Einführung in die Messtechnik
Messen – Vorgang und Tätigkeit

Wolfgang Kessel

Braunschweig

Institut für Experimentalphysik

Messtechnik und experimentell arbeitende Wissenschaften?

Messtechnik ist mehr als nur quantitative Präzisierung anderweitig gewonnener Erkenntnisse; sie spielt eine wichtige Rolle im eigentlichen Erkenntnisprozess.

(1) Sie trägt dazu bei, in den Naturwissenschaften gemachte Beobachtungen in die Form mathematisch formulierbarer Gesetzmäßigkeiten zu bringen.

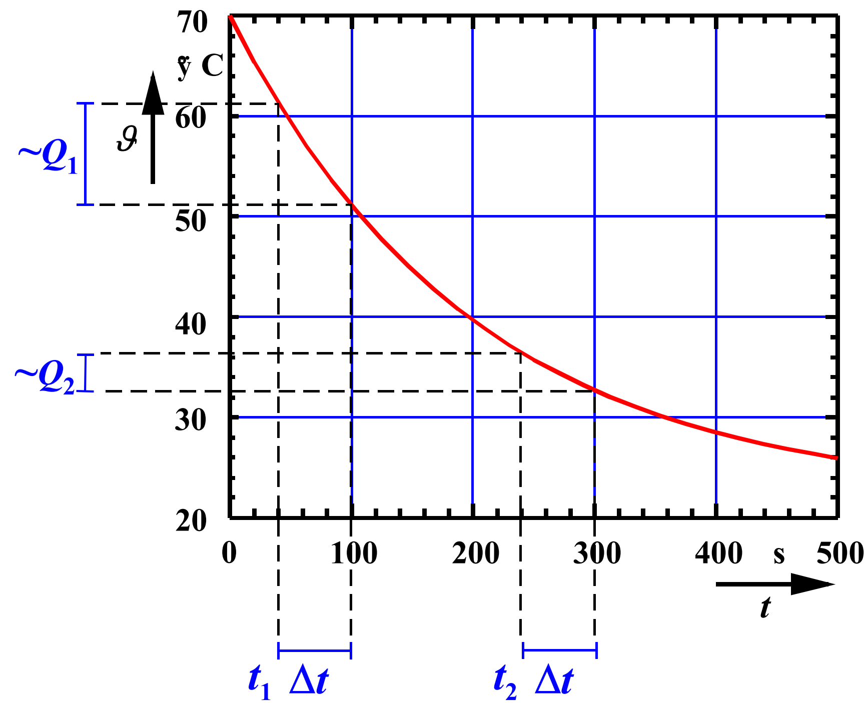
BEISPIEL **Abkühlungskurve**
Eine erhitzte Substanz (z.B. Flüssigkeit in einem Gefäss) kühlt sich in kälterer Umgebung ab.
Ein erfahrener Beobachter mit empfindlichen Temperaturgefühl wird vielleicht erkennen, dass die Abkühlung zu Beginn (Zeitpunkt t_1) schneller vor sich geht als später (Zeitpunkt t_2).
Doch erst durch laufende Messung der Substanztemperatur ϑ ist feststellbar, dass die je Zeit Δt abgegebene Wärmemenge Q proportional der Differenz $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{\mathrm{Amb}}$ zwischen der Substanztemperatur ϑ und der Umgebungstemperatur ϑ_{Amb} (ambient temperature) ist.

Daraus lässt sich der Abkühlungsprozess mathematisch als Abkühlungsgesetz

$$\dot{\vartheta} = \frac{d\vartheta}{dt} = -K_{\text{Cooling}}(\vartheta - \vartheta_{\text{Amb}})$$

formulieren.

Abkühlungskurve: Temperatur ϑ über der Zeit t. Die in **60 s** ab dem Zeitpunkt t_1 = **40 s** nach Messbeginn abgegebene Wärmemenge Q_1 ist der Temperaturdifferenz **61°C – 51°C = 10 K**, die ab dem Zeitpunkt t_1 = **240 s** abgegebene Wärmemenge Q_2 ist der Temperaturdifferenz **36°C – 32,5°C = 3,5 K** proportional.
Aus der Steigung der Tangente lässt sich die Zeitkonstante $\tau_{\text{COOLING}} = 1/K_{\text{Cooling}}$ des Prozesses ermitteln.



Ähnliche Beispiele für die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten aus Messergebnissen lassen sich in der Geschichte der Naturwissenschaften in großer Zahl finden; sie illustrieren eine effektive Form der Erkenntnisgewinnung. Dabei gilt, wie allgemein in der Messtechnik, dass die Resultate von Messungen um so besser sind, je tiefer die apriori-Kenntnisse über das Objekt oder den Vorgang sind.

(2) Es gibt in der Natur viele Erscheinungen, die man nur unter Zuhilfenahme Messmitteln wahrnehmen kann
- elektrische Vorgänge,
- Forschungen im mikroskopischen und
- Untersuchungen im atomaren Bereich.

(3) Auch durch theoretische Überlegungen gewonnene Erkenntnisse bedürfen stets einer experimentellen Bestätigung, die ohne entsprechende Messmittel nicht zu erbringen ist. Oft ist einzig und allein der Entwicklungsstand der Messtechnik ausschlaggebend dafür, ob und wann die Richtigkeit einer theoretischen Vorhersage bestätigt werden kann.

Wechselwirkungen in der Messung?

In einer Messung bestehen stets *Wechselwirkungen* zwischen

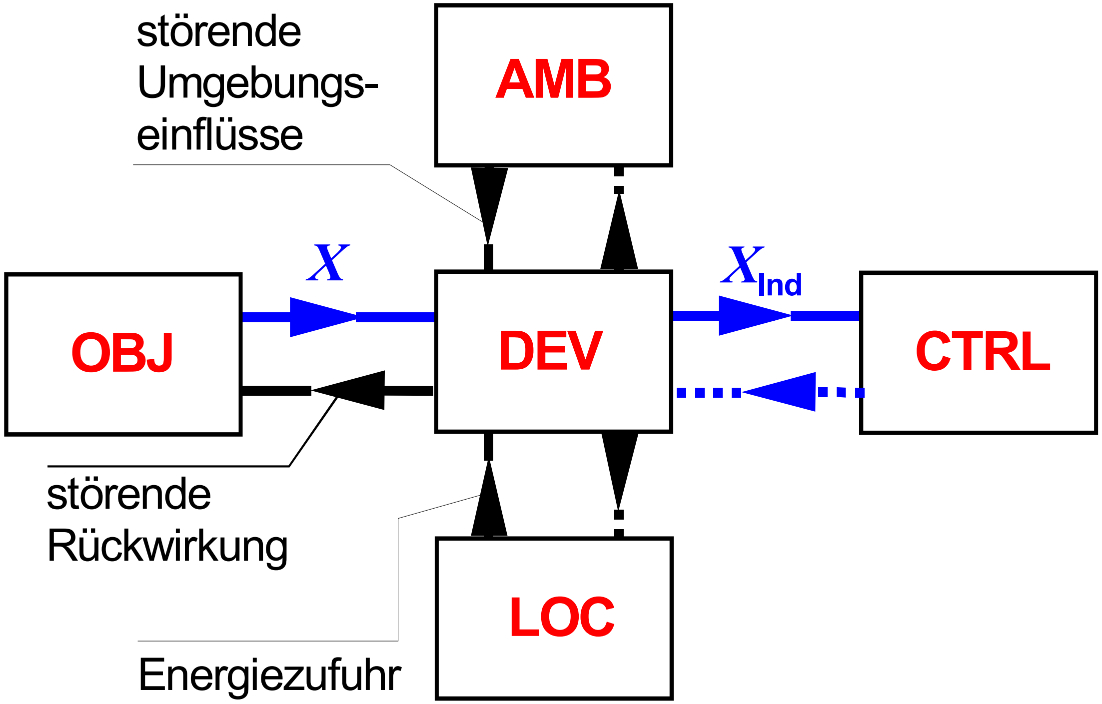
[erwünscht]
- Messobjekt und Messmittel (response);
- Messmittel und Messenden (Anzeige, indication);
- Messenden und Messmittel (Kontrolle, control);

[geduldet]
- Hilfsgeräten und Messmittel (Hilfsenergie);

[unerwünscht, aber kaum vermeidbar]
- Messmittel und Messobjekt (Rückwirkung, feedback);
- Messmittel und Umwelt (z.B. Erwärmung);
- Umwelt und Messobjekt (Störung);
- Umwelt und Messmittel (Störung);
- Umwelt und Messenden (Störung);
  (Störung durch Temperatur, Luftdruck, elektromagnetische Felder).

Messen – Vorgang und Tätigkeit

Wechselwirkungen



Wechselwirkungen, die bei der Messung eine Rolle spielen.

- OBJ - Messobjekt;
- DEV - Messgerät;
- CTRL - Anzeige, Steuerung;
- LOC - Hilfsenergie;
- AMB - Umgebung.

Zweck der Messung ist es, durch das Messgerät die Messgröße zu erfassen (Pfeil X) und in eine vom Messenden wahrnehmbare Größe (Pfeil X_{Ind}) umzuformen, d.h. nur die blauen Pfeile symbolisieren den erwünschten (idealen) Messvorgang.

Die Messwertbildung ist kein Vorgang, der nur in einer Richtung läuft. Das Messgerät tritt bei der Messung vielmehr mit dem Messobjekt in Wechselwirkung. Meist entzieht es dem Messobjekt Energie und verändert dadurch den Wert der Messgröße (*Rückwirkung*).

BEISPIEL **Rückwirkung bei der Temperaturmessung**

In einem thermisch gut isolierten Gefäss befindet sich eine auf **90°C** erhitzte Wassermenge, deren Temperatur gemessen werden soll. Dazu wird ein Quecksilber-Thermometer aus Glas in das Wasser getaucht, der Temperaturausgleich abgewartet und die Temperatur abgelesen.

Dabei hat das Thermometer Energie in Form von Wärme aufgenommen, die es dem Wasser entzogen hat. Letzteres hat sich entsprechend abgekühlt.

Die gemessene Temperatur ϑ_M ist somit nicht die gesuchte Temperatur ϑ_W des Wassers vor der Messung, über die etwas ausgesagt werden soll.

Beim Temperaturausgleich läuft ein Wärmeaustausch (Energie-Erhaltung) ab

$$\underbrace{C_{\mathrm{W}} \cdot (\vartheta_{\mathrm{W}} - \vartheta_{\mathrm{M}})}_{\text{von der Wassermenge (Messobjekt) abgegebene Wärmemenge}} = \underbrace{C_{\mathrm{Th}} \cdot (\vartheta_{\mathrm{M}} - \vartheta_{\mathrm{Th}})}_{\text{vom Thermometer (Messgerät) aufgenommene Wärmemenge}}$$

Wechselwirkungen, die bei der Messung eine Rolle spielen.

- C_{W} - Wärmekapazität des Wassers;
- ϑ_{W} - Temperatur des Wassers vor der Messung;
- C_{Th} - Wärmekapazität des Thermometers;
- ϑ_{Th} - Temperatur des Thermometers vor der Messung;
- ϑ_{M} - gemessene, d.h. am Thermometer abgelesene Temperatur.

