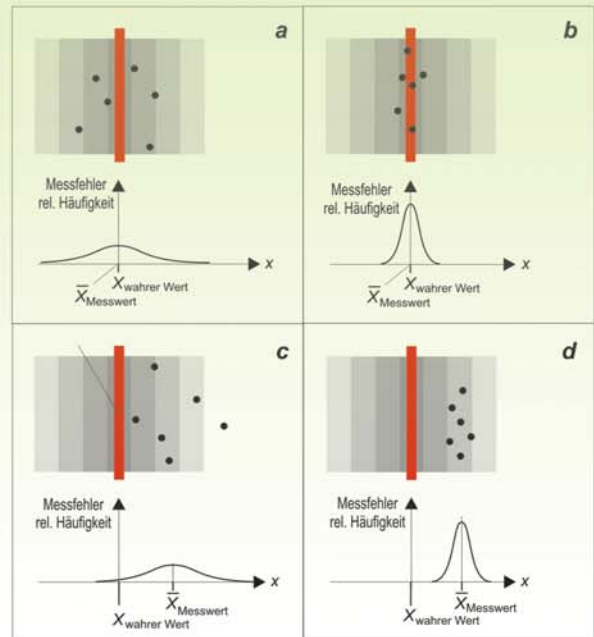


MESSTECHNIK

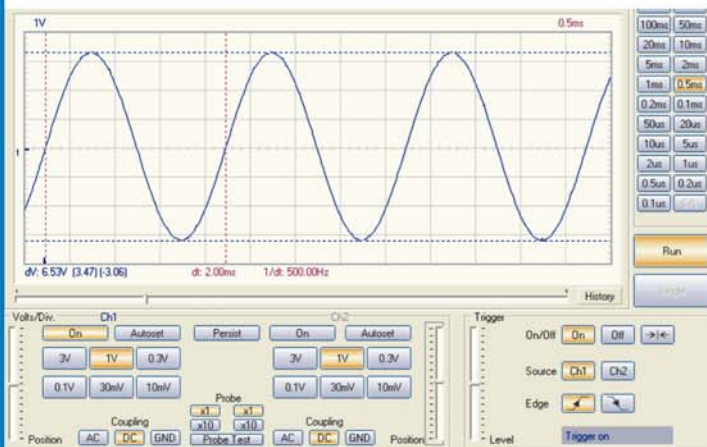
ANWENDUNG ANALOGER UND DIGITALER MESSGERÄTE



ZUNEHMENDE GENAUIGKEIT



ZUNEHMENDE PRÄZISION



GRUNDBEGRIFFE

MESSUNG: Beim Messen vergleichen wir **Messgrößen** mit ihren **Maßeinheiten** (wir dividieren).

MASSEINHEIT: eine mit der **Messgröße** gleichartige, willkürlich gewählte Menge.

PRÄFIX, VORSATZ: Wörter, die ganzzahlige Exponenten von Zehnerpotenzen symbolisieren, vor der **Maßeinheit** werden sie zur Beschreibung von sehr großen oder sehr kleinen **physikalischen Größen** benutzt.

MESSZAHL: zeigt an, welches Vielfache der **Maßeinheit** die **Messgröße** beträgt.

PHYSIKALISCHE GRÖSSE: Produkt von **Messzahl** und **Maßeinheit**.

ANALOGES MESSGERÄT: zeigt einen kontinuierlichen Wert an.

DIGITALES MESSGERÄT: zeigt einen diskreten Wert an.

MESSBEREICH: der Bereich der **physikalischen Größen**, der mit einem gegebenen Messgerät gemessen werden kann.

MESSGRENZE: größte **physikalische Größe**, die ein Messgerät messen kann, obere Grenze des **Messbereichs**. Ein Messgerät kann eine einzige (fixe) oder mehrere (variable) Messgrenzen haben.

EMPFINDLICHKEIT: die Änderung des angezeigten Wertes dividiert durch die Änderung der **Messgröße**.

GERÄTEKONSTANTE: die Änderung der **Messgröße** dividiert durch die Änderung des angezeigten Wertes, d. h. der Reziprokwert der **Empfindlichkeit**.

AUFLÖSUNG: die geringste Differenz zwischen den **Messgrößen**, die noch zwei, eindeutig unterscheidbaren Messwerten entspricht.

ANTWORTZEIT: die Zeit, in der sich der veränderte angezeigte Wert nach Änderung der **Messgröße** stabilisiert.

MESSFEHLER: Differenz zwischen einem gemessenen und dem wahren Wert.

ABSOLUTER MESSFEHLER: der Absolutwert der Differenz zwischen einem gemessenen und dem wahren Wert.

RELATIVER MESSFEHLER: der Quotient von **absolutem Messfehler** und wahren Wert.

ZUFALLSFEHLER ODER STOCHASTISCHER FEHLER: durch zufällige Wirkungen auftretender **Messfehler**, der zur Differenz, Streuung der wiederholten **Messwerte** führt, seine Größe lässt sich nicht vorhersagen.

PRÄZISION (REPRODUZIERBARKEIT): qualitatives Merkmal, dass die Streuung der wiederholten Messungen ausdrückt, je geringer der **stochastische Fehler** ist, desto höher ist die Präzision.

SYSTEMATISCHER ODER DETERMINISTISCHER FEHLER; VERZERRUNG, OFFSET: die Abweichung des wahren Wertes vom Mittelwert der wiederholten Messungen, seine Größe kann erkannt und zur Fehlerkorrektur benutzt werden.

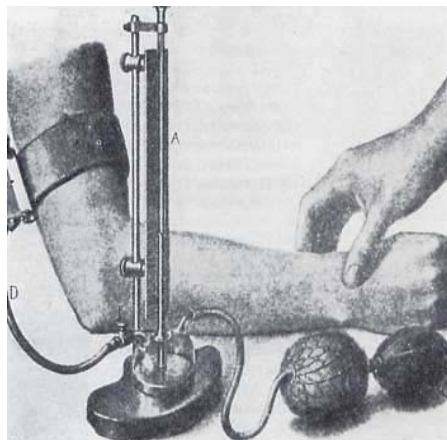
GENAUIGKEIT: qualitatives Merkmal, dass die Abweichung des wahren Wertes vom Mittel der wiederholten Messungen ausdrückt. Je geringer der **systematische Fehler** ist, desto höher ist die Genauigkeit.

DIGITALES MULTIMETER, DMM: numerisches Mehrfunktionsmessgerät, mit dem Gleich- und Wechselspannung, Gleich- und Wechselstrom sowie elektrischer Widerstand gemessen werden können.

LUXMETER: Messgerät zum Messen der Beleuchtungsstärke.

KONDUKTOMETER: Messgerät zum Messen der elektrischen Leitfähigkeit.

OSZILLOSKOP: Gerät zur graphischen Darstellung von zeitvarianten Signalen.



Quecksilber- Blutdruckmessgerät von 1896

Die Messtechnik ist die Gesamtheit der Methoden zum Bestimmen von physikalischen Größen.

In der medizinischen und pharmazeutischen Praxis ist das Messen, Anzeigen von elektrischen und nicht elektrischen physikalischen Größen, die Echtzeitdarstellung der Zeitfunktion von physiologischen Signalen, die Speicherung als Daten eine sehr häufige Aufgabe. Nach dem Messprinzip lassen sich analoge und digitale Signalaufbereitung unterscheiden. Bei analogen Geräten kann der Messwert an einer kontinuierlichen Skala abgelesen werden, die digitalen Messgeräte geben dagegen diskrete numerische Werte an. Digitale Oszilloskope stellen die Graphik des untersuchten Signals als Zeitfunktion auf dem Computerbildschirm dar (z. B. EKG).

Lehrbuch:
Damjanovich-Fidy-Szöllösi: VII. 1.

