

# Elektrische Messtechnik

## Vorlesung 6

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 24/25

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

# Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

- 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 zu viel Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung den 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:

Donnerstag 08:15 h bis 11:30 h Raum: 8-105

Start 21.10.2024 - Ende 12.02.2025

## 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 - WS 24/25

Enrollment Key: alessandrovolta

### CampUAS – Labor (R. Michalik):

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

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 24

Enrollment Key: MT-LAB-WS24

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

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

# Elektrische Messtechnik

Zustandsüberwachung  
von Maschinen

- Regelung von Maschinen
- Automatisierung
- Funktionskontrolle
- Instandhaltung

Parametererfassung in  
Prozessen

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

Qualitätskontrolle von  
Produkten

- Warenausgangsprüfung
- Zwischenprüfungen
- Messen von Kundenspezifikationen
- Funktionale Prüfung

Produktentwicklung  
und Labor

- Testen von Prototypen
- Laboraufbauten
- Machbarkeitsstudien



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



Von Hartsch - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Philp-curid-563226>



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



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

## Angabe des Herstellers zu

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

## Kenngößen, z.B.

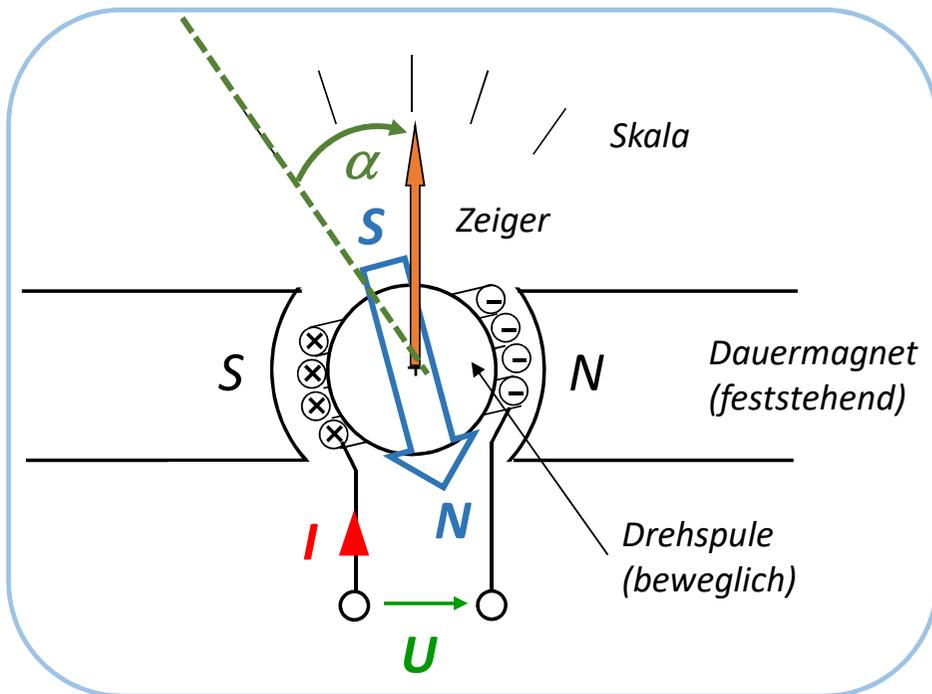
- Messbereich
- Innenwiderstand
- Frequenzbereich
- Verstärkungsfaktor

## Einflussgrößen, z.B.

- Umgebungstemperatur
- Feuchte
- elektromagnetische Felder

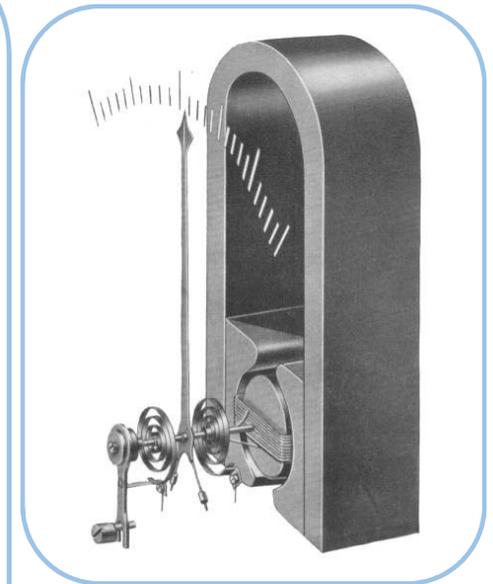
*Mit entsprechenden „Fenstern“,  
Toleranzen und Messgenauigkeiten*

# 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

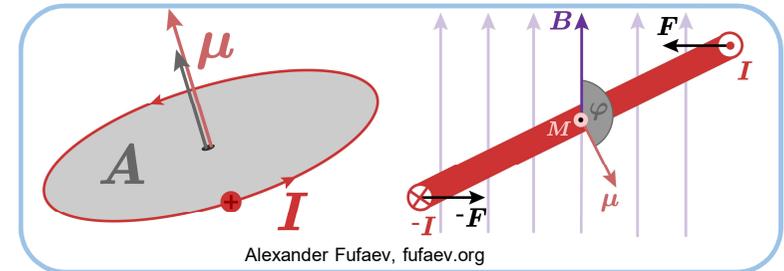


Symbol:



# Drehspulmesswerk

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



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

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

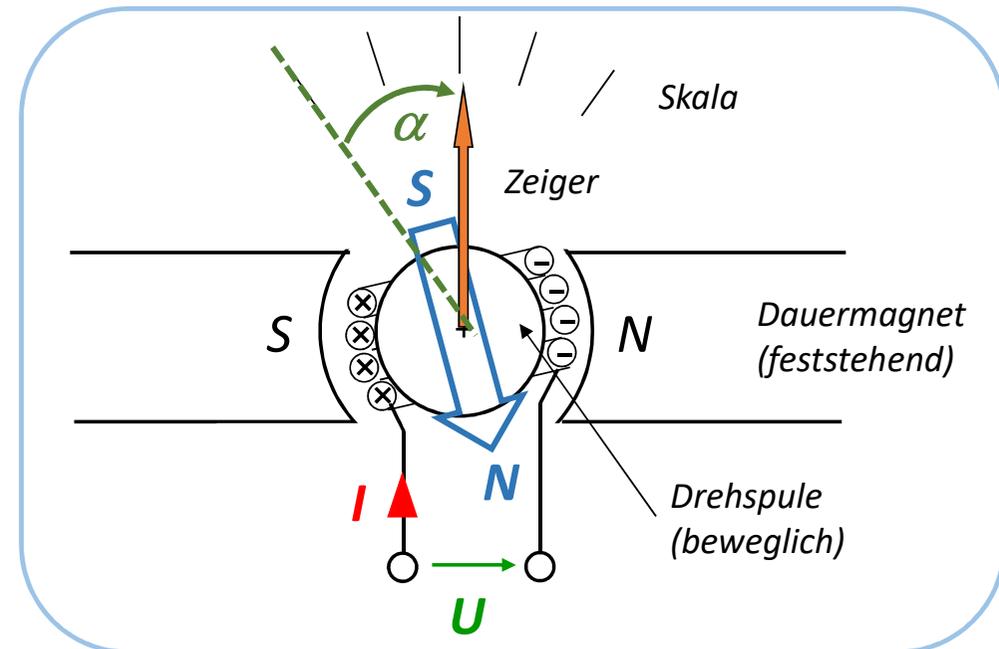
$$M_{mech} = k \cdot \alpha$$

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

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

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

$$I = const \cdot \alpha$$



# Drehspulmesswerk

## Messung von:

- Gleichstrom und Gleichspannung
- Mittelwerte periodischer Größen

## Kleinste messbare Ströme:

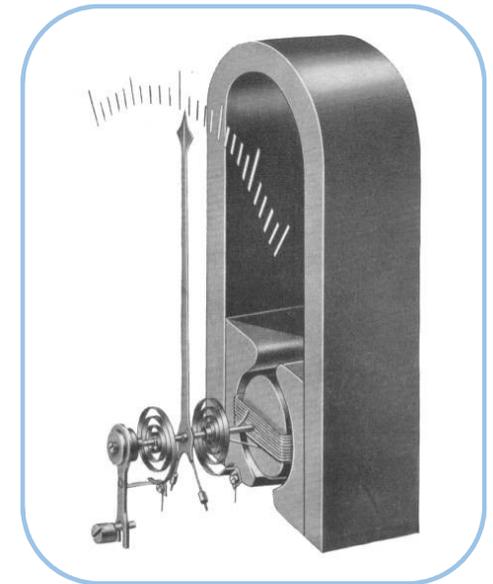
- Messbereichsendwert von  $10 \mu\text{A}$

## 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)

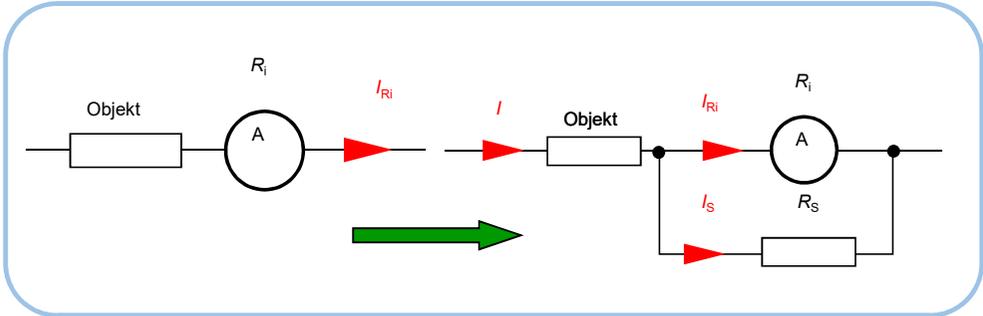
$$I_{MB} = 100\mu A$$

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)

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

Innenwiderstand (der Spule)

