

Elektrische Messtechnik

Vorlesung 5

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 2025/26

Im Studiengang Elektro- und Informationstechnik (B.Eng.)

Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

- Besuch der Vorlesungen erhöht die Chance auf eine gute Note bzw. Klausurbestehen
- Ihre Fragen und Anmerkungen gehen vor - Unterbrechen Sie mich gerne, wenn ich Ihre Meldung übersehen sollte
- Keine „Side Meetings“ in der Vorlesung - Paralleldiskussionen zu zweit verbreiten zu viel Unruhe
 - ➔ Fragen, Ideen oder Anmerkungen bitte immer in die große Runde – keine Hemmungen
 - ➔ Es gibt keine dummen Fragen - Niemand wird für eine Wortmeldung „augebuht“!
- Pünktlich erscheinen - Später hereintröpfelnde Teilnehmer verbreiten Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung meinen letzten Satz vor dem Aufstehen abwarten.
- Telefone auf „leise“
- Ich wünsche mir immer Ihr Feedback – sofort in der Vorlesung oder gerne auch z.B. per mail

Organisation

Vorlesung:

Montag 08:15 h bis 11:30 h Raum: Hung C-101

Start 13.07.2025 - Ende 26.01.2026

Labor (Herr Michalik):

Montag 11:45 h bis 15:45 h Raum: 8-205

Terminorganisation bei Herrn Michalik

CampUAS – Vorlesung (P. Weber):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4525>

Weber: Elektrische Messtechnik - WiSe 25/26

Enrollment Key: alessandrovolta

CampUAS – Labor (R. Michalik):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4433>

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 25

Enrollment Key: MTLAB-WiSe2025

Wichtig: Vorbesprechung Labor – Termin Kommt von Herrn Michalik

Bitte unbedingt in beiden Kursen einschreiben (auch bei Herrn Michalik).

Sie verpassen sonst wichtige Infos bzw. werden bei der Laborterminvergabe nicht berücksichtigt

Elektrische Messtechnik

Zustandsüberwachung von Maschinen

- Regelung von Maschinen
- Automatisierung
- Funktionskontrolle
- Instandhaltung

Parametererfassung in Prozessen

- Statistical Process Control (SPC)
- Regelkartenerstellung
- Prozessregelung
- Automatisierung



<https://www.ubisoft.com/de-de/game/star-trek/bridge-crew>

Qualitätskontrolle von Produkten

- Warenausgangsprüfung
- Zwischenprüfungen
- Messen von Kundenspezifikationen
- Funktionale Prüfung



Von Hirsch - Eigenes Werk CC BY-SA 3.0.
<http://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3632266>

Produktentwicklung und Labor

- Testen von Prototypen
- Laboraufbauten
- Machbarkeitsstudien



<https://www.se-ndh.de/produkte/testadapter>

<https://www.elektormagazine.de/news/>

Eigenschaften elektrischer Messgeräte

Angabe des Herstellers zu

- Messgröße(n) und respektive Genauigkeit(en)
- Einsatzzweck und Einsatzbereich

Kenngrößen, z.B.

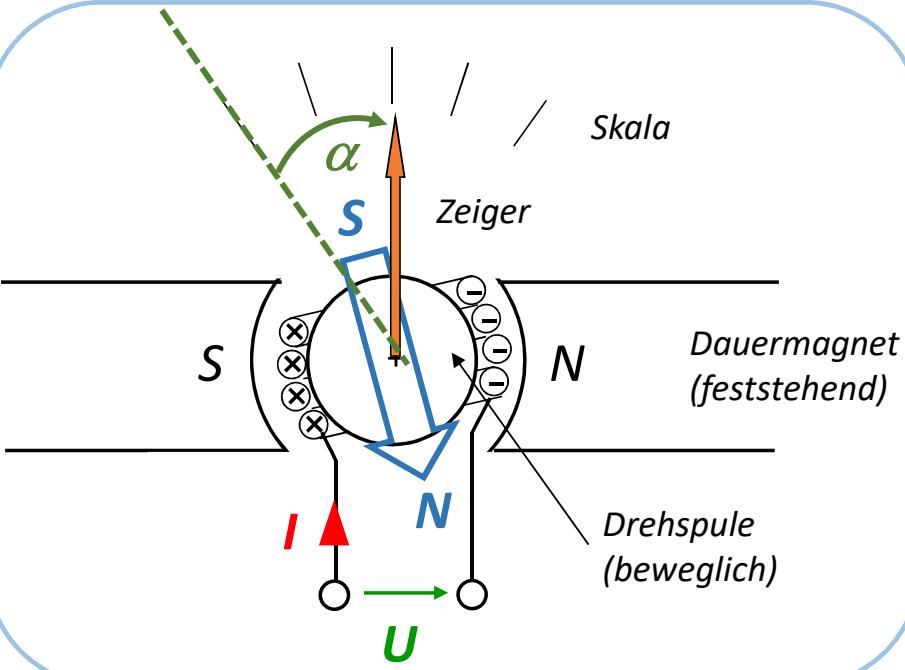
- Messbereich
- Innenwiderstand
- Frequenzbereich
- Verstärkungsfaktor

Einflussgrößen, z.B.