Hieraus ergibt sich

$$\vartheta_{\mathrm{M}} = \frac{C_{\mathrm{W}} \cdot \vartheta_{\mathrm{W}} + C_{\mathrm{Th}} \cdot \vartheta_{\mathrm{Th}}}{C_{\mathrm{W}} + C_{\mathrm{Th}}}$$

$$= \vartheta_{\mathrm{W}} - \frac{C_{\mathrm{Th}}}{C_{\mathrm{W}} + C_{\mathrm{Th}}} (\vartheta_{\mathrm{W}} - \vartheta_{\mathrm{Th}})$$

oder

$$\vartheta_{\mathrm{M}} = \vartheta_{\mathrm{W}} + \Delta\vartheta$$

mit der Abweichung

$$\Delta\vartheta_{\mathrm{M}} = \vartheta_{\mathrm{M}} - \vartheta_{\mathrm{W}}$$

$$= -\frac{C_{\mathrm{Th}}}{C_{\mathrm{W}} + C_{\mathrm{Th}}} (\vartheta_{\mathrm{W}} - \vartheta_{\mathrm{Th}})$$

RECHENBEISPIEL

Wassermenge

Temperatur des Wassers $\vartheta_\mathrm{W} = 90°\mathrm{C}$

Masse des Wassers $m_\mathrm{W} = 40\ \mathrm{g}$

spezifische Wärme $c_\mathrm{W} = 4{,}182 \cdot 10^3\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$

Wärmekapazität $C_\mathrm{W} = 0{,}04\ \mathrm{kg} \cdot 4{,}182 \cdot 10^3\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1} = 167{,}3\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$

Quecksilber-Thermometer (i.w. Thermometer-Flüssigkeit)

Temperatur des Thermometers $\vartheta_\mathrm{Th} = \vartheta_\mathrm{Hg} = 20°\mathrm{C}$

Masse $m_\mathrm{Hg} = 15\ \mathrm{g}$

spezifische Wärme $c_\mathrm{Hg} = 0{,}139 \cdot 10^3\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$

Wärmekapazität $C_\mathrm{Hg} = 0{,}015\ \mathrm{kg} \cdot 0{,}139 \cdot 10^3\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1} = 2{,}085\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$

Abweichung

$$\Delta\vartheta = -\frac{2{,}1\ \mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}}{167{,}3\ \mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1} + 2{,}1\ \mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}}\cdot(90°\mathrm{C} - 20°\mathrm{C})$$

$$\cong -0{,}868\ \mathrm{K}$$

Messwert

$$\vartheta_{\mathrm{M}} \cong 90°\mathrm{C} - 0{,}868\ \mathrm{K}$$

$$\cong 89{,}132°\mathrm{C}$$

$$\cong 89{,}1°\mathrm{C}$$

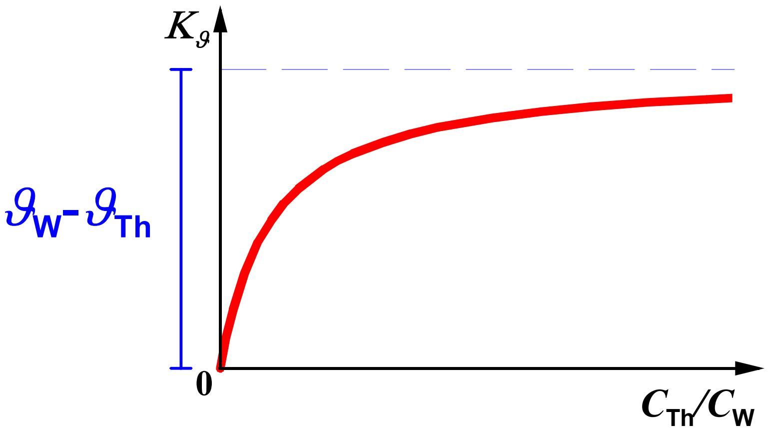
Messen – Vorgang und Tätigkeit

Rückwirkung

Dieses Beispiel schildert sicherlich einen recht ungünstigen Fall.
In der Praxis würde man den Einfluss gering zu halten suchen und das Produkt des Korretionsterms klein machen, d.h.

- entweder ein Thermometer geringerer Masse und damit geringerer Wärmekapazität verwenden (erster Faktor klein)
- oder – wenn es die Umstände zulassen – das Thermometer zusammen mit der Wassermenge erhitzen (zweiter Faktor klein).

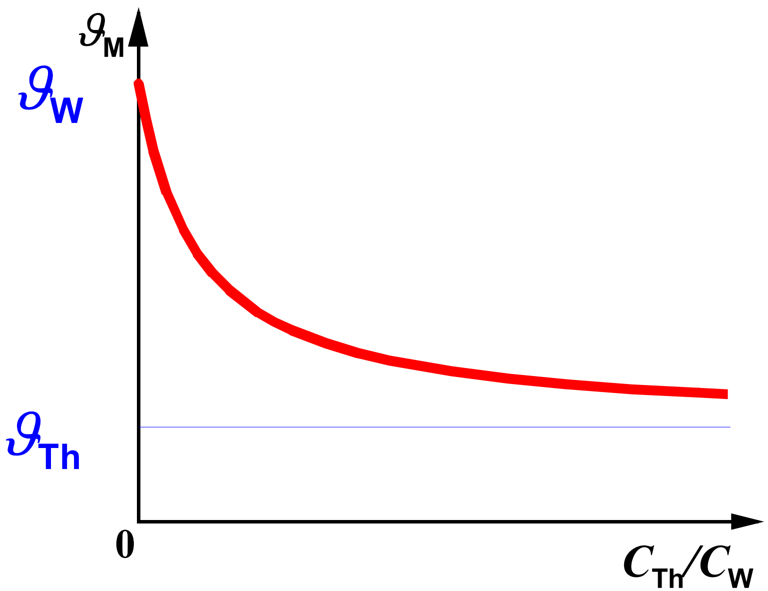
Für das Verständnis des Wesens der Rückwirkung ist es jedoch sehr instruktiv.



Die an der gemessenen Temperatur ϑ_M anzubringenden Korrektion $K_\vartheta = \vartheta_W - \vartheta_M$ in Abhängigkeit vom Verhältnis der Wärmekapazität C_{Th} des Thermometers zur Wärmekapazität C_W der Wassermenge.

Messen – Vorgang und Tätigkeit

Rückwirkung



Gemessenen Temperatur ϑ_M in Abhängigkeit vom Verhältnis der Wärmekapazität C_{Th} des Thermometers zur Wärmekapazität C_W der Wassermenge.

BEISPIEL **Messung der elektrischen Spannung einer Spannungsquelle**

Die allgemein bekannte Tatsache, dass die (bereitgestellte) Spannung V_0 einer unbelasteten elektrischen Spannungsquelle (EMK - elektromotorische Kraft) größer ist als die Spannung V (Klemmenspannung, terminal voltage) der durch das Messgerät belasteten Quelle, ist eine Erscheinungsform der Rückwirkung.

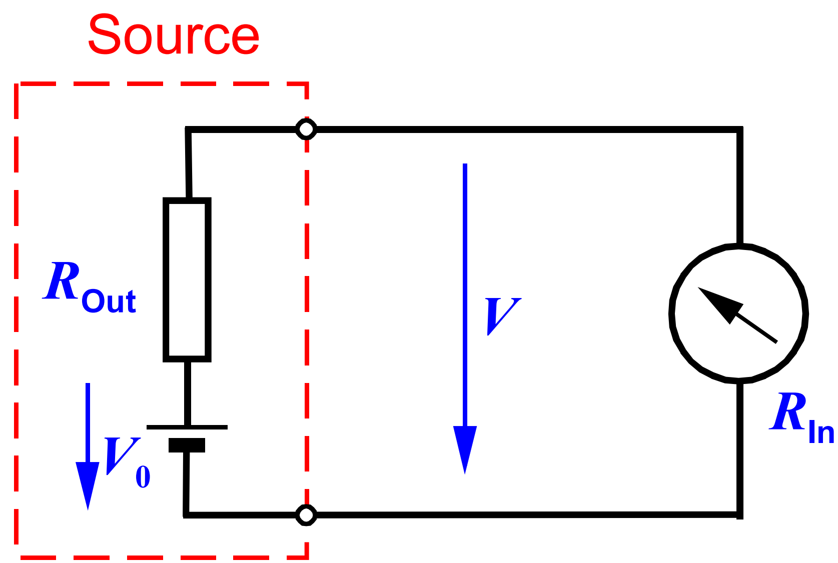
Rückwirkung bei der Messung der elektr. Spannung eines galvanischen Elementes.

V – gemessene elektrische Spannung, ;

V_0 – Klemmenspannung der unbelasteten Spannungsquelle (EMK);

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

R_{In} – Eingangs- (Innen-) Widerstand des Spannungsmessgerätes.



Messen – Vorgang und Tätigkeit

Rückwirkung

Es gilt (siehe Schaltbild)

$$V = V_0 - R_{\text{Out}} \cdot I$$

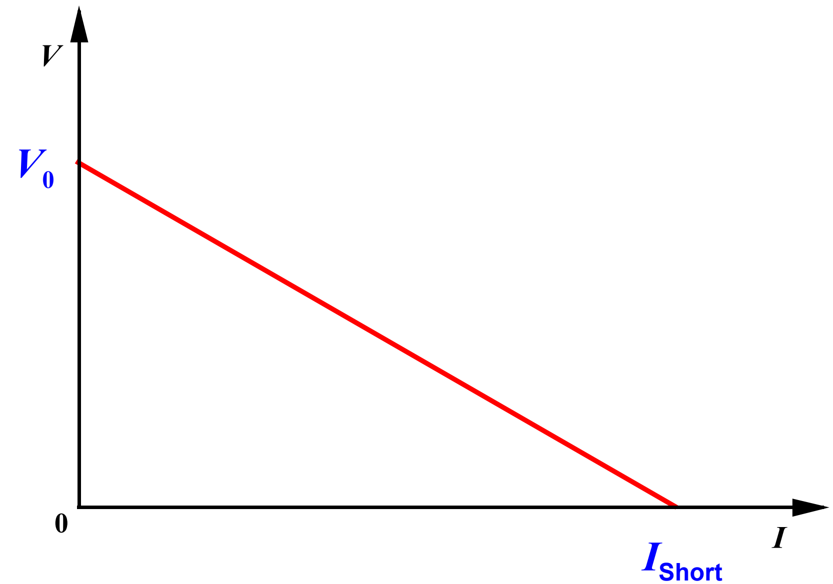
$$= V_0 \cdot \frac{R_{\text{In}}}{R_{\text{Out}} + R_{\text{In}}}$$

oder

$$V = \frac{1}{1+r} \cdot V_0$$

mit dem Widerstandsverhältnis (resistance ratio)

$$r = \frac{R_{\text{Out}}}{R_{\text{In}}}$$



Klemmenspannung V eines galvanischen Elementes aufgetragen über dem entnommenen Strom I.

V_0 – Klemmenspannung der unbelasteten Spannungsquelle (EMK) ;

I_{Short} – Kurzschluss-Strom (short circuit current).

RECHENBEISPIEL

Innenwiderstände

Spannungsmessgerät $R_{\mathrm{In}} = 20\ \mathrm{k}\Omega$

galvanisches Element $R_{\mathrm{Out}} \cong 5\ \Omega$

Widerstandsverhältnis $r \cong 0{,}25 \cdot 10^{-3}$

Klemmspannung ohne Belastung (EMK) $V_0 = 1{,}6\ \mathrm{V}$

Messwert (0,025% kleiner)

$$V = 1{,}5996\ \mathrm{V}$$

Das Messergebnis ergibt sich durch Addition der Korrektion

$$K_V = 1{,}6\ \mathrm{V} \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0{,}4 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{V}$$

Diese Abweichung wird in den meisten Fällen vernachlässigbar sein und die Berücksichtigung einer Korrektion unterbleiben.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Rückwirkung ist eine allgemeine Erscheinung der Messtechnik.
Inwieweit sie von Einfluss ist, wird durch gewisse Relationen zwischen Messgröße und Messmittel-Parameter bestimmt.
Besonders deutlich wird dies bei Messungen im atomaren Bereich, wo die Messmittel fast immer für die zu messenden Größen zu "grob" sind, so dass direkte Messungen i.Allg. undurchführbar bleiben.
Auch bei elektrischen Messungen sind die Rückwirkungen vielfach zu groß, als dass sie stets vernachlässigt werden könnten.
(siehe "elektrische Messtechnik": Verringerung der elektr. Stromstärke resp. der wirkenden elektr. Spannung durch den Innenwiderstand eines Strom-Messgerätes, das zusätzlich in den Stromkreis gelegt wird).
Das Bestreben, die Rückwirkung klein zu halten und dadurch hervorgerufene Abweichungen zu vermeiden, war der Ausgangspunkt der Entwicklung der Kompensationsmethode.

Wie wird der Messwert generiert?

Die Bildung des Messwertes ist ein physikalischer (z.T. chemischer) Vorgang durch den die Messgröße (Eingangsgröße) X_{In} auf eine zweite Größe abgebildet wird.

Realisiert wird diese Abbildung durch eine jeweils spezielle Funktionseinheit (*Messfühler*).

Anm. Messfühler, die prinzipbedingt elektrische oder optische Signale abgeben, werden häufig auch unschön Sensoren genannt.

Bei komplexen Messfühlern heisst das für die Messgröße empfindliche Element (*Mess-*)*Aufnehmer*.

Abbildungsgröße kann sein

- unmittelbar die Ausgangsgröße (output quantity) X_{Out} (Anzeige X_{Ind}, indication) oder
- eine Zwischengröße X_{Int} (intermediate quantity, primäre Abbildungsgröße), die weiteren Schritten in die (eigentliche) Ausgangsgröße umgeformt wird.

Voraussetzung für die Abbildung einer Größe auf eine andere und den (möglichst) eindeutigen Rückschluss, ist ein bekannter, eindeutiger funktioneller Zusammenhang f zwischen der (bewirkenden) Originalgröße X_{In} und der (bewirkten) Abbildungsgröße X_{Out} resp. X_{Int}

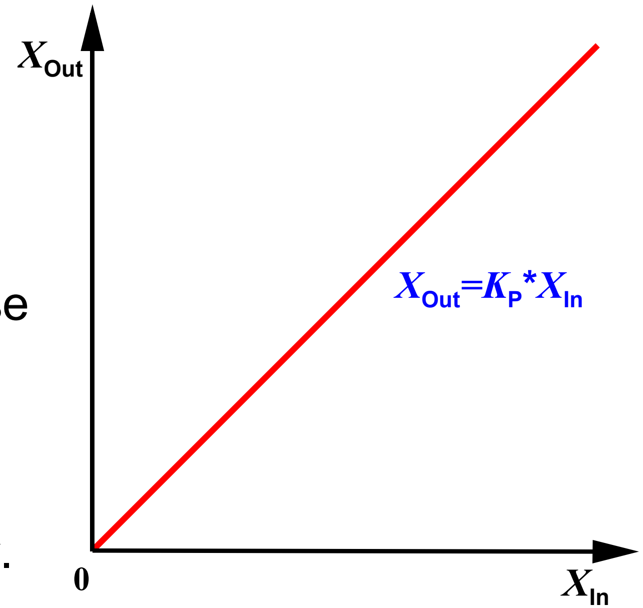
$$X_{Out}, X_{Int} = f(X_{In})$$

Messtechnisch erwünscht ist ein linearer Zusammenhang, d.h. die Funktion $f(X_{In})$ sollte eine Gerade darstellen

$$f(X_{In}) = K_P \cdot X_{In}$$

Erwünschter idealer Zusammenhang zwischen Eingangsgröße X_{In} (Messgröße) und Ausgangsgröße X_{Out} (Abbildungsgröße).