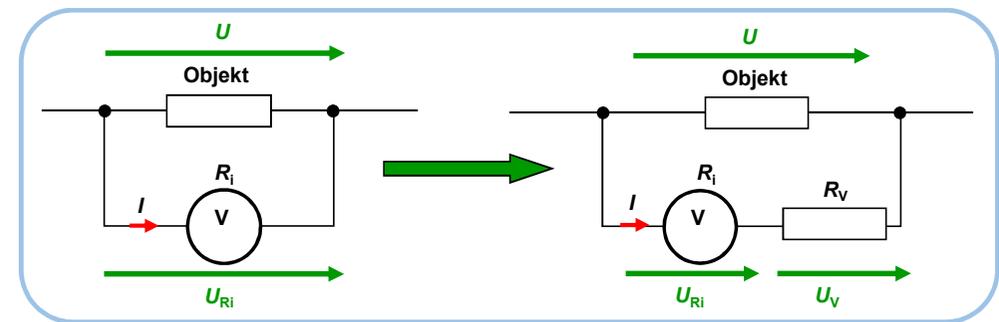
$$R_i = 1\text{k}\Omega$$

$R_i$  bewirkt einen Spannungsabfall über dem Messwerk:

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

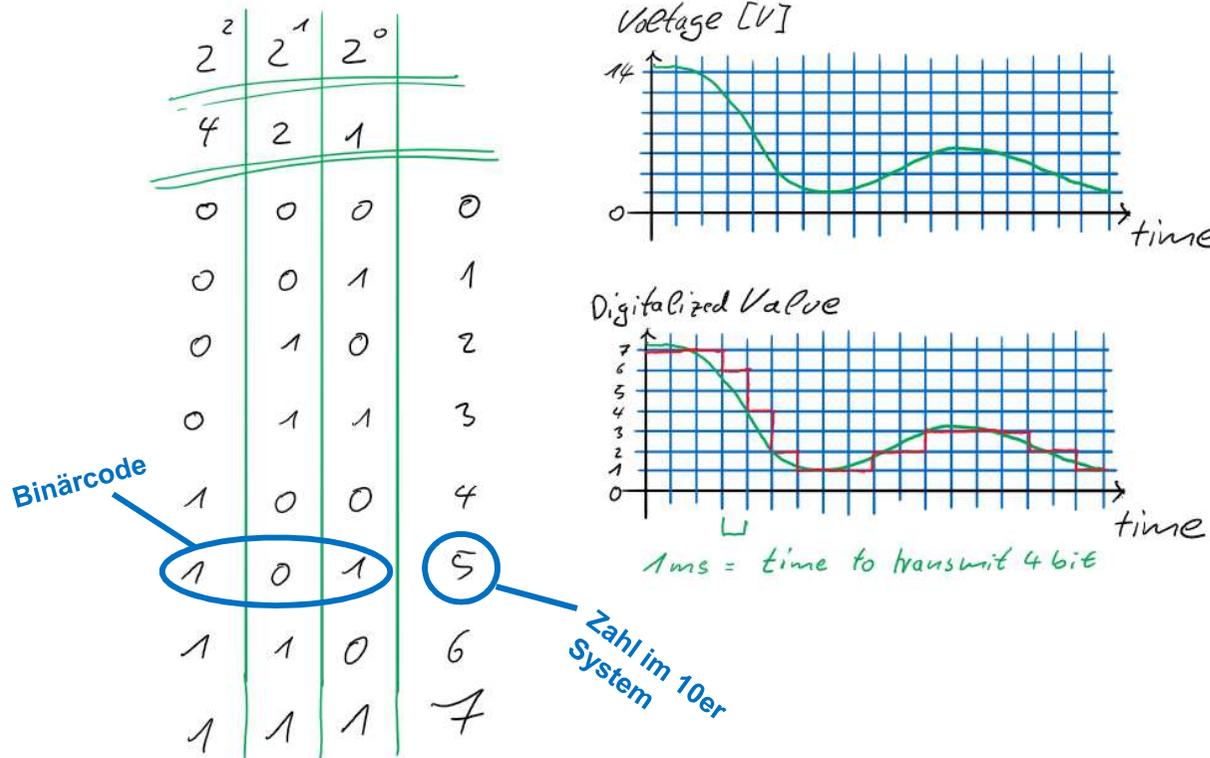
Welche verschiedenen Vorwiderstände  $R_V$  müssen Sie jeweils verwenden, wenn Sie den Messbereich auf 1V, 5V und 10V erweitern wollen?

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



# Digitalisierte Messsignale

## Digitalisierung eines 0-14 V Spannungssignales mit 3 Bit



Es können die diskreten Zahlen von 0 bis 7 dargestellt werden.

Das 0-14 V Signal muss in 7 Schritte aufgeteilt werden:

$$\frac{14V}{7} = 2V$$

Es kann also maximal die Schrittweite von 2 V aufgelöst werden.

Mit anderen Worten: Bei der AD Wandlung geht ggf. Genauigkeit verloren.

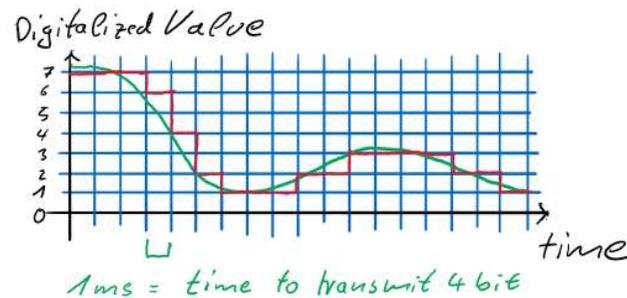
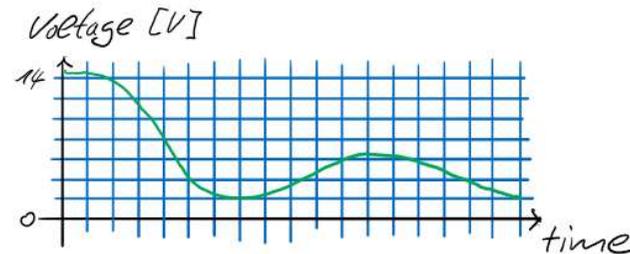
# Digitalisierte Messsignale

