

- 1            **Allgemeine Messtechnik****
- 1.1            Grundsätzliches
- 1.2            Grundbegriffe des Messens
- 1.2.1          Internationales Einheitensystem (SI), Begriffe des Normes, Eichen, Justieren, Kalibrieren
- 1.2.2          Das Meßgerät als System, der Begriff der Übertragung
- 1.3            Meßfehler
- 1.3.1          Statischer Fehler, empirische Beschreibung und Klassifizierung
- 1.3.2          Statischer Fehler mit systematischen Fehlerursachen
- 1.3.3          Statischer Fehler mit zufälligen Fehlerursachen
- 1.3.4          Dynamischer Fehler
- 1.3.5          Fehlerkennwerte in der Praxis
- 1.4            Lineare Regression
- 1.5            Filterung
- 1.5.1          Analoge Filterung
- 1.5.2          Digitale Filterung
- 1.6            Anzeige und Registrierung der Meßergebnisse
- 1.6.1          Anzeige
- 1.6.2          Registrierung

# 1 Allgemeine Meßtechnik

R. Schröter

## 1.1 Grundsätzliches

Die Fähigkeit, messen zu können, hat der Mensch in einer noch andauernden jahrhundertelangen Evolution herangebildet. In unserem Alltag begegnen wir, ob bewußt wahrgenommen oder nicht, ständig Meßvorgängen, sei es die Dosierung von Selterswasser am Getränkeautomaten, die Temperatur des Kaffees oder eines Raumes. Wir sind überall von Meßtechnik umgeben. Die Messung und Anzeige der Fahrgeschwindigkeit unseres Autos hilft uns, das Gesetz nicht zu übertreten und unser Risiko zu begrenzen. Da die Fähigkeit zum Messen für ein gerechtes Teilen Voraussetzung ist, ist sie ein Grundpfeiler des menschlichen Zusammenlebens. Der Austausch von Waren und von Dienstleistungen ist immer von Messungen der Masse, des Volumens, der Zeit u.a. begleitet.

Die Beschäftigung mit der Meßtechnik war in früheren Zeiten nur durch die aktuelle Meßaufgabe motiviert. Unterdessen gelang es, die meßtechnischen Erkenntnisse zu verallgemeinern und vom einzelnen Anwendungsgebiet zu abstrahieren. Die Meßtechnik wird inzwischen als eine selbständige Wissenschaft aufgefaßt.

Für ein Verständnis von Meßvorgängen sind die im nächsten Abschnitt erläuterten Definitionen der Grundbegriffe eine wichtige Voraussetzung. Allgemein läßt sich das Messen als ein Verfahren ansehen, von den natürlichen Zuständen oder von technischen Abläufen Informationen zu gewinnen. Zugleich gilt aber auch, daß wir bei jeder Messung einen Verlust an Informationen akzeptieren müssen. Z. B. kennen wir nicht die Temperatur, die in der Zeit zwischen zwei Messungen herrscht. Ebenso geht es mit den Meßorten. Vor, hinter und zwischen unseren zwei Meßorten haben wir ja nicht gemessen.

Es wird klar: eine Messung bedarf der Planung. Darin liegt die eigentliche Aufgabe des Ingenieurs: er legt fest, wann, wo, wie oft und wie genau wir zu messen haben.

Die Forderung nach größtmöglicher Effizienz gebietet uns für die Planung:

- so wenig Meßorte wie nötig
- so wenig Messungen wie nötig
- so wenig Meßgenauigkeit (= Aufwand) wie nötig.

Gerade gegen die letzte Forderung wird von jungen Ingenieuren und in Hochschulen ganz allgemein recht oft verstoßen. Die Meßgenauigkeit bzw. die Größe der Meßfehler muß der Ingenieur vor jeder Messung ermitteln. Die dazu nötigen Fakten sind in Kapitel 1.3 dargestellt.

## 1.2 Grundbegriffe des Messens

Die Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung von Meßverfahren und Meßgeräten wird **Metrologie** genannt. Die Umsetzung metrologischer Erkenntnisse in die Technik von Meßmitteln und ihrer Anwendung bezeichnen wir als **Meßtechnik**. Der Begriff **Messen** wird in der DIN 1319 [1 - 4] sehr knapp dargestellt mit den Worten: "Ausführung von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Meßgröße mit einer Einheit." Etwas detaillierter läßt sich sagen:

**Messen** ist der experimentelle Vorgang zum quantitativen Vergleich zwischen einer Meßgröße und einer Bezugsgröße mit Hilfe einer **Meßeinrichtung**. Das ermittelte Resultat der Messung wird **Meßwert** genannt. Der Meßwert wird in Form eines **Produktes** aus einem **Zahlenwert** und einer **Einheit** dargestellt. Dem Zahlenwert entnimmt man den **Betrag** und der Einheit die **Art** der Meßgröße. In einfachen Fällen ist dieser Meßwert schon das **Ergebnis** der Messung (z.B. Längenmessung mit einem Lineal). In anderen Fällen wird aus mehreren Meßwerten mit Hilfe einer bekannten eindeutigen **Rechenvorschrift** (z.B. Volumen als Produkt von drei orthogonalen Längen) das **Meßergebnis** ermittelt. Die physikalische Größe, welche wir messen wollen, die **Meßgröße**, ist eine Eigenschaft des Meßobjektes. **Meßobjekte** sind z.B. Körper, technische Prozesse oder Zustände.

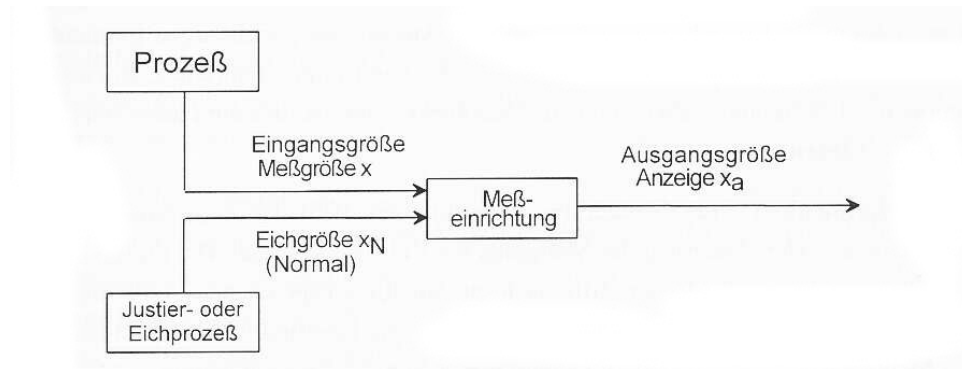
Für den Zweck der Messung wird ein physikalischer Vorgang als **Meßprinzip** eingesetzt.

Der Zusammenhang sei an einigen Beispielen erläutert:

<b>Meßgröße</b>	<b>Meßprinzip</b>
Temperatur	Längenänderung
	Flüssigkeitsausdehnung
	Thermoelektrischer (Seebeck-) Effekt
	Widerstandsänderung
Rel. Luftfeuchte	Hygroskopische Längenänderung von Haaren oder von Kunststoffasern
	Kapazitätsänderung eines Kondensators
Druck	Elastische Deformation eines Körpers
	Piezoelektrischer Effekt

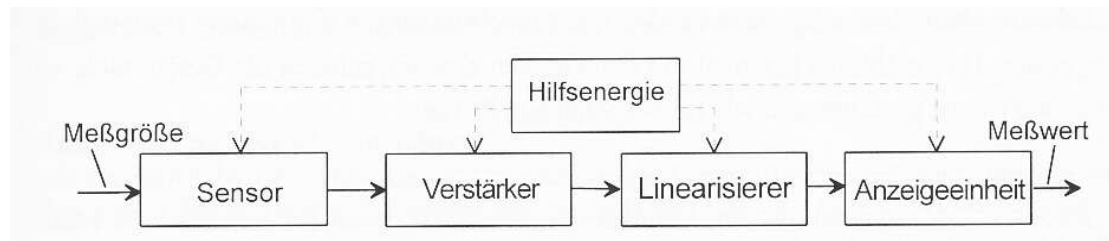
Alle zur Durchführung der Messung notwendigen Maßnahmen werden in dem Begriff **Meßverfahren** zusammengefaßt. Die praktische Umsetzung eines ausgewählten Meßverfahrens nennt man **Meßeinrichtung**. Die Meßeinrichtung ermittelt vom betrachteten

Prozeß durch den Vergleich mit einem bekannten Normal aus der Meßgröße  $x$  und der Normalgröße  $x_N$  die Anzeigegröße  $x_a$ . Diese elementare Verkettung wird als **Meßsystem** bezeichnet.



**Bild 1.1:** Meßsystem, vereinfachtes Blockschaltbild

Die Meßeinrichtung kann aus einem oder mehreren, zu einem System zusammengestellten, Meßgeräten bestehen. Es handelt sich dann um eine **Meßkette**, oder allgemeiner um ein Übertragungssystem mit einseitig gerichtetem Signalfluß.



**Bild 1.2:** Beispiel einer Meßkette einer Meßeinrichtung

Für den in Bild 1.2 verwendeten Begriff **Sensor** werden auch synonym die Begriffe **Meßgrößenaufnehmer** und **Fühler** verwendet. Der Sensor hat die Aufgabe, die zu erfassende **Primärgröße**, z. B. eine Kraft oder eine Temperatur, in eine für die Weiterverarbeitung besser geeignete **Sekundärgröße** abzubilden, z. B. in eine elektrische Spannung oder einen elektrischen Strom. Eine Grundforderung an den Sensor ist, daß die Abbildung eindeutig und reproduzierbar ist. Stellt man den Zusammenhang zwischen Primärgröße und Sekundärgröße graphisch dar, dann ergibt sich bei einem **linearen Sensor** eine gerade Kennlinie. Auf die näherungsweise Berechnung der mathematischen Funktion dieser Kennlinie, aus einer Anzahl von Meßwerten, wird im Kapitel **1.4 Lineare Regression** näher eingegangen.

Den im Bild 1.2 enthaltenen **Linearisierer** würde man einem **nichtlinearen Sensor** zur Erzeugung einer **linearen Kennlinie** nachschalten. Linearisierer sind Analogrechner, deren nichtlineare Verstärkung sich so parametrieren läßt, daß sie im Zusammenwirken mit einer nichtlinearen Eingangsgroße (dem Sensor) an ihrem Ausgang eine lineare Kennlinie bereitstellen. Werden die Meßwerte in einem Rechner verarbeitet, dann erfolgt die Linearisierung oft auch als rechnerische Korrektur der numerisch vorliegenden Meßwerte.

Spannung und Strom werden häufig als Sekundärgrößen gewählt. Gründe dafür sind: Sie lassen sich auf einfache Art übertragen, und die Möglichkeiten der gezielten Signalaufbereitung (z. B. Filterung, Integration) sind mit geringem Aufwand verfügbar.

Handelt es sich um die Ermittlung der ganzzahligen Anzahl von gleichartigen Elementen (z. B. Anzahl der vorbeitransportierten Schrauben) oder von Ereignissen (wie z. B. Anzahl der Rotationen = Umdrehungszahl) an einem Meßobjekt, dann ist dies ein meßtechnischer Sonderfall, der **Zählen** genannt wird.

Um die **Empfindlichkeit** eines Meßgerätes zu bestimmen, wird der Zeigerweg auf der Skala zur entsprechenden Änderung der Meßgröße ins Verhältnis gesetzt. Bei digital arbeitenden Geräten wird die Anzahl der Zifferschritte auf die entsprechende Änderung der Meßgröße bezogen. Für nichtlineare Meßgeräte läßt sich die Empfindlichkeit nicht für den gesamten Meßbereich angeben, sondern ist punktweise vom Meßwert abhängig.

