

1. Grundlegende Begriffsbestimmungen

Das Beobachten und die anschließende zahlenmäßige Erfassung von Naturvorgängen und Naturerscheinungen ist das zentrale Thema der Meßtechnik. Das objektive und quantitative Beobachten von Naturvorgängen¹ bildet zusammen mit dem logischen Denken die Grundlage jeder naturwissenschaftlichen Erkenntnis. Diese von Galileo Galilei (1564-1642) und Leonardo da Vinci (1452-1519) konsequent angewandte Methode² führte im 16. Jh. zur Entwicklung der Naturwissenschaften. Das Messen stellt sowohl im Bereich der Grundlagenforschung, Entwicklung, Produktion als auch der Normung³ einen wichtigen Teil dar. Eine Grundlage hierfür ist die Definition eines sogenannten „**Basiseinheiten Systems**“ um verschiedene Messung miteinander vergleichen zu können. Erste Bestrebungen hierfür liegen bereits mehr als 100 Jahre zurück und sind größtenteils auf Bestrebungen eines länderübergreifenden, internationalen Handels zurückzuführen.

Die elektrische Meßtechnik umfaßt den Vorgang des **Erfassens** elektrischer Größen und darüber hinaus auch anderer physikalischer Größen, die sich in elektrische Größen überführen lassen. Die Einrichtung die diese Konversion der physikalischen Größe in eine elektrische Größe durchführt wird **Transducer** oder **Sensor** genannt. Dieser Bereich der Meßtechnik hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen und sich zu einer eigenen Disziplin – der **Sensorik** – weiterentwickelt. Hauptaugenmerk der Sensorik ist somit nicht die Bestimmung der unbekanntes Größe sondern die Entwicklung von Transducern, die diese in eine elektrische Größe umwandeln, z.B.: biomechanische Größen.

Der Vorgang des **Messens** ist durch das Erfassen von physikalischen Größen und anschließendes Darstellen dieser in Form eines numerischen Zahlenwertes gekennzeichnet. Das Meßergebnis ist durch die Zuordnung eines numerischen Zahlenwertes (Maßzahl) gegeben, der angibt wie oft die jeweilige Maßeinheit in der ermittelten Meßgröße enthalten ist⁴. Als klassisches Beispiel kann hier die Längenmessung betrachtet werden. Im Mittelalter oder der Antike wurde die unbekannte Strecke „abgegangen“ und die Maßzahl ergab sich aus der Anzahl der „**Fuß**“ die in der unbekannte Strecke enthalten waren. Dieses einfache Beispiel verdeutlicht bereits eine Notwendigkeit des Messens, es muß eine Vergleichsgröße vorhanden sein – **das Normal N**, in diesem Fall der Fuß. Nur wenn ein Normal **N** vorhanden ist, ist es möglich zu ermitteln wie oft die Vergleichsgröße in der unbekanntes Größe enthalten ist, dies führt folglich auf die Meßzahl **x**.

$X = x \cdot N$ Der Meßgröße **X** wird die numerische Maßzahl **x** als Vielfaches der Einheitsgröße (des Normales) **N** zugeordnet.

X ... Meßgröße, *physikalische Größe die zu messen ist, z.B.: Leistung, Entfernung, Höhe, Gewicht*

x ... Maßzahl, *ein rein numerischer Zahlenwert, z.B.: 1357, ... 99568 ...*

N ... Einheitsgröße oder Meßnormal, *durch Definition festgelegt, z.B.: Volt, Meter, Pascal*

¹ Auszug aus Platos (427-347 v.Chr.), Der Staat: „Das beste Mittel gegen Sinnestäuschungen ist das Messen, Zählen und Wägen. Dadurch wird die Herrschaft der Sinne über uns beseitigt“

² Leonardo da Vincis naturwissenschaftliche Arbeiten waren bahnbrechend für die damalige Zeit (z.B. Beobachtung des Vogelfluges, Strömungsverhalten ...). Neben seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten war Leonardo auch ein begnadeter Bildhauer und Maler (Mona Lisa).

³ Verfügbarkeit von Standardbauteilen, z.B. M3 Mutter. Nur eine ständige Kontrolle und damit Messung der Maßhaltigkeit dieser Bauteile ermöglicht ihren sinnvollen Einsatz.

⁴ Dies wurde von Lord Kelvin treffend formuliert: „Wenn Ihr das, wovon Ihr sprecht, messen und durch eine Zahl ausdrücken könnt, so wißt Ihr etwas von eurem Gegenstand“.

