FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Elektrische Messtechnik

Vorlesung 5

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 2026/27

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:

Mittwochs 08:15 h bis 09:45 h, Raum: Hung C 101

Donnerstags 08:15 h bis 09:45 h, Raum: Hung C 101

Start 12.10.2026

Ende 25.01.2027

CampUAS – Vorlesung (P. Weber):

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

Weber: Elektrische Messtechnik - WiSe 26/27

Enrollment Key: alessandrovolta

CampUAS – Labor (R. Michalik):

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

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 26

Enrollment Key: MTLAB-2026

Labor (Herr Michalik):

Wichtig: Vorbesprechung Labor – Termin Kommt von Herrn Michalik

2. Semester TBD Raum: 8-205

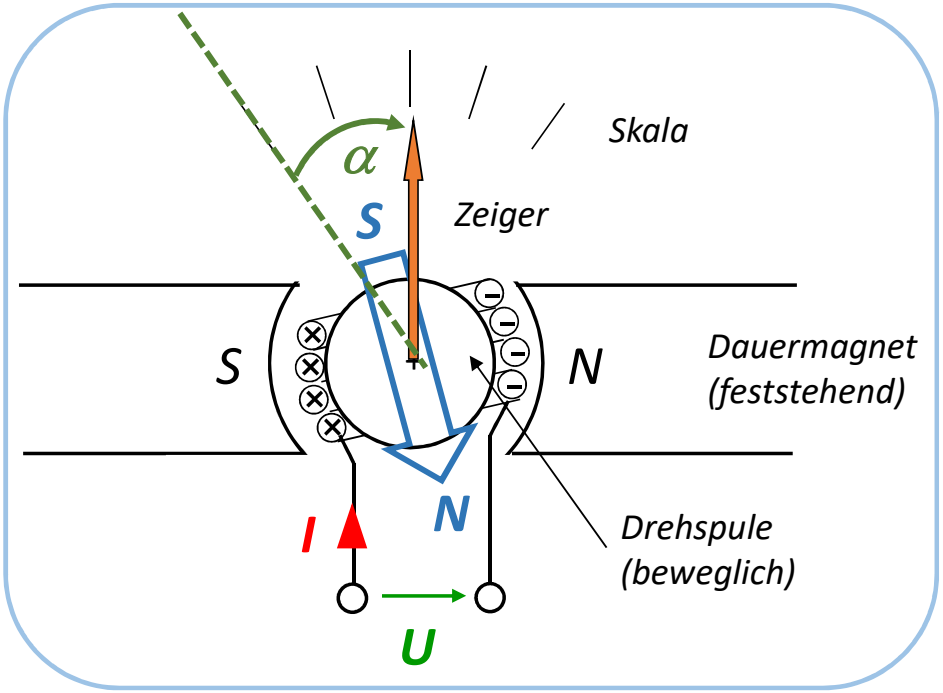
3. Semester Montag 08:15 h bis 11:30 h Raum: 8-205

Terminorganisation bei Herrn Michalik

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

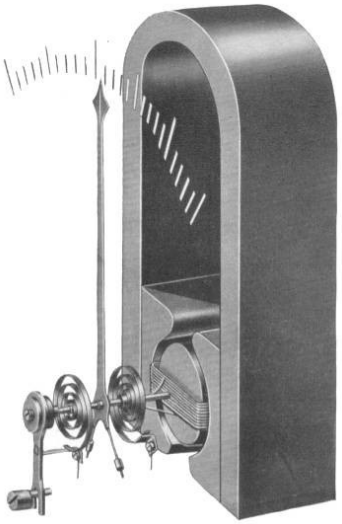
Sie verpassen sonst wichtige Infos bzw. werden bei der Laborterminvergabe nicht berücksichtigt

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

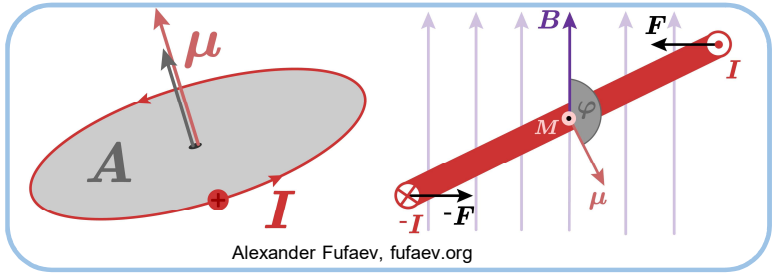


Symbol:



Drehspulmesswerk

A	**Querschnittsfläche der Spule [m²]**
n	**Anzahl der Wicklungen der Spule**
B	**Magnetfeld des Dauermagneten [Vs/m²] = [N/(Am)]**
μ	**Magnetisches Dipolmoment [Am²]**
M_{mag}	**Drehmoment des Dipols im B-Feld [Nm]**
M_{mag}	**Drehmoment der Feder [Nm]**
k	**Federkonstante [Nm/°]**



Alexander Fufaev, fufaev.org

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

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

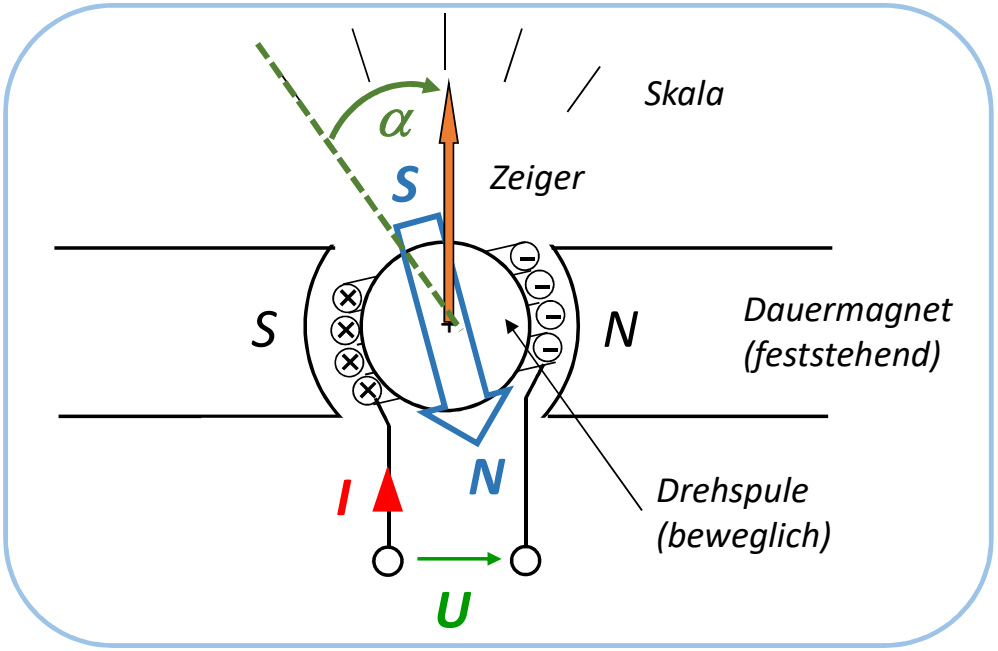
$$M_{mech} = k \cdot \alpha$$

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

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

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

$$I = const \cdot \alpha$$



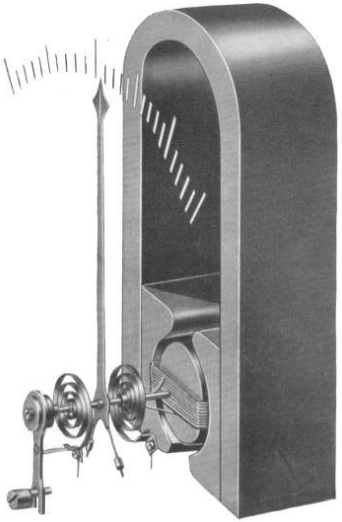
Drehspulmesswerk

Messung von:
- Gleichstrom und Gleichspannung
- Mittelwerte periodischer Größen

Kleinste messbare Ströme:
- Messbereichsendwert von 10 µA

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.

$$\frac{R_S}{R_i} = \frac{I_{Ri}}{I - I_{Ri}} = \frac{I_{Ri}}{I_S}$$

$$\Rightarrow R_S = R_i \frac{I_{MB}}{I_S}$$

Beispiel:

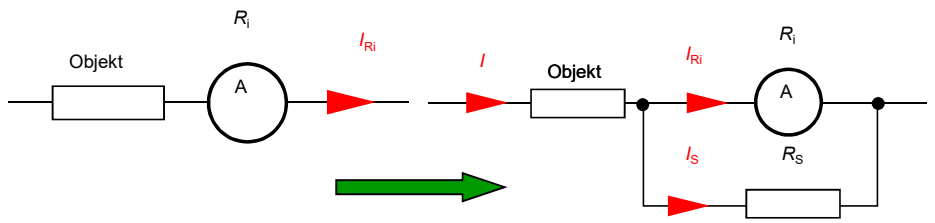
Messbereichsendwert (Strom bei Vollausschlag)

I_{MB} = 100µA

Innenwiderstand (der Spule)

R_i = 1kΩ

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



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} = 100µA

Innenwiderstand (der Spule)

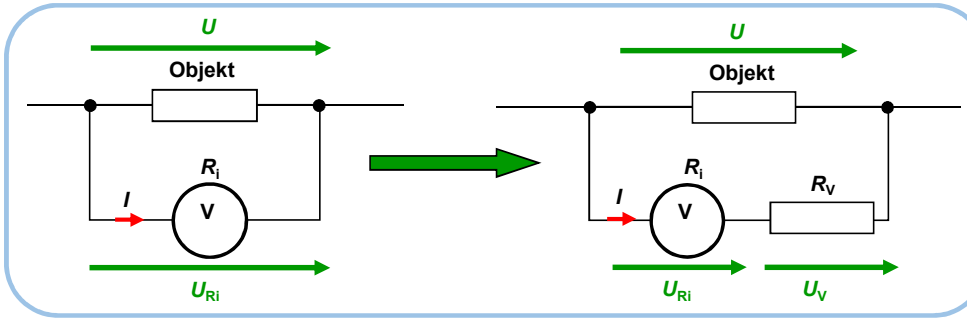
R_i = 1kΩ

R_i bewirkt einen Spannungsabfall über dem Messwerk:
$U_{Ri} = I_{MB}\, R_i = 10^{-4}\ A\ 10^3\ \Omega = 0{,}1V = 100mV$

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

Zum Beispiel:
- Schnittstelle
- Bildschirm-ausgabe
- Abspeichern in Tabelle bzw. Datenbank



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!

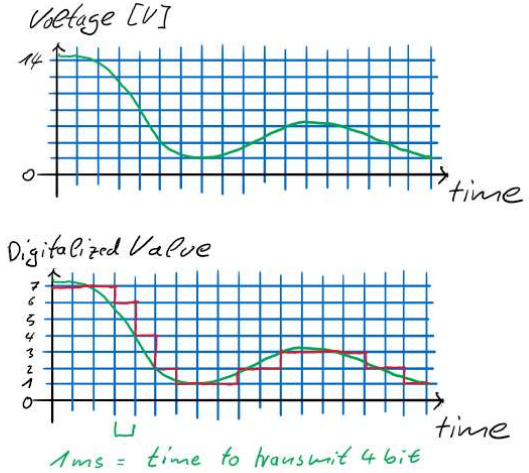
Digitale Messdatenerfassung ist
Zeitdiskret:
- Messgröße wird zu festen (diskreten) Zeitpunkten abgetastet.
- Es existieren nur Messwerte zu diesen abgetasteten Zeitpunkten.
- Informationen dazwischen gehen verloren.

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



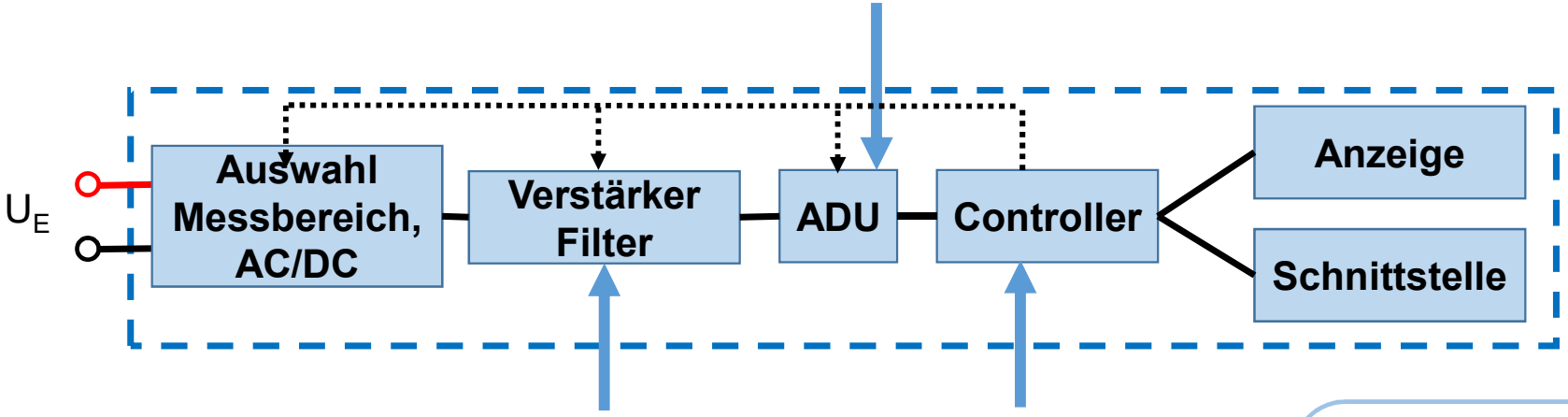
Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198