THEORETISCHE ZUSAMMENFASSUNG

DIE MESSUNG

Die Messung ist ein vergleichender Vorgang, bei dem die gemessene **physikalische Größe** mit einer gleichartigen, willkürlich gewählten und angenommenen Größe, der **Maßeinheit**, verglichen (dividiert) wird. Das Ergebnis ist die **Messzahl**.

$$\text{PHYSIKALISCHE GRÖSSE} = \text{MESSZAHL} \cdot \text{MASSEINHEIT} \quad (1)$$

- Z. B.: — Höhe des Berges Kékestető = 1014 m
— systolischer Blutdruck des Patienten = 145 mmHg
— mittlere Masse des menschlichen Gehirns = 1500 g.

Oft wird bei den Maßeinheiten das Vielfache oder der Bruchteil der Zehnerpotenz benutzt, das sind die Präfixe (s. 30. ANHANG).

- Z. B.: — Entfernung Budapest–Wien = 243 km = 243 000 m
— längerer Durchmesser der Froscherythrozyten = 19 μm = 0,000 019 m
— Aktivität eines applizierten Isotops = 120 MBq = 120 000 000 Bq

GENERELLER AUFBAU VON MESSGERÄTEN

Während der Messung treten Messobjekt oder untersuchte Person in Wechselwirkung mit dem Fühler (Sensor) des Messgerätes, der die Messgröße erfasst und umwandelt (Transducer), meist in ein **elektrisches Signal**, das nach Bedarf verstärkt wird (Abb1, 2).

Bei **analogen Messgeräten** wird dieses Signal nach Aufbereitung (z. B. Verstärkung, Rauschfilterung) auf einer Skala von einem Zeiger oder – bei zeitvarianten Signalen – graphisch (auf dem Bildschirm des Oszilloskops, Papierstreifen oder Film) dargestellt, wo der stufenlose Messwert abgelesen werden kann.

Die **digitalen Messgeräte** setzen das verstärkte, noch kontinuierliche elektrische Signal mit Probenentnahmen und Abrundung in ein diskretes Signal um. Nach der weiteren Signalaufbereitung erscheint das Signal numerisch (auf einer digitalen Anzeige) oder graphisch auf dem Bildschirm des Computers (digitalen Oszilloskops) bzw. ausgedruckt. Digitale Signale lassen sich bedeutend einfacher speichern (im Speicher des Computers) und auch die Möglichkeiten der Verarbeitung sind vielschichtiger.



Abb. 1. Analoges und digitales Blutdruckmessgerät

analoges Messgerät
analog mérőműszer
analog measuring instrument, meter

digitales Messgerät
digitális mérőműszer
digital measuring instrument, digital meter

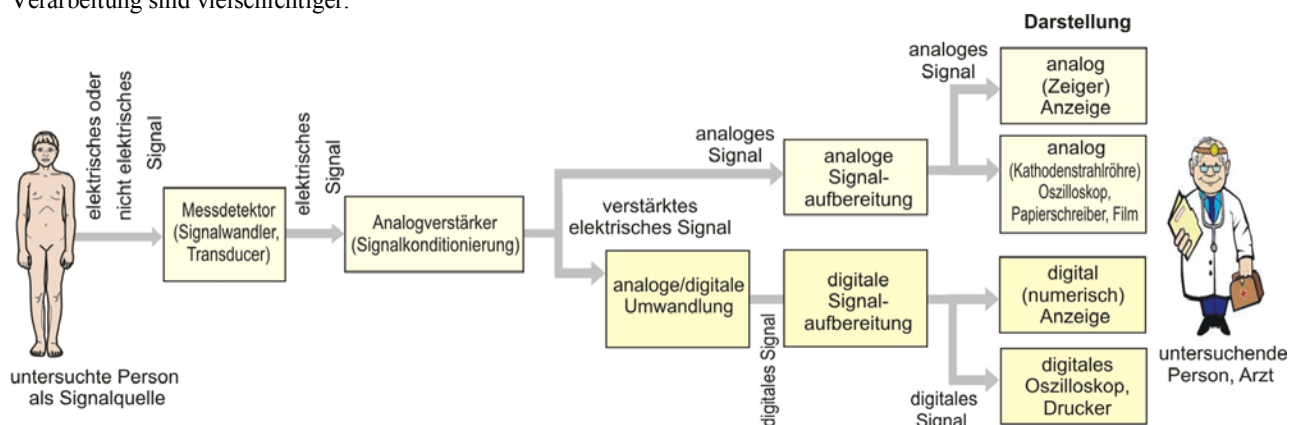


Abb. 2. Flussdiagramm analoger und digitaler Signalverarbeitung in der Medizin

Beispiel zur Wahl des Messbereichs bzw. der Messgrenzen:

Der Messbereich einer gewöhnlichen Tarierwaage ist 0–2 kg. Die Messgrenze von 2 kg lässt sich nicht ändern, zum Messen einer größeren Masse muss eine andere Waage benutzt werden.

Bei einem digitalen Voltmeter kann der Messbereich zwischen 0 V und 1000 V liegen. Innerhalb dieses Bereichs sind die möglichen Messgrenzen z. B. 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 1000 V. Zum Messen eines Auto-Akkumulators ($U_{\text{geschätzt}} = 12 \text{ V}$) ist es zweckmäßig, die Messgrenze von 20 V zu wählen. Zur Messung der elektrischen Spannung des Membranpotenzials ($U_{\text{geschätzt}} = 90 \text{ mV}$) ist es dagegen zweckmäßig, die Messgrenze von 200 mV zu wählen.

Der Messbereich des Fieberthermometers liegt zwischen 35°C und 42°C.

Beispiel für die Wahl der Auflösung des Messgeräts:




Die Genauigkeit beim Fiebermessen sollte $\pm 0,1^\circ\text{C}$ betragen. Deshalb wählen wir ein Thermometer, dessen Einteilung und Spezifikation das Ablesen von Zehntelgraden ermöglicht.

Zum Messen der Zimmertemperatur reicht aber auch ein Thermometer mit einer geringeren Auflösung, mit einer Skaleneinteilung von 1°C aus.

Beispiel zur Wahl des Messgeräts aufgrund der Einstellzeit (Antwortzeit):

Die elektrische Potenzialänderung des Herzens ist so schnell, dass man ihr mit einem analogen oder digitalen Handmessgerät nicht folgen kann, denn die Antwortzeit beträgt ca. 1–2 s. Deshalb benutzt man zur Verfolgung der EKG-Zeitfunktion ein analoges oder digitales Oszilloskop.

 **Messwert**
 mért érték
 measured value

 **wahrer Wert**
 tényleges érték
 true value

Beispiel für den absoluten und relativen Fehler:




Mit einer Tarierwaage messen wir eine „Etalon“ Masse von 1 kg. Die gemessene Masse zeigt aber 0,993 kg. Der absolute Fehler ist:

$$H = |0,993 - 1| = 0,007 \text{ kg} = 7 \text{ g},$$

der relative Fehler ist:

$$h = (|0,993 - 1| / 1) = 0,007 = 0,7\%.$$

 **Genauigkeit**
 pontosság
 accuracy

 **Präzision**
 precizitás
 precision, repeatability

DIE WICHTIGSTEN MESSTECHNISCHEN MERKMALE DER MESSGERÄTE

Messbereich, Messgrenze

Messungen lassen sich mit jedem Messgerät nur innerhalb eines bestimmten **Messbereichs** durchführen, der von dem kleinsten und dem größten noch messbaren Wert begrenzt ist. Meist ist der Minimalwert Null, der Maximalwert die **Messgrenze** selbst. Einfache Messgeräte haben eine einzige Messgrenze, während sich die Messgrenze bei komplizierteren Messgeräten variieren lässt, so können sowohl kleinere als auch größere physikalische Größen mit fast gleicher Genauigkeit gemessen werden. Bei Messungen von Größen über der Messgrenze nimmt der Messfehler zu, auch kann das Gerät durch Überlastung geschädigt werden. Deshalb soll man vor der Messung wenigstens eine grobe Schätzung der Messgröße haben, um einer Überlastung vorzubeugen. Aufgrund des Schätzwertes wählt man das Messgerät, dessen Messbereich den Schätzwert enthält. Danach wählt man die Messgrenze, die dem Schätzwert am nächsten kommt, diesen aber sicher überschreitet, denn so erreicht man die minimale Messunsicherheit. Aus Vorsicht schadet es aber nicht, wenn man die Messung mit Einstellung des Messgeräts auf die maximale Messgrenze beginnt und diese dann nur allmählich verringert.