- Umgebungstemperatur
- Feuchte
- elektromagnetische Felder

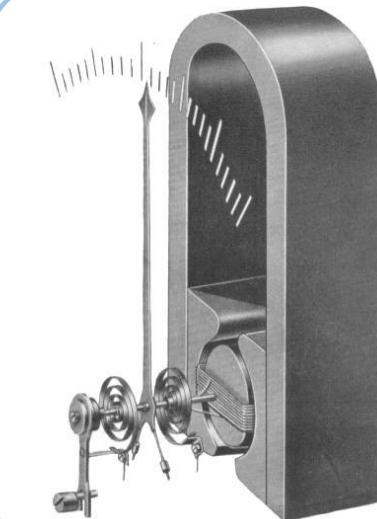
Mit entsprechenden „Fenstern“,
Toleranzen und Messgenauigkeiten

Drehspulmesswerk



Messprinzip:

- Das stromabhängige magnetische Moment einer Spule erzeugt im Permanentmagnetfeld ein mechanisches Moment entgegen einer Spiralfeder.
- Die resultierende Drehung der Spule ist proportional zum Strom durch die Spule.
- Die Drehung wird durch einen Zeiger auf einer Skala angezeigt



Symbol:


Drehspulmesswerk

A	Querschnittsfläche der Spule [m ²]
n	Anzahl der Wicklungen der Spule
B	Magnetfeld des Dauermagneten [Vs/m ²] = [N/(Am)]
μ	Magnetisches Dipolmoment [Am ²]
M_{mag}	Drehmoment des Dipols im B-Feld [Nm]
M_{mag}	Drehmoment der Feder [Nm]
k	Federkonstante [Nm/°]

$$\mu = n \cdot I \cdot A$$

$$M_{mag} = \vec{\mu} \times \vec{B} \approx \mu \cdot B$$

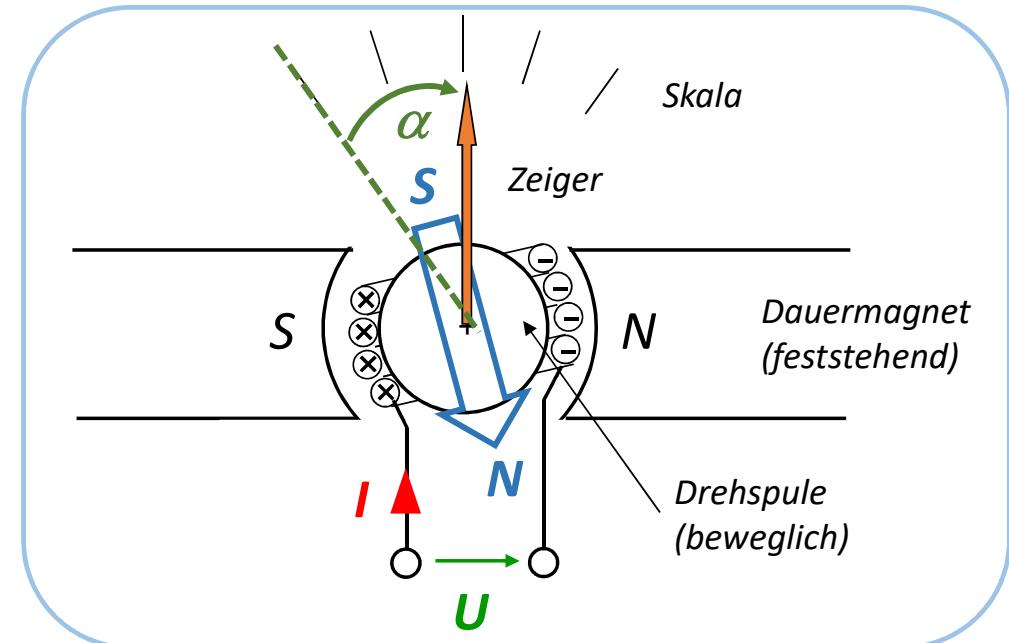
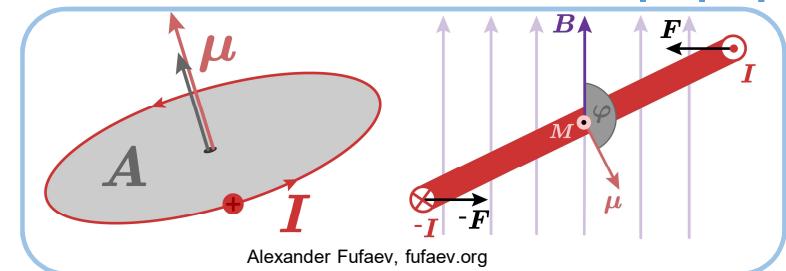
$$M_{mech} = k \cdot \alpha$$

$$M_{mech} = M_{mag}$$

$$k \cdot \alpha = \mu \cdot B = n \cdot I \cdot A \cdot B$$

$$\alpha = \frac{n \cdot A \cdot B}{k} \cdot I$$

$$I = const \cdot \alpha$$



Drehspulmesswerk

Messung von:

- Gleichstrom und Gleichspannung
- Mittelwerte periodischer Größen

Kleinste messbare Ströme:

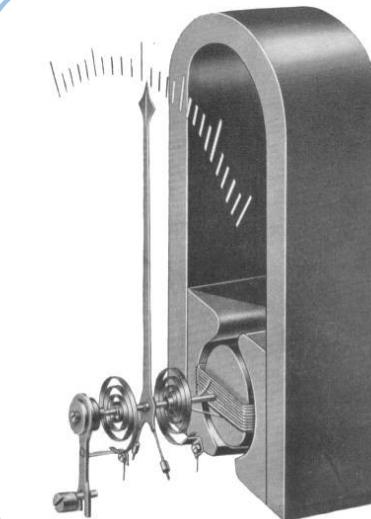
- Messbereichsendwert von $10 \mu\text{A}$

Strommessung

- Möglichst kleiner Innenwiderstand, um das System nicht zu beeinflussen

Spannungsmessung

- Möglichst kleiner Messstrom,
 - um Effekte durch Erwärmung zu vermeiden (temperaturabhängiger Widerstand)
 - und um das System nicht zu beeinflussen



Symbol:


Strommessung mit dem Drehspulmesswerk

Messung direkt im Strompfad

Messwerk in Reihe geschaltet

Messbereichs-Erweiterung durch Parallelwiderstände

Als Amperemeter hat das Drehspulmesswerk idealerweise einen sehr kleinen Innenwiderstand

Durch den Parallelwiderstand (den sog. Shunt) wird ein Teil des Gesamtstromes I am Messwerk vorbei geleitet. Der um I_S reduzierte Strom I_{Ri} ist dann klein genug für das Messwerk.

Beispiel:

Messbereichsendwert (Strom bei Vollausschlag)

$$I_{MB} = 100\mu A$$

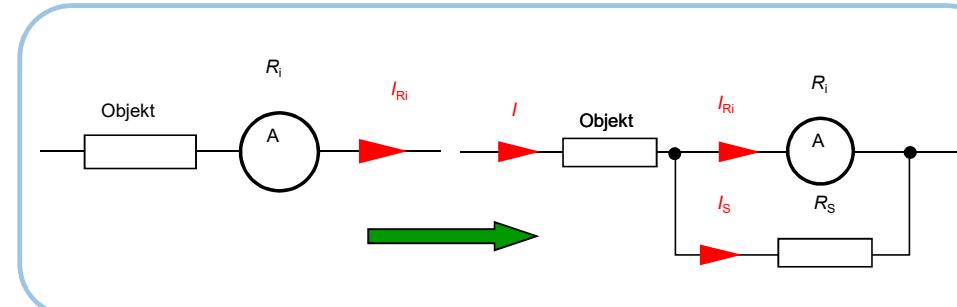
Innenwiderstand (der Spule)

$$R_i = 1k\Omega$$

Welche verschiedenen Shunt-Widerstände müssen Sie jeweils verwenden, wenn Sie den Messbereich auf 1mA, 10mA und 100mA erweitern wollen?

$$\frac{R_s}{R_i} = \frac{I_{Ri}}{I - I_{Ri}} = \frac{I_{Ri}}{I_s}$$

$$\Rightarrow R_s = R_i \frac{I_{MB}}{I_s}$$



Spannungsmessung mit dem Drehspulmesswerk

Messung zwischen 2 Potentialen im Strompfad

Messwerk parallel geschaltet

Messbereichs-Erweiterung durch Serienwiderstände

Als Amperemeter hat das Drehspulmesswerk idealerweise einen sehr kleinen Innenwiderstand

Der serielle Widerstand R_V begrenzt den Teilstrom I durch das Messwerk.

Beispiel:

Messbereichsendwert (Strom bei Vollausschlag)

$$I_{MB} = 100\mu A$$

Innenwiderstand (der Spule)

$$R_i = 1k\Omega$$

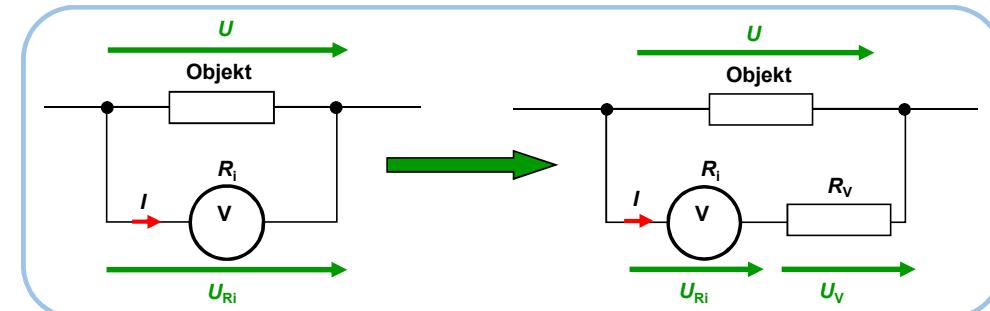
R_i bewirkt einen Spannungsabfall über dem Messwerk:

$$U_{Ri} = I_{MB} R_i = 10^{-4} A \cdot 10^3 \Omega = 0,1V = 100mV$$

Welche verschiedenen Vorwiderstände R_V müssen Sie jeweils verwenden, wenn Sie den Messbereich auf 1V, 5V und 10V erweitern wollen?

$$\frac{R_V}{R_i} = \frac{U - U_{Ri}}{U_{Ri}} = \frac{U_V}{U_{Ri}}$$

$$\Rightarrow R_V = R_i \frac{U_V}{U_{Ri}}$$



Messkette

Zum Beispiel:

- Energieversorgung
- Temperaturstabilisierung

Hilfsgeräte



Sensor

Analoge
Signalverarbeitung

AD-Wandler

Digitale
Signalverarbeitung

Ausgabe des
Messwertes

Zum Beispiel:

- Umwandlung in ein Spannungssignal
- Konditionierung auf den AD-Wandler
- Analoge Filter
- Verstärker

Zum Beispiel:

- Digitale Filter
 - Kalibrierkurve
- Umwandlung des primären in den sekundären Messwert
- Vergabe eines „Zeitstempels“

Digitalmultimeter

Analoge Geräte wie das Drehspulinstrument finden
heute in der Praxis nahezu keine Anwendung mehr!