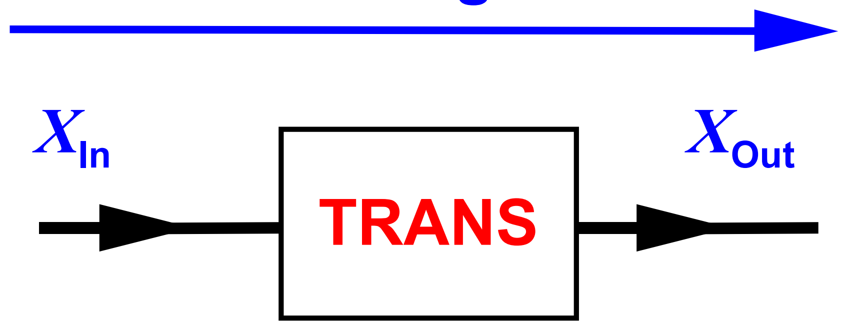
K_P – Umformungsfaktor.



Physikalische (erkenntnis-theoretische) **Betrachtungsweise**

Eine Messung kommt dadurch zustande, dass eine Änderung der Messgröße (*Ursache*) eine (gewollte) definierte und reproduzierbare Änderung der Abbildungsgröße (Wirkung) hervorruft.

Ursache-Wirkung-Ausbreitung



Jede definierte, eindeutige und reproduzierbare Wirkung, die durch eine Änderung der Größe verursacht wird, lässt sich (prinzipiell) zur Messung dieser Größe nutzen. Aufgrund des allgemeinen Zusammenhangs vieler physikalischer Erscheinungen hat die Änderung einer Größe (Ursache) meist verschiedenste Wirkungen.

Messen – Vorgang und Tätigkeit

Bildung des Messwertes

BEISPIEL **Temperaturmessung**

Messprinzip (genutzter physikalischer Effekt	**Beispiele für Messgeräte, die diesen Effekt nutzen**
Thermische Ausdehnung von Festkörpern Flüssigkeiten Gase	 Stabausdehnungsthermometer Flüssigkeit/Glas-Thermometer Gasthermometer
Druckerhöhung bei konstantem Volumen in Flüssigkeiten Gasen	 Flüssigkeit/Feder-Thermometer Dampfdruck-Thermometer
Änderung der elektrischen Leitfähigkeit in Metallen Halbleitern	 Widerstandsthermometer Thermistor
Thermoelektrischer Effekt	Thermoelement
Strahlungemission des Messobjektes	Pyrometer
Chemische Reaktionen	Temperaturmessfarben
Änderung des Aggregatzustandes	Segerkegel, Temperatur-Fixpunkte

SCHLUSSFOLGERUNG

Aufgrund der

- Vielzahl der Wirkungen, die durch die Änderung einer Messgröße hervorgerufen werden können und der
- Vielzahl möglicher Messgrößen

ist die Anzahl der für Messzwecke nutzbaren Effekte (*Messprinzipien*) ungeheuer groß.

Meist bietet jedes Prinzip bei der technischen Realisierung ganz spezifische Vorteile.

Messungen von Größen der gleichen Art nutzen unter verschiedenen Messbedingungen unterschiedliche Prinzipien.

Wirkungsweisen und Ausführungsformen der Messfühler sind sehr vielgestaltig:

- die Auswahl der verfügbaren oder zu entwickelnden Messfühler ist sehr groß; für nahezu jedes Messproblem gibt es einen geeigneten Messfühler;
- Messfühler sind wenig standardisierungsfreundlich.

Analog-/digital- anzeigende Messgeräte? (grundlegende Unterschiede)

Anzeige

analog

Abbildung auf eine i.Allg. optisch wahrnehmbare Größe (angezeigter Wert meist Länge oder Winkel);

Registrierung: stetiger Kurvenzug.

Die Umsetzung in einen mit Ziffern notierten Zahlenwert obliegt dem Messenden.

digital

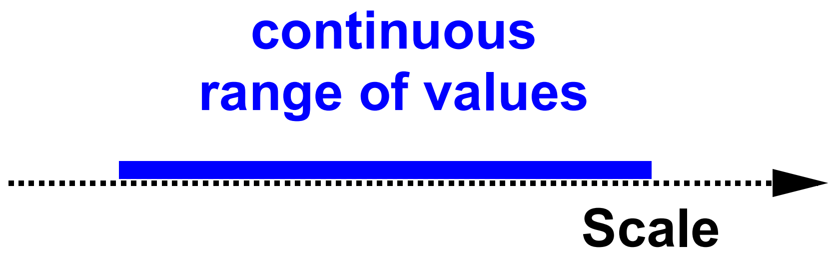
Unmittelbare Ausgabe des Messwertes in Ziffernform;

Registrierung: Zahlenkolonnen, Tabellen

Wertevorrat

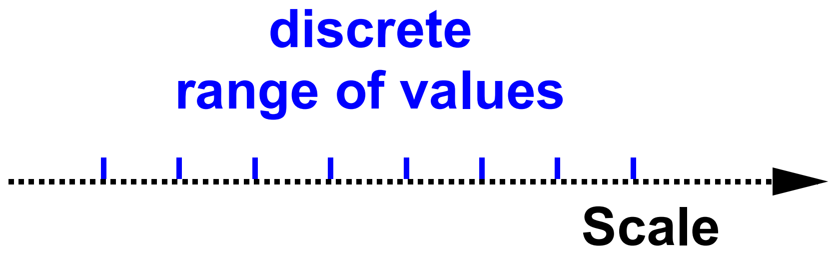
analog

Abbildungsgröße ist im Prinzip unendlich vieler, kontinuierlich verteilter Werte fähig.



digital

Abbildungsgröße ist nur endlich vieler, diskret verteilter (abzählbarer) Werte fähig.



BEISPIEL **Digitales Messgerät**

Ein digitales Messgerät mit einer Ziffernanzeige aus $\mathbf{3}$ Stellen kann nur die Zahlenwerte

$$\mathbf{000\ (=0),\ 001\ (=1),\ \ldots,\ 999}$$

anzeigen.

Das sind $n_{\text{Displ}} = \mathbf{1000} = \mathbf{10^3}$ Zahlenwerte. Die unendlich vielen, stetig aufeinander folgenden Werte der Messgröße müssen für die digitale Abbildung in gleiche Portionen (Quantisierungsintervalle) aufgeteilt werden. Jedes von ihnen umfasst einen Teil der Länge $2{\cdot}\Delta X = 1/n_{\text{Displ}} = 1/1000 = 10^{-3}$ des Messbereiches.

ANMERKUNG

Es ist üblich digitale Messgeräte mit einer Anzeige aus $\mathbf{3}$ Stellen als $\mathbf{2\tfrac{1}{2}}$-stellig zu bezeichnen, wenn die höchstwertigste Stelle nur die Ziffern $\mathbf{0}$ oder $\mathbf{1}$ anzeigen kann. In diesem Fall werden nur die Zahlenwerte $\mathbf{000,\ \ldots,\ 199}$ angezeigt, also $n_{\text{Displ}} = \mathbf{200} = \mathbf{0{,}2{\cdot}10^3}$ Zahlenwerte.

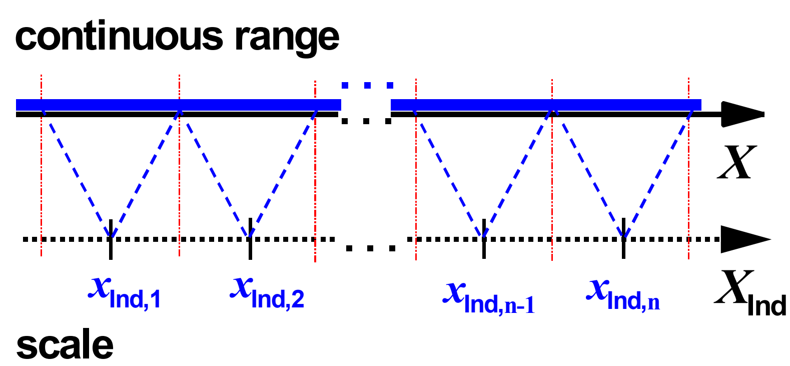
- **Skala (eines Messgerätes)** (scale (of a measuring instrument)) [VIM 4.17]
  geordnete Menge von Anzeigemarken zusammen mit einer zugeordneten Nummerierung, Teil des Anzeigeeinrichtung eines Messgerätes.
  BEMERKUNG
  Die Marken werden Skalenstriche genannt.

Ein Skale ist eine Abbildung eines kontinuierlichen Wertevorrates einer messbaren Größe X auf einen (geordneten) Bereich diskreter Werte, meist gleichabständig:

$$Scale = \{x_{\text{Ind},0} + i \cdot \Delta x_{\text{Step}} \mid i = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots\}$$

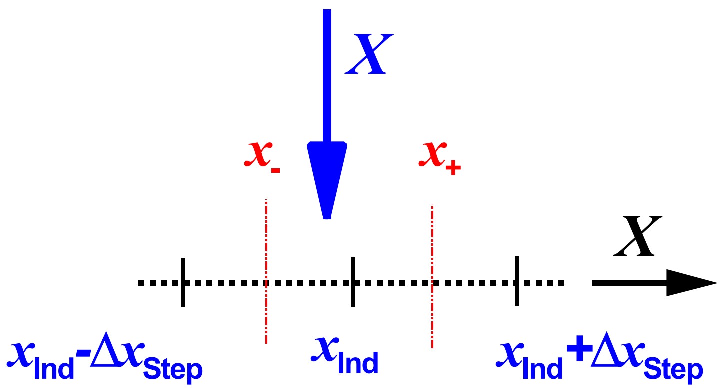
$x_{\text{Ind},0}$ - Lokalisierungsparameter, Offset des Nullpunktes des kontinuierlichen Bereichs;

Δx_{Step} - Skalierungsparameter, Teilung, Weite der equivalenten Bereiche der Skale.



Die Abbildung des kontinuierlichen Bereichs fasst equivalenteBereiche in discrete Punkte (indicated values) der Skale zusammen.

Die Abbildung eines kontinuierlichen Wertevorrates auf einen diskreten Bereich von Anzeigen zerteilt den kontinuierlichen Bereich in Quantisierungsintervalle mit den Grenzen x_- , x_+ um die diskreten Anzeigen (indications) x_{Ind}.



Die Abbildung des kontinuierlichen Wertevorrats auf die angezeigbaren Werte einer Skale zerteilt den kontinuierlichen Bereich in (meist gleichweite) Quantisierungs intervalle.

- X - Messgröße;
- x_{Ind} - (nähester) angezeigter Wert;
- Δx_{Step} - Skalenwert;
- x_-, x_+ - Grenzen des Quantisierungsintervalls.

Die Grenze x_-, x_+ teilen den Bereich zwischen dem angezeigten Wert und dem nächst niedrigeren resp. nächst höherem jeweils in der Mitte, d.h.

$$x_\pm = x_{\text{Ind}} \pm \frac{1}{2}\Delta x_{\text{Step}}$$

Messen – Vorgang und Tätigkeit

Analog/digital

Mit der Anzeige x_{Ind} der Größe X sind alle Werte konsistent im Intervall

$$X : x_{\text{Ind}} - \frac{1}{2}\Delta x_{\text{Step}} \ldots x_{\text{Ind}} + \frac{1}{2}\Delta x_{\text{Step}} \quad \Leftrightarrow \quad \left| X - x_{\text{Ind}} \right| \leq \frac{1}{2}\Delta x_{\text{Step}}$$

BEISPIEL **Messschieber mit digitaler Anzeige**

Ein zur Längenmessung im Bereich $\mathbf{0\ mm \ldots 150\ mm}$ verwendeter Messschieber besitzt eine $\mathbf{5}$-stellige digitale Anzeige ($\mathbf{3}$ Vorkomma- und $\mathbf{2}$-Nachkomma-Stellen). Dadurch wird eine Skale erzeugt mit dem Skalenwert

$$\Delta \vartheta_{\text{Step}} = \mathbf{0{,}01\ mm = 10 \cdot 10^{-3}\ mm = 10\ \mu m}$$

Aussage: angezeigte Innenweite eines Rechteck-Hohleiters $l_{\text{Ind}} = \mathbf{22{,}86\ mm}$.