Empfindlichkeit des Messgeräts, Gerätekonstante

Die **Empfindlichkeit des Messgeräts** ist der Quotient aus angezeigtem Wert und Änderung des Messsignals. Aus praktischen Gründen wird oft der Reziprokwert der Empfindlichkeit, die **Gerätekonstante** benutzt.

Bei einem analogen Messgerät drückt die Gerätekonstante aus, welcher Messgröße ein Skalenteil (der kleinste ablesbare Teilstrich) entspricht. Bei digitalen Geräten drückt die Gerätekonstante aus, welcher Messgröße der kleinste anzeigbare Wert (*Digit*) entspricht.

Auflösung des Messgeräts

Aber auch die innerhalb des Messbereichs liegenden physikalischen Größen können mit dem Messgerät nicht unbedingt voneinander unterschieden werden: wenn sie zu nahe beieinander liegen, wird der angezeigte Wert gleich sein. Die **Auflösung** des Geräts ist die kleinste *Abweichung*, die zwischen zwei, noch eindeutig unterscheidbaren angezeigten Werten besteht.

Antwortzeit des Messgeräts

Die Antwortzeit des Messgeräts ist die Zeit, in der sich nach Änderung der Messgröße der veränderte angezeigte Wert stabilisiert. So wird z. B. die Antwortzeit von Zeigergeräten oft von der Einstellzeit des Zeigers bestimmt.

MESSFEHLER

Der mit Messung bestimmte Wert (Messzahl) stimmt oft nicht mit dem wahren Wert der Messgröße überein, die Differenz ist der **Messfehler** (Abb. 3c). Das kann verschiedene Gründe haben, z. B.:

- Fehler des Messgeräts
- Fehler der Messmethode
- Ungenauigkeit bei der Ablesung.

Absolute Messfehler

Aus der Differenz zwischen dem wahren Wert (X_{wahr}) und dem mit der Messung festgestellten Wert (X_{gemessen}) ergibt sich der absolute Messfehler:

$$H = |X_{\text{gemessen}} - X_{\text{wahr}}| \quad (2)$$

Relative Messfehler

Der relative Messfehler ist der (in Prozenten ausgedrückte) Quotient von absolutem Fehler und wahren Wert.

$$h = \frac{\text{absoluter Fehler}}{\text{wahrer Wert}} = \frac{|X_{\text{gemessen}} - X_{\text{wahr}}|}{X_{\text{wahr}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Präzision und Genauigkeit

Die zwei charakteristischen Parameter des Messfehlers sind Präzision und Genauigkeit. Obwohl diese im Alltag als Synonyme benutzt werden (s. Randbemerkung), haben sie in der Messtechnik eine genau definierte Bedeutung (Abb. 3).

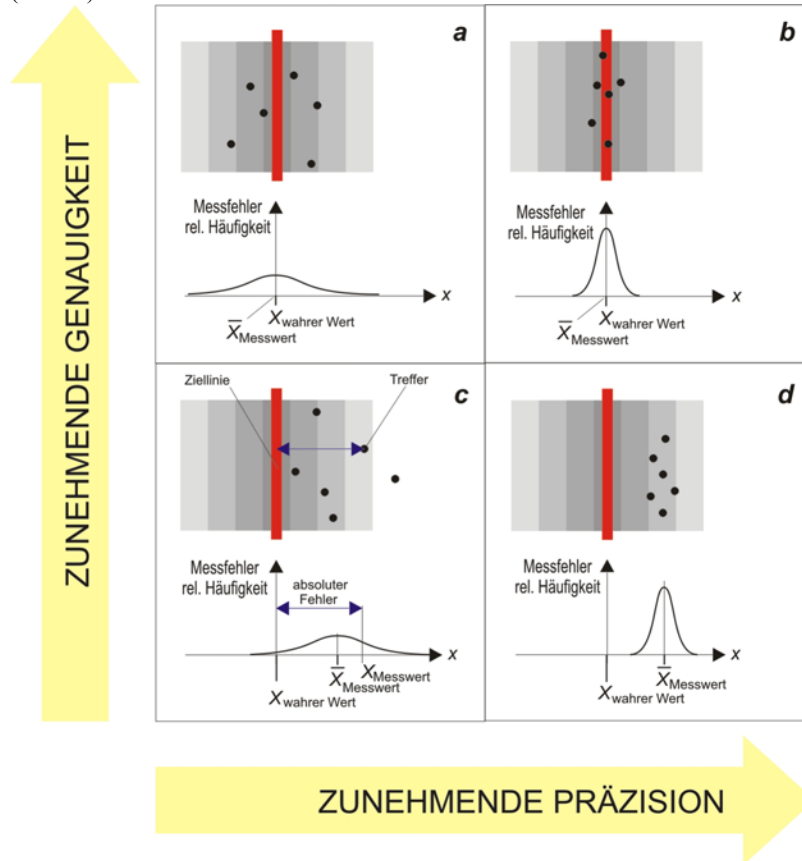


Abb. 3. Illustration von Präzision und Genauigkeit am Zielschießen. Der blaue Pfeil zeigt die Größe des Fehlers bei einem Schuss (einer Messung).

Zufallsfehler, Präzision

Wird eine gegebene Messung mehrmals wiederholt, so sieht man, dass die Messwerte mehr oder weniger von den wahren Werten abweichen. Die so entstandenen Fehler, deren Größe und Vorzeichen sich zufällig ändern, bezeichnet man als **Zufallsfehler** (stochastische Fehler). Ihre Ursache lässt sich nicht beseitigen (und ist oft unbekannt), ihre Größe lässt sich nicht vorherbestimmen. Der Zufallsfehler folgt charakteristisch der Normalverteilung, seine Dichtefunktion ist glockenförmig (s. Abb. 3 bzw. **STATISTIK**). Unter **Präzision** versteht man, **in welchem Grad die wiederholten Messergebnisse voneinander abweichen**, d. h. wie **reproduzierbar** die Messergebnisse sind: je weniger die Ergebnisse voneinander abweichen, desto präziser ist die Messung. Die Präzision wird in der Regel mit einem statistischen Streuparameter (Streuung, relative Streuung) ausgedrückt. Die Unsicherheit durch den Zufallsfehler kann gemindert werden, wenn man statt eines einzigen Messwertes den Mittelwert wiederholter Messungen nimmt.

Systematischer Fehler, Genauigkeit

Es kommt aber vor, dass auch der Mittelwert einer großen Zahl von Messungen vom wahren Wert abweicht. Das ist der **systematische Fehler** (Verzerrung, *Offset-Fehler*), dessen Grad mit der **Genauigkeit** des Geräts charakterisiert wird. Darunter versteht man, **wie weit der Mittelwert der wiederholten Messwerte vom wahren Wert abweicht**: je geringer diese Abweichung ist, desto genauer ist die Messung. Im Gegensatz zum Zufallsfehler ist die Ursache des systematischen Fehlers in der Regel bekannt, der Grad lässt sich bestimmen (deterministisch), mit ihm kann dann die **Korrektur** des angezeigten Wertes durchgeführt werden (Kalibration).