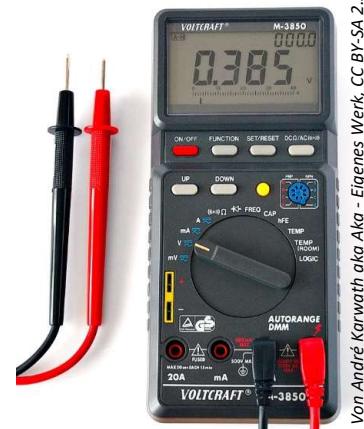
Digitale Messdatenerfassung ist

Zeitdiskret:

- Messgröße wird zu festen (diskreten) Zeitpunkten abgetastet.
- Es existieren nur Messwerte zu diesen abgetasteten Zeitpunkten.
- Informationen dazwischen gehen verloren.

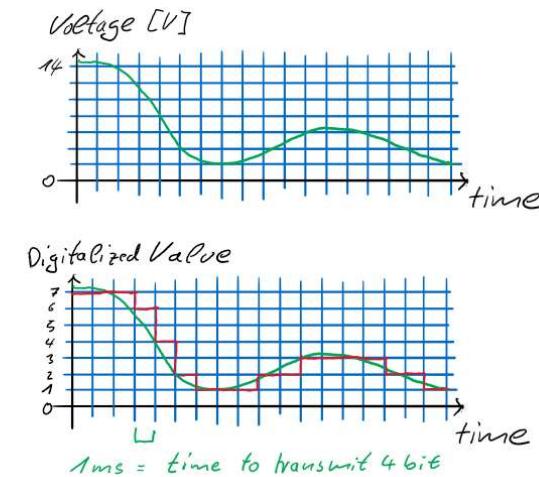
Wertediskret:

- Messgröße wird in feste (diskrete) Stufen unterteilt.
- Die Messwerte können nur diese diskreten Werte annehmen.
- Information dazwischen gehen verloren.