Meßgeräte werden hinsichtlich ihres Einsatzes den **Labormeßgeräten** oder den **Betriebsmeßgeräten** zugeordnet. Letztere sind überwiegend kontinuierlich messende Geräte, welche einen vollautomatischen Betrieb ermöglichen. Die Bauart ist dem Einsatzort entsprechend robust. Mit Labormeßgeräten werden i. a. Einzelmessungen mit höherer Genauigkeit durchgeführt. Da geschultes Personal mit den Geräten arbeitet, müssen die Geräte nicht so einfach und robust gestaltet sein wie im betrieblichen Einsatz.

In der eingangs erwähnten Definition für den Begriff Messen wurde der Meßwert als das Produkt eines Zahlenwertes mit einer Einheit dargestellt. Ist dieser Zahlenwert - die Maßzahl - von einem Meßgerät ablesbar, dann nennt man ihn **Anzeige**. Bei analogen Meßgeräten erfolgt die Ablesung durch Ermittlung der Zeigerposition relativ zur Skale, bei digitalen Geräten ist die Anzeige direkt als Zahlenwert ablesbar.

Das Intervall der Meßwerte, die am Meßgerät insgesamt ablesbar sind, wird **Anzeigebereich** (auch: **Skalenbereich**) genannt. Der Teilbereich des Anzeigebereiches, in dem der Meßfehler einen vom Hersteller spezifizierten oder garantierten Grenzwert nicht überschreitet, ist der **Meßbereich**. Beginnt der Anzeigebereich nicht bei Null, wird also ein Bereich unterhalb des kleinsten anzeigbaren Wertes nicht angezeigt, dann bezeichnet man diesen als **Unterdrückungsbereich**. Werden im Rahmen einer Meßreihe sowohl positive als auch negative Meßwerte erwartet, dann wird auch ein Anzeigebereich mit dem Nullpunkt in der Mitte eingesetzt. Die Ruhestellung des Zeigers befindet sich dann ebenfalls in der Mitte.

Bei aufwendigeren analogen Zeigergeräten wird zur Vermeidung eines **Parallaxefehlers** durch schräge Betrachtung ein halbringförmiger Streifen in der Skala mit einem Spiegel unterlegt. Wird bei der Ablesung darauf geachtet, daß der Zeiger und sein Spiegelbild hintereinander liegen, dann liest man rechtwinklig ab und der Parallaxefehler ist vermieden.

Zur Einteilung von Meßverfahren werden die folgenden Unterscheidungsmerkmale herangezogen:

### **Direkte und indirekte Meßverfahren**

Direkte Meßverfahren ergeben Meßwerte, die zugleich Größenwerte der eigenen Meßgröße sind. Also, z.B. bei der Längenmessung wird mit einem Metermaß verglichen, bei der Gewichtsmessung wird auf einer Hebelwaage direkt mit geeichten Gewichten verglichen.

Indirekte Meßverfahren ergeben erst einmal andersartige Meßgrößen (Sekundärgrößen). Daraus wird in einem weiteren Schritt mit gegebenen eindeutigen physikalischen Zusammenhängen das Meßergebnis aus den "Rohmeßwerten" berechnet. Bezogen auf die genannten Beispiele ergäbe sich hier etwa für die Längenmessung eine Anzahl von Lichtwellenlängen (Interferometer) oder bei der Gewichtsmessung eine Spannung, die durch die elastische Deformation einer Platte (bzw. eines daran befestigten Halbleiters) herbeigeführt wurde (Piezoelektrischer Effekt). Andere Meßgrößen, wie z. B. die Zeit oder die Temperatur, sind prinzipiell nicht durch ein direktes Meßverfahren meßbar. Ist ein Meßergebnis durch eine Rechenvorschrift aus mehreren Meßgrößen gebildet, z. B. das Volumen als Produkt dreier Längen, dann gilt diese Vorgehensweise auch als indirektes Meßverfahren.

### **Aktive und passive Meßverfahren**

Bei vielen Meßverfahren benötigen die eingesetzten Geräte Energie. Diese Energie wird bei aktiven Meßverfahren als Hilfsenergie von außen zugespeist. Bei den passiven Meßverfahren wird sie dem Prozeß bzw. dem Meßobjekt entnommen.

Ein einfaches Zeigervoltmeter oder ein Flügelradwindgeschwindigkeitsmesser entnimmt dem Prozeß die für seinen Betrieb (Zeigerausschlag bzw. Rotation des Flügelrades) benötigte Energie. Es handelt sich also um passive Meßverfahren.

Bei einem modernen Multimeter ist durch einen batteriegespeisten Verstärker die Belastung der zu messenden Spannungsquelle weitgehend vermieden. Wird die Windgeschwindigkeit mit dem im Kapitel 4.2.4 beschriebenen Laser-Doppler-Velozimeter gemessen, dann entfällt die beim Flügelrad entstehende Beeinflussung der Strömung. Die beiden letztgenannten Verfahren sind also aktiv (mit eigener Energiequelle) an den Prozeß angekoppelt.

### **Analoge und digitale Meßverfahren**

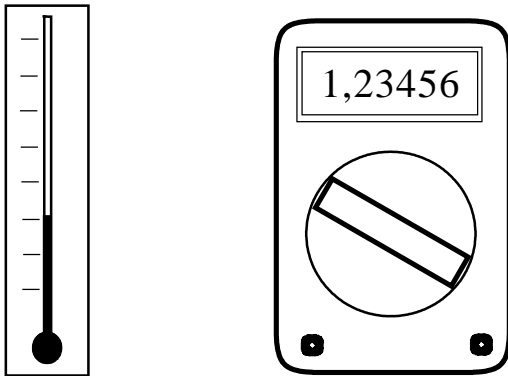
Die uns interessierenden natürlichen oder technischen Abläufe verhalten sich sowohl hinsichtlich ihrer Größe als auch ihres zeitlichen Ablaufs stetig. D.h. sie machen keine

Sprünge und verändern sich um beliebig kleine Differenzen. Dieses analoge Verhalten wird von einem Meßverfahren unter Verlust von Informationen abgebildet.

Bei den analogen Meßverfahren ist die abgebildete Ausgangsgröße stetig, also z.B. ein sich kontinuierlich bewegendes Stift eines Schreibers, ein Zeigerinstrument.

Die digitalen Meßverfahren produzieren eine gerasterte, also in kleine Schritte unterteilte Ausgangsgröße. Der Meßwert erscheint hier als (ganze) Zahl von Quantisierungsschritten oder als Ziffernfolge.

Für die Messung elektrischer Spannungen gibt es Umsetzer, mit denen die Wandlungen Analog-Digital und Digital-Analog einfach durchzuführen sind. Analog angezeigte Meßwerte sind für den Menschen leichter und schneller zu erfassen. Z. B. in einem Flugzeugcockpit werden alle wichtigen Meßwerte analog signalisiert. Nur die seltener abzulesenden Meßwerte werden digital dargestellt.



**Bild 1-3:** Beispiele für Meßgeräte mit analoger und digitaler Anzeige (Thermometer, Multimeter)

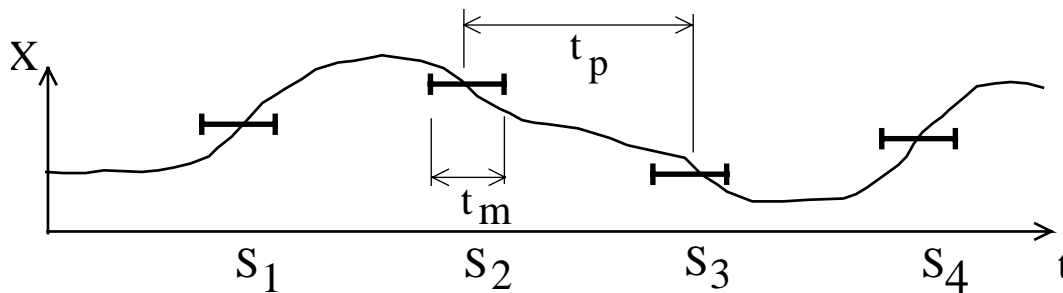
### Kontinuierliche und diskontinuierliche Meßverfahren

Bei der Unterscheidung der analogen und digitalen Meßverfahren ergab sich eine Rasterung hinsichtlich der Größe des Meßwertes. Die zeitliche Veränderung der Meßwerte kann ebenfalls kontinuierlich oder in Schritten erfaßt werden. Ein digitales Meßverfahren ergibt zwangsläufig auch für die Zeitachse eine Rasterung. Prinzipiell ergibt sich bei den diskontinuierlichen Verfahren - sie werden auch als getastete Systeme bezeichnet - ein Informationsverlust, Bild 1-4.

Die sprunghafte Veränderung des Meßwertes zwischen den Messungen  $S_3$  und  $S_4$  würde in diesem Beispiel nicht erfaßt werden. Die Zeit  $t_p$  wird meistens für die Dauer einer Messung konstant reproduziert. Es handelt sich dann um ein **äquidistantes Meßzeitraster**. I. a. ergibt sich zwischen den Messungen eine kurze Meßpause  $t_B$

$$t_B = t_p - t_m \quad (1.1)$$

Die Dauer der Einzelmessung  $t_m$  wird auch Integrationszeit genannt. Während dieses "Zeitfensters" wird ein Mittelwert von der sich ständig verändernden Meßgröße gebildet.



**Bild 1-4:** Diskontinuierliche Messung

### 1.2.1 Internationales Einheitensystem, Normal, Eichen, Justieren, Kalibrieren

Die Abkürzung SI steht für *Système International d'Unités*. Für die eindeutige Definition einer Meßgröße bedarf es der Festschreibung von Konventionen für sog. Meßnormale. Solche Konventionen müssen in langen Verhandlungen von möglichst vielen Nationen akzeptiert werden. Die ggf. nötigen Umstellungen, um die nationale Industrie an internationale Standards anzupassen, kosten sehr viel Geld. Die Durchmesser und Steigungen von Schraubgewinden sind ein typisches Beispiel für die Schwierigkeiten.

Für viele Größen gibt es ein starkes Interesse, sie - im Sinne der Norm - zu messen, aber die strenge und scharfe Definition eines international anerkannten Grundnormals gelingt nicht. Beispiele hierfür sind: Die menschliche Intelligenz oder die von den Klimatechnikern vielfach untersuchte Behaglichkeit sind im Sinne der Norm nicht "meßbar". Bei der Behaglichkeit ist in der wissenschaftlichen Diskussion nicht einmal eindeutig abgegrenzt, welche Einflüsse dazu einen Beitrag leisten. Dennoch wird in dem für die Behaglichkeit wichtigen Bereich, dem der Geruchsempfindungen, an einem Standard gearbeitet. Es wird versucht, die Empfindungen einer großen Zahl von Testpersonen statistisch auszuwerten. Bei anderen viel diskutierten Größen, wie z.B. die Qualität eines Konzerts oder von anderen künstlerischen Darbietungen, ist es vielleicht gar nicht wünschenswert, daß nach Standards gesucht wird.

Auf der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CPGM) wurde 1960 das heute gültige Einheitensystem, kurz SI empfohlen. Es enthält die Definition von sieben Basiseinheiten. In der folgenden Tabelle sind Größen, Formelzeichen, Basiseinheit und Einheitenzeichen zusammengestellt.



Basisgröße	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Stromstärke	I	Ampere	A
Thermodyn. Temperatur	T	Kelvin	K
Lichtstärke	I <sub>L</sub>	Candela	cd
Stoffmenge		Mol	mol

**Tabelle 1-1:** Die sieben Grundgrößen des SI-Systems

Die Festlegung von Basiseinheiten kann nicht für alle Zeit gelten. Sie muß gelegentlich an den aktuellen Stand der Technik angepaßt werden. Die Basiseinheit Meter wurde früher durch einen in Paris aufbewahrten x-förmigen Platin-Iridium-Stab repräsentiert. Auf der 17. Generalkonferenz der CGPM wurde 1983 eine neue Definition festgelegt. Ein Meter ist die Länge der Wegstrecke, die das Licht im Vakuum in der Zeit  $1/299792458$  Sekunden durchläuft. Die Bedeutung einer sehr genauen Reproduzierbarkeit (Unsicherheit der obigen Definition  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$ ) wird heute höher eingeschätzt als die einer einfachen Realisierung eines Normals.