„It is better to be roughly right than precisely wrong“

Alan Greenspan, 1997

An der Schießbude muss man mit einem Luftgewehr ein senkrecht Stäbchen treffen. Die Treffer eines „Anfängers“ sind - wenn die Zielvorrichtung auch noch schlecht eingestellt ist - weder **genau** noch **präzise**, d. h. die Treffer sind in einer Richtung verschoben und streuen stark (Abb. 3c). Die Schüsse des „Profischützen“ können zwar **präzise** sein, sind aber nicht **genau**, wenn die Zielvorrichtung auch weiterhin schlecht eingestellt ist, d. h. die Treffer sind auch hier in einer Richtung verschoben, streuen aber nur gering (Abb. 3d). Mit Einstellen der Zielvorrichtung kann die Verschiebung korrigiert werden, d. h. die **Genauigkeit** wird in beiden Fällen besser (Abb. 3a,b).

Beispiel für systematische und stochastische Fehler:

Bei Messen der Körpergröße wird die Distanz vom Scheitel bis zur Sohle gemessen. Stochastische Fehler können sich aus der Ungenauigkeit der Messlatte, der aktuellen Haltung der gemessenen Person (gerade oder gebeugt), der Ablesegenauigkeit der messenden Person usw. ergeben. Die so entstandenen Fehler sind unterschiedlich groß, vergrößern oder verkleinern die wahre Körpergröße. Durch Mittelung oft wiederholter Messungen verringert sich der stochastische Fehler.

Zum schnellen Messen wird die Größe oft nicht barfuß, sondern in Schuhen gemessen, was zu einem systematischen Fehler führt. Die Sohlendicke der Schuhe addiert sich immer zum Messwert. Durch Abziehen einer mittleren Sohlendicke vom Messergebnis kann der systematische Fehler kompensiert werden.

Messunsicherheit
mérési bizonytalanság
uncertainty of measurement

Beispiel für die Messunsicherheit bei Geräten mit analoger Anzeige:

Sei beim Messen des Membranpotenzials mit einer Endablenkung von 200 mV der abgelesene Wert $X_{\text{gemessen}} = -92$ mV. Beträgt die angegebene Messunsicherheit des analogen Geräts 1%, so wird die Messunsicherheit bei jedem abgelesenen Wert $H_{\text{max}} = 200 \text{ mV} \cdot 1\% = 2 \text{ mV}$ sein. Der Messwert des Membranpotenzials ist also mit Angabe der Messunsicherheit (4): $-92 \text{ mV} \pm 2 \text{ mV}$.

Beispiel für die Messunsicherheit bei Geräten mit digitaler Anzeige:

Gleichfalls ist beim Messen des Membranpotenzials mit einer Messgrenze von 200 mV der abgelesene Wert $X_{\text{gemessen}} = -91,85$ mV. Ist die angegebene Messunsicherheit des digitalen Geräts $0,1\% \cdot X_{\text{gemessen}} + 3 \cdot \text{Digit}$, dann ist die Messunsicherheit beim abgelesenen Wert $H_{\text{max}} = 91,85 \text{ mV} \cdot 0,1\% + 3 \cdot 0,01 \text{ mV} = 0,12 \text{ mV}$. Der Messwert des Membranpotenzials ist also mit Angabe der Messunsicherheit: $-91,85 \text{ mV} \pm 0,12 \text{ mV}$.

Angabe der Messunsicherheit bei Messgeräten

Die bei der Spezifikation der Messgeräte angegebene sog. **Messunsicherheit** enthält die bei Messungen mit dem gegebenen Gerät vorkommenden stochastischen und systematischen Messfehler. Der Fehler des Messwertes wird bei gegebenem Gerät mit dem maximal möglichen Fehler (H_{\max}) wie folgt gekennzeichnet:

$$X_{\text{gemessen}} \pm H_{\max} \quad (4)$$

Bei analogen Messgeräten ist die Messunsicherheit ein gegebener Prozentsatz des Wertes bei der maximalen Auslenkung (Messgrenze). **Bei digitalen Messgeräten** wird die Messunsicherheit durch die Summe von gegebenem Prozent des Messwertes und sog. Quantifizierungsfehler angegeben. Der Quantifizierungsfehler wird als Vielfaches des geringsten Stellenwertes angegeben.

Ist der Messwert bedeutend geringer als der Maximalwert der gegebenen Messgrenze, so kann der relative Fehler sehr groß werden. Deshalb muss die Messgrenze so gewählt werden, dass sich der Messwert möglichst nah an der Messgrenze befindet (s. Abb. 5).

MESSUNGEN

MESSUNGEN MIT EINEM DIGITALEN MULTIMETER

Das im Praktikum benutzte digitale Multimeter (DMM, Typ: *Metex 3800*; Abb. 4) ist ein Mehrfunktionsmessgerät mit Ziffernanzeige, mit dem Gleich- und Wechselspannung, Gleich- und Wechselstrom sowie elektrischer Widerstand mit einer Genauigkeit von $3\frac{1}{2}$ Ziffern gemessen werden können. Letzteres bedeutet, dass während der Zahlenwert der letzten 3 vollwertigen Charakter von 0-9 reichen kann, der Zahlenwert des „halben“ Charakters mit höchstem Stellenwert nur 0 oder 1 sein kann (d. h. der maximale Anzeigewert der 4 Charakter ist ± 1999). Bei Gleichstrommessungen bedeutet das Zeichen „-“ die negative Polarität, die positive Polarität wird nicht angezeigt. Das Ein- und Ausschalten des Geräts erfolgt mit dem Schalter ON-OFF. An das Gerät können gleichzeitig zwei Messdrähte mit Bananenstecker angeschlossen werden. Der eine Draht wird immer an den Masseanschluss COM gekoppelt. Der andere Messdraht wird wie folgt angeschlossen:

- a) bei Messen von Gleichspannung (**DCV**), Wechselspannung (**ACV**) bzw. Widerstand (**OHM**) in den Messanschluss für Spannung und Widerstand **V/ Ω** ,
- b) bei Messen von Gleichstrom (**DCA**), Wechselstrom (**ACA**) bis zur Stromstärke 2 A in den Messanschluss **A**, bzw. bis 20 A in den Messanschluss **20A**.



Abb. 4. Bedienungsfläche des digitalen Multimeters (Das Gerät zeigt bei der Widerstandsmessung gerade einen Riss)

Messgrenzen

Mit dem Drehgeber in der Mitte kann die Messgrenze im Bereich der Messgröße wie folgt gewählt werden:

- a) bei Gleichspannungsmessung in **DCV**
- b) bei Wechselspannungsmessung in **ACV** (zeigt die effektive Spannung)
- c) bei Widerstandsmessung in **OHM**
- d) bei Gleichstrommessung in **DCA**
- e) bei Wechselstrommessung in **ACA** (zeigt die effektive Stromstärke)

Die **Messgrenze** zeigt, wie groß in der gegebenen Stellung die maximale anzeigbare Messgröße ist (z. B. bei Spannungsmessung bei der Messgrenze „2“ ± 2 V, genauer $\pm 1,999$ V, da $\pm 2,000$ V gerade nicht mehr auf der Anzeige erscheinen können). Die Zeichen μ (Mikro), m (Milli), k (Kilo), M (Mega) nach den Ziffern der Messgrenzen sind die Präfixe der Maßeinheit des auf der Anzeige abgelesenen Wertes (beträgt z. B. bei Gleichstrommessung im DCA Bereich mit der Messgrenze 20m der angezeigte Wert „4,94“, dann ist der Messwert $+4,94$ mA). Die Messung wird immer bei der größten Messgrenze begonnen und dann die Messgrenze schrittweise solange gesenkt, bis auf der Anzeige der Wert erscheint, der der Messgrenze am nächsten kommt.

Messung von Gleichspannung

Die Rolle der Messgrenzenänderung demonstrieren wir anhand der Spannungsmessung, natürlich ist das Prinzip auch bei Strom- und Widerstandsmessungen anzuwenden (Abb. 5). Der innere Widerstand des Spannungsmessers ist fast unendlich, deshalb kann seine Belastung der Spannungsquelle vernachlässigt werden.