Bedeutung: Der (mögliche) Wert der Innenweite liegt zwischen den Mitten des linken und des rechten Quantisierungsintervalles

$$X : \mathbf{22{,}855\ mm \ldots 22{,}865\ mm} \quad \Leftrightarrow \quad \left| X - \mathbf{22{,}86\ mm} \right| \leq \mathbf{5\ \mu m}$$

BEISPIEL **Temperatur-Anzeigen an einer Thermometerskala**

Die Skala eines Quecksilber-Thermometers besitzt die Skalenstriche

$$-20{,}0°C;-19{,}5°C;-19{,}0°C;\ldots;124{,}0°C;124{,}5°C;125{,}0°C.$$

Skalenwert: $\Delta\vartheta_{\text{Step}} = 0{,}5\ °C$.

Aussage: Anzeige des Quecksilber-Thermometers $\vartheta_{\text{Ind}} = 23{,}5°C$.

Bedeutung: Der (mögliche) Wert der Temperatur liegt in dem Bereich

$$\vartheta : 23{,}475°\,C \ldots 23{,}525°\,C \quad \Leftrightarrow \quad \left|\vartheta - 23{,}5°\,C\right| \le 0{,}25\ K$$

BEISPIEL **Tabulierte Werte**

Aussage: In einer (normgerechten) Tabelle ist der Wert des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizient α_{Quartz} von Quarz mit $45 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ angegeben.

Auf grund unvermeidbarer, schwacher Verunreinigungen oder Störungen der regulären Struktur, variiert der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient zwischen einzelnen Quarz-Schmelzen.

Der in der Tabelle angegebene Wert berücksichtigt diese Tatsache durch die Anzahl der angegebenen (signifikanten) Ziffern:
Quarzgläser des spezifizierten Typs besitzen einen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, dessen Wert bis auf mathematische Rundung mit dem angegeben Wert übereinstimmt.
Bedeutung: Der Tabellenwert ist in einer Skale mit dem Skalenwert

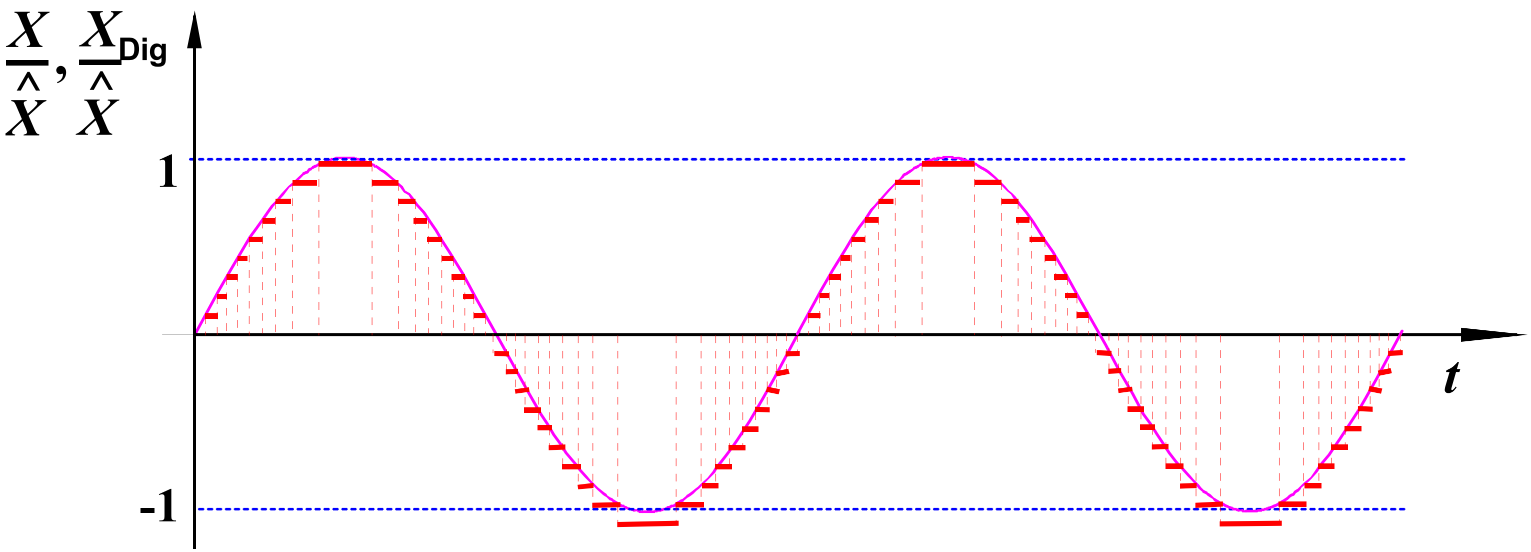
$\Delta\alpha_{\mathrm{STEP}} = 1 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ angegeben.

Die (möglichen) Werte, welche die Angabe in der Tabelle zulässt (Konsistenz), sind

$$\alpha_{\mathrm{Quartz}} : 44{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1} \ldots 45{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

$$\Rightarrow \quad \left| \alpha_{\mathrm{Quartz}} - 45 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1} \right| < 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

BEISPIEL **Digitalisierung einer Messkurve**



Diskreter Werteverlauf $X_{Dig}(t)$ (rote Kurve) eines (zeitlich) kontinuierlichen (analogen) Sinus-Signals $X(t)$ (violette Kurve). Sofern X_{Dig} auf den nächsten Wert springt, wenn das analoge Signal um einen bestimmten Stufenwert zugenommen hat, ergibt sich eine von der Feinheit der Quantisierung und der Kurvensteigung abhängige Quantisierung der Zeitskala.

Weiterleitung

Technische Überlegenheit digitaler Methoden bei der Weiterleitung von Messinformationen über größere Entfernungen.

BEISPIEL **Weiterleitung eines Messwertes**

Wird zur Weiterleitung eines Messwertes ein *Amplitudensignal*, z.B. ein Stromsignal (Abbildung der Information auf eine elektrische Stromstärke I), verwendet, so hängt die Stromstärke auch vom Widerstand R_{Line} der Leitung ab.

Selbst wenn R_{Line} beim Einmessen zunächst berücksichtigt wird, werden sich Änderungen ΔR_{Line} des Leitungswiderstandes (infolge von Temperaturschwankungen, veränderten Kontaktwiderständen u.ä.) als Abweichungen auswirken und den übertragenen Messwert verfälschen.

Auf ein Signal, bei dem die Information in einer bestimmten *Impulsfolge* enthalten ist, bleibt eine Änderung des Leitungswiderstandes ohne Einfluss, solange das geforderte *Nutzsignal/Störsignal-Verhältnis* nicht unterschritten wird. Die Impulshöhe ist für die Information (in diesem Fall) ohne Bedeutung.

Verarbeitbarkeit

Die i.Allg. einfachere Verarbeitbarkeit digitaler Signale hängt damit zusammen, dass Digitalrechner den Analogrechnern überlegen sind, wenn es um (echte) Berechnungen geht .

Die Speicherung (Ablage von Messwerten, Signalen) ohne Informationsverlust ist bei analogen Signalen sehr aufwendig.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die wesentlichen Gründe für die Überlegenheit digitaler Methoden bei der Lösung bestimmter Messprobleme sind

- Vermeidung von Informationsverlusten bei der Messwertbildung;
- Vermeidung von Informationsverlusten bei der Informationsweiterleitung;
- gute rechentechnische Verarbeitung digitaler Signale;
- gute Speicherfähigkeit digitaler Signale.

Messabweichung – wesentliches Enscheidungkriterium!

Die Auffindung einer optimalen Lösung für eine Messaufgabe ist i.Allg. nicht einfach. Es müssen meist mehrere Kriterien zugleich berücksichtigt werden.

Das nötige Maß an messtechnischer Erfahrung kann durch praxis-orientierte "Rezepte" nie völlig ersetzt werden; sie haben vielmehr den Sinn und Zweck den Erwerb der notwendigen Erfahrungen zu unterstützen!

Einer der messtechnisch wichtigsten Parameter, wenn nicht sogar der wichtigste, für die Beurteilung einer Messung ist die (wirkliche oder auch mögliche) *Messabweichung*.

Sie nimmt eine (spezielle) Sonderrolle ein:
- sie hängt mit der Realisierung des Zieles in der Messung zusammen und
- sie umfasst eine Beurteilung der Messung,
  d.h. wie gut die Realisierung das erwünschte Ziel erfasst.

Für sie ist die Festlegung technisch und ökonomisch begründbarer Forderungen weitaus schwieriger als bei den anderen messtechnischen Parametern.

BEISPIEL **Messabweichung als Beurteilungskriterium**

Mit dem erwarteten Änderungsbereich der Messgröße (Dynamikbereich) ist der benötigte Messbereich festgelegt.
Ein konkretes Messgerät erfüllt die Forderung oder nicht (JA/NEIN-Entscheidung).

Demgegenüber unterliegt bei der Messabweichung die Entscheidung, ob ein bestimmtes Messgerät noch zugelassen werden kann oder ob ein bestimmte maximal zulässige Abweichung (Fehlergrenze) eingehalten werden muss, der *Beurteilung* (des Messenden oder des Anwenders) und damit einer gewissen Willkür.

Die (wirkliche oder mögliche) Messabweichung hat die Eigenschaft eines *Qualitätskriteriums*, das etwas über den "Gebrauchswert" eines Messergebnisses aussagt.

Goldene Regel der Messtechnik:

" Es ist nicht so genau wie möglich,
sondern nur so genau wie nötig zu messen. "

- **Messabweichung** (error of measurement) [nach VIM 3.10]

  Bei einer Messung festgestellter Wert minus dem richtigen Wert einer Messgröße

$$\Delta X_{\mathrm{Ind}} = X_{\mathrm{Ind}} - X$$

BEISPIELE

a) anzeigendes Messgerät

festgestellter Wert	:	angezeigter Wert;
richtiger Wert	:	angebotener Wert

b) bereitstellendes Messgerät (Maßverkörperung, Messwertgeber, Kalibrator)

festgestellter Wert	:	eingestellter Wert;
richtiger Wert	:	abgegebener Wert

- **Richtiger Wert** (conventional true value (of a quantity)) [VIM 1.20]
  Durch Vereinbarung anerkannter Wert, der einer betrachteten speziellen Größe zu geordnet wird, und der mit einer dem jeweiligen Zweck angemessenen Unsicherheit behaftet ist.

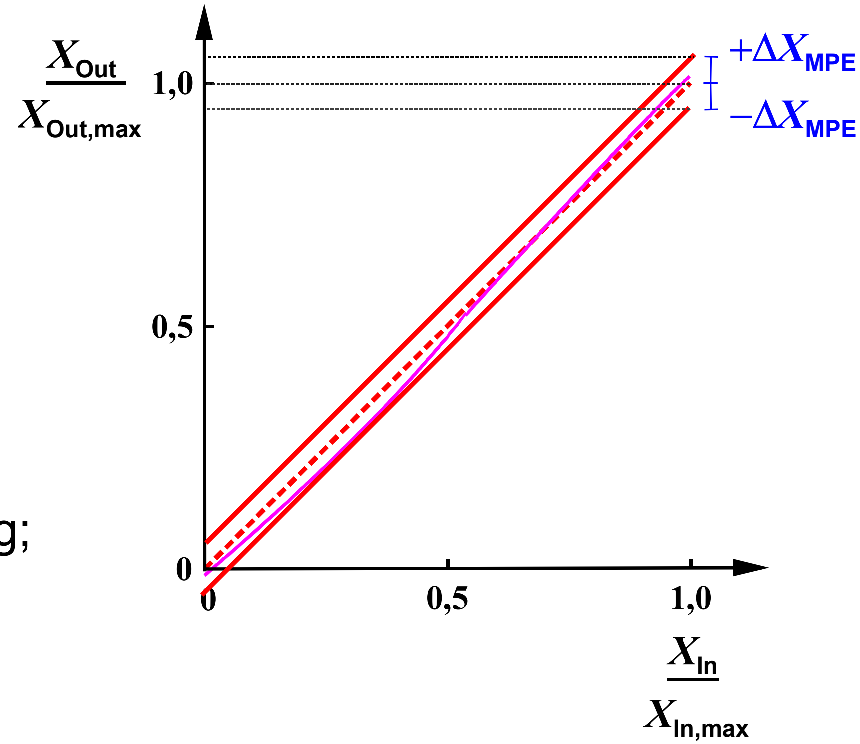
  BEISPIELE
  a) Der von CODATA (1986) empfohlene Wert der Avogadro-Konstanten,
  N_A: **6,022 136 7·10²³ mol⁻¹;**
  b) Der Wert einer durch ein Bezugsnormal realisierten Größe kann an einer betrachteten Stelle als richtiger Wert angesehen werden.

- **Korrektion** (correction) [nach VIM 3.15]
  Algebraisch zum festgestellten Wert einer Messgröße zu addierender Wert zum Ausgleich einer (bekannten) systematischen Messabweichung.

$$X = X_\mathrm{Ind} + K_\mathrm{Ind} \quad \Rightarrow \quad K_\mathrm{Ind} = -\Delta X_\mathrm{Ind}$$

- **Fehlergrenze** (maximum permissible error (of a measuring instrument)) [VIM 5.21]
  Für ein betrachtetes Messgerät durch Spezifikationen, Vorschriften o.ä. zugelassene Extremwerte einer Messabweichung.