Die Festlegung für die anderen sechs Basiseinheiten soll hier nicht dargestellt werden. Sie ist u.a. im Handbuch der industriellen Meßtechnik von P. Profos [7] dargestellt. Die gesetzliche Festlegung der sieben Grundeinheiten des SI-Systems erfolgte für die Bundesrepublik Deutschland am 2.7.1969. In der täglichen Meßpraxis werden neben diesen sieben Basiseinheiten auch Einheiten verwendet, die aus ihnen zusammengesetzt sind. Sie werden als kohärente abgeleitete SI-Einheiten bezeichnet. In der Tabelle 1-2 auf der Seite 11 sind die wichtigsten abgeleiteten Einheiten aufgenommen.

Die nachfolgend erläuterten Begriffe Justieren, Kalibrieren und Eichen werden von den Praktikern häufig fehlerhaft verwendet.

**Justieren (oder Abgleichen)** ist eine Minimierung der Meßabweichungen, so daß die Beträge der Meßabweichungen die gegebenen Fehlergrenzen nicht überschreiten. Es handelt sich also i.a. um einen Eingriff in das Gerät, also um eine bleibende technische Änderung des Meßgerätes bzw. der Maßverkörperung.

**Beispiel:** Von einem Meßverstärker ist ein Verstärkungsfaktor von 10 gefordert. Es wird, in einem Vergleich mit einem Normalgerät entsprechend höherer Genauigkeit, so lange an dem im Meßverstärker befindlichem Potentiometer gedreht, bis der Verstärkungsfaktor 10 im Rahmen der vorgegebenen Toleranz erreicht ist.

Größe	Name	Einheit	durch andere SI-Einheiten ausgedrückt	durch SI-Basiseinheiten ausgedrückt
Fläche	Quadratmeter	m <sup>2</sup>		m <sup>2</sup>
Volumen	Kubikmeter	m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Dichte	Kilogramm pro Kubikmeter	kg/m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>
Geschwindigkeit	Meter pro Sekunde	m/s		m/s
Beschleunigung	Meter pro Sekundenquadrat	m/s <sup>2</sup>		m/s <sup>2</sup>
Kraft	Newton	N		m kg s <sup>-2</sup>
Volumenstrom (Volumendurchfluß)	Kubikmeter pro Sekunde	m <sup>3</sup> /s		m <sup>3</sup> /s
Massenstrom Massendurchfluß)	Kilogramm pro Sekunde	kg/s		kg/s
kinematische Viskosität	Quadratmeter pro Sekunde	m <sup>2</sup> /s		m <sup>2</sup> /s
spezifisches Volumen	Kubikmeter pro Kilogramm	m <sup>3</sup> /kg		m <sup>3</sup> /kg
Drehzahl	reziproke Sekunde	s <sup>-1</sup>		s <sup>-1</sup>
Frequenz	Hertz	Hz		s <sup>-1</sup>
Druck, mech. Spannung	Pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
Leistung, Energie- strom, Wärmestrom	Watt	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
Celsiustemperatur	Grad Celsius	°C		K

**Tabelle 1.2:** Kohärente, abgeleitete SI-Einheiten

Beim **Kalibrieren** handelt es sich um die Feststellung der Maßabweichung des Meßgerätes. Es wird kein justierender Eingriff vorgenommen. Auch bei der Kalibrierung wird ein Normalgerät höherer Genauigkeit (oder entsprechende physikalische Fixpunkte) zum Vergleich herangezogen. Diese Vorgehensweise wird auch "anschießen" genannt. Bei dem o. g. Beispiel eines Meßverstärkers würde also nur festgestellt werden, daß die Verstärkung den Wert 9,92 hat. Allgemein gesagt, wird die Anzeige eines Meßgerätes Eingangswerten (z. B. in Form einer Tabelle) zugeordnet. Diese Tätigkeit wird fälschlich auch als Eichung bezeichnet.

Es handelt sich jedoch nur dann um eine **Eichung**, wenn die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) oder eine von ihr dazu zugelassene Institution diese Tätigkeit als eine amtliche Handlung vollzieht. Die Eichung ist eine (regelmäßige) amtliche Überprüfung ("Richtighaltung") von Meßmitteln. Ist diese Prüfung erfolgreich, d. h. die Beträge der Meßabweichungen überschreiten die Fehlergrenzen nicht, so wird sie auf dem Meßmittel entsprechend beurkundet (Stempel oder Aufkleber). Die Gültigkeitsdauer einer Eichung ist befristet und so festgelegt, daß bei sachgemäßer Handhabung die Abweichungen in den spezifizierten Grenzen bleiben. Rechtzeitig vor Ablauf der Frist (z. B. zwei Jahre) hat eine Nacheichung zu erfolgen. Ob ein Meßmittel der Eichpflicht unterliegt, hängt vom Einsatzfall ab. Einsatzfälle, für die eine Eichpflicht gesetzlich vorgeschrieben ist, sind z.B.:

- Quantitätsbestimmung von Waren im Geschäftsverkehr (z. B. Kaufmannswaage, Volumenstrom in einer Zapfsäule für Treibstoff, Wasserzähler, aber auch der Wegstreckenzähler im Leihwagen)
- Kontrollen im Gesundheitswesen (z. B. Blutdruckmessung), auch für den Strahlenschutz
- Sicherheitswesen, auch für die Sicherheit im Straßenverkehr (z. B. Fahrgeschwindigkeit)
- für den Einsatz als Normal

Ist ein Gerät eichpflichtig, dann wurde vor seiner Markteinführung seine Eichfähigkeit von der PTB untersucht und bescheinigt.

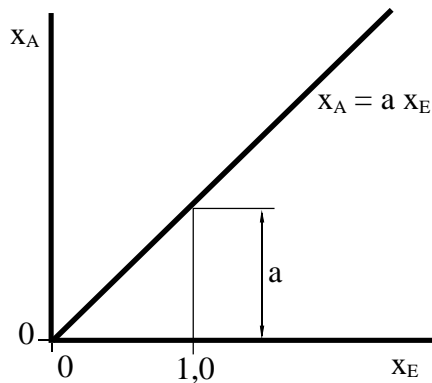
### 1.2.2 Das Meßgerät als System, der Begriff der Übertragung

Die Umwandlung der Meßgröße in einen unseren Anforderungen entsprechenden Meßwert, ist oft ein Weg mit vielen Etappen. Bei der Erläuterung der Grundbegriffe wurde gezeigt, daß einer Meßeinrichtung eine Kette von einzelnen Übertragungsgliedern zugrunde liegt. In jedem Übertragungsglied findet eine Umformung der Meßinformation statt. Es ergibt sich daher ein Unterschied zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Die Übertragungsglieder nennt man auch Wandler bzw. Meßwertwandler.

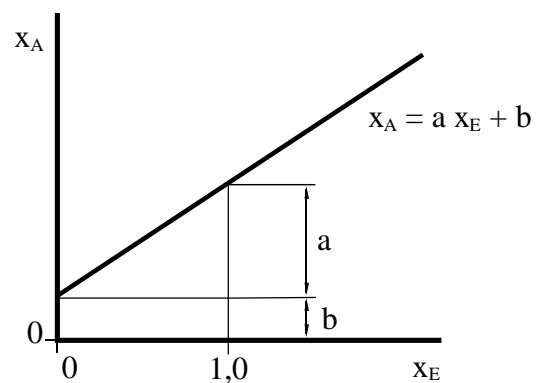
Die Umformung der Meßinformation wird auch als Abbildung bezeichnet. Eine Eingangsgröße wird über einen eindeutigen funktionellen Zusammenhang in die Ausgangsgröße umgewandelt.

$$x_A = f(x_E) \quad (1.2)$$

Diese Funktion muß eindeutig (umkehrabbildbar) und stetig sein. Im einfachsten Falle ist die Abbildung linear und es gibt keine Verschiebung des Nullpunktes (Bild 1-4a). Ergibt sich eine Verschiebung des Nullpunktes ("offset"), dann ergibt sich die allgemeine Form der Geradengleichung (Bild 1-4b).



**Bild 1-4a:** linearer Zusammenhang zwischen Eingangs- u. Ausgangsgröße



**Bild 1-4b:** linearer Zusammenhang zwischen Eingangs- u. Ausgangsgröße mit Nullpunktverschiebung

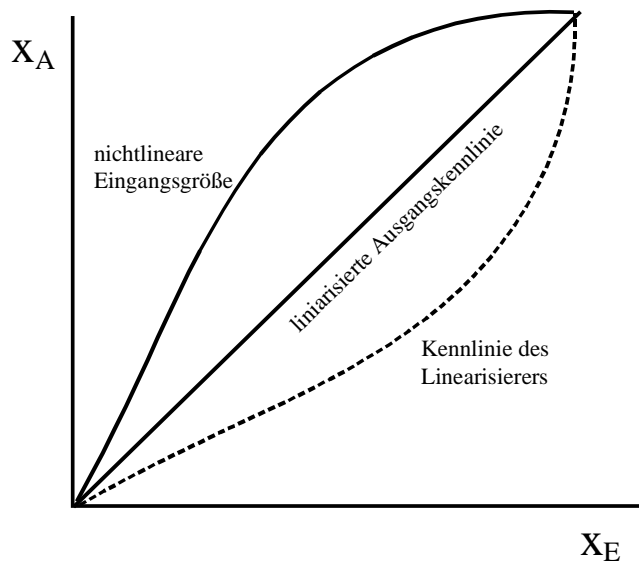
Für digitale Meßverfahren würde sich anstelle der einfachen Geraden in den Bildern 1-4a und 1-4b eine Treppenfunktion ergeben. Zur digitalen Meßwertbildung gehört auch der Quantisierungsvorgang, der zu einer ganzzahligen gerasterten Darstellung des Meßwertes führt. Die Schrittweite der Rasterung wird so gewählt, daß ihr Einfluß auf die Meßgenauigkeit hinreichend klein ist. Sehr verbreitet sind Analog-Digital-Wandler mit einer Auflösung von 12 bit. Das übliche Spannungsintervall 0 - 10 Volt wird hier in  $2^{12}$  Werte, also in 4096 Werte gerastert [6]. Der Spannungsprung beträgt dann 2,4 mV. Der durch die Rasterung beigetragene maximale Fehler ist  $\pm 1,2$  mV.

Um die volle Auflösung des Analog-Digitalwandlers auszunutzen, muß die Meßgröße auch das gesamte Spannungsintervall ausnutzen. Wird z. B. im Sensor der zu messende Temperaturbereich von 0 °C bis 30 °C in einen Spannungsbereich von 2,0 - 3,0 Volt abgebildet, dann wird das 10-Voltintervall des Wandlers nur zu 10% ausgenutzt. Von den möglichen 4096 Werten werden nur etwa 400 ausgenutzt. In der Praxis arbeitet der Wandler dann mit nur 8 bis 9 bit. Die Abbildung der Eingangsmeßgröße in das Spannungsintervall muß also so gewählt werden, daß das Intervall (z. B. 0 - 10 Volt) nahezu vollständig genutzt wird. Diese Anpassung bezeichnet man als Normierung.

Bei dem im Kap. 1.2 vorgestellten Linearisierer ist die Eingangsgröße nichtlinear und der funktionelle Zusammenhang der Abbildung ist so definiert, daß die Ausgangsgröße linear, also durch eine Gerade dargestellt wird. In Bild 1-5 ist der Zusammenhang aufgezeichnet. Die obere Kurve sei die nichtlineare Eingangsgröße (z. B. Thermisches Anemometer). Die gestrichelte untere Kurve ist die zur Linearisierung nötige Kennlinie des Linearisierers. Sie wird gebildet durch Spiegelung der oberen (Eingangs-) Kurve an der 45°-Geraden. Die Korrekturkurve ist also spiegelbildlich verzerrt, bzw. es ist die inverse Funktion.