## Digitalisierung eines 0-14 V Spannungssignales mit 3 Bit

$2^2$	$2^1$	$2^0$	
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

Binärcode

Zahl im 10er System



Allgemein gilt für die Auflösung  $\Delta U$  eines mit  $n$  binären Stellen digitalisierten Spannungssignals:

$$\Delta U = \frac{U_{max}}{2^n - 1}$$

Man spricht in dem Zusammenhang auch vom Diskretisierungsfehler.

# Digitalisierte Messsignale

## Aufgabe:

Betrachten Sie nun ein Messsystem, welches Ihnen proportional zum Messwert ein analoges Signal zwischen 0 und 5 V ausgibt. Bestimmen Sie die Auflösung der AD-Konversion, wenn Sie ein 4 Bit System verwenden.

4-bit-Signal  
Digitalization

$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$	
8	4	2	1	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
1	0	1	0	10
1	0	1	1	11
1	1	0	0	12
1	1	0	1	13
1	1	1	0	14
1	1	1	1	15

Consider a 0..5V analog output voltage to be converted into a 4-bit digital signal.

The maximum representable number in 4-bit is 15.

Thus, the maximum possible output voltage of 5V is represented by 15 [1111].

$$5V \hat{=} 15$$

$$\Rightarrow \frac{5V}{15} \hat{=} 1$$

$$\Rightarrow \frac{1V}{3} \hat{=} 1 \text{ [0001]}$$

The resolution of this A/D conversion with 4-bit bandwidth is 0,33V.

# Signal-Zu-Rauschverhältnis

**Schwache Signale werden in der Regel durch ein immer vorhandenes Untergrundrauschen maskiert.**

**Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis gibt an, in Welche Verhältnis die Signalleistung zur Rauschleistung steht.**

**Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird in der Regel in Bell bzw. Dezibell angegeben.**

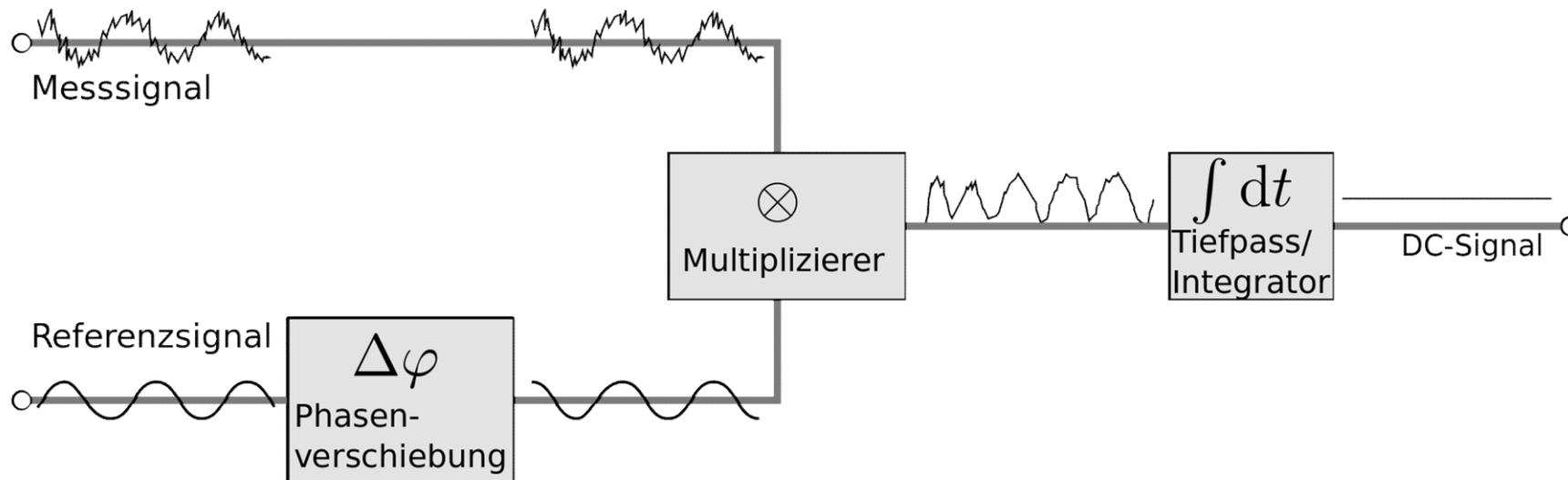
$$SNR = \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rausch}}}$$

# Beispiel Analoge Signalverarbeitung

## Lock-In Verstärker

Messen von schwache, verrauschten Signalen:

- Messsignal wird mit einem periodischen Signal moduliert (= überlagert)
- Bandfilter lässt nur die Frequenzanteile des modulierten Signal passieren



Von Zebear - Template:Grafik selbst erstellt nach Vorlage <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Lock-in.png> von Christian Nölleke, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12078001>

# Messkette

Zum Beispiel:

- Energieversorgung
- Temperaturstabilisierung

Hilfsgeräte



Sensor

Analoge  
Signalverarbeitung

Zum Beispiel:

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

AD-Wandler

Digitale  
Signalverarbeitung

Zum Beispiel:

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

Ausgabe des  
Messwertes

Zum Beispiel:

- Schnittstelle
- Bildschirm-  
ausgabe
- Abspeichern in  
Tabelle bzw.  
Datenbank

# 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.

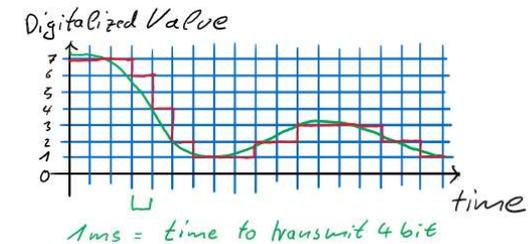
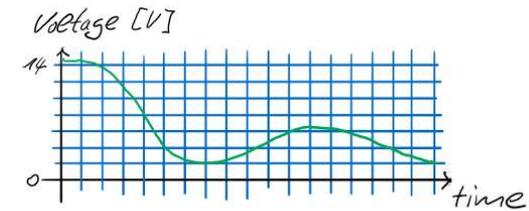
## Wertediskret:

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

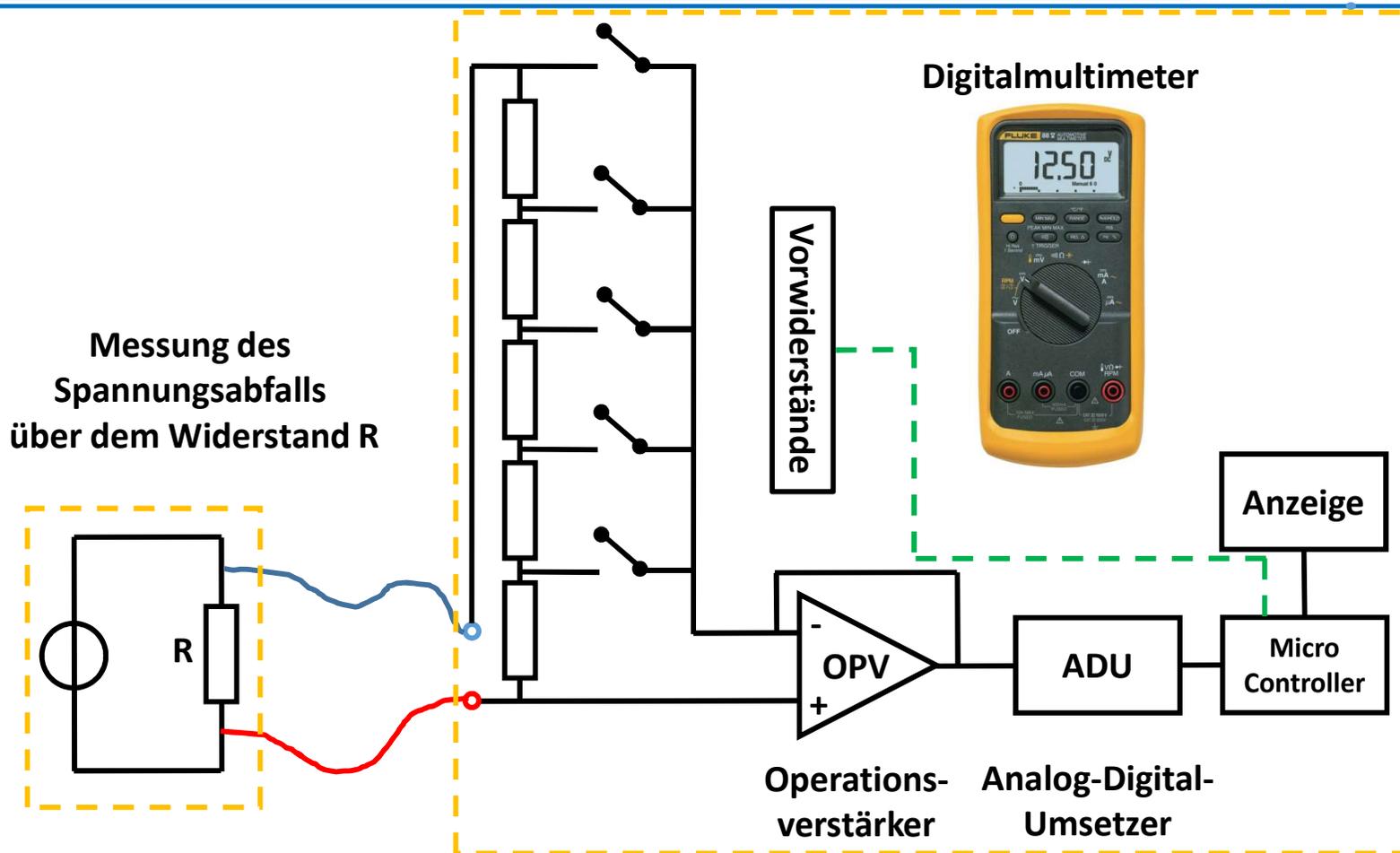


Von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64198>

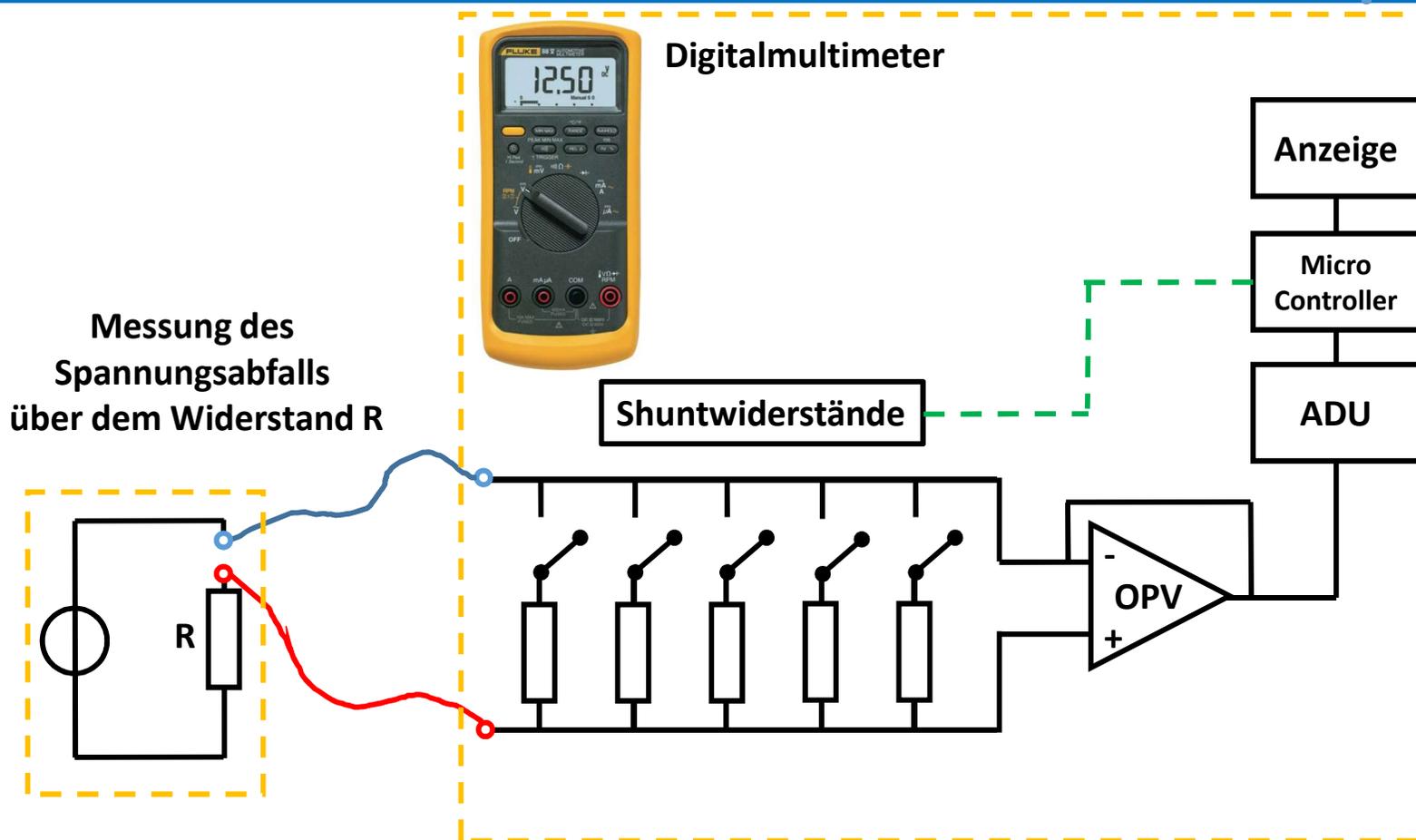
$2^2$	$2^1$	$2^0$	
4	2	1	
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7