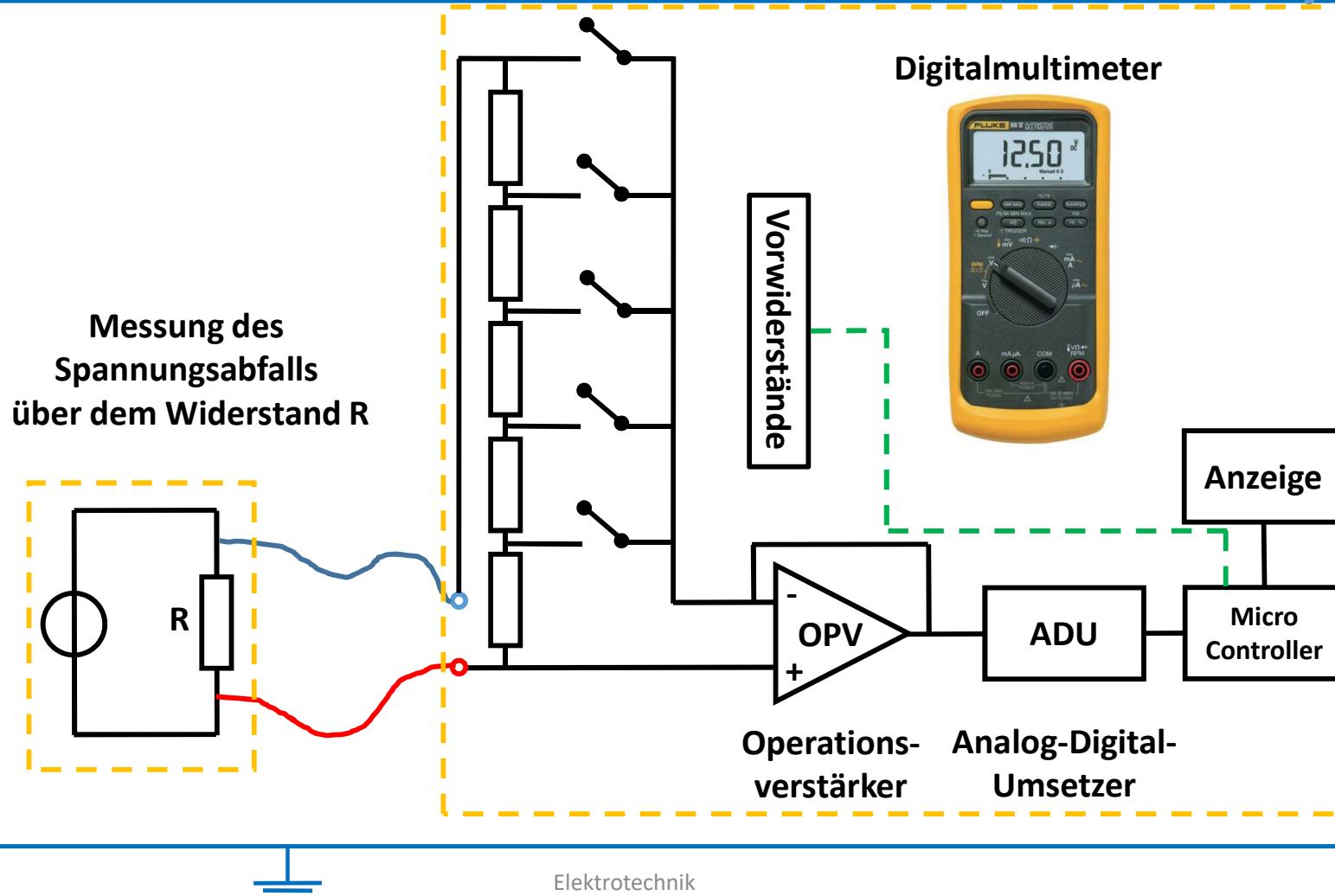


Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198>

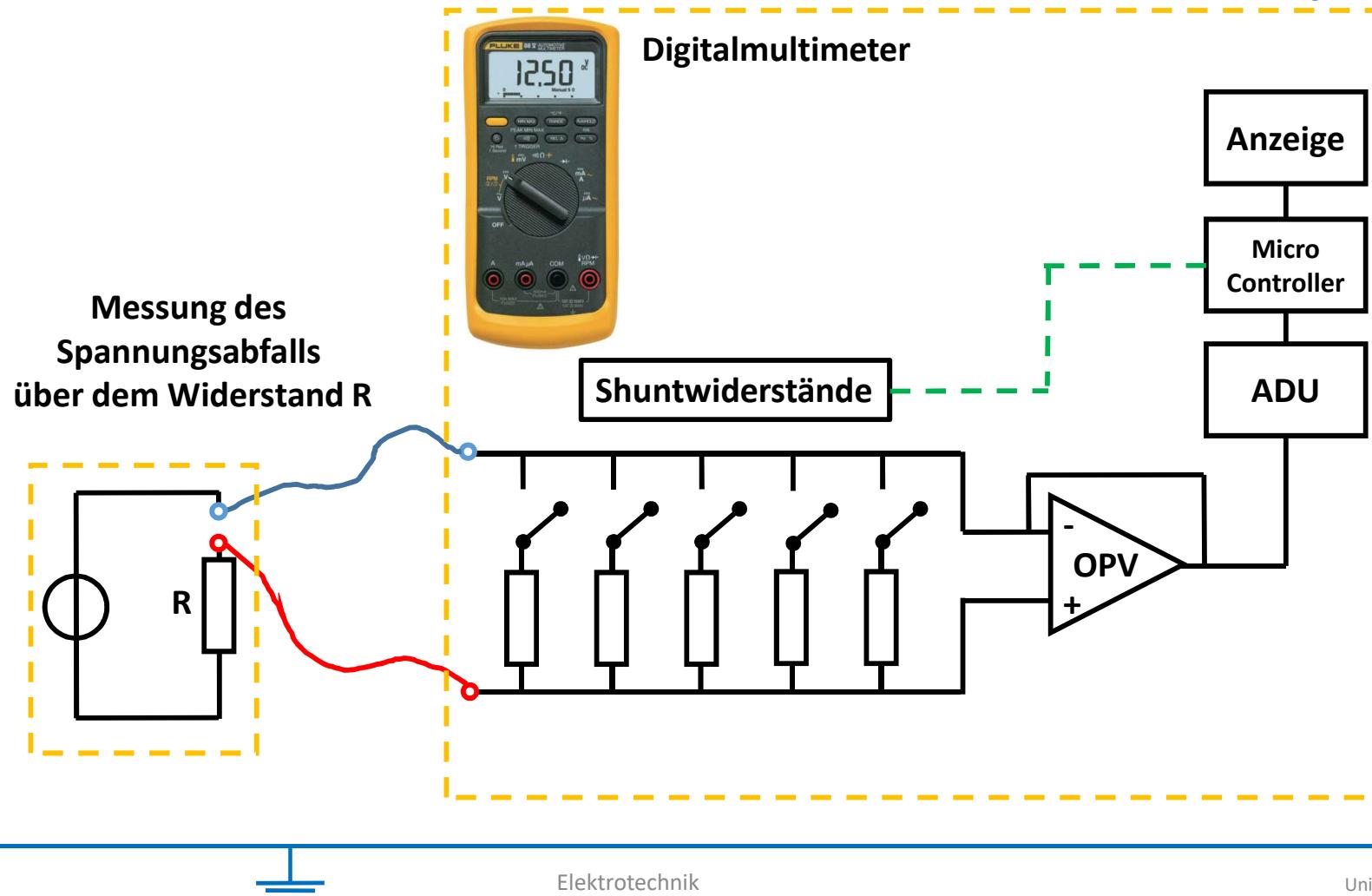
2^2	2^1	2^0	
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7