In den meisten Fällen wird heute nicht mehr mit analogen Linearisierern gearbeitet. Anstelle dessen wird die nichtlineare Eingangsgröße nach der Analog-Digital-Wandlung im Computer

rechnerisch linearisiert. Bei der AD-Wandlung von stark nichtlinearen Eingangsgrößen ergeben sich in Teilbereichen sehr kleine Spannungsunterschiede je Rasterschritt. (Bild 1-5). Für diese Anwendung kommen auch die etwas teureren 14- oder 16-bit-Wandler zum Einsatz (16 bit = 65536 Werte).



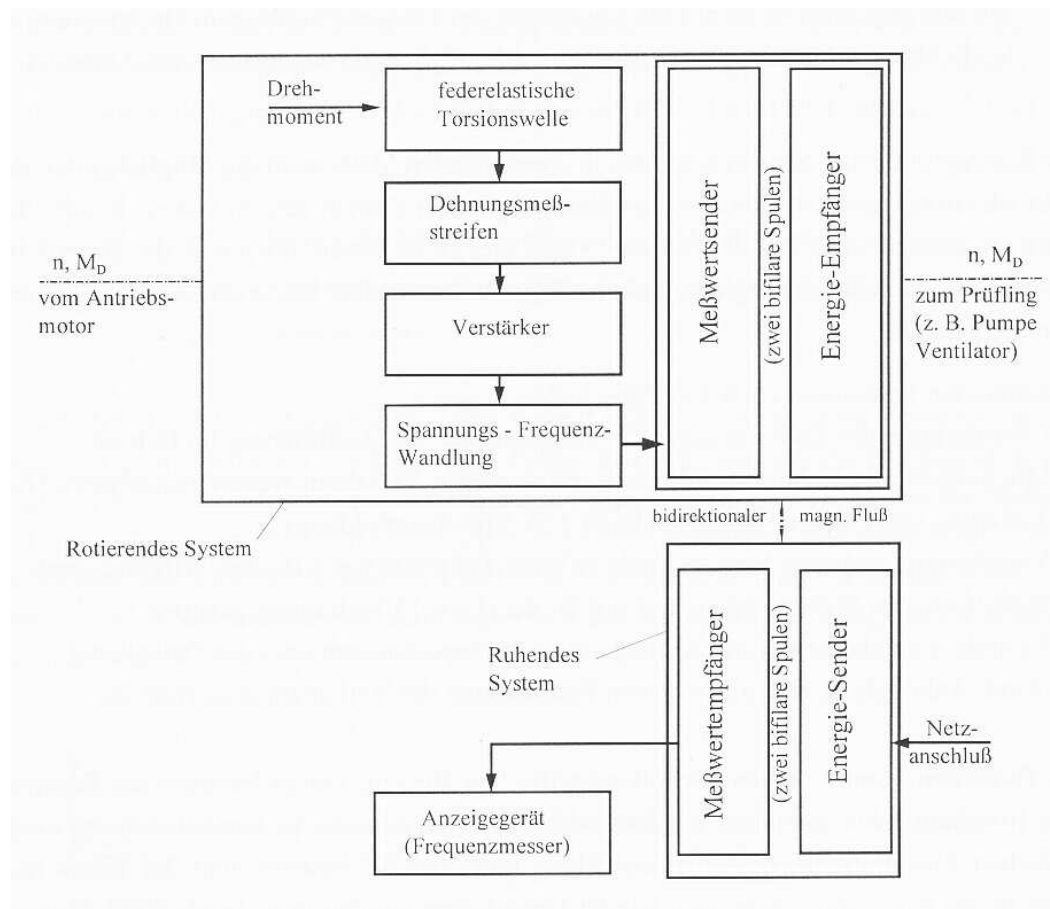
**Bild 1-6:** Wirkung eines Linearisierers

Für eine saubere Analog-Digital-Wandlung ist immer auch die Filterung des Analogsignals erforderlich. Der in dem Meßsignal enthaltene Nutzsignalanteil soll von dem ebenfalls enthaltenen Störanteil (wie z. B. Rauschen) getrennt werden. Auf die Filterung wird im Kapitel 1.5 näher eingegangen.

#### Zwei Beispiele für Meßsysteme mit Übertragungsgliedern:

- Beim Haarhygrometer ist die primäre Wirkung der Änderung der relativen Feuchte eine Längenänderung von federbelastet eingespannten Haaren. Über Hebel wird diese Wegstrecke mechanisch umgelenkt und bewirkt einen Zeigerausschlag. Die Stellung des Zeigers relativ zur darunterliegenden Skale läßt sich als Meßwert ablesen. Die Meßeinrichtung Haarhygrometer arbeitet also mit zwei Wandlungsschritten. Im ersten Schritt, dem Sensor, wird die relative Feuchte in eine Länge der eingespannten Haare abgebildet. Es wird die hygroskopische Materialeigenschaft der Haare ausgenutzt. Im zweiten Schritt wird die Länge der Haare mit einem Hebelwerk in eine Drehstellung des Zeigers gewandelt. Die Hinzunahme der Skale mit einer passenden Teilung oder Skalierung ermöglicht die Ablesung des Meßwertes.
- Das in Bild 1-7 dargestellte Drehmomentmeßsystem arbeitet mit sehr viel mehr Wandlungsschritten. Das eigentliche Meßproblem - Drehmoment in einer rotierenden Welle - ist hier überlagert von einem Datenübertragungsproblem. Das Gerät wird zwischen dem Antriebsmotor und der angetriebenen Maschine eingebaut. Im Betrieb

rotiert es mit der Drehzahl der Maschine. Die Meßwerte müssen aus dem rotierenden System in das ruhende System übertragen werden (die drahtlose Übertragung von Meßwerten wird als Telemetrie bezeichnet). Andersherum muß die zur Messung benötigte elektrische Energie aus dem ruhenden System herangeschaffen werden. Eine Möglichkeit, diese Übertragungsaufgabe zu lösen, ist der Einsatz von Schleifringen. Sie unterliegen jedoch mechanischem Verschleiß und es entsteht Verlustleistung. Für die Energiezufuhr werden auch Batterien in das rotierende System eingebaut. Bei dem hier vorgestellten System geschieht die Übertragung transformatorisch. Eine Wechselspannung erzeugt in einer Spule einen magnetischen Fluß. Der magnetische Fluß gelangt zu einer zweiten Spule. An dieser kann wieder eine Wechselspannung ausgekoppelt werden. In einem Transformator wird der magnetische Fluß mit hohem Wirkungsgrad durch das Eisen (Transformatorblechpakete) geleitet.



**Bild 1-7:** Drehmomentmeßsystem

Hier wird der magnetische Fluß durch einen kleinen Luftspalt zwischen dem rotierenden und dem ruhenden System ausgetauscht. Die Spulen des rotierenden Systems sind als Ringspulen an seinem Umfang angeordnet. Dadurch ist die Größe des magnetischen Flusses nicht von der Drehstellung abhängig. Im rotierenden und im ruhenden System gibt es je zwei Spulen, eine Sende- und eine Empfangsspule. Sende- und Empfangsspule werden gemeinsam auf einen

Kern gewickelt (bifilar). Die ins rotierende System übertragene elektrische Energie wird in eine präzise stabilisierte Gleichspannung gewandelt. Mit ihr werden die Komponenten der Meßschaltung versorgt. Das Drehmoment bewirkt eine federelastische Deformation (Torsion) der Torsionswelle. Damit verbunden ist eine Längen- und Widerstandsänderung der auf der Welle applizierten Dehnungsmeßstreifen. Die Dehnungsmeßstreifen sind in einer Brückenschaltung angeordnet und eine Widerstandsänderung bewirkt eine kleine Spannung. Nach einer Verstärkung wird eine Wechselspannung erzeugt, deren Frequenz der Größe der Eingangsspannung proportional ist. Nach der Übertragung in das ruhende System, kann die Frequenz der Wechselspannung von einem Frequenzmeßgerät gemessen und angezeigt werden. Eine Zuordnung des Frequenzwertes zum Drehmoment ist leicht über die Geradengleichung  $y = ax + b$  möglich, da das System linear arbeitet.

Zur Konzeption neuer Sensoren werden in zunehmenden Maße auch die Möglichkeiten der Mikroelektronik genutzt. Beim sog. intelligenten Sensor ("smart sensor") ist ein komplettes Mikroprozessorsystem Teil des Sensors. Ohne hier zu bewerten, inwieweit der Begriff Intelligenz für ein solches programmierbares System anwendbar ist, seien seine wichtigsten Vorteile genannt:

- autonomer Systemtest nach dem Einschalten
- Überwachung der Kalibrierung, u. U. automatische Nachkalibrierung im Betrieb
- Möglichkeit, die Rohdaten mit relativ aufwendigen Verfahren weiterzuverarbeiten (Reduzierung von Fehlern, Datenreduktion z. B. Mittelwertbildung)
- Verarbeitung mehrerer Sensorsignale zu einer Zielgröße wie z.B. dem Wirkungsgrad
- Signalform des Meßergebnisses ist gut für die (Fern-) Übertragung geeignet
- Zentrale Vorgabe bzw. Umschaltung von Betriebsparametern über das Datenkabel
- Durch Ankopplung an ein Bussystem Reduzierung des Verkabelungsaufwandes

Als Bussystem kommt, neben herstellereigenen Bussen, immer häufiger der Europäische Installationsbus (genannt: instabus oder EIB) zum Einsatz. Es handelt sich um einen einfachen Zweidrahtbus, dessen Entwicklung unter der Schirmherrschaft der Firma Siemens in den 80er Jahren begonnen wurde. Unterdessen wurden in mehr als 3000 Anlagen über 1,5 Millionen EIB-Produkte installiert. Alle Anbieter von EIB-Produkten haben sich in der in Brüssel residierenden EIB-Association (unterdessen: Konnex Association) zusammengeschlossen. Nachdem in der Anfangsphase die Schwerpunkte in den Bereichen Lichtsteuerung, Jalousiesteuerung usw. lagen, sind unterdessen auch Komponenten für die Heizungsregelung erhältlich. Das Angebot wird ständig erweitert und es wird angestrebt, auch in den Markt der Einfamilienhäuser und Wohnungen gehobenen Standards hineinzukommen.

Ab 1989 wurde an dem Bussystem EHS (Esprit Home System) gearbeitet. Das EHS verzichtete ganz auf die Busleitungen und benutzte als Kommunikationsweg das für die Energieversorgung verwendete Wechselspannungsnetz (Powerline). Die Bemühungen wurden unterdessen eingestellt, da die Powerline-Datenübertragung zu viele Probleme hatte.

Im Bereich der Gebäudeleittechnik wird mit dem BACnet ein Kommunikationsprotokoll (EN ISO 16484-5) etabliert, das auf mehreren Busses läuft und auf dem sich Geräte verschiedener Hersteller miteinander verbinden lassen. Speziell die Verwendung des Bürokommunikationsbusses (Ethernet) verbreitet sich sehr schnell.