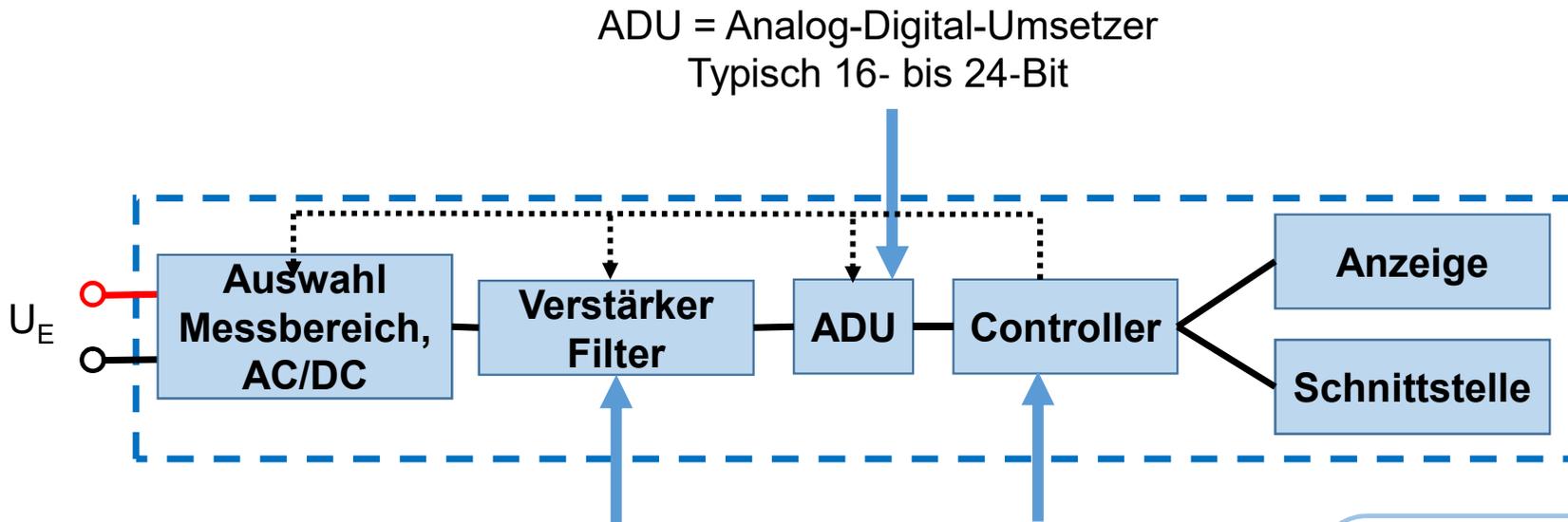
# 1.4 Spannungsmessung



# 1.4 Strommessung



# Digitalmultimeter



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

Mikroprozessor

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

Die Güteklasse wird als Ziffer angegeben

- prozentualen Fehler bei **Vollausschlag**

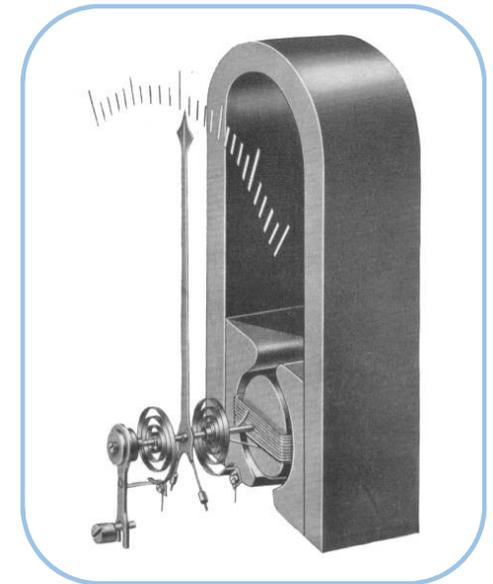
### Beispiel

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  $\pm 20\%$

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



# Messgenauigkeit Digitalmultimeter

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

Beispiel

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

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



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:

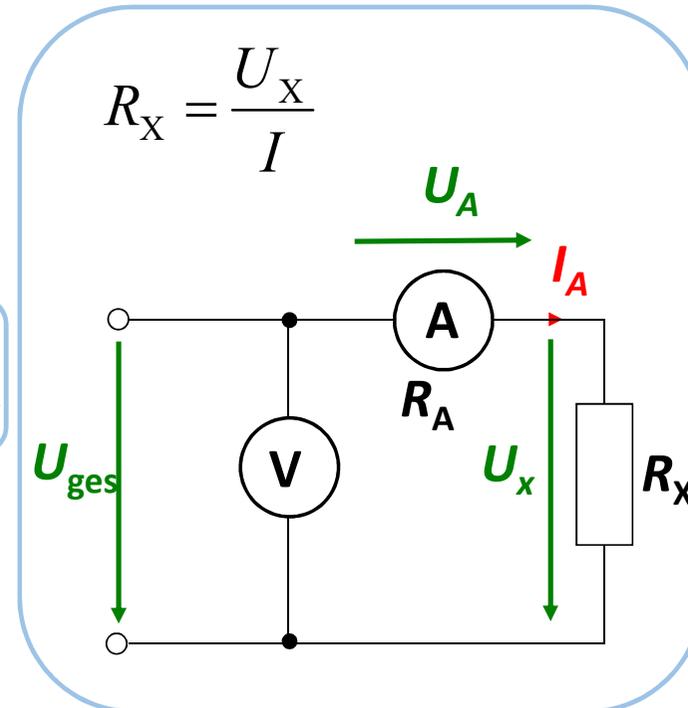
Aus dem Schaltbild ergibt sich  
nach dem Maschensatz:

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

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

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:

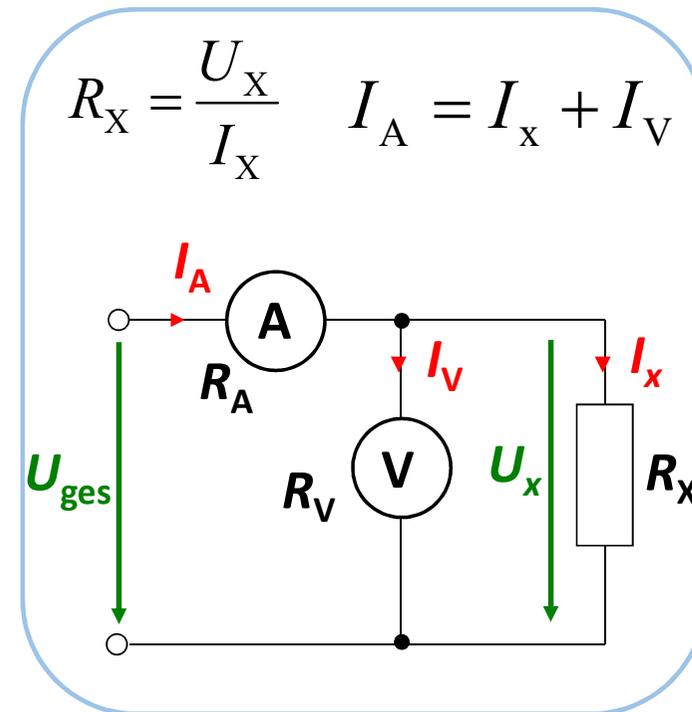
$$I_A = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_A + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_V}\right)}}$$