Als Spannungsquelle benutzen wir eine Flachbatterie mit 4,5 V Nennspannung. Den Drehschalter der Messgrenze stellen wir zu Beginn in die 1000 V Maximalstellung des **DCV** Bereichs. Die Messdrähte koppeln wir laut Abb. 5 an das digitale Multimeter bzw. mit Krokodilklemmen an die Flachbatterie (Parallelschaltung). Beim Tausch von positivem (+) und negativem (-) Pol erscheint auf der Anzeige das entgegengesetzte Vorzeichen.

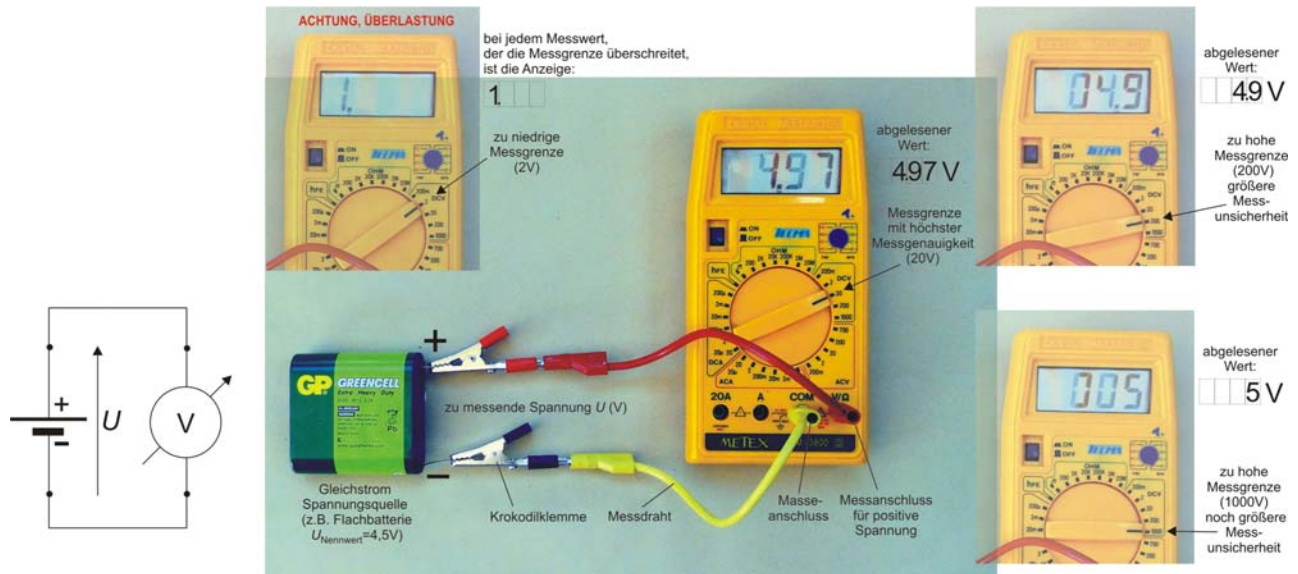


Abb. 5. Messung von Gleichspannung mit dem digitalen Multimeter. Die Wirkung der Messgrenzen auf die Messunsicherheit.

Für die genauere Messung ist es zweckmäßig, innerhalb des Messbereichs eine Messgrenze zu wählen, welche die geringste Messunsicherheit verursacht. Das wird bei der obigen Messung die 20 V Messgrenze sein. Bei der 20 V Messgrenze können natürlich 4,5 V nicht mehr angezeigt werden, in diesem Fall ist das Gerät überlastet und auf der Anzeige erscheint (bei jeder Spannung über 2 V) 1.000. In diesem Fall muss um eine Stufe zur höheren Messgrenze zurückgeschaltet werden, wo man schon mit einer Genauigkeit von 3 Ziffern ablesen kann. Beachten wir die Zunahme der Messunsicherheit bei weiterer Erhöhung der Messgrenze!

In der Spezifikation des Messgeräts ist der garantierte Fehler H_{\max} der Gleichspannungsmessung kleiner als

$$0,5\% \cdot X_{\text{gemessen}} + 1 \cdot \text{Digit.} \quad (5)$$

Messen wir die Spannung der Batterie und berechnen wir laut Gl. (5) die Messunsicherheit!

gemessene Spannung der Flachbatterie, U_{gemessen}		V
kleinster Stellenwert, Digit		V
Messunsicherheit, H_{max}		V
Messwert mit Angabe der Messunsicherheit	\pm	V

Messung der Gleichstromstärke, Kontrolle des ohmschen Gesetzes

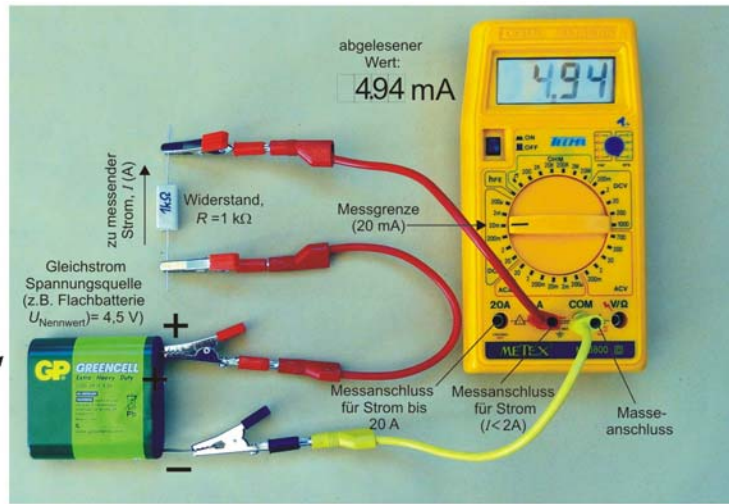
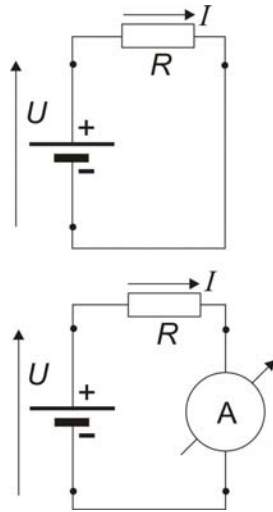


Abb. 6. Stromstärkemessung durch einen Widerstand

Den Drehschalter für den Messbereich stellen wir anfangs auf 2 A im Bereich **DCA**. Die Messdrähte koppeln wir laut Abb. 6 an das DMM. Die Spannungsquelle der Messung ist die Flachbatterie der vorherigen Messung. Die Stromstärke messen wir laut Schaltung in Abb. 6 durch einen Widerstand (1 kΩ).

Das Amperemeter wird immer mit Unterbrechung des Stromkreises in Reihe geschaltet. Da der innere Widerstand des Amperemeters annähernd null ist, ändert sein Koppeln in den Stromkreis den im Stromkreis fließenden Strom nicht wesentlich. Die Gültigkeit des ohmschen Gesetzes kann kontrolliert werden, indem man die zuvor gemessene Spannung der Flachbatterie mit der gerade gemessenen Stromstärke dividiert ($R = U/I$). So erhält man den Wert des Widerstands im Stromkreis.