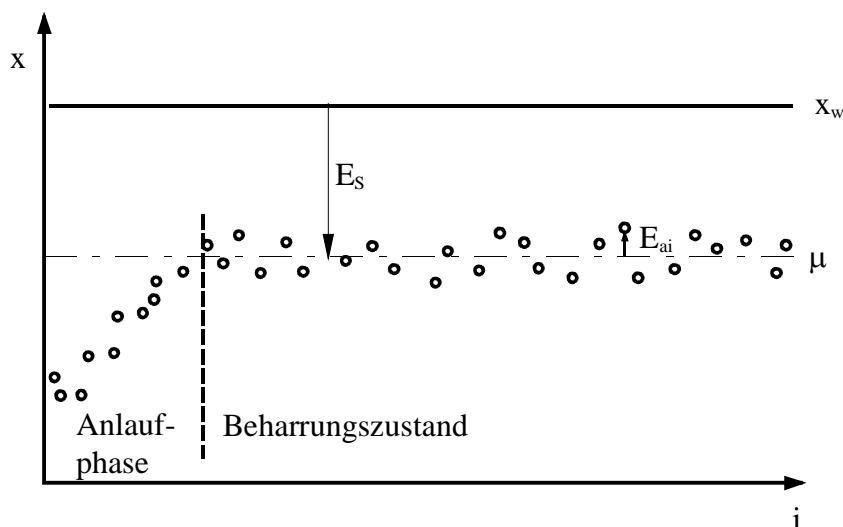
### 1.3 Meßfehler

Das ideale Ziel einer jeden Messung, nämlich den wahren Wert einer Meßgröße zu ermitteln, können wir leider nie erreichen. Der gemessene Wert einer Meßgröße wird immer eine gewisse Abweichung - die Meßabweichung - vom wahren Wert haben. Diese Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem wahren Wert wird als Fehler bezeichnet.

$$\Delta x = x - x_w \quad (1.3)$$

mit  $\Delta x =$  Fehler (Meßabweichung, andere Schreibweise  $E$ )  
 $x =$  Meßwert (manchmal auch als  $x_a$ , Anzeigewert bez.)  
 $x_w =$  Wahrer Wert

In der DIN 1319 [1 - 4] wird neben dem Begriff Fehler auch das Wort Abweichung verwendet. Das in der Praxis etablierte Wort Fehler bzw. Meßfehler sollte hier jedoch bevorzugt werden. Neben der Angabe des absoluten Fehlers  $\Delta x$  (in der Dimension der Meßgröße) ist es üblich, den relativen Fehler  $\Delta x/x$  in Prozent anzugeben. Die Angabe auf welche Größe bezogen wird ist unerlässlich. Führt man eine Messung nicht nur einmal durch, sondern in vielen Wiederholungen, dann ergibt sich für eine stationäre Meßgröße ein Bild wie das folgende:



**Bild 1-8:** Häufigkeitsverteilung einer Längenmessung



Nach einer Anlaufphase in der sich sowohl das Meßgerät als auch der Prozeß auf ihren Beharrungszustand einschwingen bzw. erwärmen, ergeben sich immer noch Abweichungen der gemessenen Werte von dem als durchgezogene Linie eingezeichneten wahren Wert  $x_w$ . Der als gestrichelte Linie eingezeichnete Erwartungswert  $\mu$  ist definiert als Mittelwert aus unendlich vielen Einzelmessungen

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.4)$$

Der Fehler

$$E_s = \mu - x_w \quad (1.5)$$

wird als systematischer Fehler und der Fehler

$$E_{ai} = x_i - \mu \quad (1.6)$$

wird als **zufälliger Fehler** bezeichnet (Index a steht für **aleatorisch**, lat., vom Zufall abhängig, Index i steht für den i-ten Einzelwert aller Messungen).

Der **systematische Fehler** ist reproduzierbar in jedem Meßergebnis enthalten. Er läßt sich also nicht durch eine mehrfache Wiederholung der Messung feststellen. Durch Vergleich mit einem genaueren Meßgerät ließe sich der systematische Fehler (zum Teil; abhängig von der Genauigkeit des Vergleichsmeßgerätes) ermitteln. Im einfachsten Falle sind die Größe und das Vorzeichen des systematischen Fehlers konstant. Durch Einflüsse wie Abnutzung, Alterung, Änderung der Temperatur des Meßgerätes, können sich zeitliche Änderungen des systematischen Fehlers ergeben. Es wird nach Möglichkeit versucht, diese Effekte zu vermeiden.

Der **zufällige Fehler** bewirkt eine Streuung der Einzelwerte um einen mittleren Wert. Die Größe und das Vorzeichen der bei einer Einzelmessung auftretenden Abweichung läßt sich nicht vorhersagen. Mit einer großen Zahl von Einzelmessungen und durch die Anwendung geeigneter statistischer Methoden läßt sich die Größe des zufälligen Fehlers näherungsweise ermitteln.

Der systematische Fehleranteil macht den Meßwert unrichtig, der Anteil an zufälligen Fehlern macht den Meßwert dagegen unsicher. Die beiden Anteile am Fehler müssen unterschiedlich behandelt werden. Systematische Fehler müssen im Rahmen der geforderten Genauigkeit quantitativ erfaßt und im Meßergebnis durch eine Korrektur berücksichtigt werden. Sie sind also prinzipiell korrigierbar. Die Größe der zufälligen Fehler wird mit Hilfe der Statistik ermittelt und mit dem Meßergebnis angegeben.

### 1.3.1 Statische Fehler, empirische Beschreibung und Klassifizierung

In der Gleichung 1.5 wird der systematische Fehler als Differenz zwischen dem Erwartungswert und dem wahren Wert definiert. Zur Ermittlung der Größe des systematischen Fehlers kann diese Gleichung nicht taugen, da sowohl der wahre Wert  $x_w$  der Meßgröße, als auch der aus unendlich vielen Messungen ermittelte Erwartungswert (Gleichung 1.4) nicht zu bilden sind. Als Schätzung auf den Erwartungswert wird der Mittelwert  $\bar{x}$  aus einer endlichen Zahl von Messungen bestimmt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.7)$$

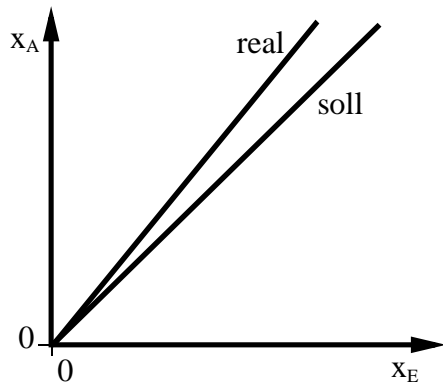
An die Stelle des wahren Wertes tritt ein Meßergebnis eines Vergleichsmeßgerätes, dessen Genauigkeit entsprechend höher ist.

Eine detaillierte Analyse aller einzelnen Fehlerquellen ist in der Praxis nicht möglich. Einige der möglichen Ursachen seien hier zusammengestellt:

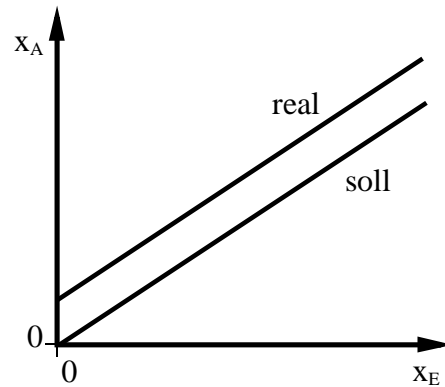
- Unklare oder unpräzise Aufgabenstellung
- Eigenschaften des Meßobjektes (z. B. Einfluß der elastischen Deformation bei der Längenmessung)
- Rückwirkung des Meßeingriffes auf das Meßobjekt (z. B. der Strömungsgeschwindigkeitssensor verändert durch seine Anwesenheit das ihn umgebende Strömungsfeld)
- Eignung des Meßverfahrens bzw. des ausgenutzten physikalischen Effektes
- Bedienung, Ablesung des Meßgeräts, Auswertung der Rohdaten
- Den größten Anteil am systematischen Fehler haben die im Meßgerät (Meßmittel) auftretenden Fehler. Die wichtigsten Fehleranteile sind in Bild 1.5a - 1.5f auf der Seite 20 zusammengestellt.

•

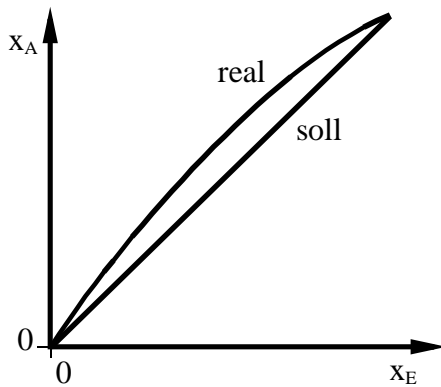
**Beispiel:** Eine Temperaturmeßeinrichtung für eine Raumklimaanlage wird mit einem PT1000-Sensor betrieben. Nach der Installation muß der Meßverstärker abgeglichen werden. Ohne einen Abgleich würden die im Bild 1.5a und b dargestellten Fehler der Steigung und des Nullpunktes der Kennlinie auftreten. Zum Abgleich dieser beiden Freiheitsgrade müssen zwei verschiedene Temperaturwerte kontrolliert werden. Man könnte am Ort des Sensors mit einem genaueren Referenzthermometer die Kontrolle durchführen. Da jedoch ein PT1000-Sensor ein genormter Sensor mit einer bekannten Kennlinie ist, können die zwei Temperaturen mit präzisen Widerständen simuliert werden. Mit zwei Meßwerten läßt sich die Abweichung für Verstärkung und Nullpunktverschiebung ermitteln. Nachdem die Abweichung durch Abgleichen der entsprechenden Potentiometer beseitigt wurde, wird eine Kontrollmessung durchgeführt.



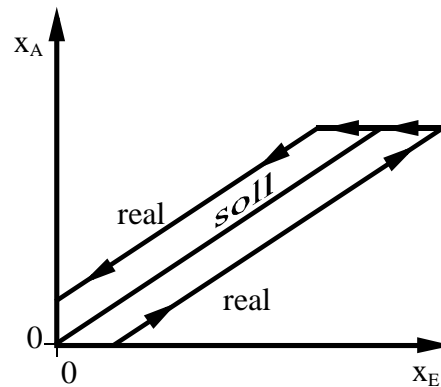
a) Fehler in der Kennliniensteigung  
(Übertragungsfaktor bzw. Verstärkung)



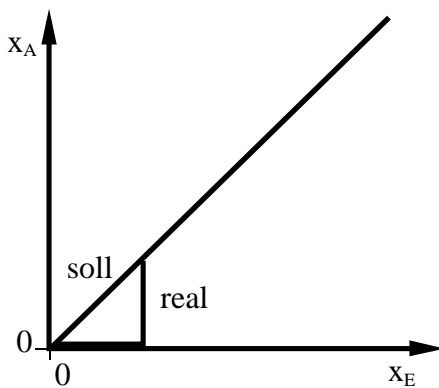
b) Verschiebung des Nullpunktes bei gleicher Steigung



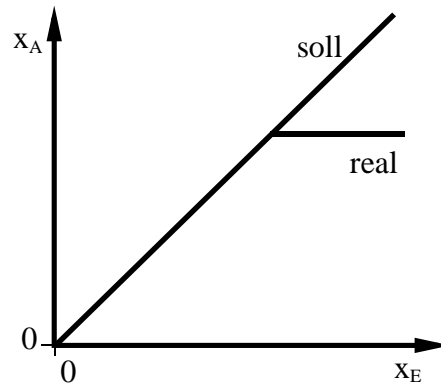
c) Fehler durch Nichtlinearität



d) Hysteresefehler (Umkehrspanne z. B. durch Spiel in den mech. Übertragungselementen)



e) Fehler durch zu geringe Ansprechempfindlichkeit



f) Kappungsfehler (der Maximalwert des Sensors wurde von der Meßgröße überschritten)

**Bild 1-9:** Ursachen für systematische Fehler

### 1.3.2. Statische Fehler mit systematischen Ursachen

Auf die Genauigkeit einer Meßeinrichtung haben auch die Einbaubedingungen Einfluß. Die Art wie der Sensor an den Prozeß angekoppelt ist, beeinflußt die Meßgenauigkeit. Die Aufgaben des Messtechnikingenieurs enden daher nicht an der Systemgrenze der Meßeinrichtung.