Kennlinie eines Messgerätes unter Berücksichtigung seiner Fehlergrenzen (maximal zulässige Messabweichung, MPE).
violette Kurve – mögliche wirkliche Kennlinie;
ausgezogene Kurven - Grenzen, innerhalb derer der richtige Wert garantiert wird;
gestrichelte Kurve – erwünschte, ideale Kennlinie.



ΔX_{MPE} - maximal zulässige Messabweichung;
$\Delta X_{In,max}$ - Wert der Eingangsgröße und
$\Delta X_{Out,max}$ - Wert der Ausgangsgröße bei Vollausschlag.

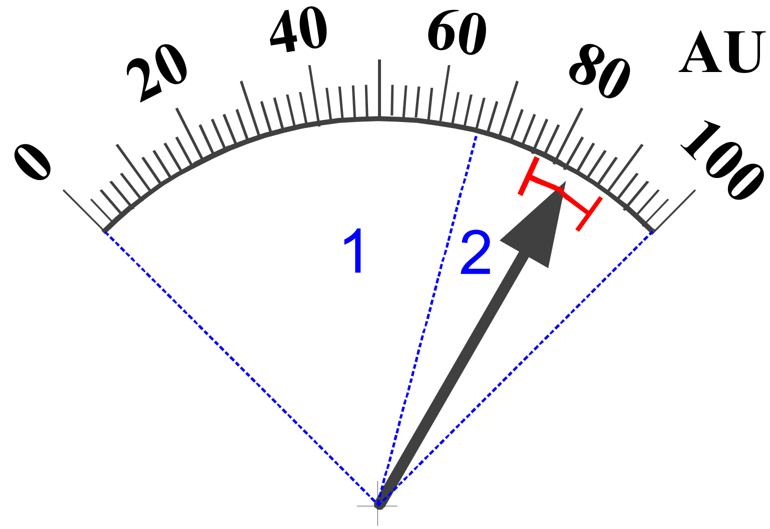
Messgeräte-Hersteller garantieren durch Angabe der Fehlergrenzen ΔX_{MPE}, dass der dem (jeweiligen) Ausgangswert X_{Out} (zuzuordnende) richtige Wert X_{In} im Bereich $X_{\mathrm{Out}} \pm \Delta X_{\mathrm{MPE}}$ ($X_{\mathrm{Out}} - \Delta X_{\mathrm{MPE}} \ldots X_{\mathrm{Out}} + \Delta X_{\mathrm{MPE}}$) liegt,
d.h. für die mögliche Messabweichung gilt

$$\left|\Delta X_{\mathrm{Out}}\right| \leq \Delta X_{\mathrm{MPE}}$$

Angegeben wird meist die auf Vollausschlag bezogene (relative) Fehlergrenze

$$e_{\mathrm{MPE,min}} = \frac{\Delta X_{\mathrm{MPE}}}{X_{\mathrm{Out,max}}}$$

i.Allg. als Klassenwert (auf den Vollausschlag bezogenen Messabweichung in Prozent).



Die Anzeigemarke eines Messgerätes zieht einen Bereich möglicher Mess-abweichung (Intervall) mit sich, in dem der richtige Wert mit Sicherheit liegt.
- rotes Intervall – Bereich möglicher Messabweichungen;
- 1 - Orientierungs- und
- 2 - Arbeitsbereich der Anzeige.

BEISPIEL **Tachometer**

Das Tachometer in einem Auto habe einen Messbereich **0...140 km/h**. Der Hersteller garantiert eine maximal zulässige Messabweichung (Fehlergrenze) von **±3,5 km/h**. Die auf den Vollausschlag bezogene Fehlergrenze beträgt somit

$$e_{\mathrm{MPE,min}} = \frac{3{,}5\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}}{140\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}}$$

$$= 0{,}025$$

Das sind **2,5%**.

Verlangt umgekehrt die Verkehrsvorschrift, dass die auf den Vollausschlag bezogene Fehlergrenze höchstens **3,5%** betragen darf, so beträgt die maximale Abweichung der Geschwindigkeit bei einer Anzeige von **50 km/h**

$$\Delta \upsilon = 140\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} \cdot 0{,}035$$

$$= 4{,}9\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$$

BEISPIEL **Messgeräteklasse**

Ein Hersteller gibt auf der Skala eines analog-anzeigenden (elektrischen) Messgerätes an, dass es ich um ein Gerät der Klasse 1,5 handelt.

Messgeräteklasse $\mathbf{1{,}5}$

auf den Vollausschlag bezogene (relative)

maximal zulässige Messabweichung $e_{\text{MPE,min}} = 1{,}5\%$

gewählter Messbereich $V: 0...500\ \text{mV}$

maximal zulässige Messabweichung $\Delta V = 7{,}5\ \text{mV}$

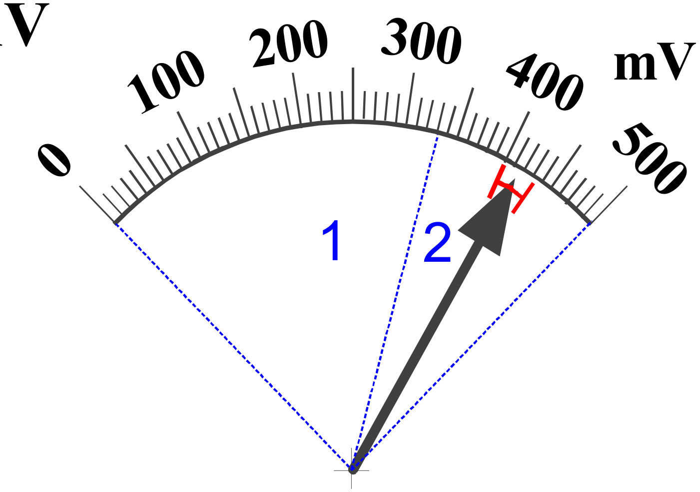
angezeigter Wert $410\ \text{mV}$

auf den angezeigtem Wert bezogene (relative)

maximal zulässige Messabweichung

$$e_{\text{MPE}} = \frac{7{,}5\ \text{mV}}{410\ \text{mV}}$$

$$\cong 0{,}0183 \cong 1{,}8\%$$

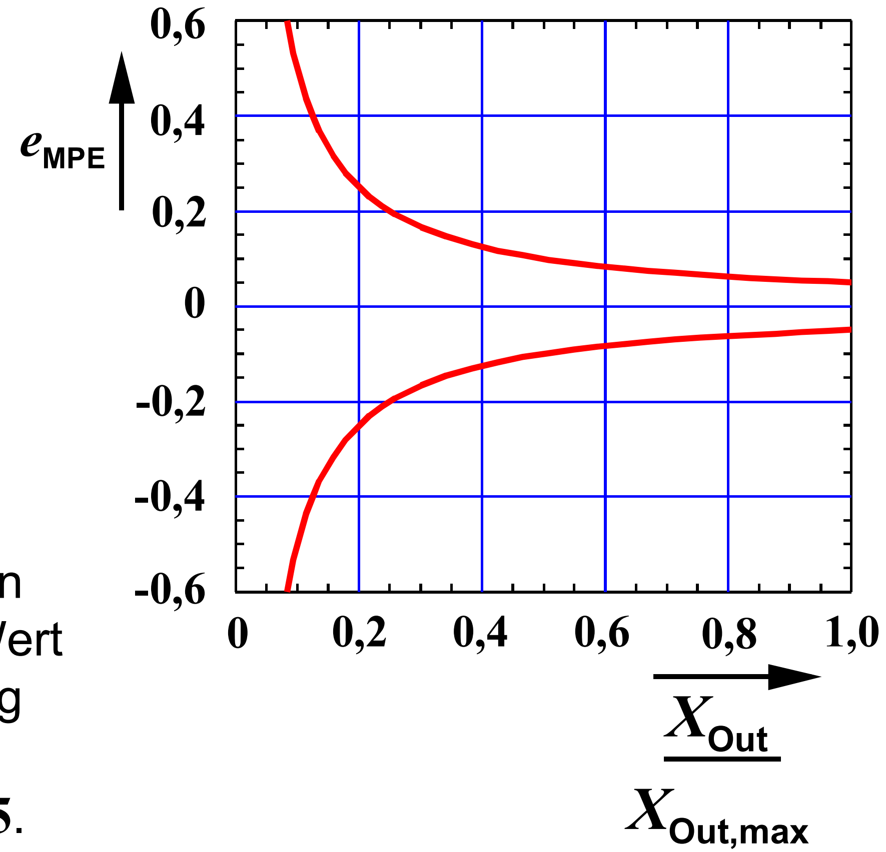


Für die auf den (jeweiligen angezeigten) Wert bezogene (relative) Messabweichung gilt

$$\left| \frac{\Delta X_{\text{Out}}}{X_{\text{Out}}} \right| \le e_{\text{MPE}}$$

wobei Grenze e_{MPE} jetzt vom (jeweiligen angezeigten) Wert abhängt

$$e_{\text{MPE}} = e_{\text{MPE,min}} \cdot \left(\frac{X_{\text{Out}}}{X_{\text{Out,max}}} \right)^{-1}$$



Zusammenhang zwischen den Grenzen der auf den (jeweiligen angezeigten) Wert bezogenen (relativen) Messabweichung und der auf Vollausschlag bezogenen Anzeige für ein Messgerät der Klasse **5**.

Die graphische Darstellung zeigt, dass sich die Grenze e_{MPE} für die auf den (angezeigten) Wert bezogene (relative) Messabweichung im rechten Teil des Diagramms relativ wenig ändert, im linken jedoch große Änderungen auftreten.

Ablese-Regel

Messungen sind im rechten Drittel des Anzeigebereichs (Arbeitsbereich) eines Messgerätes durchzuführen.

$$\frac{e_{\mathrm{MPE}}}{e_{\mathrm{MPE,min}}} \leq 3$$

Die linken beiden Drittel sollten nur der Orientierung und Anpassung des Messbereiches dienen (Orientierungsbereich).

Diese $1/3$-Regel findet sich an vielen Stellen der Messtechnik, wenn es um Beurteilung geht. Sie wird in der Unsicherheitsanalyse auf der Grundlage des Begriffs der Messunsicherheit der ISO/BIPM-GUM-Sicht näher begründet.

Bei guten Messinstrumenten mit mehreren Messbereichen ist diese Regel in der Staffelung der Messbereiche (z.B. $1:2:5:10$ o.ä.) berücksichtigt.

Was ist die geeignete Bezugsgröße?

BEISPIEL **Thermometer**

Ein Thermometer mit einem Messbereich $\mathbf{0...200^oC}$ habe eine Fehlergrenze von $\Delta\vartheta_{\mathbf{MPE}} = \mathbf{0{,}5\ K}$. Die auf den Messbereich bezogene Fehlergrenze ist also

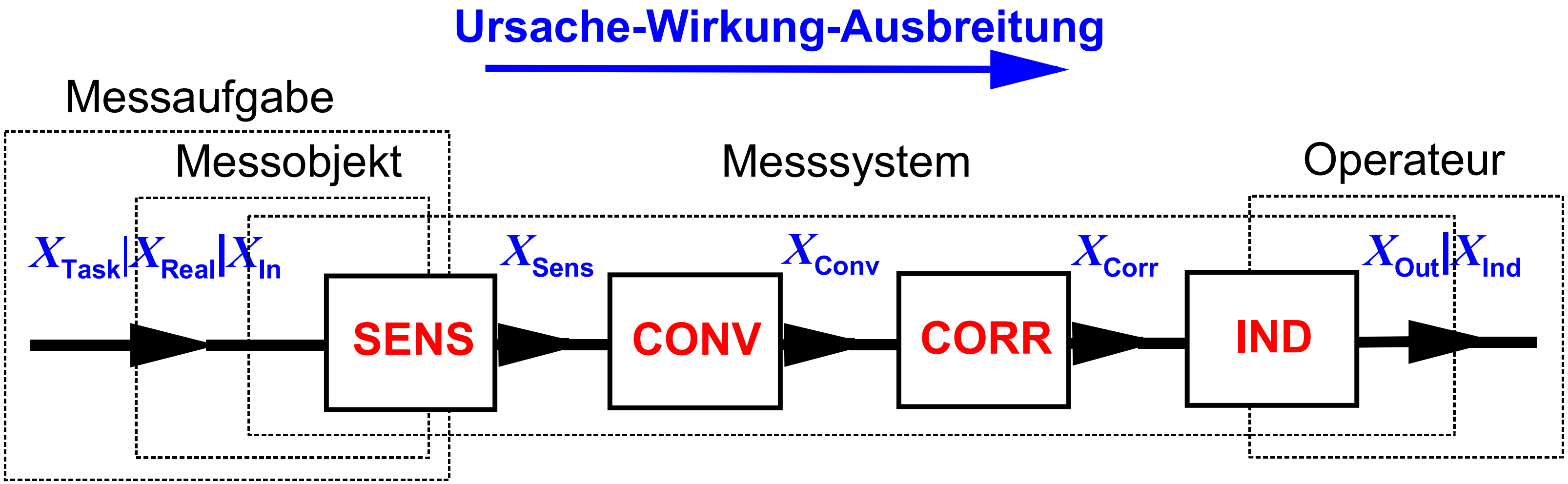
$$e_{\mathrm{MPE,min}} = \frac{\mathbf{0{,}5\ K}}{\mathbf{200\ K}}$$

$$= \mathbf{0{,}025}$$

also $\mathbf{2{,}5\%}$. Wird das gleiche Thermometer mit einer in **Kelvin** graduierten Skala versehen, so besitzt es den Messbereich $\mathbf{273...473\ K}$, während die auf den Messbereich bezogene Fehlergrenze ihren Wert von $\mathbf{2{,}5\%}$ behält.