2^2	2^1	2^0	
4	2	1	
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



Digitalmultimeter

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



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

Mikroprozessor

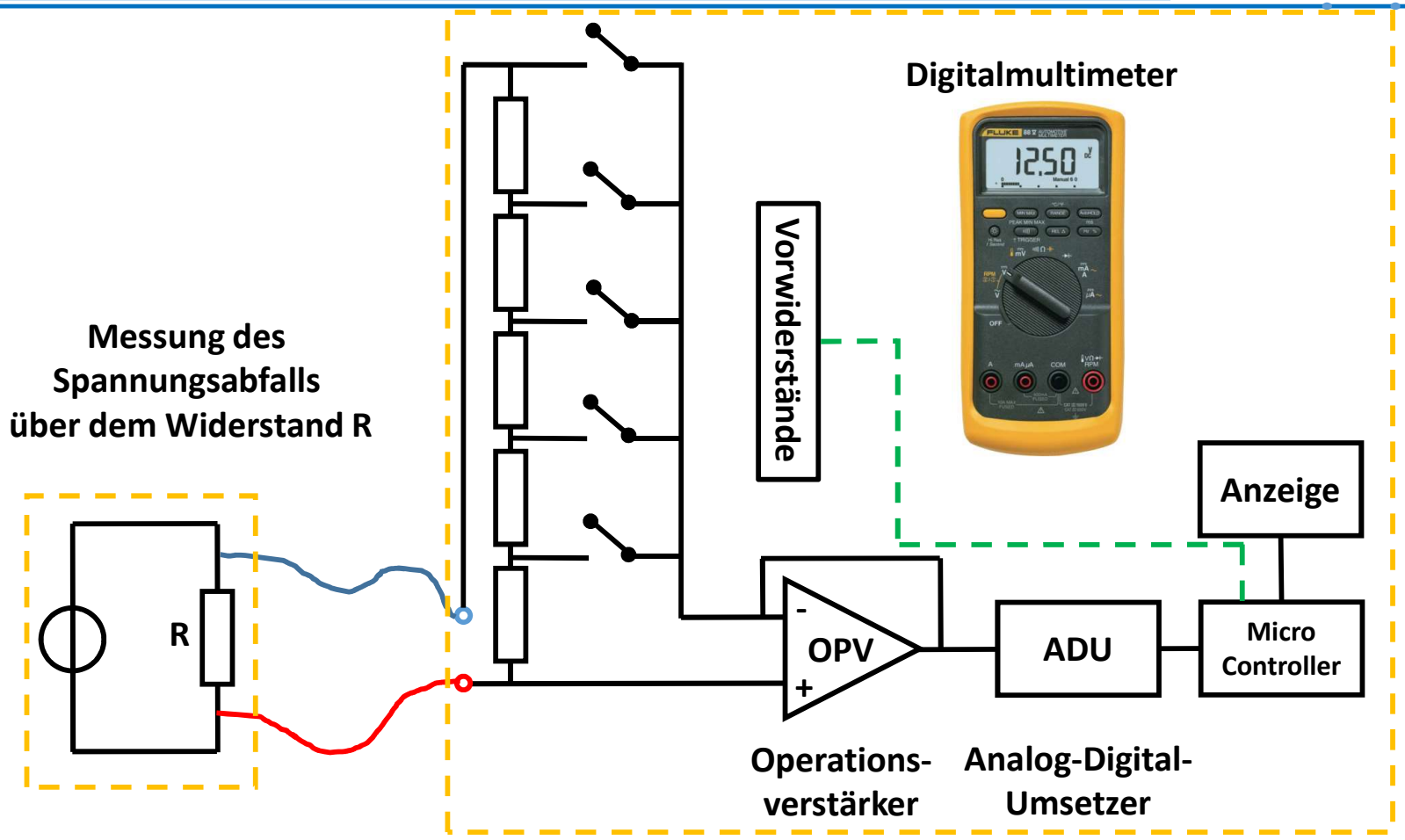


Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198

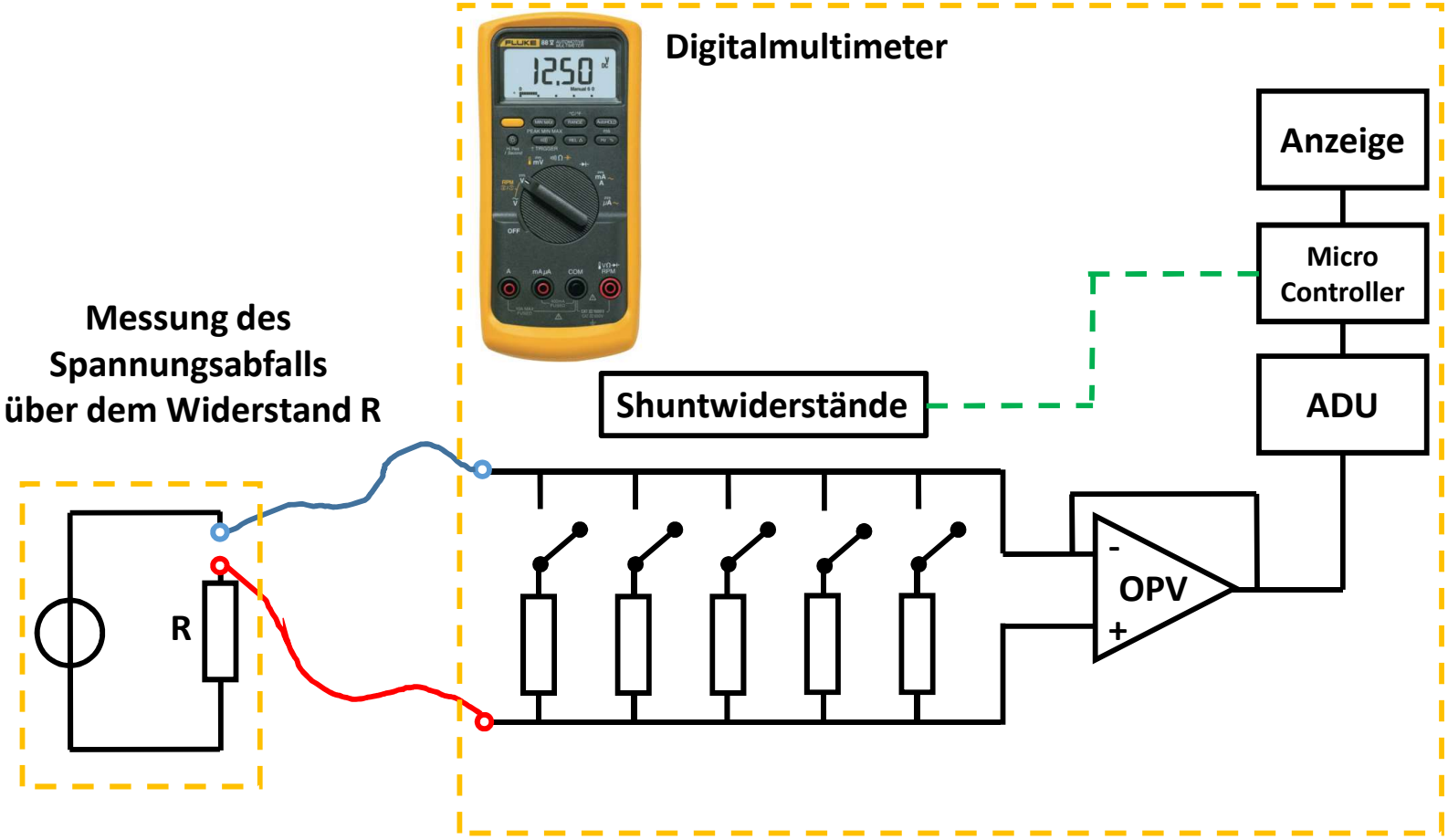


Thomas Mühl, Elektrische Messtechnik, 6. Auflage, Springer Vieweg

1.4 Spannungsmessung



1.4 Strommessung



Messgenauigkeit „klassische“ Geräte

Güteklasse eines Drehspulinstruments

Die Güteklasse wird als Ziffer angegeben

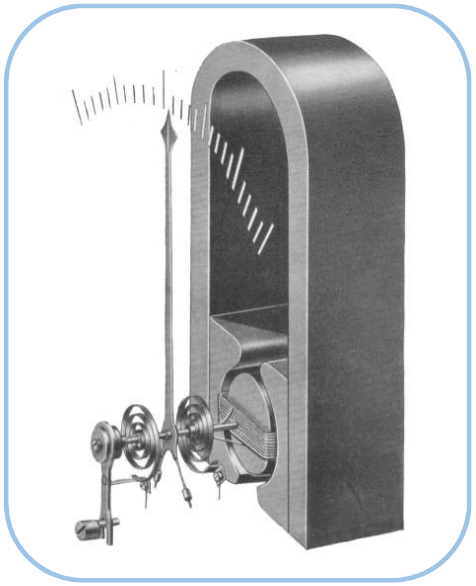