Beispiel: Die Genauigkeit einer Förderstrommessung mit einem Venturirohr hängt nicht nur von den Eigenschaften des Venturirohres, sondern auch von den Zuströmbedingungen ab. Ist die Zuströmung hinsichtlich des Profils der axialen Geschwindigkeit und der möglichen Rotation des Fluides gestört, dann ergeben sich Meßfehler. Rohreinbauten, die solche Störungen verursachen, sind T-Stücke, Schieber und insbesondere Krümmer. Um in der Praxis saubere Zuströmbedingungen sicherzustellen, werden gerade Zulaufstrecken einer Länge von mindestens 10 Rohrdurchmessern gefordert.

Die Anbringung eines Temperatursensors an einem Rohr sei ein weiteres Beispiel für mögliche Mängel der Prozeßankopplung. Ist zwischen dem Sensor und dem Rohr ein Luftabstand, dann wird sich ein Temperaturgefälle einstellen. Der Einfluß der Temperatur des Raumes wirkt bei fehlender Isolation des Sensors ebenfalls störend. Die Querempfindlichkeit des Sensors oder der sonstigen Glieder einer Meßkette auf andere Einflüsse als die zu messende Größe kann zu Meßfehlern führen.

Beispiel: Der Widerstandswert der Meßwiderstände in einem resistiven Wegmeßsystem hängt primär von der Fahrposition ab. Es gibt jedoch auch einen Einfluß der Umgebungstemperatur auf den Widerstandswert. Prinzipiell ließe sich dieser Temperatureinfluß ebenfalls messen und er könnte kompensiert werden. Wird dieser Aufwand nicht getrieben, dann muß bei der Ermittlung des maximalen Fehlers die Auswirkung der höchsten und tiefsten Umgebungstemperatur berücksichtigt werden.

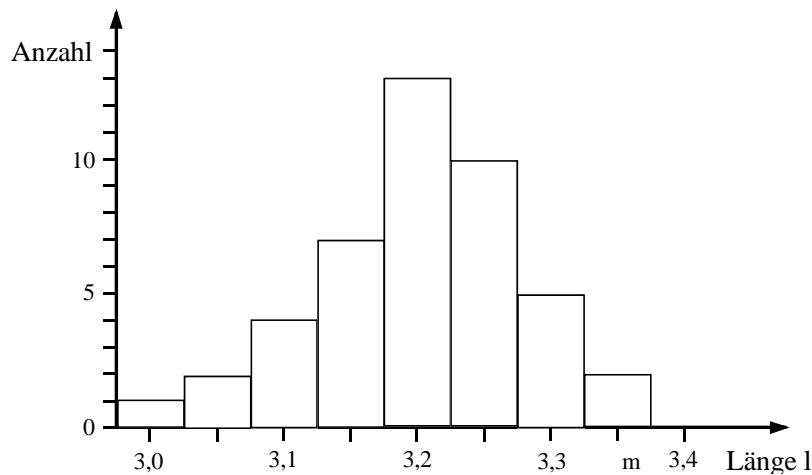
### 1.3.3 Statische Fehler mit zufälligen Fehlerursachen.

Die Schwankungen der zufälligen Fehler führen zu einer Verteilung der Einzelmeßwerte um den Erwartungswert, wie es in Bild 1-4 dargestellt ist. Dieses anscheinend regellose Verhalten läßt sich nur mit statistischen Gesetzen beschreiben. Die Anwendung der statistischen Theorie setzt voraus, daß es sich nicht um das Ergebnis einer einzelnen Messung handelt, sondern daß eine möglichst große Zahl von Messungen durchgeführt wurde. Eine Tabelle von Meßwerten kann graphisch dargestellt werden, indem man auf der X-Achse ein Raster für die gemessene Größe vorgibt und auf der Y-Achse die Anzahl der in das Teilintervall fallenden Messungen aufträgt. Als Beispiel das Ergebnis einer Längenmessung:

Der Y-Maßstab dieser sog. Häufigkeitsverteilung ist hier die absolute Anzahl. Häufiger, bei der Darstellung als Histogramm, wird eine relative Häufigkeit  $h(x)$  aufgetragen. Die auf der

X-Achse aufgetragenen Intervalle werden als Klassen bezeichnet. Die Anzahl der Messungen in einer Klasse  $\Delta n$  wird bezogen auf die Klassenbreite  $\Delta x$  und auf die Gesamtanzahl  $n$  der Messungen.

$$h(x) = \frac{\Delta n / \Delta x}{n} \quad (1.8)$$



**Bild 1.10:** Häufigkeitsverteilung einer Längenmessung

Würde man unter idealen Bedingungen mit unendlich vielen Meßwerten die Klassenbreite gegen Null verkleinern, dann ginge die Häufigkeitsverteilung in eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung über. Die Fläche unter der  $h(x)$ -Kurve (Integration) würde dann den Wert Eins ergeben. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Meßwert im Intervall  $-\infty$  bis  $+\infty$  liegt beträgt 100%. Für ein eingeschränktes Intervall ergäbe sich für die Wahrscheinlichkeit  $P$  dementsprechend ein Wert zwischen Null und Eins.

$$P(x) = \int_{x_1}^{x_2} h(x) dx \quad (1.9)$$

Die Form der Dichtefunktion liegt nicht als mathematische Gleichung vor, nur aus einer Vielzahl von Messungen ergibt sich der Verlauf. Für meßtechnische Aufgabenstellungen läßt sich diese unbekannte Dichtefunktion in sehr guter Näherung durch die von Karl Friedrich Gauß<sup>1</sup> definierte Gaußsche Normalverteilung ersetzen. Zur Überprüfung der Qualität dieser Näherung existieren Verfahren wie Summenhäufigkeitspapier und Chi-Quadrat-Test, auf die hier nicht näher eingegangen wird [7]. Die Dichtefunktion der Gaußverteilung ist definiert zu:

$$h(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.10)$$

mit  $\mu$  = Erwartungswert

<sup>1</sup>Die Gleichung 1.10 und das Bild 1.7 waren auf dem (von April 1991 bis Dezember 2001 im Umlauf befindlichen) zu Ehren von Karl Friedrich Gauß (1777 - 1855) herausgegebenen 10-DM-Schein abgedruckt.

$\sigma$  = Standardabweichung

Der in Gleichung 1.4 angegebene Erwartungswert  $\mu$  basiert auf unendlich vielen Meßwerten. Für praktische Berechnungen wird er näherungsweise durch den in Gleichung 1.7 gegebene Mittelwert  $\bar{x}$  ersetzt. Die Standardabweichung  $\sigma$  bzw. deren Quadrat  $\sigma^2$  ist definiert:

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) x^2 dx \quad (1.11)$$

Als praktischer Schätzwert für die Standardabweichung wird die Streuung  $S$  benutzt. Die Streuung  $S$  wird auch (wegen der begrenzten Zahl der Messungen) als empirische Standardabweichung bezeichnet.

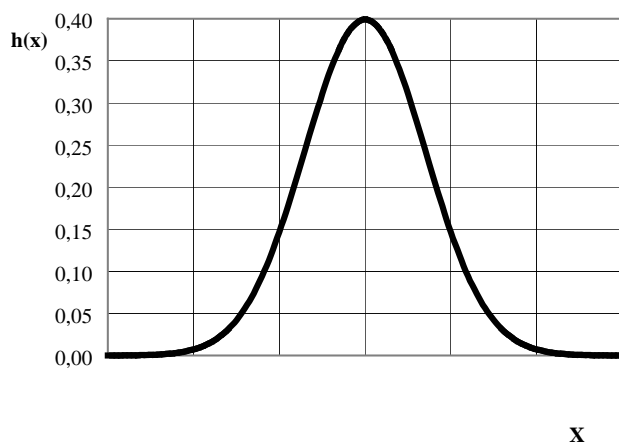
$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.12)$$

Für den Einsatz in Computerprogrammen wird eine umgestellte Form der Gleichung 1.12 verwendet

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (1.13)$$

Sie hat gegenüber Gl. 1.12 den Vorteil, daß der Mittelwert nicht schon zu Beginn der Rechnung bekannt sein muß.

Bei der Messung der Geschwindigkeit turbulenter Strömungen ergibt sich eine weitere Bedeutung für die Standardabweichung. Es handelt sich nicht unbedingt um eine Schwankungsbreite, die ihre Ursache in der unzureichenden Genauigkeit des Meßverfahrens hat, sondern die Schwankungsbreite ist bedingt durch die Intensität der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen, also der Turbulenz der Strömung.



**Bild 1.11:** Gaußsche Verteilungsdichtefunktion für die Werte  $\mu=3$ ,  $\sigma=5$

Durch Integration der Verteilungsfunktion  $h(x)$  ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $P(x)$ . Sie hat einen S-förmigen Verlauf, von null am linken Rand der Verteilung auf Eins an ihrem rechten Rand ansteigend. Eine Integration der Gleichung 1.10 ist nicht explizit möglich,  $P(x)$  läßt sich jedoch numerisch bestimmen. Zur Ermittlung der Unsicherheit  $u(\bar{x})$  des Mittelwertes  $\bar{x}$  wird das bestimmte Integral der zugrundegelegten Verteilungsfunktion Gaußsche Glockenkurve benötigt. Integrationsbereich ist das Intervall um den Mittelwert. Für  $\pm 1\sigma$  ergibt sich:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} n(x) dx = 2 \int_{\mu}^{+\sigma} n(x) dx \quad (1.14)$$

Die relative Anzahl der Werte, welche in einem  $\pm$ -Intervall (von  $-c$  bis  $+c$ ) um den Erwartungswert  $\mu$  liegen, beträgt:

c	$\pm 1.0 \sigma$	$\pm 1.645 \sigma$	$\pm 1.96 \sigma$	$2,58 \sigma$	$\pm 3.0 \sigma$	$\pm 4,0 \sigma$	$\pm \infty \sigma$
P	68,26%	90,0%	95,0%	99,0%	99,73%	99,99%	100%

Wird ein Mittelwert  $\bar{x}$  mit Hilfe der Gleichung 1.7 aus nur einem einzigen Meßwert gebildet, dann entspräche seine Unsicherheit  $u(\bar{x})$  gerade der Streuung  $S$ . Für unendlich viele Meßwerte ergäbe sich der Erwartungswert  $\mu$  mit der Unsicherheit Null. Es gilt

$$u(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1.15)$$

Oder mit Gleichung 1.12

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.16)$$

Die in Gleichung 1.15 ermittelte Unsicherheit des Mittelwertes  $\bar{x}$  berücksichtigt nur die ca. 68% der Meßwerte, welche im genannten  $\pm 1\sigma$ -Intervall sind. Die statistische Sicherheit beträgt also 68%. Für eine höhere statistische Sicherheit, z. B. die in der Praxis häufig gewählten 95%, ergibt sich eine größere Unsicherheit des Mittelwertes. Die Unsicherheit vergrößert sich in diesem Fall um den Faktor  $c = 1,96$ . Die Unsicherheit des Mittelwertes würde sich zusätzlich vergrößern, wenn die Anzahl der Messungen nicht groß genug ist. Die oben genannten Tabellenwerte gelten exakt nur für unendlich viele Messungen. In praxistauglicher Näherung müßten mindestens 200 Messungen zugrundegelegt werden. Würde man z. B. bei einer 95%-igen statistischen Sicherheit den Mittelwert aus nur drei Werten bilden, dann würde sich der Faktor von 1,96 auf 4,3 vergrößern. Diese sog. Student-Faktoren für die gebräuchlichsten statistischen Sicherheiten und für kleinere Werte der Anzahl  $n$  sind als t-Faktoren tabelliert [8]. Die vollständige Gleichung für die Unsicherheit des Mittelwertes lautet:

$$u(\bar{x}, n) = \pm \frac{t(P, n)}{\sqrt{n}} S \quad (1.17)$$

Bei mindestens 150 - 200 Meßwerten und  $P = 95\%$  ergibt sich näherungsweise:

$$u \approx \frac{2s}{\sqrt{n}} \quad (1.18)$$

#### 1.3.4 Dynamische Fehler

Ist eine Meßgröße zeitlichen Veränderungen unterworfen, dann erweitern sich die Anforderungen an das Meßgerät erheblich. Das Meßgerät hat nicht, wie beim Messen zeitlich konstanter Meßgrößen, die Möglichkeit, sich auf diesen Wert lange zu adaptieren. Durch die Speicherung von mechanischer, thermischer oder elektrischer Energie ergibt sich im Meßgerät eine dämpfende Wirkung oder Trägheit. Es kann also dazu kommen, daß der angezeigte Meßwert den zeitlichen Änderungen des Meßwertes nicht schnell genug folgen kann.