Benutzt man hingegen im Nenner den Messbereichsendwert (Vollausschlag) als Bezugsgröße, ergibt die auf den Endwert bezogene Fehlergrenze den geringeren Wert $e_{\mathrm{MPE,min}} = \mathbf{0{,}106\%}$, ohne dass sich am Messfühler etwas verändert hat.

Was sind die Ursachen der Messabweichungen?

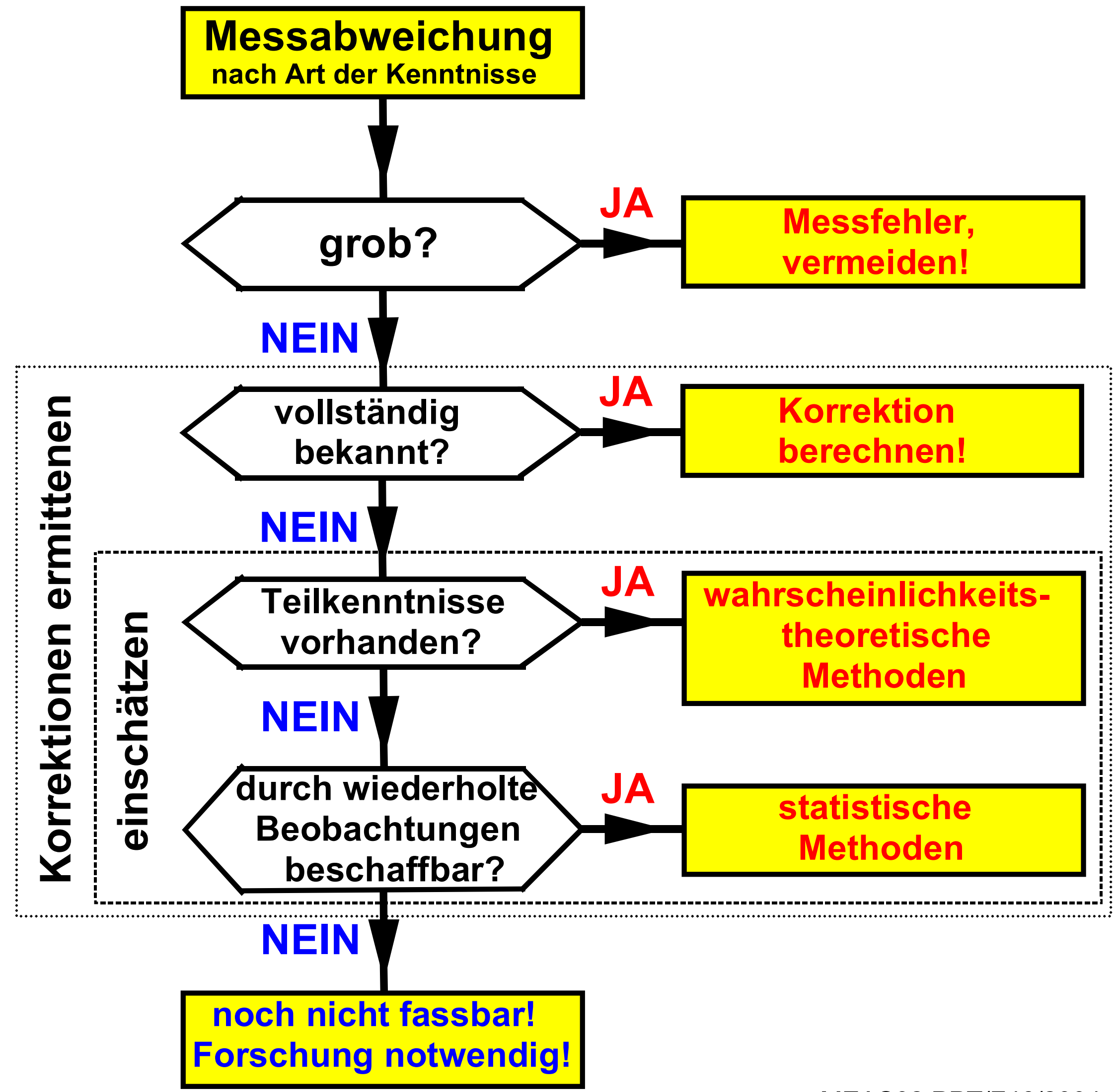


Veränderung (und Verfälschung) des Wertes der Zielgröße (Aufgabengröße) auf dem Weg durch eine Messkette infolge von Abweichungen bei den einzelnen nicht-ideal realisierten Übertragungsgliedern und Verknüpfungen.

X_{Task} - Zielgröße (Aufgabengröße);
X_{Real} - in der Messung realisierte Größe;
X_{In} - Eingangsgröße;
X_{Sens} - vom Messfühler **SENS** erzeugte primäre Abbildungsgröße;

X_{Conv}, X_{Corr} – von den Umsetzern **CONV** und **CORR** erzeugte sekundäre resp. tertiäre Abbildungsgröße;
X_{Out}, X_{Ind} - primäre und wahrgenommene (Anzeige, **IND**) Ausgangsgröße.

Einteilung der Messabweichungen



Kann man exakte Messergebnisse erhalten?

Vom praktischen Aspekt aus, kann man feststellen, das es in einigen Fällen durchaus möglich ist, Messabweichungen so weit zu reduzieren, dass man Messergebnisse erhält, die unter dem vorgegebenen Verwendungszweck als exakt angesehen werden können.

BEISPIEL **Caesium-Atomuhr**

Bei einer (kommerziellen) **Cs**-Atomuhr beträgt die Gangabweichung in **1 h** etwa

$$0{,}07\ \mu s = 0{,}07 \cdot 10^{-6}\ s \leq \frac{1}{10\,000\,000}\ s$$

d.h eine auf die gemessene Zeitspanne von **1 h** bezogene (relative) Abweichung

$$\frac{0{,}07\ \mu s}{1\ h} = \frac{0{,}07 \cdot 10^{-6}\ s}{3600\ s} \cong 19{,}4 \cdot 10^{-12}$$

Für die meisten Zwecke wird man damit durchgeführte Zeitmessungen mit gutem Gewissen als exakt ansehen können.

Messen – Vorgang und Tätigkeit

Korrektion

Beispiele dieser Art gibt es in großer Zahl: Auch beim Zählen sind, wenn es sich nicht um enorm große Anzahlen wie i.Allg. bei atomaren Objekten handelt, exakte Ergebnisse, oft sogar ohne großem Aufwand zu erreichen.

Ob vom praktischen Aspekt aus Messabweichungen ein Messergebnis beeinflussen, und entsprechende Korrektionen zu berücksichtigen sind, hängt von der aus der jeweiligen Messaufgabe resultierenden Genauigkeitsforderung ab.
Man unterscheidet daher Messaufgaben mit

- hohen Anforderungen,
  Präzisionsmesstechnik, hier z.T. so genau wie möglich;
- mittleren Anforderungen,
  Labor-, Fertigungs- und Betriebsmesstechnik (meist so genau wie nötig) und
- niedrigen Anforderungen,
  im täglichen Lebens reicht meist die ohne hohen Aufwand erreichbare Genauigkeit aus (Lineal, Gliedermaßstab, Uhr, Thermometer)

Ist eine Messabweichung als relevant anzusehen, ist sie durch Hinzufügen einer entsprechenden Korrektion auszugleichen. Das kann
- numerisch (rechnerisch) oder
- grafisch

erfolgen.

Ist nur eine oder sind nur einige wenige Messungen durchzuführen, wird man die Korrektion nach jeder Messung durch Rechnung anbringen.

Bei wiederholten, gleichartigen Messungen wird man die Korrektionen einmal vorab berechnen und in Tabellen bereitstellen, so dass die benötigten Werte ständig zur Verfügung stehen.

Im letzten Fall kann man die Korrektionen auch grafisch auftragen und die Werte aus den Kurven ablesen:
- Verlauf und Wert der Korrektionen ist leichter zu übersehen und
- Zwischenwerte sind unmittelbar (ohne Interpolation) verfügbar.

Die grafische Darstellung bietet eine nicht zu unterschätzende Beigabe:
Bei richtiger Wahl der Koordinatenmaßstäbe wird vermieden, Korrektionen mit ungerechtfertigter Genauigkeit (zu große Stellenzahl) anzugeben.
Berechnungen von Korrektionen unterliegen leicht der Versuchung - insbesondere bei Nutzung elektronischer Taschenrechner - einige Stellen mehr anzugeben, als sinnvoll ist.
Dadurch wird nur der Eindruck erweckt, als sei das korrigierte Messergebnis extrem genau.

FAUSTREGEL

In der Labormesstechnik, die hier vorwiegend diskutiert wird, ist es i.Allg. nicht sinnvoll, Korrektionen mit mehr als **2** signifikanten Stellen anzugeben.

Ergibt die Berechnung einer Korrektion mehr als **2** signifikante Stellen, ist das Ergebnis auf **2** signifikante Stellen mathematisch zu runden:

(1) die **2.** signifikante Stelle ist um **1** zu erhöhen, falls der Wert der nachfolgende Stelle größer oder gleich **5** ist; und

(2) alle auf die **2.** signifikante Stelle folgenden Stellen sind zu streichen.

Das Messergebnis ist auf die Stellenwerte der Korrektion (mathematisch) zu runden.

BEISPIEL

	Messwert, Messergebnis	Korrektion
berechnet	**12,248 5 g**	**0,024 7 g**
gerundet	**12,274 g**	**0,025 g**

Welche Rolle spielt der Messende?

Vorbereitung der Messung

- Präzisierung der Messaufgabe
- Inbetriebnahme der Messeinrichtung

  Messmittel vorschriftsmäßig aufstellen/anschliessen:

  Verbindung mit Energiequellen;

  Zuführen von Hilfsstoffen, z.B. Kühlmittel;

  Zuführen von Messsubstanzen;

  Verbinden von Baugruppen;

  Herstellen stabiler Messbedingungen,

  z.B. Temperaturausgleich zwischen den Messmitteln,

  Einstellung der Betriebstemperatur elektrischer Messmittel;

  Justieren und Abgleich der Messeinrichtung;

  Einmessen, Kalibrieren der Messeinrichtung;

  Nullpunkt-Kontrolle bzw. -Korrektur,

  meist leicht realisierbar: Länge, elektrische Spannung.

Messen – Vorgang und Tätigkeit

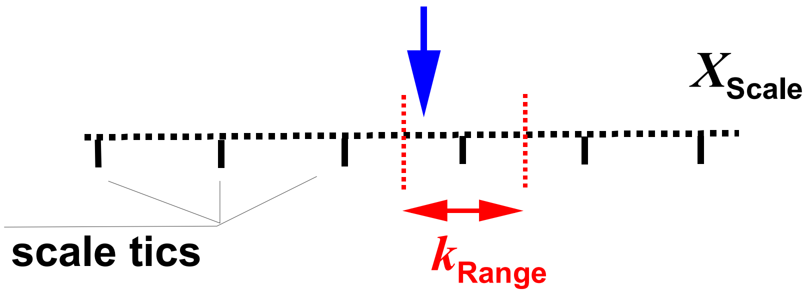
Tätigkeiten

Direkte Tätigkeiten beim Messen

- Eingeben der Messgröße
  Wie die Messgröße zum Messmittel gelangt und wie die eigentliche Messung realisiert ist, hängt von der jeweiligen Messgröße und der Messmittelkonstruktion ab, wobei z.T. besondere Erfahrungen und Fertigkeiten notwendig sind.
- Kontrolle der Messmittelfunktion bzw. Handhabung der Messgeräte (z.B. Messschieber, Stoppuhr, Pyknometer) durch Vorversuche.
- Konstanthaltung bzw. Überwachung der Einflussgrößen (Umwelt, z.B. Temperatur, Luftdruck, elektromagnetische Störungen).
- Entgegennahme des Messwertes
  Anzeige
  digital: direktes Ablesen des Messwertes;
  analog: Bildung des Zahlenwertes durch den Messenden.