- prozentualen Fehler bei Vollausschlag

Beispiel

Güteklasse 2 bedeutet: Fehler von 2%

➔ Z.B. bei Vollausschlag 100µA ➔ ± 2µA

- Messung bei 100 µA ➔ Richtiger Wert liegt zwischen 98µA .. 102µA
- Relativer Fehler ± 2%
- Messung bei 10 µA ➔ Richtiger Wert liegt zwischen 8µA .. 12µA
- Relativer Fehler ± 20%



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

Messgenauigkeit Digitalmultimter

Für moderne Geräte wird die Güteklasse häufig differenzierter angegeben.
Kombinierte Angabe:
%-Anteil am gemessenen Wert + %-Anteil am Skalenendwert + Digit-Limit



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

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

Beispiel

± (0,2 % Messwert + 0,3 % Skalenendwert + 1 Digit)

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:

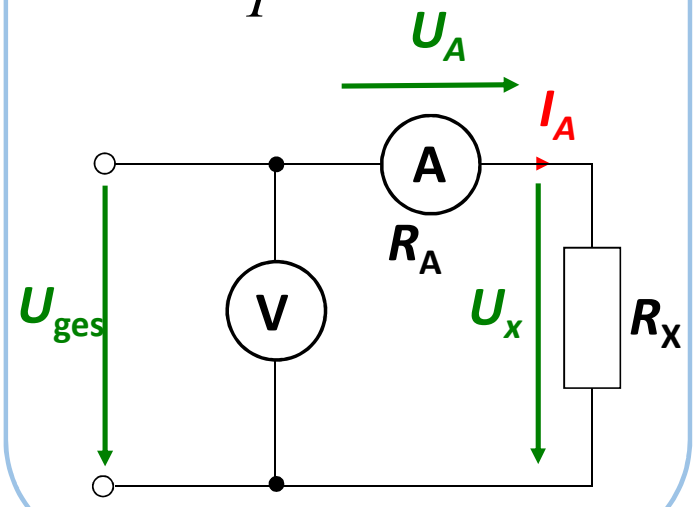
$$U_{ges} = U_A + U_X = I_A R_A + I_A R_X$$

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

Für $R_A << R_X$
kann man in Näherung annehmen:

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

$$R_X = \frac{U_X}{I}$$



Messen von Widerständen

Spannungsrichtige Schaltung:

Aus dem Schaltbild ergibt sich:

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

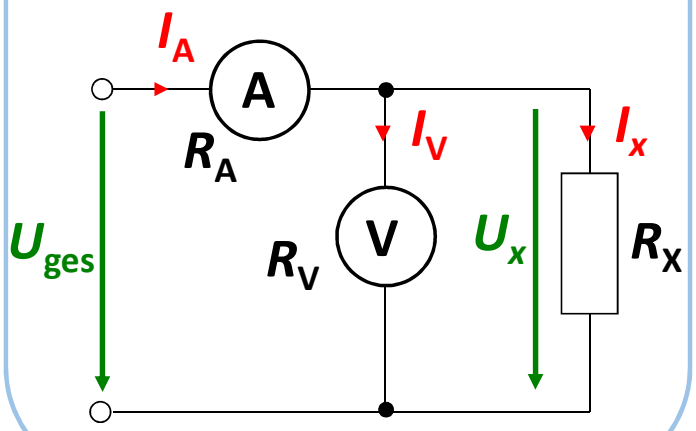
Sei $R_A = 0$, dann folgt:

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

Und für $R_V >> R_X$ kann man in Näherung annehmen:

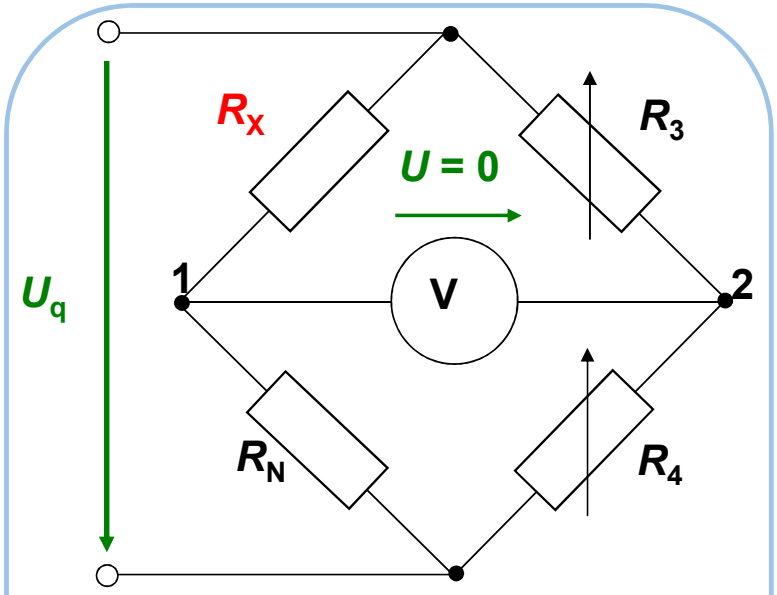
$$R_X \approx \frac{U_{ges}}{I_A}$$

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} \qquad I_A = I_x + I_V$$



Messen von Widerständen

Widerstandsmessbrücke (Wheatstone Brücke)



R_X - Prüfling
R_N - Präzisionswiderstand
R_3, R_4 - einstellbare Widerstände

Die Widerstände werden so eingestellt, dass gilt:

$$U_{12} = 0$$

Abgleichbedingung der Brückenschaltung

Für die beiden Spannungsteiler muss dann gelten:

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

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

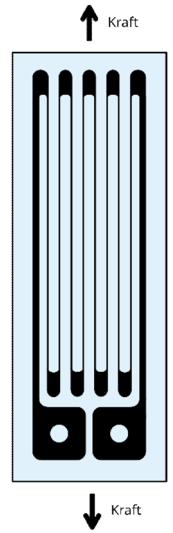
Aber hohe Relevanz z.B. für die Anordnung von Dehnungsmessstreifen.

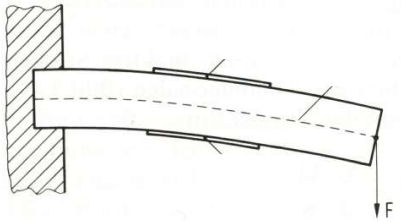
Dehnungsmessstreifen (DMS)

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

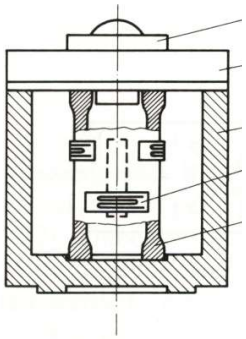
DMS werden zur Messung von Normal-, Biege- und Torsionsspannungen verwendet.