1.4 Spannungsmessung

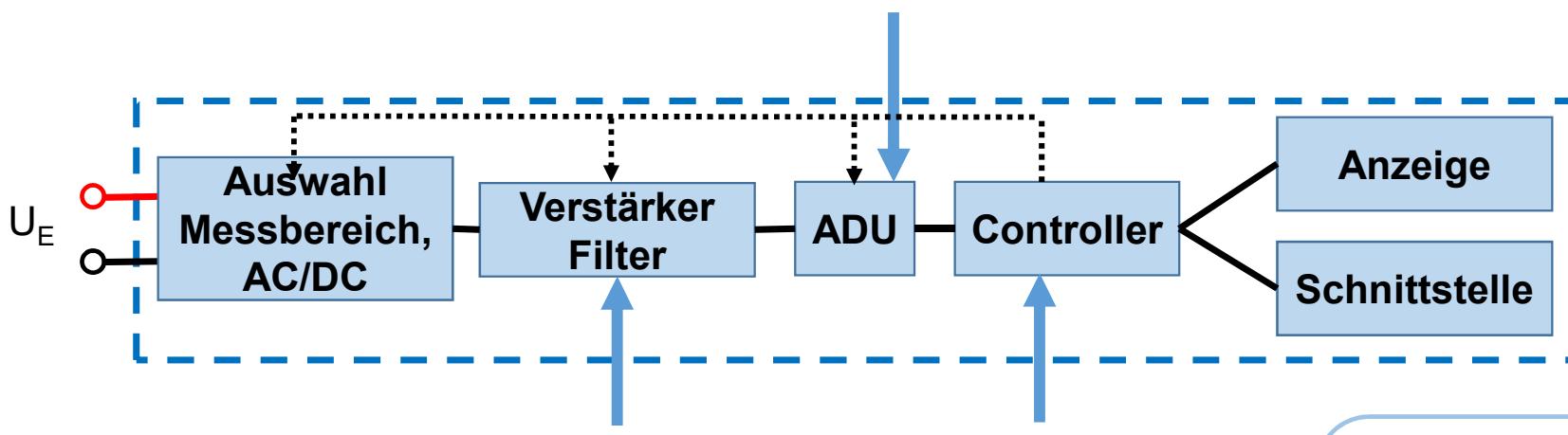


1.4 Strommessung



Digitalmultimeter

ADU = Analog-Digital-Umsetzer
Typisch 16- bis 24-Bit



- Anpassung an den Spannungs-bereich des Umsetzers
- z.B. Anti-Aliasing Filter

Thomas Mühl, Elektrische Messtechnik,
6. Auflage, Springer Vieweg



Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198>

Messgenauigkeit „klassische“ Geräte

GütekLASSE EINES Drehspulinstruments

*Messen im oberen Bereich
der Skala (ca. 1/3)!*

Die GütekLASSE wird als Ziffer angegeben

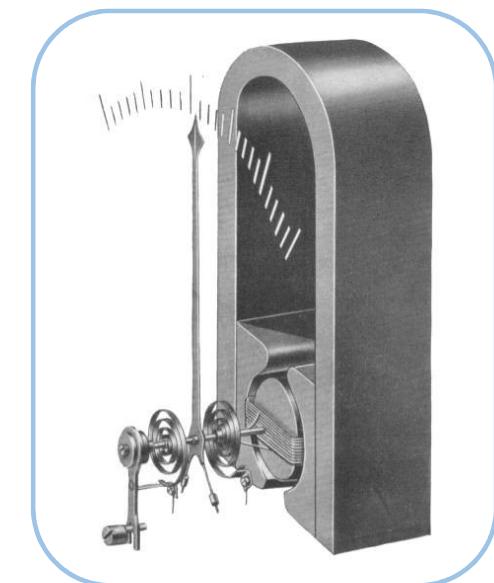
- prozentualen Fehler bei Vollausschlag

Beispiel

GütekLASSE 2 bedeutet: Fehler von 2%

→ Z.B. bei Vollausschlag $100\mu\text{A}$ → $\pm 2\mu\text{A}$

- Messung bei $100 \mu\text{A}$ → Richtiger Wert liegt zwischen $98\mu\text{A} .. 102\mu\text{A}$
- Relativer Fehler $\pm 2\%$
- Messung bei $10 \mu\text{A}$ → Richtiger Wert liegt zwischen $8\mu\text{A} .. 12\mu\text{A}$
- Relativer Fehler $\pm 20\%$



Messgenauigkeit

Digitalmultimeter

Für moderne Geräte wird die Güteklassie häufig differenzierter angegeben.

Kombinierte Angabe:

%-Anteil am gemessenen Wert + %-Anteil am Skalenendwert + Digit-Limit

*Messen im oberen Bereich
der Skala (ca. 1/3)!*

Beispiel

$\pm (0,2\% \text{ Messwert} + 0,3\% \text{ Skalenendwert} + 1 \text{ Digit})$



Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198>

Messgenauigkeit ist grundsätzlich limitiert durch die Anzeigegenauigkeit.

Das ist die letzte angegebene Dezimalstelle.

Dieser Wert wird als 1 Digit bezeichnet.

Ob das Digit angegeben werden muss, hängt davon ab, ob die Genauigkeit des Gerätes kleiner oder größer als 1 Digit ist.