In der Regelungstechnik stellt sich die Aufgabe, entsprechend dem Zeitverhalten einer Strecke ein dazu passendes Zeitverhalten des auf die Strecke einwirkenden Reglers einzustellen. Hier in der Meßtechnik ist es nötig, das Meßgerät so auszuwählen bzw. einzustellen, daß durch die Dynamik der Meßgröße keine Verfälschung bzw. kein Verlust an Informationen auftritt. Eine ausführliche Darstellung zur Behandlung dynamischer Meßfehler gibt Profos/Pfeifer, (Seite 52 - 98), [7].

#### 1.3.5 Fehlerkennwerte in der Praxis

Zur Klassifizierung von Meßgeräten werden sog. Güteklassen angegeben. Es handelt sich um den relativen systematischen Fehler des Meßgerätes. Er wird auf den festen Meßbereichsendwert und nicht auf den aktuellen Meßwert bezogen. Für die aktuellen Meßwerte handelt es sich daher um einen absoluten Fehler. Man unterscheidet Güteklassen für sog. Feinmeßgeräte (0,1; 0,2 und 0,5 %) und Güteklassen für Betriebsmeßgeräte (1; 1,5; 2,5 und 5 %). Der relative Fehler wird ermittelt:

$$\text{relativer Fehler} = \frac{G \cdot x_e}{x} \quad (1.19)$$

Ist z. B.            der Meßbereichsendwert     $x_e = 80$   
                       die Güteklasse                             $G = 10\%$   
                       und der aktuelle Meßwert         $x = 16$ ,

dann ergibt sich ein relativer Fehler von

$$\text{relativer Fehler} = \frac{0,1 \cdot 80}{16} = 0,5 \text{ bzw. } 50\%$$

Der (Meßwert-) relative Fehler wird also um so größer, je kleiner der Meßwert relativ zum Vollausschlag ist.



Selbstverständlich müssen die von den Herstellern angegebenen Fehler unter zugelassenen, aber ungünstigsten Betriebsbedingungen noch eingehalten werden. Die maximalen Fehler, welche für ein Gerät zulässig sind, werden als **Garantiefehlergrenzen** bezeichnet.

Die Angabe sowohl des maximal auftretenden systematischen Fehlers  $E_s$  als auch der Unsicherheit  $u$  des statistisch gebildeten Mittelwertes (in Abhängigkeit von der gewählten statistischen Sicherheit und von der Anzahl der Messungen) ist für den Praktiker oft zu aufwendig. Es wird, um die Angabe der gesamten Meßunsicherheit  $E$  auf nur eine Zahl zu reduzieren, die quadratische Summe gebildet:

$$E = \sqrt{E_s^2 + u^2} \quad (1.20)$$

#### 1.4. Lineare Regression

Oftmals wird für einen unbekanntem funktionalen Zusammenhang, von dem nur diskrete Meßwerte bekannt sind, eine beschreibende Gleichung gesucht. Für diese näherungsweise zu ermittelnde Gleichung wird oft ein Polynomansatz gewählt. Läßt sich a priori unterstellen, daß der Zusammenhang linear ist, dann reduziert sich das Polynom auf eine Geradengleichung des Typs:

$$y = ax + b \quad (1.21)$$

Nach der Gaußschen Methode der kleinsten Summe der Fehlerquadrate errechnen sich die Werte  $a$  und  $b$  aus:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1.22)$$

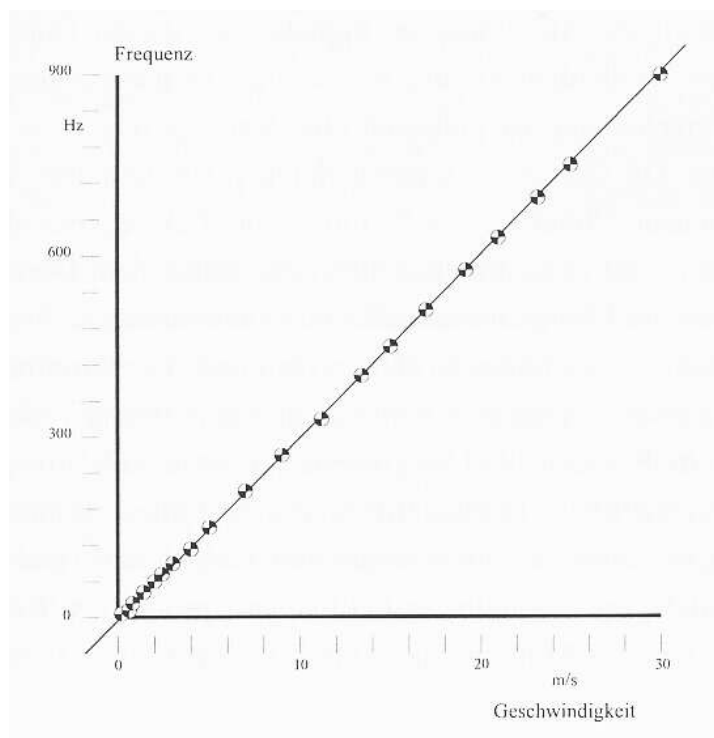
$$b = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i \right] \quad (1.23)$$

Als Anwendungsbeispiel sei die auf der nächsten Seite folgende Tabelle einer Kalibrierung für Flügelradanemometer angeführt. Neben den Meßwerten der Strömungsgeschwindigkeit  $x$  und der Signalfrequenz  $y$  sind die einzelnen Werte für  $x^2$ ,  $y^2$  und für  $xy$  angegeben. Weiterhin sind die jeweiligen Summen, die Koeffizienten  $a$  und  $b$  und das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  eingetragen. Neben  $a$  und  $b$  kann als dritter Wert das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  berechnet werden. Dieser Wert liegt zwischen 0 und 1 und ist ein Maß für die Güte der Anpassung. Die Anpassung ist um so besser je näher  $r^2$  bei 1 liegt.

$$r^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)} \quad (1.24)$$

i	x	y	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	xy
	m/s	Hz			
1	0,25	4,4	0,06	19,36	1,1
2	0,5	12,2	0,25	148,84	6,1
3	0,75	19,4	0,56	376,36	14,55
4	1	26,8	1	718,24	26,8
5	1,5	41,2	2,25	1.697,44	61,8
6	2	55,5	4	3.080,25	111
7	2,5	70,7	6,25	4.998,49	176,75
8	3	85,3	9	7.276,09	255,9
9	4	114,2	16	13.041,64	456,8
10	5	144,7	25	20.938,09	723,5
11	7	204	49	41.616	1.428
12	9	261	81	68.121	2.349
13	11	319	121	101.761	3.509
14	13	377	169	142.129	4.901
15	15	435	225	189.225	6.525
16	17	495	289	245.025	8.415
17	19	554	361	306.916	10.526
18	21	613	441	375.769	12.873
19	23	670	529	448.900	15.410
20	25	732	625	535.824	18.300
21	30	878	900	770.884	26.340
Σ	210,5	6.112,4	3.854,38	3.278.464,8	112.410,3
a = 29,32		b = -2,81		r <sup>2</sup> = 0,99998	

Im nachfolgenden Bild 1-12 sind die Meßwerte und die aufgrund dieser Meßwerte ermittelte Gerade der linearen Regressionsgleichung  $y = ax + b$  aufgetragen.



**Bild 1-12:** Meßwerte einer Kalibrierung, Vergleich mit der linearen Regression

## 1.5 Filterung

Die wichtigste Aufgabe der Filterung ist es, den im Frequenzgemisch des Signals enthaltenen Informationsanteil, das Nutzsignal, von den ebenfalls enthaltenen Störungen bzw. den bei der Messung nicht interessierenden Signalanteilen zu trennen. Das Nutzsignal - Störsignal - Verhältnis (SNR, signal to noise ratio) ist eine Maßzahl für die Qualität eines Signals. Als bedeutendste Störeinflüsse sind das Brummen (periodisch, eher niederfrequent) und das Rauschen (stochastisch, eher höhere Frequenzen) zu nennen.

Die Bildung von zeitlichen Mittelwerten ist auch möglich, ohne daß ein symmetrischer Rauschanteil durch ein Filter unterdrückt wird. Die Standardabweichung dagegen kann durch einen nicht eliminierten Rauschanteil mit einem zu großen Wert ermittelt werden.

Bei der Messung im Frequenzbereich, sei es die Messung diskreter Frequenzen oder die Analyse des Frequenzspektrums, ist eine dem Meßproblem angepaßte Filterung unabdingbar.

### 1.5.1 Analoge Filterung

Die Filterschaltung läßt sich als aktive oder als passive Schaltung aufbauen. Bei einem passiven Filter geschieht die Frequenzbeeinflussung ausschließlich durch ohmsche Widerstände, Kondensatoren und Spulen. Für hochfrequente Signale, wie sie z. B. in der Antennentechnik vorkommen, werden bevorzugt passive Filter verwendet. Bei niederfrequenten meßtechnischen Anwendungen dominieren die aktiven Filter. Die gewünschten dynamischen Eigenschaften werden durch Rückkopplungsschaltungen von Operationsverstärkern realisiert.

Das Filter beeinflußt frequenzabhängig die Amplitude des Signals. Es wird der Durchlaß- und der Sperrbereich unterschieden. Außerdem kommt es zu einer frequenzabhängigen Phasenverschiebung. Die Phasenverschiebung ist praktisch eine Verzögerung, bzw. eine Laufzeit des Signals durch das Filter. Die Grenze zwischen dem Durchlaß- und dem Sperrbereich wird als Eckfrequenz bezeichnet. Üblich ist eine Definition der Eckfrequenz als die Frequenz, bei der die Amplitude um 3 dB (also um etwa 30%) gegenüber dem Durchlaßbereich abgenommen hat. Die Breite des Übergangsbereiches von Durchlassen zu Sperren, der sog Amplitudenabfall, ist ein weiteres wichtiges Kriterium für Filter. Der Amplitudenabfall wird i. a. in dB/Oktave angegeben. Durch eine Serienschaltung mehrerer Filter mit gleicher Eckfrequenz läßt sich der Amplitudenabfall vergrößern. Es werden die folgenden Filterwirkungen unterschieden: Tiefpaßfilter, Hochpaßfilter, Bandpaßfilter, Bandsperre (Bandpaß und Bandsperre sind entsprechende Kombinationen von Tiefpaß und Hochpaß). Es werden Filter mit fester und solche mit einstellbarer Eckfrequenz produziert. Bei den sog. Mitlauf- oder Tracking-Filtern wird die Mittenfrequenz eines Bandpaßfilters

signalfrequenzabhängig geregelt. Bei der wichtigen Gruppe der Tiefpaßfilter werden - je nach Übertragungsverhalten - die Filterkonzepte Gauß, Butterworth, Tschebycheff, Cauer und Bessel unterschieden [7].