Die Maßzahl oder auch der Meßwert x wird hierbei durch die Anzeige eines Meßgerätes erhalten, wobei x durch die Stellung eines Zeigers (oder einer beliebigen Marke) über einer Skala - *analog* - oder als Ziffer auf einem Zählwerk⁵ (oder numerischer Anzeige) - *digital* - gegeben ist.

z.B. Temperaturmessung: 25°C, Strommessung: 0,37A, Spannungsmessung: 385V

Ist die Meßgröße X zeitlich nicht konstant, so ist für Ihre Charakterisierung natürlich eine einfache Zahl nicht mehr ausreichend, in diesem Fall ist x eine Funktion der Zeit und somit $x(t)$.

Die Verfügbarkeit einer Maßzahl X und einer Einheitsgröße oder eines Normals N kann als **1. Fundamentalvoraussetzung** gelten.

1. Fundamentalvoraussetzung: Die zu messende Größe muß qualitativ eindeutig definiert und quantitativ bestimmbar (erfassbar) sein.

2. Fundamentalvoraussetzung: Das Meßnormal für die betrachtete Größe muß durch Konvention festgelegt sein.

Die eigentliche Messung einer physikalischen Größe erfolgt also durch einen Vergleich mit einer bekannten – *hinlänglich definierten* – Einheitsgröße oder Einheit (*sehr anschaulich ist dies bei einer Balkenwaage. Hier kann der Vergleich direkt durch die Bewegung des Balkens zufolge der unterschiedlichen Gewichte auf beiden Seiten beobachtet werden*). Der Vorgang des Messens besteht nun darin festzulegen wie oft die Einheitsgröße in der unbekanntem Meßgröße enthalten ist.

Die Einheit wird oft durch Meßnormale dargestellt. Diese Meßnormale sind im allgemeinen stark vom jeweiligen Stand der Technik abhängig. Nicht alle Konventionen sind eindeutig (z.B. Wirkungsgrad, Klirrfaktor ...). Nicht alle Größen sind einer quantitativen Erfassung zugänglich (z.B. Intelligenz, Behaglichkeit, Erfolg ...).

Eine weitere wichtige Komponente für eine erfolgreiche Messung stellt die **Abstraktion** dar. In einem physikalischen System kann die interessierende Größe im allgemeinen nicht absolut isoliert betrachtet werden. Das Einbringen des Meßgerätes in den Prozeß und der Beobachter an sich verändern den Prozeß. Es ist deshalb sinnvoll, die Auswirkung dieser Einflußfaktoren auf das Meßergebnis abzuschätzen. Wird die Messung abstrahiert betrachtet, so kann folgendes Schema herangezogen werden.

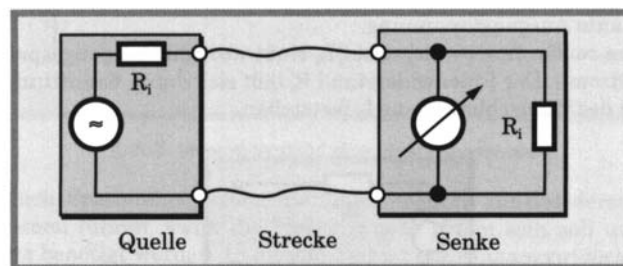


Abb. 1.1. Prinzipieller Aufbau eines Meßsystems

Das zu vermessende System und die für die Messung notwendigen Hilfsmittel werden als der Meßaufbau bezeichnet. Dieser kann in drei Teilsysteme zerlegt werden: Der physikalische Prozeß oder die **Quelle**; die Informationsverarbeitung oder die **Senke**, die die physikalische Prozeßgröße in eine für den Menschen verwertbare Form wandelt; **Quelle** und **Senke** sind im allgemeinen örtlich voneinander getrennt, eine

⁵ Als klassischer Vertreter einer digitalen Anzeige kann der mechanische **km** Zähler in älteren KFZ's gesehen werden. Dies ist ein rein mechanisches Instrument, bei dem der Zahlenwert digital angezeigt wird, bei dem aber keinerlei Quantifizierung des Meßwertes auftritt, wie dies bei moderne elektronischen Digitalanzeigen stets der Fall ist.

geeignete Verbindung der beiden Einheiten wird als **Strecke**⁶ bezeichnet. Im Rahmen der elektrischen Meßtechnik wird von der Quelle oftmals eine elektrische Spannung (oder Strom) als Ausgangssignal erzeugt. Werden nicht elektrische Größen erfaßt, so werden diese innerhalb der Quelle in Spannungen oder Ströme gewandelt (z.B. integrierte Temperatur, Druck oder Lichtsensoren). Die Senke ist nicht notwendigerweise auf die Anzeigeeinrichtung beschränkt. Bei sehr kleinen Signalpegel müssen der Anzeige noch zusätzlich signalverstärkende Baugruppen (bei Störungen noch vielfach Filter) vorgeschaltet werden.