Messen von Widerständen

Stromrichtige Schaltung:

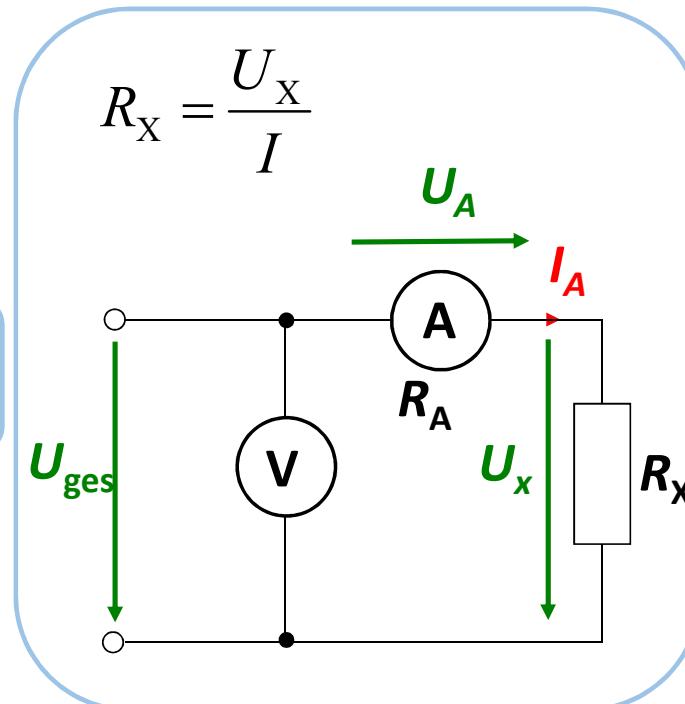
Aus dem Schaltbild ergibt sich
nach dem Maschensatz:

$$U_{\text{ges}} = U_A + U_X = I_A R_A + I_A R_X$$

$$\frac{U_{\text{ges}}}{I_A} = R_A + R_X \quad \text{bzw.} \quad R_X = \frac{U_{\text{ges}}}{I_A} - R_A$$

Für $R_A \ll R_X$
kann man in Näherung annehmen:

$$R_X \approx \frac{U_{\text{ges}}}{I_A}$$



Messen von Widerständen

Spannungsrichtige Schaltung:

Aus dem Schaltbild ergibt sich:

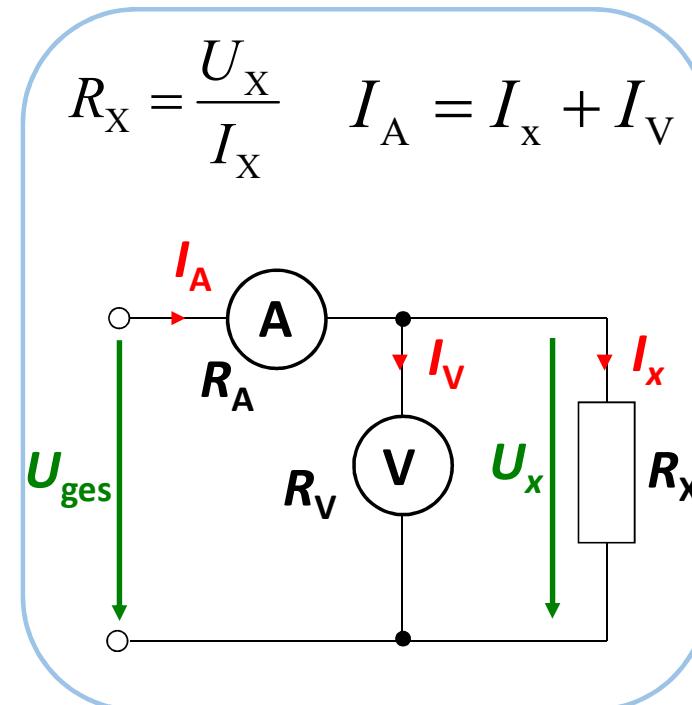
$$I_A = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_A + \frac{1}{(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_V})}}$$

Sei $R_A = 0$, dann folgt:

$$\frac{I_A}{U_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_V}$$

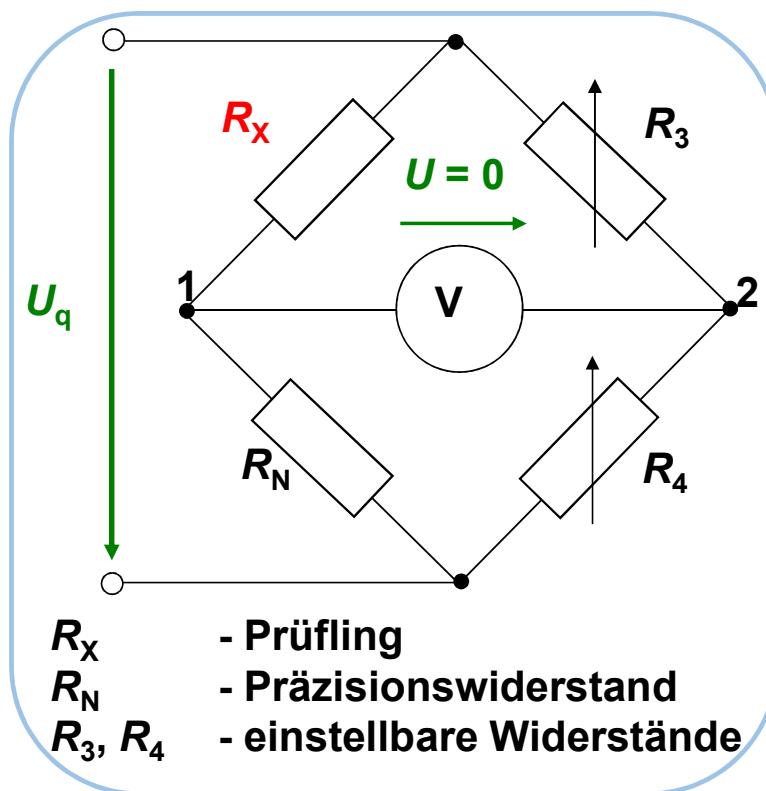
Und für $R_V \gg R_X$ kann man in Näherung annehmen:

$$R_X \approx \frac{U_{\text{ges}}}{I_A}$$



Messen von Widerständen

Widerstandsmessbrücke (Wheatstone Brücke)