Für die heute immer häufiger angewendete digitale Verarbeitung der Meßdaten kann, speziell wenn es um Informationen im Frequenzbereich geht, auf eine passende Filterung vor der Analog-Digital-Wandlung nicht verzichtet werden. Die Abtastrate und die Eckfrequenz des benötigten Tiefpaßfilters müssen zueinander passen. Die Abtastrate muß, entsprechend dem Abtasttheorem von SHANNON, mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz. Die maximale Signalfrequenz, welche also der halben Abtastfrequenz entspricht wird auch als NYQUIST-Grenze oder als NYQUIST-Frequenz bezeichnet. Außerdem muß der Aliasing Effekt beachtet werden. Die Amplituden von Frequenzanteilen des Signals, die in dem Intervall zwischen der halben Abtastfrequenz und der Abtastfrequenz liegen, werden in den Nutzfrequenzbereich hinein als Störung wirksam. Es handelt sich um eine Spiegelung auf der Frequenzachse um den Punkt der halben Abtastfrequenz. Zur Unterdrückung solcher Frequenzanteile wird ein sehr steil wirkendes Tiefpaßfilter eingesetzt. Diese sog. Antialiasing-Filter verfügen über einen Amplitudenabfall an ihrer Eckfrequenz von bis zu 120 dB/Oktave.

### 1.5.2. Digitale Filterung

Wenn die Meßinformation nicht mehr als zeitkontinuierlicher Spannungsverlauf, sondern als eine durch Abtastung (i. a. mit einem Analog-Digital-Wandler) erzeugte Zahlenliste vorliegt, dann kann sie digital gefiltert werden. Die Digitalfilterung ist also die Anwendung eines Algorithmus auf eine punktweise definierte Datenmenge. Der Algorithmus, der auch allgemein als eine Übertragungsfunktion angesehen werden kann, erzeugt als sein Ergebnis wieder eine Datenliste [9]. Oft wird die Übertragungsfunktion als ein Softwareprogramm implementiert. Es ist aber auch möglich, die Übertragungsfunktion durch eine Hardware zu realisieren. Das bei der Analog-Digital-Wandlung einzusetzende Antialiasing-Filter ist jedoch unverzichtbar. Alle weiteren Filterungen können dann digital durchgeführt werden.

Bei Signalen mit sehr unterschiedlicher Maximalfrequenz arbeitet man häufig dennoch mit einer festen maximalen Abtastfrequenz. Das ebenfalls für eine feste Eckfrequenz ausgelegte Antialiasing-Filter und der AD-Wandler sind optimal aufeinander abgestimmt. Ist die aktuelle Signalfrequenz dann sehr viel niedriger als die Frequenz, mit der abgetastet wurde, dann wird nur jeder zweite oder nur jeder vierte Wert verwendet. Für diese dann, gegenüber der Samplingrate, (mehrfach) halbierte Frequenz kann die dazu passende Antialiasing-Filterung dann nachträglich digital erfolgen. Diese Vorgehensweise wird als Oversampling bezeichnet.

## 1.6 Anzeige und Registrierung der Meßergebnisse

Werden die von einer Meßkette produzierten Meßergebnisse nicht direkt für die Regelung einer Anlage verwendet, dann muß es eine Anzeige- oder Registriermöglichkeit für die Daten geben. Das übergeordnete Prinzip für die Aufbereitung der Informationen sollten immer die Erfordernisse des Nutzers sein. Die Informationstechnik erlaubt es heute die sog. Mensch-Maschine-Schnittstelle in vielfältiger Art bewußt zu gestalten. Potentiell ist die Zahl der bei einer Messung produzierten Informationen stark gestiegen. Es bedarf der kritischen Analyse und der Planung, welche Informationen in welchem Umfang gefordert sind.

### 1.6.1 Anzeige

Die klassische analoge Skalenanzeige arbeitet mit einem Zeiger der über der Skale ein Stück Weg zurücklegen kann. Die Skale ist mit Strichen, Punkten oder mit Zahlen in kleine Teilintervalle unterteilt. Dadurch läßt sich der Drehstellung des Zeigers ein Wert zuordnen. Bei passender Beschriftung der Skale, ergibt sich direkt der Meßwert. Die Genauigkeit ist, i. a. nicht sehr hoch, die Anzeige ist jedoch für den Menschen sehr übersichtlich und er kann die Information relativ schnell aufnehmen. Zur Anzeige schneller periodischer Signale ist das Oszilloskop (Elektronenstrahloszillograph) das wichtigste Anzeigegerät. Es erlaubt die Anzeige des zeitlichen Verlaufes und auch von Abhängigkeiten zweier Signale untereinander.

Die digitale Anzeige von Meßwerten erfolgt nicht nur auf dem Computerbildschirm, sondern auch mit Hilfe verschiedenster Displaytechniken. Es kommen zum Einsatz: selbstleuchtende Lumineszenzdiodendisplays in verschiedenen Farben, (von hinten beleuchtete) Flüssigkristalldisplays für eine farbige Anzeige hoher Qualität, einfarbige Plasmadisplays und andere.

Viele ehemals analoge Anzeigefunktionen werden heute mit der digitalen Technik simuliert. Mit einer Reihe von dynamisch angesteuerten Leuchtdioden wird die Zeigerbewegung nachempfunden. Mit den etablierten Softwarepaketen (z. B. LabView oder Visual Designer) für die digitale Meßdatenverarbeitung werden auf dem Bildschirm des Computers sog. virtuelle Meßgeräte dargestellt. Deren Funktion, Größe und Aufbau läßt sich in einem einfachen Dialog jederzeit verändern.

### 1.6.2 Registrierung

Bei den Registriergeräten zeigt sich eine deutliche Trendwende. Die Geräte für die direkte Aufzeichnung analoger Meßgrößen verlieren schnell an Marktanteil. Die aufwendigere Technik der digital arbeitenden Geräte ist einem derartigen Preisverfall unterworfen, daß die sehr aufwendigen analogen Aufzeichnungsgeräte kaum noch eine Chance haben. Dennoch sei in diesem Kapitel mit den analogen Aufzeichnungsgeräten begonnen.

**Koordinatenschreiber** arbeiten einem feststehenden Papier im A4- oder im A3-Format. Der Schreibstift (oder auch mehrere Stifte) ist in zwei Richtungen (x und y, eine der Achsen läßt sich auch als Zeitachse nutzen) beweglich. Die Stiftservos werden von einem in seiner Verstärkung einstellbaren Verstärker versorgt. Übliche Schreibgeschwindigkeiten liegen bei bis zu 20 cm/s.

**Linienschreiber** haben eine Vorschubsteuerung für das Papier, welches von einer Rolle kommend durch das Gerät transportiert wird. Quer dazu wird der Schreibstift von einem Servo bewegt. Langsam arbeitende Geräte arbeiten mit einer Feder, die mit Tinte gefüllt wird. Einfacher zu bedienende Geräte haben wartungsfreie Tusche- oder Faserschreiber, die man schnell austauschen kann. Um die Schreibgeschwindigkeit deutlich zu erhöhen, wurden auch Geräte mit lichtempfindlichem Papier, bei denen eine UV-Lichtquelle an die Stelle des Stiftes tritt, entwickelt.

Bei den **Punktschreibern** wird anstelle der durchgezogenen Linie nur in regelmäßigen Zeitabständen ein Punkt auf das Registrierpapier gebracht. Wichtigster Repräsentant ist der Fallbügelschreiber, bei dem der bewegliche Zeiger eines Meßwerkes periodisch über einem Farbband auf das Papier gedrückt wird. Die Mehrkanalversion arbeitet mit mehreren Farbbändern verschiedener Farbe.

Neben den rein analog arbeitenden Geräten gibt es unterdessen auch Geräte, die mit Mikroprozessoren ausgestattet sind. Dadurch ließen sich die Möglichkeiten erheblich erweitern. Die Zahl der Kanäle beträgt 32 oder mehr, eine höhere maximale Signalfrequenz wird durch Zwischenspeicherung möglich, einzelne Kanäle lassen sich rechnerisch miteinander verknüpfen, alphanumerische Ausgaben sind sowohl auf dem Papier als auch auf einem Display möglich. Die Ausgabe auf das Papier erfolgt wie bei den EDV-Druckern.

Für sehr schnelle Vorgänge sind **Speicheroszilloskop** verfügbar. Diese Geräte sind mit AD-Wandlern im Bereich 100 MHz, 500 MHz und mehr ausgestattet. Die Anzeige erfolgt auf einem für Computer üblichen Rasterbildschirm. Als Option ist i. a. ein Drucker anschließbar oder er läßt sich einbauen. Zur Standardausstattung gehört eine Schnittstelle über die ein Dialog zum Computer möglich ist.

Das bedeutendste Gerät für die Erfassung und Verarbeitung von Meßdaten ist der Mikrocomputer selbst. Es gibt heute einen kaum noch zu überschauenden Markt an Zubehör für den PC. Die Hardware für die Meßdatenerfassung wird sowohl als Einschubmodul als auch in Form von externen Gehäusen oder Baugruppenträgern angeboten. Die Software wird schon lange nicht mehr projektspezifisch geschrieben. Große Pakete mit einem umfassenden Leistungsangebot werden projektspezifisch konfiguriert. Bei einzelnen Paketen geschieht diese Konfiguration mit einer grafischen Benutzerschnittstelle. Es werden Symbole (sog. Icons) aneinandergereiht und mit einer Linie verbunden. Für ein umfangreiches Meßprojekt muß nicht mehr eine einzige Programmzeile geschrieben werden. Die Reduktion der Daten

auf wesentliche Inhalte und die Möglichkeit nahezu beliebige Zusammenhänge grafisch darzustellen sind als Vorteile zu nennen.

Die wichtigsten Ausgabegeräte sind die auch in der Büroanwendung üblichen Drucker. Das früher sehr verbreitete Endlospapier ist dem Einzelblatt gewichen. Alle Drucker arbeiten mit einer gerasterten Ausgabe. Die Auflösung wird in Punkten je Zoll (dpi = dots per inch) angegeben und beträgt zwischen 300 und 1200 dpi. Das übliche Papierformat ist DIN A4, sehr viel teurere Geräte sind für das A3-Format lieferbar.

Der klassische Nadeldrucker, er ist billig, robust und kann auch Durchschläge als Mehrfachkopie erzeugen, der Tintenstrahldrucker der üblicherweise farbig drucken kann, der Laserdrucker mit einem dem Fotokopierer vergleichbaren elektrostatischen Druckprinzip. Für große Formate bis DIN A0 stehen Plotter zur Verfügung. Moderne Geräte arbeiten nicht mehr mit Stiften, sondern nach dem gleichen Prinzip wie die Tintenstrahldrucker. Neben den vielfältigen Ausgabemöglichkeiten auf Papier ist eine sichere Speicherung der Meßdaten z. B. auf Festplatten, Disketten, Bändern, mobilen Speichermodulen, beschreibbare CD-Roms möglich. Die Übertragung der Meßdaten vom Datenerfassungsrechner geschieht über die verschiedenen Dienste der Telecom oder auch drahtlos.

### **Literaturverzeichnis**

- [1] DIN 1319, Teil 1: Grundlagen der Meßtechnik, Grundbegriffe, Jan. 1995
- [2] DIN 1319, Teil 2: Grundlagen der Meßtechnik, Begriffe für die Anwendung von Meßgeräten, Entwurf, Febr. 1996
- [3] DIN 1319, Teil 3: Grundlagen der Meßtechnik, Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, Entwurf, Febr. 1995
- [4] DIN 1319, Teil 4: Grundbegriffe der Meßtechnik, Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen, Dez. 1985
- [5] VDI 2048: Meßungenauigkeiten bei Abnahmeversuchen, Grundlagen, Juni 1978.
- [6] Arbeitskreis der Dozenten für Regelungstechnik, Digitale Regelung und Steuerung in der Versorgungstechnik, 2. Aufl., 1995
- [7] Profos, T., Pfeifer, T.: Grundlagen der Meßtechnik, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 4. Auflage, 1993.
- [8] Hart H.: Einführung in die Meßtechnik, VEB Verlag Technik Berlin, 5. Aufl. 1989
- [9] Azizi, S. A.: Entwurf und Realisierung digitaler Filter, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 5. Auflage, 1990.