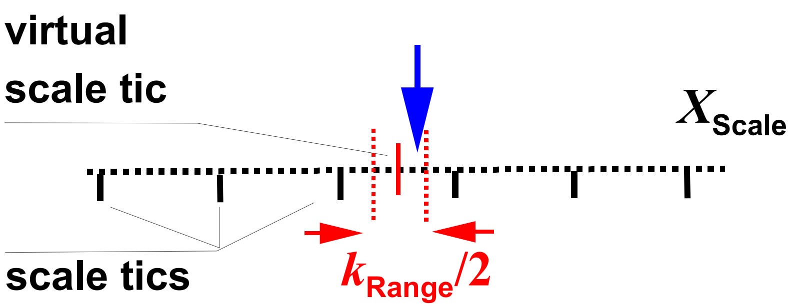
BEISPIEL **Quantisierung beim Ablesen analoger Skalen**

direktes Ablesen



$$X_{\text{Ind}} = X + \delta X_{\text{Ind}}, \left|\delta X_{\text{Ind}}\right| \leq \frac{k_{\text{Range}}}{2}$$

indirektes, interpolierendes Ablesen



$$X_{\text{Ind}} = X + \delta X_{\text{Ind}}, \left|\delta X_{\text{Ind}}\right| \leq \frac{k_{\text{Range}}}{4}$$

Mit dem bloßem Auge können nur Längendifferenzen größer als **0,5 mm** sicher (eindeutig) identifiziert werden (Skalen entsprechender Länge auswählen).

Auswertung von Messungen (Bildung des Messergebnisses)

- Identifizierung des Messwertes.
- Anbringen von Korrektionen.
- Ermittlung der Messunsicherheit;
- Zusammenfassung zum vollständigen Messergebnis;

Schlussfolgerung resp. Ableitung von Entscheidungen aus dem Messergebnis gehören nicht zur Auswertung einer Messung, werden sich aber i.Allg. an jede Messung anschliessen.

Richtighaltung von Messmitteln

- Messmittelbewahrung und Überprüfung .

Wie werden Messergebnisse angegeben?

Einen einzelnen Messwert gibt man korrekt in Form einer Größengleichung an

$$X = \{X\}[X]$$

d.h.

- auf der linken Seite steht die Messgröße X (als Formelzeichen oder ausgeschrieben) und
- rechts der Zahlenwert $\{X\}$ gefolgt von der Einheit $[X]$.

Zum vollständigen Messergebnis gehört eine Unsicherheitsangabe, die zugleich die Anzahl der anzugebenden, gültigen Stellen festlegt, ergänzt durch eine Angabe der relevanten Messbedingungen.

Bei einer norm-gerechten Angabe des Messergebnis ist für die Unsicherheitsangabe die Messunsicherheit entsprechend der ISO/BIPM-GUM-Methode zu ermitteln und anzugeben (siehe Vorlesung "Messfehler").

BEISPIEL **Angabe eines Messergebnisses**

Messergebnis

$\vartheta = \mathbf{-12^oC}$;

Fülldruck $p_{\mathrm{Fill}} = \mathbf{228\ Pa}$;

Vollständiges Messergebnis

Masse der Substanz $\mathbf{12{,}35\ kg \pm 10\ g}$;

Umgebungstemperatur $\mathbf{(23 \pm 2)^oC}$.

In Ausnahmefällen ist es zulässig, die Einheiten wegzulassen, sofern die benutzten Einheiten festliegen.

So ist es z.B. üblich, dass Maßangaben in bestimmten technischen Zeichnungen in **mm** erfolgen und die Werte an den Bemaßungspfeilen ohne Einheit angegeben werden; dabei wird meist noch in der Zeichnungslegende vermerkt, dass alle Maße in **mm** angegeben sind.

Sollen Messwerte mehrerer Größen der gleichen Größenart angegeben werden, verwendet man bevorzugt Tabellen; die benutzte Einheit wird in der Regel nur einmal im Tabellenkopf angegeben, entweder einzeilig in der Form

Größe X in $[X]$

oder in einer besonderen Zeile. Die Tabelle erläutert verschiedene Möglichkeiten; in der Praxis wird man um Missverständnisse und Fehlinterpretationen zu vermeiden jeweils nur eine der Möglichkeiten verwenden.

Tabelle Beispiel zur Einheitenangabe in Tabellenköpfen

Nr. der Messung	Messstrecke l_M (in $\mathbf{m}$)	Zeit t in $\mathbf{s}$	Geschwindigkeit $\mathbf{m/s}$
1	**100**	**5**	**20**
2	**400**	**30**	**13,3**
3	**200**	**14,4**	**13,9**

FALSCH ist es, die Einheiten im Tabellenkopf in eckige Klammern zu setzen!

Unsicherheiten können zusammengefasst außerhalb der Tabelle angegeben werden.

Bei der Ermittlung funktioneller Zusammenhänge lassen sich die Messwerte (Werte-Paare), ebenfalls in Form von Tabellen wiedergeben.
Der funktionelle Zusammenhang zweier Größen, d.h. seine mathematische Form $Y = f(X)$, ist i.Allg. jedoch leichter aus einer grafischen Darstellung zu erkennen.
Aus diesem Grund werden derartige Messergebnisse meist in geeigneten Koordinatensystemen als Messpunkte eingetragen und Kurven durch die erhaltene Punkteschar gelegt (*grafische Darstellung*, *Diagramm*).

Es sind zwei Arten von grafischen Darstellungen zu unterscheiden

- *informatorische* (skalenlose) *Diagramme* für orientierende, qualitative Aussagen;
- *Arbeitsdiagramme* und *Nomogramme* (Skalendiagramme) für die Wiedergabe quantitativer Zusammenhänge, denen ggf. auch Zahlenwerte entnommen werden sollen.

Bei der Erstellung von messtechnischen und wissenschaftlichen Diagrammen sind folgende Hinweise zu beachten
(siehe DIN 461 "Grafische Darstellung in Koordinatensystemen"):

(1) Bestandteile einer grafischen Darstellung

Eine grafische Darstellung besteht in der Regel aus:
- dem Diagramm,
- der Bildunterschrift
  (Benennung des Diagramms);
- der Legende
  (Erklärungen zum Diagramm).

Das Diagramm ist (weitgehend) frei von Text zu halten.
Wörter sind nur gerechtfertigt, wenn sie ohne Beeinträchtigung der dargestellten Zusammenhänge wichtige Zusatz-informationen auf den "ersten Blick" vermitteln!

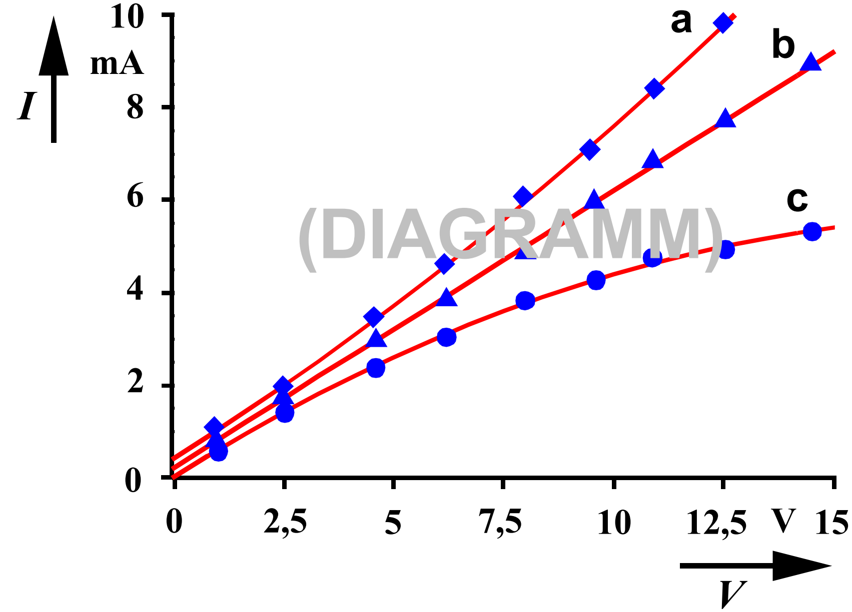


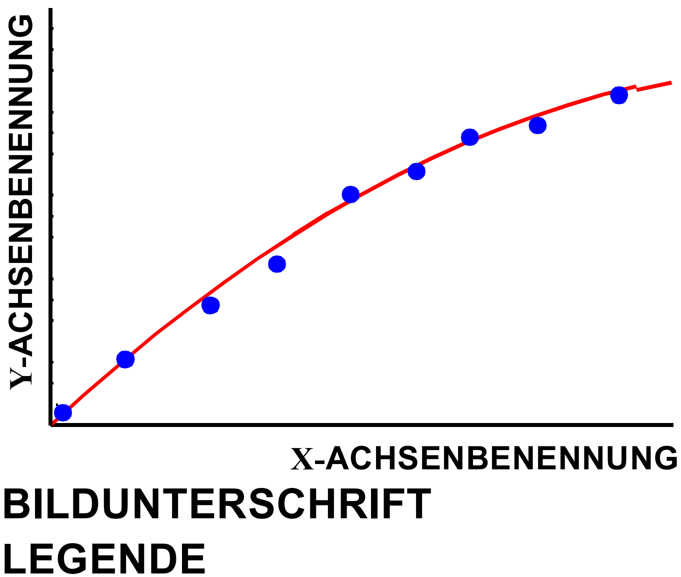
Abb. #: Kennlinie ... (BENENNUNG)

I: .... *U*: .... (ERKLÄRUNG)

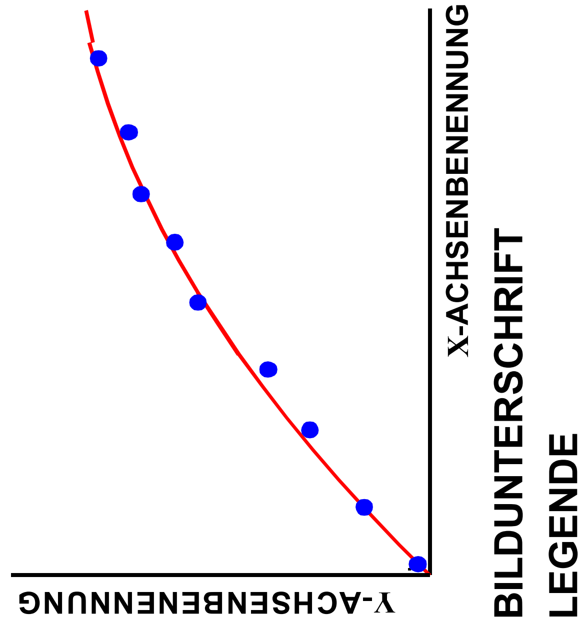
a: .... b: .... (ERKLÄRUNG)

(2) Orientierung der grafischen Darstellung

Ein Diagramm sollte so orientiert werden, dass die Schrift von unten bzw. rechts lesbar ist. Notfalls kann es auch so orientiert werden, dass diese Bedingung erst nach Drehen der Darstellung um 90° im Uhrzeigersinn erfüllt ist (von rechts bzw. oben lesbar).



Orientierung unten/rechts



Orientierung rechts/oben

(3) Bestandteile des Diagramms

Ein Diagramm besitzt in der Regel
- (zwei) Achsen;
- eine Benennung für jede Achse;
- eine Kennzeichnung der Wertzuwachs-Richtung für jede Achse;
- Messpunkte (möglichst mit Unsichersheitsbalken);
- eine oder mehrere Kurven;
- Benennungen der einzelnen Kurven bei Kurvenscharen;

und zusätzlich bei Arbeitsdiagrammen
- eine Teilung auf jeder Achse;
- Einheiten an jeder Achse;

Die Achsenmaßstäbe sind so zu wählen, dass die wesentlichen Bereiche der Kurve unter einem Winkel von etwa zur Abszisse verlaufen.
Es können dazu auch unterschiedliche Koordinaten-Teilungen (eine Achse linear, die andere logarithmisch geteilt u.ä.) verwendet werden.

(4) Markierung der Messpunkte

Messpunkte sind deutlich durch zentrierte Symbole (Kreuze, Vierecke, Dreiecke, Kreise u.ä.) zu markieren.
Messpunkte, die zu verschiedenen Kurven gehören oder unterschiedlichen Charakter (gemessene/berechnete Werte) besitzen, sind durch entsprechend unterschiedliche Markierungen deutlich zu unterscheiden.