Messen wir die durch den Widerstand fließende Stromstärke und berechnen wir den Widerstand!

gemessene Stromstärke, I		mA
berechneter Wert des Widerstands, R		kΩ

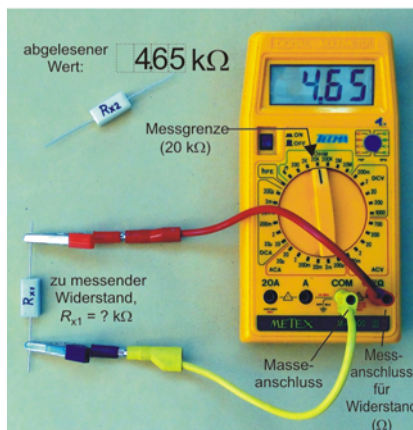
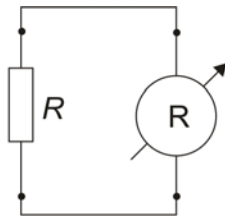


Abb. 7. Direkte Widerstandsmessung

Widerstandsmessung

Den Drehschalter für den Messbereich stellen wir anfangs auf 2 MΩ im Bereich **OHM**. Die Messdrähte koppeln wir laut Abb. 7 an das DMM. Bei direkter Widerstandsmessung misst das Messgerät gleichfalls Strom, dazu benutzt es aber eine innere Spannungsquelle und auf der Anzeige erscheint der daraus berechnete Widerstand.

Messen wir in der Schaltung laut Abb. 7 die Widerstände R_{x1} bzw. R_{x2} !

Messwert des einen unbekannten Widerstands, R_{x1}		kΩ
Messwert des anderen unbekannten Widerstands, R_{x2}		kΩ

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

Wählen wir zwei beliebige Widerstände mit bekanntem Nennwert und verwirklichen wir die Reihen- bzw. Parallelschaltung laut Abb. 8 und messen wir dann die Gesamtwidestände! Vergleichen wir die Messwerte mit den Ergebnissen der Berechnung aus den Nennwerten!

$$R_{\text{in Reihe gesamt}} = R_1 + R_2$$

$$R_{\text{parallel gesamt}} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$$

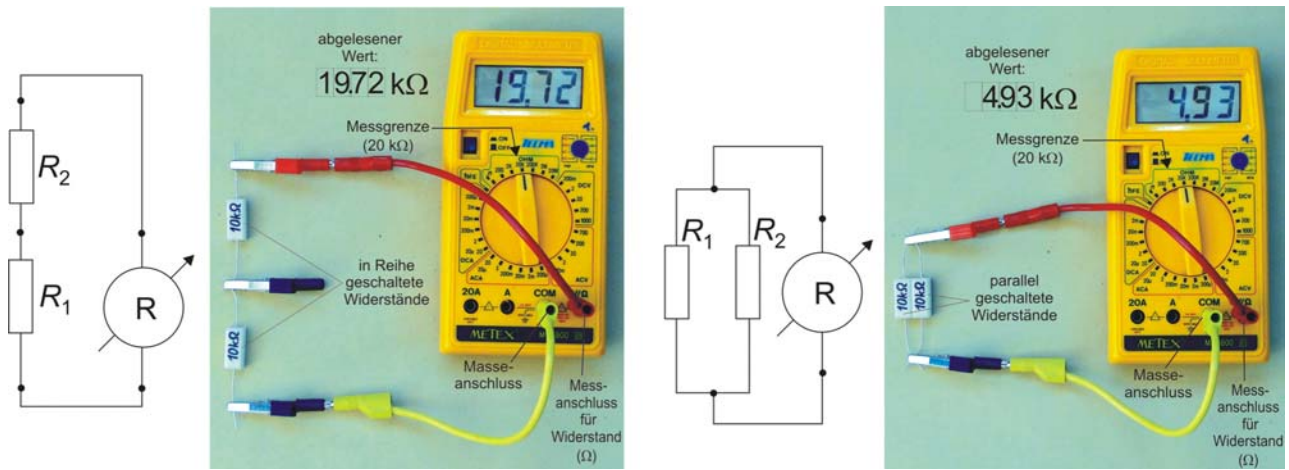


Abb. 8. Direkte Messung des Gesamtwiderstands bei Reihen- und Parallelschaltung

Messwert des einen Widerstands, R_1		kΩ
Messwert des anderen Widerstands, R_2		kΩ
berechneter Gesamtwiderstand in Reihe, $R_{\text{in Reihe gesamt}}$		kΩ
gemessener Gesamtwiderstand in Reihe, $R_{\text{in Reihe gesamt}}$		kΩ
berechneter Gesamtwiderstand, parallel, $R_{\text{parallel gesamt}}$		kΩ
gemessener Gesamtwiderstand, parallel $R_{\text{parallel gesamt}}$		kΩ

Messung von spannungsteilenden Widerständen (optional)

Mit einer Flachbatterie und zwei beliebigen Widerständen verwirklichen wir die Schaltung laut Abb. 9! Beweisen wir mit Messungen, dass der Spannungsteiler die Spannung der Flachbatterie im Verhältnis der Widerstände senkt!
 $U_1 = U \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$.

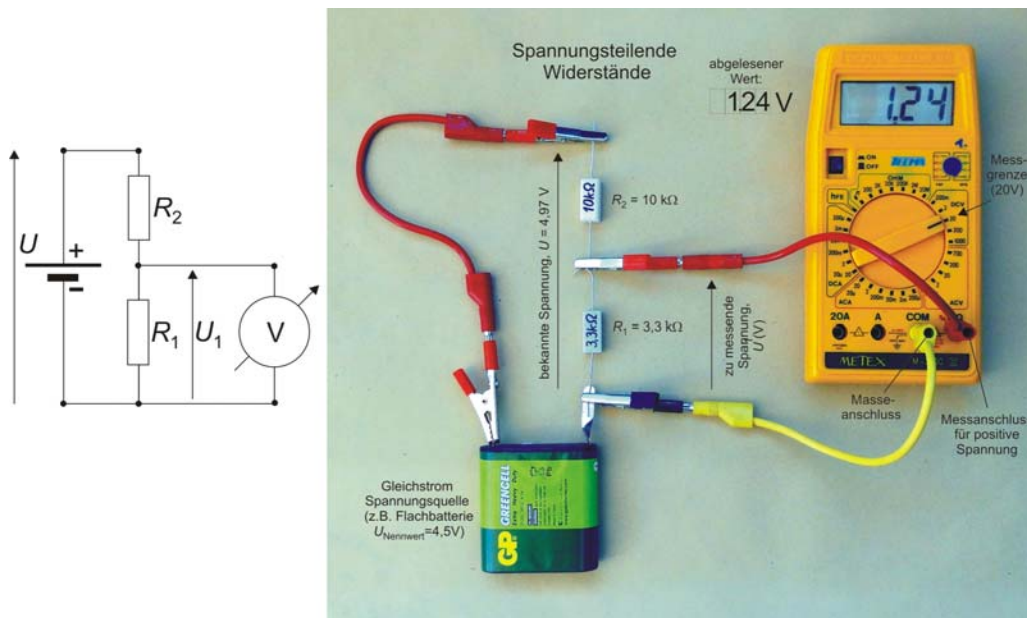


Abb. 9. Messung von spannungsteilenden Widerständen

berechnetes Verhältnis der Widerstände, $R_1 / (R_1 + R_2)$		
gemessene Spannung der Flachbatterie, U		V
geteilte berechnete Spannung, $U_1 = U \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$		V
gemessene geteilte Spannung, U_1		V
berechnetes Verhältnis der Spannungen, U_1 / U		

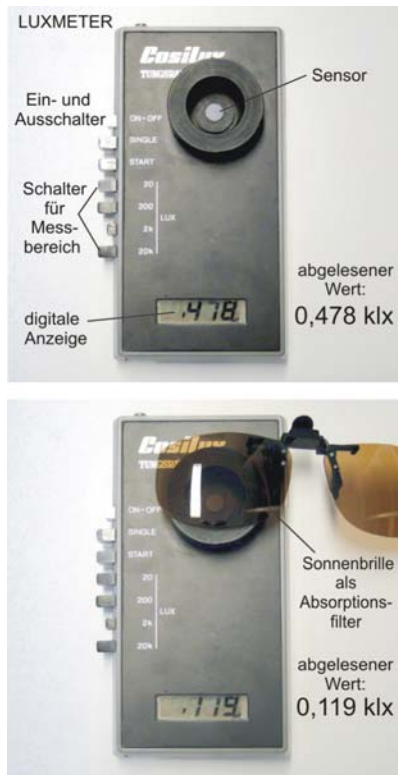


Abb. 10. Digitaler Lichtmesser

BELEUCHTUNGSMESSUNG MIT DEM DIGITALEN LUXMETER

Der digitale Beleuchtungsmesser (Typ: *Tungsram Cosilux*) in Abb. 10 misst die Beleuchtungsstärke, deren Einheit lux (lx) ist, deshalb wird das Gerät auch als Luxmeter bezeichnet.