Sei  $R_A = 0$ , dann folgt:

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

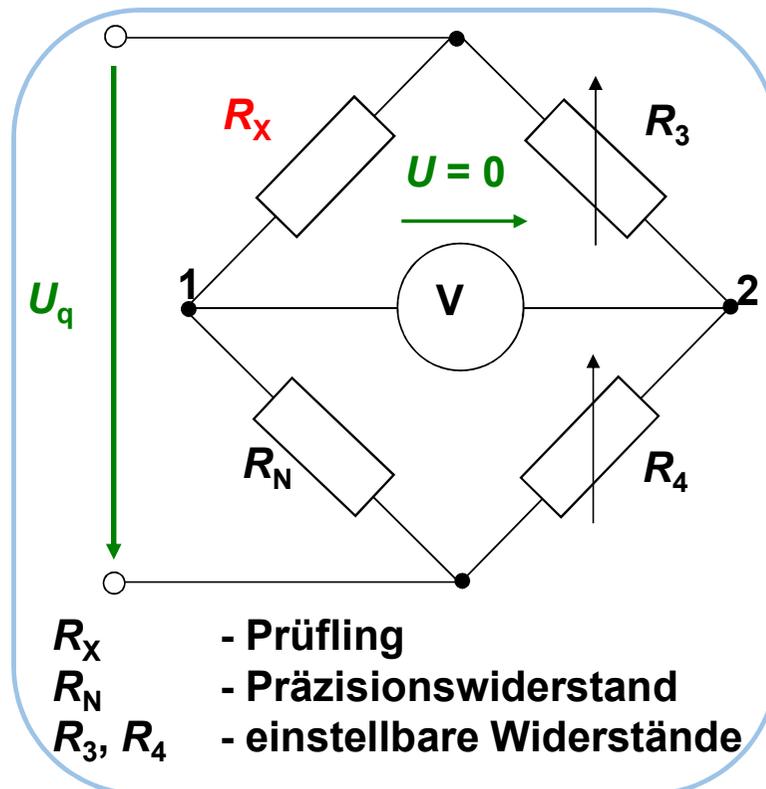
Und für  $R_V \gg R_X$  kann man in Näherung annehmen:

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



# 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

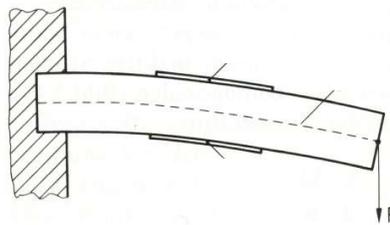
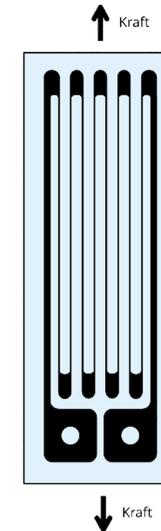
Aber hohe Relevanz z.B. für die Anordnung von Dehnungsmessstreifen.

# 1.4 Messen von Widerständen

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

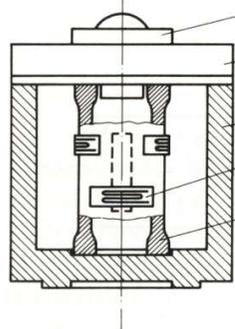
DMS werden zur Messung von Normal-, Biege- und Torsionsspannungen verwendet.

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

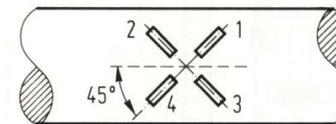


**1. Biegebalken**

(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 ( $\epsilon = \Delta l/l$ ) an.

- Halbleiter-DMS

K = +120 (p-Silizium)

K = - 100 (n-Silizium)



# Messen von Widerständen

## Aufgabe 7.1

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

- Spannungsmessbereich  $300\text{V}$ ,
- Strommessbereich  $3 \text{ A}$

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

- mit einem Messgerät der Klasse 1 im Messbereich von  $150\text{V}$  und
- mit einem Messgerät der Klasse 1,5 im Messbereich von  $60\text{V}$ .

Wie sind die relativen Fehler in beiden Fällen ?

## Aufgabe 7.3

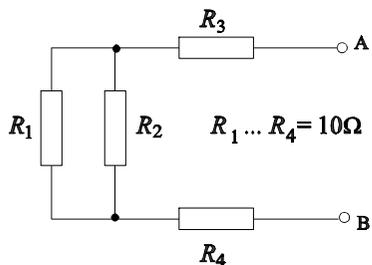
Ein Vielfachmessgerät (Multimeter) wird zur Strommessung eingesetzt. Folgende Werte sind gegeben

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

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:

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