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

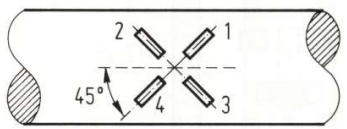




1. Biegbalken



2. Kraftmessdose



3. Torsionsmessung

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

Dehnungsmessstreifen (DMS)

Typen von DMS

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

Metallisch ($k \approx 2$)

- Folien-DMS
- Dünnschicht-DMS

halbleitend / piezoresistiv ($k \approx 50–200$)

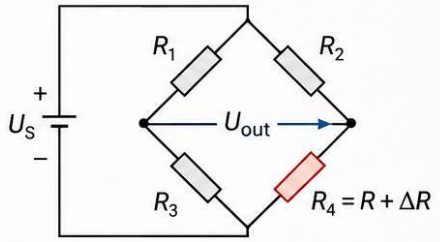
- separat aufgebracht
- monolithische MEMS-Sensoren

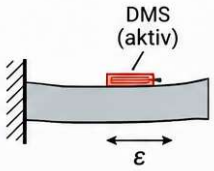


Dehnungsmessstreifen (DMS)

DMS in der Wheatstone-Messbrücke – Viertel-, Halb- und Vollbrücke

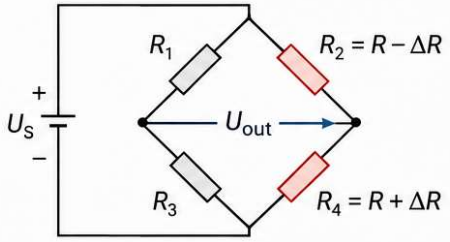
Viertelbrücke
1 aktiver DMS

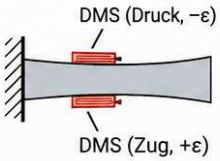




- einfach, kostengünstig
- geringste Empfindlichkeit

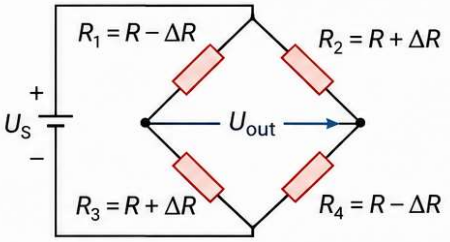
Halbbrücke
2 aktive DMS (Zug und Druck)

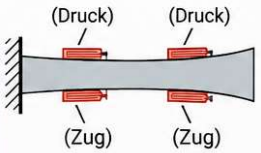




- höhere Empfindlichkeit (≈ 2× Viertelbrücke)
- gute Temperatur-kompensation

Vollbrücke
4 aktive DMS (2× Zug, 2× Druck)





- höchste Empfindlichkeit (≈ 4× Viertelbrücke)
- beste Temperatur-kompensation
- häufig bei präzisen Messaufgaben

Zusammenhang DMS – Brückenausgang

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

k ... K-Faktor (z. B. ≈ 2 bei Metall-DMS)
ε ... Dehnung (dimensionslos, z. B. 500 με = $5 \cdot 10^{-4}$)
ΔR/R ... relative Widerstandsänderung

Brückenausgangsspannung (kleine Dehnungen)

Brückentyp	$\frac{U_{out}}{U_S} \approx$
Viertelbrücke	$\frac{k \cdot \varepsilon}{4}$
Halbbrücke	$\frac{k \cdot \varepsilon}{2}$
Vollbrücke	$k \cdot \varepsilon$

Beispiel (Viertelbrücke)

Gegeben: $k = 2$, $U_S = 5\ V$, $U_{out} = 1{,}25\ mV$

$$\varepsilon \approx \frac{4U_{out}}{kU_S} = \frac{4 \cdot 1{,}25\ mV}{2 \cdot 5\ V} = 5 \cdot 10^{-4}$$

ε = 500 με (= 500 µm/m)

Messen von I, U & R

Aufgabe Messbereich

Für ein Drehspulmessgerät (I = 3,00 mA, P = 900 µW) soll ein Strom- und ein Spannungsmessbereich eingerichtet werden.

a) Spannungsmessbereich 300,0 V,

b) Strommessbereich 3,000 A

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

Aufgabe Messunsicherheit

Eine Spannung von U = 56,0V 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 ?

1.4 Aufgaben

Aufgabe Wheatstone Bridge
Zeigen Sie, dass die Beziehung von Seite 14 dieser Vorlesung für die Brückenschaltung tatsächlich gilt:

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

Aufgabe 1.23 B
Zeigen Sie, dass die Beziehung von Seite 17 dieser Vorlesung für die Viertelbrücke tatsächlich gilt:

$$\boxed{\frac{U_{out}}{U_S} \approx \frac{1}{4}\frac{\Delta R}{R}}$$

Nutzen Sie dabei die Näherung

$$\frac{\Delta R}{R} \ll 1$$