Wir schalten das Luxmeter auf dem Tisch in horizontaler Position ein und beginnen dann die Messung der Deckenbeleuchtung des Praktikumsraums mit maximaler Stellung des Messbereichsschalters (20k).

Auch hier erreichen wir die minimale Messunsicherheit so, dass wir mit dem Messbereichsschalter stufenweise in den Bereich mit höherer Empfindlichkeit schalten (20k→2k→200→20 lx), bis wir auf der Anzeige die meisten Ziffern sehen. Ist die zu messende Beleuchtungsstärke höher als die aktuelle Messgrenze, so zeigt das Gerät auch hier die Überlastung an (1.□□□).

Wiederholen wir die Messung, indem wir eine lichtabsorbierende Schicht (z. B. eine Sonnenbrille) vor den Sensor platzieren! Berechnen wir, auf den wievielten Teil der Lichtabsorber die Stärke des einfallenden Lichts mindert!

gemessene Lichtstärke ohne Absorption		lx
gemessene Lichtstärke mit Absorption		lx
Schwächungsrate		

LEITFÄHIGKEITSMESSUNG MIT ANALOGEM KONDUKTOMETER

Bei entsprechend dünnen Lösungen ist die spezifische Leitfähigkeit (s. 29. DIFFUSION) direkt proportional zur Ionenkonzentration. Das macht es möglich, auf die Konzentration der gegebenen Lösung mittels eines Kalibrierdiagramms zu folgern.

In unserem Praktikum messen wir die Leitfähigkeit von drei Lösungen:

- ionenausgetauschtes Wasser
- Leitungswasser
- NaCl Lösung mit der Konzentration 500 mmol/l

Schalten wir das analoge Konduktometer (*Radelkis OK-102/1*) ein und warten wir ungefähr 5 Minuten, bis sich das Gerät erwärmt hat. Dann stellen wir mit dem Potentiometer **CALIBRATION** den Zeiger des Gerätes auf das rote Zeichen (Wert 5 der oberen Skala) während wir den Schalter **CALIBRATION** (schwarzer Knopf am rechten Rand) eingedrückt halten (s. Abb. 11).

Füllen wir zuerst ca. 25 cm³ ionenausgetauschtes Wasser aus der entsprechenden Spritzflasche in den Messzylinder und senken dann die Elektrode so in die Flüssigkeit, dass die Lösung alle drei schwarzen Ringe (d. h. die Messelektroden) bedeckt!

Den abgelesenen Wert bestimmt, auf welchen Wert der Zeiger auf der gewählten Skala zeigt. Die Teilstriche zwischen den Ziffern der Skala helfen beim Ablesen des Messwertes. Der Zeiger zeigt oft zwischen zwei Teilstrichen, dann kann der abgelesene Wert durch Schätzung präzisiert werden.

Die Messgrenze wird (beginnend bei der maximalen Messgrenze) zum Messen auf die kleinste Messgrenze über dem Messwert eingestellt. (Der Zeiger soll nicht zu nahe an 0 stehen, dann ist nämlich die Messunsicherheit sehr groß, aber auch nicht über die Skala hinausgehen, denn dann ist das Ablesen unmöglich und das Gerät wird auch überlastet.)

Auf welcher Skala der Wert abzulesen ist, bestimmt sinngemäß die Position des Messbereichsschalters. (So bedeuten z. B. bei der Messgrenze 50 µS die Endablenkung 5 auf der oberen Skala den Wert 50 µS und bei der Messgrenze 150 µS der Wert 15 auf der unteren Skala 150 µS.

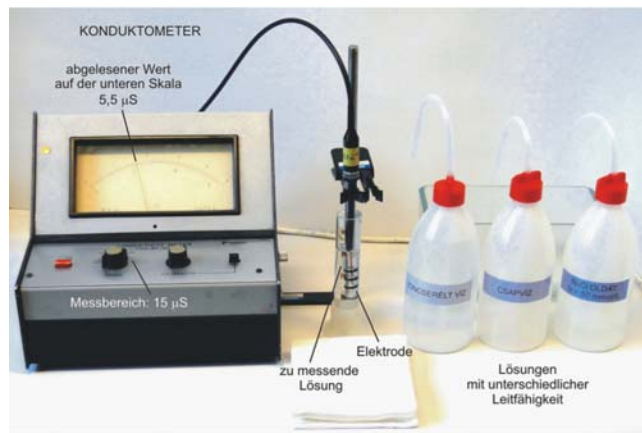


Abb. 11. Messanordnung des analogen Konduktometers und Gebrauch der Skalen

Der in der Gerätespezifikation garantierte Fehler H_{\max} der Leitfähigkeitsmessung ist kleiner als

$$2\% \cdot X_{\text{Messgrenze}} \quad (6)$$

Messen wir die Leitfähigkeit der unteren Lösungen und berechnen wir nach Gl. (6) die Messunsicherheit!

Lösung	gemessene Leitfähigkeit	Messunsicherheit	Einheit
ionenausgetauschtes Wasser, $G_{\text{ionenausgetauschtes Wasser}}$		\pm	...S
Leitungswasser, $G_{\text{Leitungswasser}}$		\pm	...S
NaCl Lösung ($c = 500 \text{ mmol/l}$), G_{NaCl}		\pm	...S

MESSUNGEN MIT DEM DIGITALEN OSZILLOSKOP

Das Oszilloskop ist ein Messgerät, das sich zur Darstellung von zeitvarianten physikalischen Größen (z. B. elektrische Spannung) in Echtzeit, funktionsartig in x und y Koordinaten eignet.

Bildschirm und Bedienungsfläche eines digitalen Oszilloskops (Abb. 12) erscheinen in der Regel auf dem Computermonitor. Mittels Mausklick lassen sich die auf dem Bildschirm angezeigten Funktionen der einzelnen Schalter aktivieren. Im Gegensatz zu den anderen digitalen Geräten mit Ziffernanzeige ist hier das Messergebnis (die gezeichnete Funktionslinie) keine Zahl, sondern eine Graphik und ähnelt dem Bild auf einem analogen Oszilloskop. Der Unterschied liegt im Verarbeitungsprozess der Messdaten sowie in der Ausgabemöglichkeit von numerischen Daten durch den Cursor.

Die horizontale x -Achse auf dem Bildschirm entspricht der Zeitachse der untersuchten Funktion. Auf der vertikalen y -Achse erscheint der Funktionswert des untersuchten Signals (in elektrische Spannung umgesetzter Wert). Auf dem Bildschirm sind horizontale und vertikale Gitterlinien der Skaleneinteilung zu sehen.

Die auf den Schaltern der Zeitbasis und der vertikalen Empfindlichkeit angezeigten Werte (Gerätekonstanten) bedeuten, wieviel ms ein horizontaler Skalenteil (**Time/Div**) bzw. wieviel V ein vertikaler Skalenteil (**Volts/Div**) auf dem Bildschirm entspricht. Mittels dieser Daten können an dem Graphen des untersuchten Signals Zeit- und Amplitudenmessungen durchgeführt werden.

Das Umschalten der Messgrenze betrifft beim Oszilloskop sowohl den maximalen Anzeigewert (Messgrenze), als auch die Gerätekonstante.