Die Widerstände werden so eingestellt, dass gilt:

$$U_{12} = 0$$

Abgleichbedingung der Brückenschaltung

Für die beiden Spannungsteiler muss dann gelten:

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{bzw.} \quad R_X = R_N \frac{R_3}{R_4}$$

Messbrücken werden kaum noch in der Praxis zur Bestimmung von Widerständen eingesetzt.
→ Heute: Verwendung von präzisen Digitalmultimetern und Operationsverstärkern

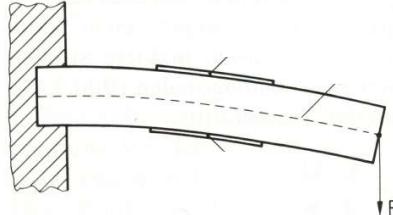
Aber hohe Relevanz z.B. für die Anordnung von Dehnungsmessstreifen.

1.4 Messen von Widerständen

Bei Dehnungsmessstreifen (DMS) bewirkt die Deformation der Festkörperstruktur eine Änderung der Leitfähigkeit.

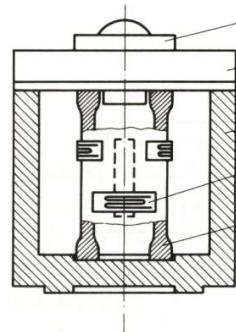
DMS werden zur Messung von Normal-, Biege- und Torsionsspannungen verwendet.

Dazu werden sie mit Widerständen zu Viertel-, Halb- oder Vollbrücken geschaltet. Die Verstimmung der Brücke ist ein Maß für die mechanische Spannung.

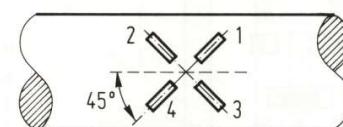


1. Biegbalken

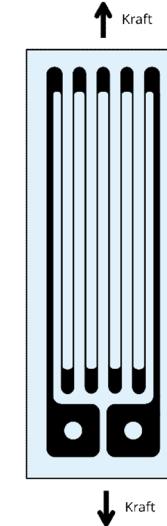
(Literatur: Schrüfer, E., Elektrische Messtechnik, S. 268 – 281)



2. Kraftmessdose



3. Torsionsmessung



Der K-Faktor gibt das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung ($\Delta R/R$) zur relativen Längenänderung ($\varepsilon = \Delta l/l$) an.

- Halbleiter-DMS

$K = +120$ (p-Silizium)

$K = -100$ (n-Silizium)

Messen von Widerständen

Aufgabe 7.1

Für ein Drehspulmessgerät ($I = 3,00 \text{ mA}$, $P = 900 \mu\text{W}$) soll ein Strom- und ein Spannungsmessbereich eingerichtet werden.

- a) Spannungsmessbereich 300V,
- b) Strommessbereich 3 A

Geben Sie für beide Fälle die Schaltung an und berechnen Sie die zur Erweiterung notwendigen Bauelemente einschließlich der erforderlichen Verlustleistung.

Aufgabe 7.2

Eine Spannung von $U = 56,0\text{V}$ wird gemessen

- a) mit einem Messgerät der Klasse 1 im Messbereich von 150V und
- b) mit einem Messgerät der Klasse 1,5 im Messbereich von 60V.

Wie sind die relativen Fehler in beiden Fällen ?

Aufgabe 7.3

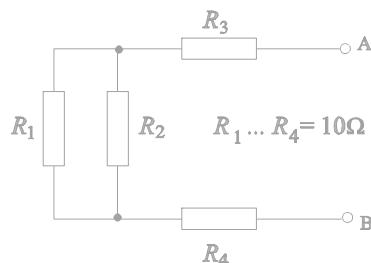
Ein Vielfachmessgerät (Multimeter) wird zur Strommessung eingesetzt. Folgende Werte sind gegeben

(Messbereich/Innenwiderstand): $30\mu\text{A}/10\text{k}\Omega$; $0,3\text{mA}/1,5\text{k}\Omega$; $30\text{mA}/15\Omega$; $600\text{mA}/0,75\Omega$

Berechnen Sie den Spannungsabfall und den Eigenverbrauch (Leistung über dem Messgerät).

Aufgabe 7.4

Zeigen Sie durch Rechnung, ob für den nebenstehenden Zweipol die spannungsrichtige oder die stromrichtige Messung zur Widerstandsbestimmung günstiger ist (Voltmeter $R_V = 100\text{k}\Omega$, Amperemeter $R_A = 15\Omega$), indem Sie die real gemessenen Widerstände bestimmen.



Aufgabe 7.5

Zeigen Sie, dass die Beziehung von Seite 20 dieser Vorlesung für die Brückenschaltung tatsächlich gilt:

$$R_x = R_N \frac{R_3}{R_4}$$