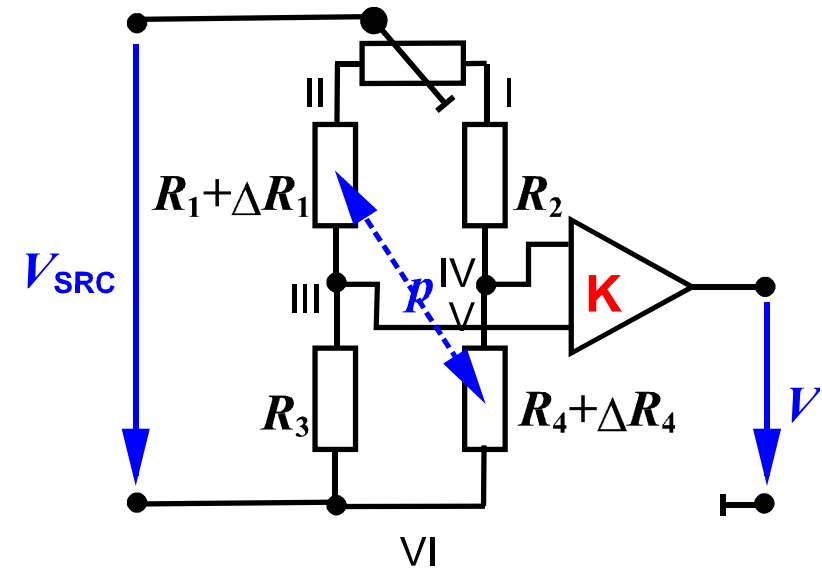
Aufbau



Messumformer (Wheatstonesche-Dehnungsmessstreifen-Brücke)



Messschaltung



Kennlinie

$$V = K \cdot \frac{V_{\text{SRC}}}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = A \cdot V_{\text{SRC}} \cdot p$$

$$(R_1 = R_3, R_4 = R_2)$$

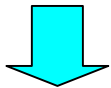
Eigenschaften der Wheatstoneschen Brückenschaltung

$$V_{III} = V_{\text{SRC}} \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad \Rightarrow \quad V_{\text{VI,V}} - V_{III} = V_{\text{SRC}} \cdot \frac{R_1 R_4 - R_3 R_2}{(R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4)}$$

$$V_{\text{VI,V}} = V_{\text{SRC}} \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

Abgleich

$$V_{\text{VI,V}} - V_{III} = 0$$



$$R_1 R_4 = R_3 R_2$$

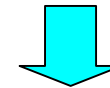
Verstimmung : Gegen-/Gleichtakt

$$R_1 \Rightarrow R_1 + \Delta R_1$$

$$R_1 \Rightarrow R_1 + \Delta R_1$$

$$R_2 \Rightarrow R_2 + \Delta R_2$$

$$R_4 \Rightarrow R_4 + \Delta R_4$$



$$\frac{V_{\text{VI,V}} - V_{III}}{V_{\text{SRC}}} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} \right)^2 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \mp \frac{\Delta R_{2,4}}{R_{2,4}} \right)$$

Kompensationsschaltung

Die veränderlichen Widerstände R_1 und R_2 werden so abgeglichen, dass der Strom I in dem Kreis mit der zu vermessenden Spannungsquelle verschwindet. Dann ist die an dem Widerstand R_2 gleich der Spannung V_x der zu vermessenden Spannungsquelle.

$$I = 0 \Rightarrow V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{SRC}}$$