Am digitalen Oszilloskop ist aber das Ablesen von Amplitude oder Zeit sehr einfach. Beim Aktivieren von **View/Markers** im Menüband erscheinen je zwei

vertikale bzw. horizontale gestrichelte Linien (Cursors), deren Position mit der Maus beliebig verschoben werden kann. Führt man den Cursor auf einen charakteristischen Punkt des Signals (z. B. Minimum, Maximum oder zwei entgegengesetzte Spitzen, so kann man die Amplitudendifferenz (**dV**) bzw. die Zeitdifferenz (**dt**) am unteren Bildschirmrand numerisch ablesen.

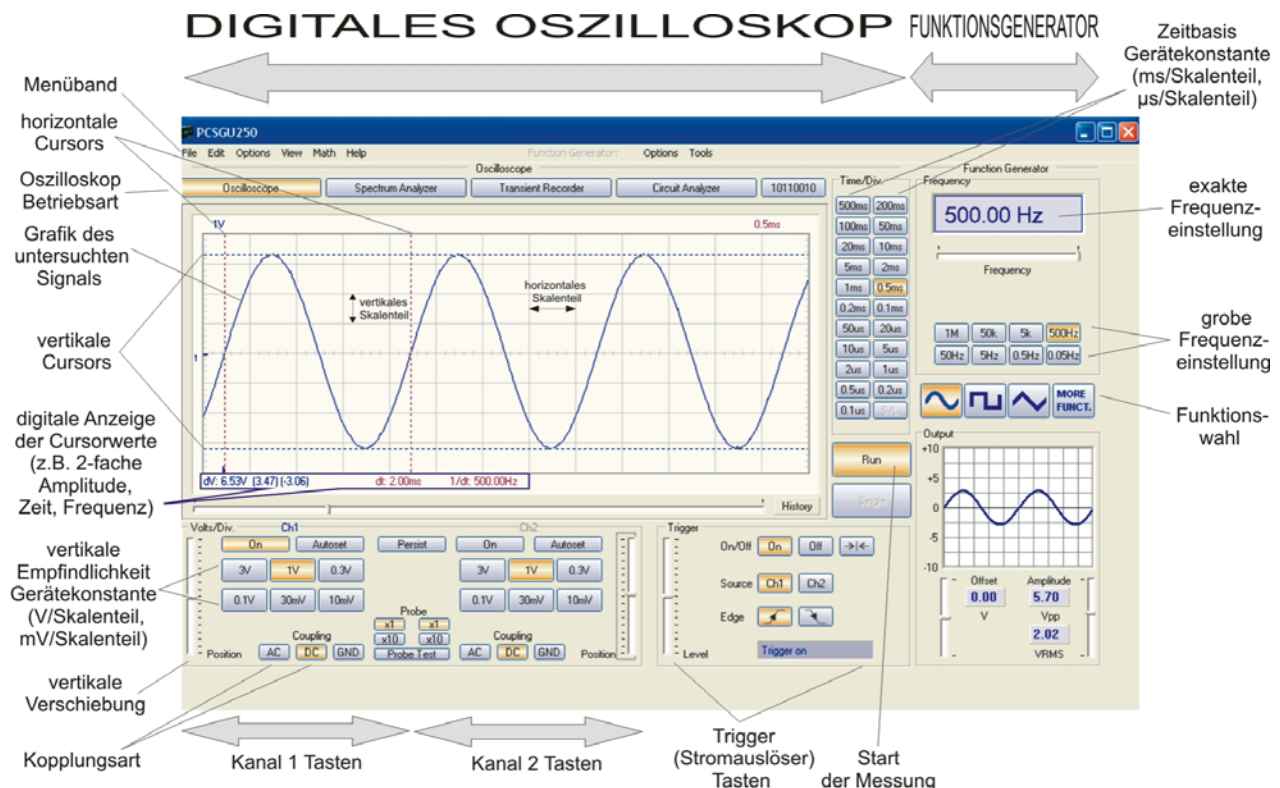


Abb. 12. Bedienungsfläche des digitalen Oszilloskops

Das im Praktikum benutzte digitale Oszilloskop (Velleman PCSGU 250) verfügt über zwei Signaleingänge und einen Funktionsgeneratorausgang (BNC-Stecker) und wird mit einem USB-Kabel an den Computer angeschlossen (s. Titelblatt, untere Abbildung). Der Bildschirm des Oszilloskops ist der Computermonitor. Der Funktionsgenerator kann digital Sinus-, Rechteck- usw. Funktionen mit beliebiger Amplitude und Frequenz erstellen. Bei den Messungen leiten wir seine Signale mittels eines Kabels in den einen Signaleingang des Oszilloskops (z. B. **Ch1**).

- Wählen wir am Funktionsgenerator die Sinusfunktion!
- Stellen wir mit den Knöpfen der groben Frequenzeinstellung die Schwingungsfrequenz auf 500 Hz ein!
- Drücken wir den Knopf **On** bei den Bedienelementen des 1. Kanals!
- Starten wir die Messung durch Drücken des Knopfes **Run**!
- Danach drücken wir den Knopf **Autoset**! Das Gerät stellt sich automatisch in die optimale Position ein (*Time/Div*, *Volts/Div*, *trigger*), so stabilisiert sich das Signal und nimmt eine Größe an, die sich gut studieren lässt. Natürlich kann das Bild des Signals mit den Knöpfen Zeitbasis und vertikale Empfindlichkeit auch manuell verändert werden.
- Zählen wir zuerst mit der gewöhnlichen Methode, wieviel Skalenteile eine Signalperiode bzw. die zweifache Amplitude (von Spitze zu Spitze) ausmacht! Danach multiplizieren wir die Zahl der erhaltenen Skalenteile mit der aktuell gültigen Gerätekonstante, die wir an dem eingedrückten Knopf ablesen können (z. B.: $T = 4,1 \text{ Skalenteil} \cdot 0,5 \text{ ms/Skalenteil} = 2,05 \text{ ms}$ bei horizontaler Messung der Periodendauer). Auf ähnliche Weise erhalten wir auch den Wert der zweifachen Amplitude.
- Lassen wir danach mit dem Knopf **View/Markers** im Menüband die Cursors erscheinen. Mittels Maus markieren wir eine Periode des Sinussignals bzw. die von Spitze zu Spitze gemessene zweifache Amplitude ($U_{\text{Sp-Sp}}$)! Lesen wir die

digital angezeigten Werte **dt** bzw. **dV** ab und vergleichen wir sie mit den in Punkt f) nach der gewöhnlichen Methode gemessenen Werten!

- h) Berechnen wir den effektiven Wert des Sinussignals! ($U_{\text{eff}} = 0,707 \cdot (U_{\text{Sp-Sp}})/2$)
- i) Obige Messungen können mit Signalfunktionen einer anderen Form, Frequenz und Amplitude wiederholt werden.

Periodendauer, T	mit gewöhnlicher Methode gemessen		mit Cursors gemessen	
Sinussignal, T_{Sin}		...s		...s
.....-Signal, $T_{\text{.....}}$...s		...s
$2 \cdot \text{Amplitude } (U_{\text{Sp-Sp}})$	mit gewöhnlicher Methode gemessen		mit Cursors gemessen	
Sinussignal, $U_{\text{Sp-Sp Sin}}$...V		...V
.....-Signal, $U_{\text{Sp-Sp}}$...V		...V
effektiver Wert des Sinussignals, U_{eff}				...V

- j) Nehmen wir den empfindlichen (nicht geerdeten) Zweig des Messkabels in die Hand und stellen wir – bei Bedarf durch Steigern der vertikalen Empfindlichkeit – auf dem Bildschirm ein starkes Rauschsignal ein! Nähern wir uns mit der freien Hand einem elektrischen Leiter (230 V, 50 Hz), so sehen wir, dass die Amplitude des Signals zunimmt. Die Quelle dieses Signals ist das elektrische Netz, das sich **kapazitiv an unseren Körper koppelt**. Die Elimination dieser **Störspannung durch das Stromnetz** ist bei diagnostischen Messungen der Signalspannung wichtig (s. [27. EKG](#)).