Kreuze: + ×

Vierecke: □ ◇ ■ ◆

Dreiecke: △ ▽ ▲ ▼

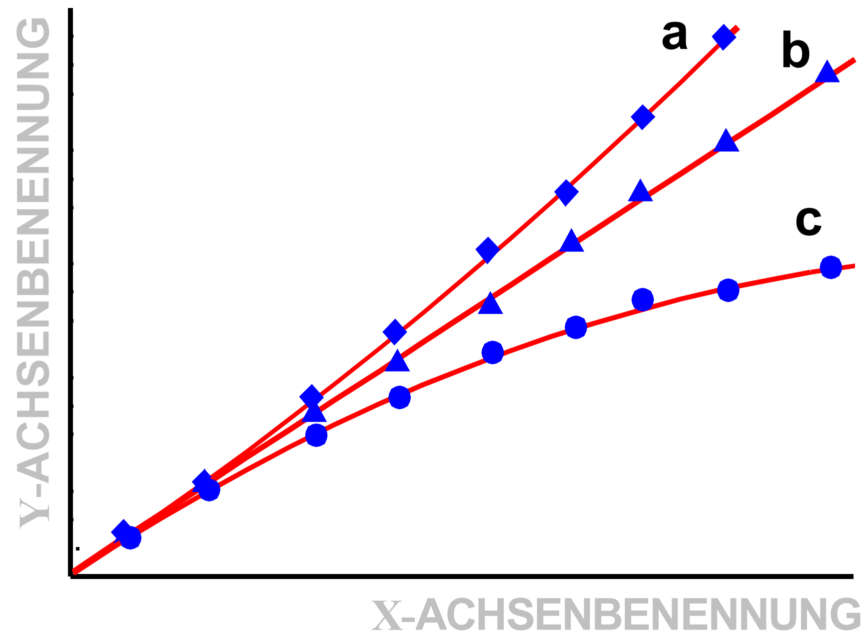
Kreise: ○ ●

(5) Verwendung von Kurven

Kurven sollen die realen Gegebenheiten darstellen, auf die von den gemessenen Werten geschlossen wird.
Man wird daher, auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit, i.Allg. glatte Kurven (Stetigkeit der wirklichen Vorgänge) durch streuende Messpunkte legen.
Die einzelnen Kurven einer Kurvenschar müssen zur Identifizierung bezeichnet sein:

keinen Text,
nur Ziffern oder Buchstaben, deren Bedeutung in der Legende erklärt wird.

RICHTIG

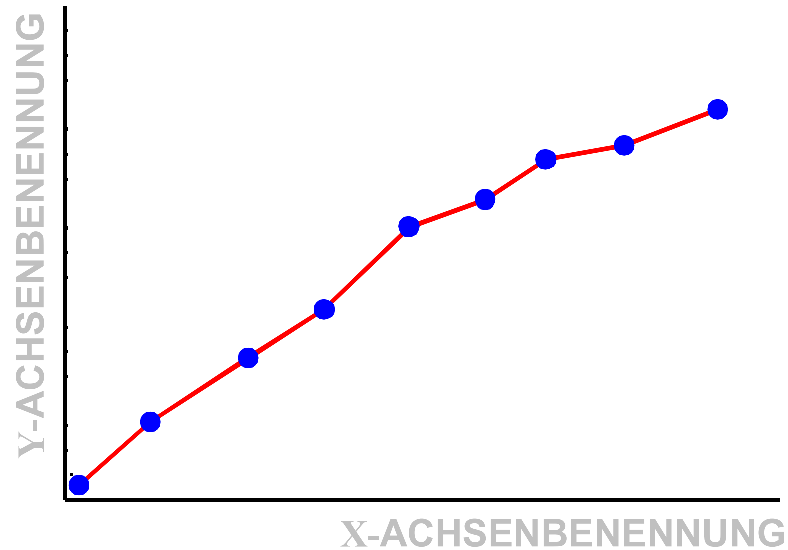


BILDUNTERSCHRIFT

LEGENDE

Strichbreiten der Kurven sind dem jeweiligen Zweck und der Größe des Diagramms anzupassen; unterschiedliche Strichbreiten oder Farben können als Träger zusätzlicher Information zweckmäßig sein.
Sollen Kurven (messtechnisch ermittelte Zusammenhänge) miteinander verglichen werden, so sind sie möglichst in demselben Diagramm darzustellen.
Werden mehrere Diagramme für übersichtlicher gehalten, müssen die Achsenmaßstäbe übereinstimmen!

FALSCH



BILDUNTERSCHRIFT

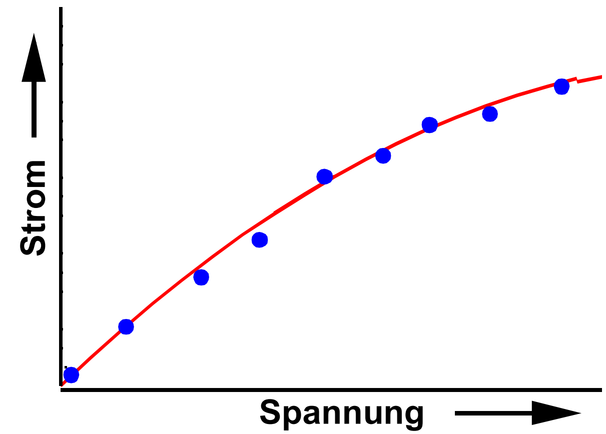
LEGENDE

Kein Kurvenzug mit stetiger Tangente (Fieberkurve!)

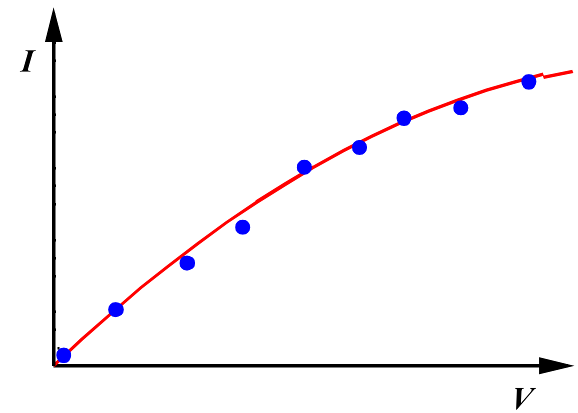
(6) Benennung der Achsen

Die Achsen müssen benannt werden, um deutlich herauszustellen, was wie dargestellt wird.
Dazu sind die im Diagramm aufgetragenen Größen an den Achsen anzugeben,
 entweder ausgeschrieben in Worten
 oder als Formelzeichen
zusammen mit einem Pfeil in Richtung wachsender Werte der betreffenden Größe.
Dabei gelten die Regeln
- Abszisse: Wertzuwachs nach rechts
- Ordinate: Wertzuwachs nach oben.

Bei informatorischen Diagrammen kann das Formelzeichen der Größe auch an die Pfeilspitze der betreffenden Achse stehen.



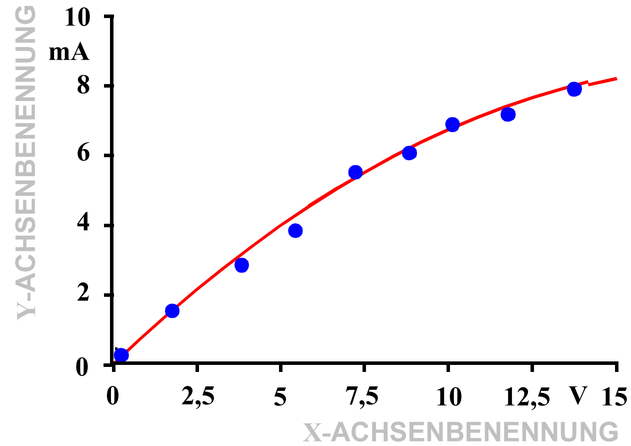
BILDUNTERSCHRIFT
LEGENDE



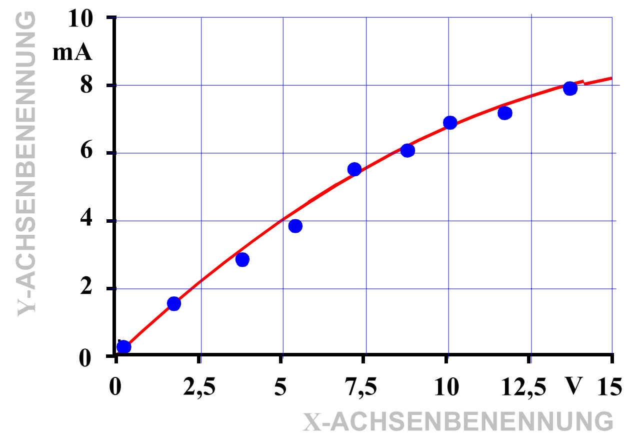
BILDUNTERSCHRIFT
LEGENDE

(7) Teilung der Achsen

Durch die Teilung der Achsen erfolgt die Wertzuweisung.
Die Markierung erfolgt durch Teilungsstriche (Querstriche, engl. tics), wobei nicht alle Teilungsstriche eine Wertangabe tragen müssen - Zwischenwerte sind wegzulassen, falls die Teilung zu dicht wird; der Beginn einer Achse muss in jedem Fall eine Wertangabe tragen.
Negative Werte sind mit einem Minuszeichen zu versehen.
Die Teilung der Achsen kann zur Unterstützung einer genaueren Ablesung einzelner Werte durch ein Gitternetz (Linien-Raster) ergänzt werden.
Bei informatorischen Diagrammen wird auf eine Teilung resp. ein Gitternetz verzichtet.



BILDUNTERSCHRIFT
LEGENDE



BILDUNTERSCHRIFT
LEGENDE

(8) Einheiten auf den Achsen

Die verwendeten Einheiten sind möglichst zwischen dem vorletzten und dem letzten Zahlenwert der Achsenteilung anzugeben.
Alternativ können die Größen auch als zugeschnittene Größen (Quotient aus Größe und Einheit) angegeben werden.
FALSCH ist es, die Einheiten in eckige Klammern zu setzen!

(9) Bildunterschrift - Benennung des Diagramms

Zu jedem Diagramm gehört eine Bildunterschrift; sie sollte die Angaben enthalten:

- Bild-/Abbildungsnummer,
- deutliche, in Worten gefasste Angabe welche Größe in Abhängigkeit von welcher anderen dargestellt ist, ggf. ergänzt durch Angabe des funktionellen Zusammenhanges in Form einer Gleichung (bzw. Angabe der Gleichungs-nummer im Text).

- Hinweise bei mehreren Kurven im selben Koordinatensystem auf ihre Bedeutung ("gemessen", "berechnet", o.ä.),
- Messbedingungen (soweit nötig), wie benutzte Messmittel, eingestellte Messbereiche, Umgebungstemperatur, Messzeiten, Messunsicherheiten, Auswertemethode usw.;
- Quellenangabe, soweit erforderlich.

(10) Legende - Erklärungen zum Diagramm

In der Legende ist die Bedeutung der verwendeten Messpunkt-Markierungen, Kurven-Benennungen und Formelzeichen o.ä. zu erklären.

Messmitschrift (Messprotokoll)

- Konzentrierte dokumentarische Darstellung der chronologischen Folge der bei der Messung durchgeführten Tätigkeiten und Beobachtungen sowie mit Aufzeichnungen der unmittelbar abgelesenen Anzeigen (z.B. Skalenteile, Messbereiche);
- Separate, transparent Vor-/Teilauswertung mit dem Ziel der Nachprüfbarkeit.

Die Messmitschrift ist ein Dokument, das in einem gebundenem Laborbuch oder als ”Lose Blattsammlung” geführt werden kann.
Sie sollte auf jeder Seite enthalten

- Kopfzeile mit Titel (eindeutige Identifikation);
- Seitennummer und Anzahl der Seiten des Dokumentes;
- Name(n) des (der) Messenden (Kennzeichnung des Protokollführers), ev. zusätzliches Identifikationsmerkmal;
- Datum der Messung, ev. mit zusätzlicher fortlaufender Nummerierung bei mehreren gleichen Messungen.

Formulierung messtechnischer Zusammenhänge

Klare Formulierung messtechnischer und physikalischer Zusammenhänge und Einsicht in die messtechnischen Vorgänge bedingen sich gegenseitig:

- eine schlechte Sprache zeugt auch von mangelndem Verständnis;
- eine klare Aussage setzt eine klare Definition der Begriffe voraus.

Häufig werden die Dinge und ihre Eigenschaften durcheinandergeworfen.

BEISPIEL **Kapazität - Kondensator**

Teil einer Verstärkerschaltung ist nicht eine Kapazität, sonder ein Kondenstor.
Die Kapazität ist seine Eigenschaft elektrische Ladung zu speichern.

Häufig findet man auch eine technisch-wissenschaftliche Kindersprache.

BEISPIEL **in Watt gemessene Leistung**

(1) "Die in Watt gemessen Leistung, die nötig ist, um... ".
Der Zusatz "in Watt gemessene" ist eine unnötige Einschränkung;
die Leistung wird sicher auch nötig sein, wenn sie in einer anderen Einheit gemessen wird.

(2) "Das sind „die Watt“, die nötig sind, um... ".

Bei dieser sprachlichen Armut kommt einem die "Ostfriesland" in den Sinn!

Die Kurzsprache der Messtechnik wie der exakten Naturwissenschaften ist die **Formelsprache** der Mathematik

In ihr werden Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten dargestellt.
Sie ist eine Symbolsprache (Stenografie), die physikalische Größen durch mathematische Operationen verbindet, eine knappe und prägnante Kommunikation vermittelt und den höchstmöglichen Informationsgehalt verbürgt.
Die heute meist angewendete Schreibweise der Gleichungen ist die Größengleichung.
Jedes Formelzeichen bedeutet eine physikalische Größe, wofür im konkreten (speziellen) Fall ein Produkt aus Zahlenwert und Einheit einzusetzen ist. So geschriebene Gleichungen gelten unabhängig von der Wahl der Einheiten.