Wird die, über eine Meßkette (*Anordnung von Quelle zur Senke*), erfaßte Meßgröße zur Veränderung oder Beeinflussung eines Prozesses oder Systems⁷ herangezogen, so spricht man vom Regeln des Systems. Hierbei werden die Prozessparameter des Systems auf Grund der gemessenen Werte in bestimmter Weise verändert um die für den Prozess notwendigen Rahmenbedingungen zu garantieren. Als Beispiel kann ein Kessel betrachtet werden, in dem eine chemische Reaktion abläuft. Diese Reaktion läuft nur bei einer bestimmten Temperatur ab. Somit ist es notwendig, das Innere des Kessels genau auf dieser Temperatur zu halten. Von außen kann der Kessel geheizt werden, ohne Information über die Temperatur im Inneren ist aber eine sinnvolle Heizung nicht möglich. Es muß somit die Innentemperatur bestimmt werden um ein sinnvolles Maß an Heizleistung zu ermitteln. Dieser geschlossene Kreis aus Temperaturmessung und Zuführung der entsprechenden Heizleistung wird auch als **Temperaturregelung** bezeichnet.

Wird das System lediglich mit einer bestimmten aus Erfahrungswerten gewonnene Größe beaufschlagt, ohne die tatsächliche Prozessgröße zu kennen, so spricht man vom Steuern eines Systems.

2. SI Basisgrößen und zugehörige Einheiten

Nach der **1. Fundamentalvoraussetzung** muß die Meßgröße quantitativ erfaßbar sein. Es muß somit eine Relation zu einer „Grund“- oder „Bezugsmenge“ einer Größe bestimmbar sein. Dies setzt das Vorhandensein eines Normals voraus. Die voneinander unabhängig definierten Normale werden *absolute* oder *Grundnormale* genannt⁸. Die sieben zu den Grundnormalen gehörigen Basiseinheiten werden durch das internationale Einheitensystem (**SI**⁹ – **S**ystème **I**nternational d’**U**nités) definiert:

2.1. Masse - Kilogramm / kg

Das Grundnormal der **Masse**, definiert durch den in Sèvres (Frankreich) aufbewahrten Pt-Ir (Platin Iridium) Zylinder – internationales Kilogramm. Durch Vergleich über Balkenwaagen erreichbare Genauigkeiten $\sim 10^{-9}$.

Das Kilogramm ist gleich der Masse des in Sevres bei Paris aufbewahrten internationalen Kilogramm Prototyps.

⁶ Die Verbindung von Quelle und Senke muß nicht immer galvanisch (direkte leitfähige elektrische Verbindung) sein, sie kann auch optisch, z.B. Lichtleiter oder auch akustisch, z.B. Geigerzähler sein. In letzter Zeit setzt sich die Meßwertübertragung über Funkkanäle immer stärker durch. Module für Sender und Empfänger für das 433 MHz Band werden kostengünstig angeboten und sind einfachst in das System zu integrieren.

⁷ Z.B. Temperatur innerhalb eines Wärmeofens oder Wasserhöhe in einem Staubecken.

⁸ Nach der französischen Revolution ging man systematisch dazu über die Einheiten nicht mehr vom Menschen selbst abzuleiten, sondern auf größere weniger variable Systeme zu beziehen. Das **Meter** wurde z.B. vom Erdumfang abgeleitet, das **Kilogramm** vom Gewicht eines dm^3 Wassers und die Zeiteinheit die **Sekunde** von der Erdumdrehung.

⁹ 1954 begründete die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (bestehen aus mehr als 50 Staaten – mit Sitz in Sèvres bei Paris) das heute gültige „Internationale Einheitensystem“. Das System wurde 1971 noch um die Grundeinheit der Stoffmenge - das Mol - erweitert.

2.2. Zeit - Sekunde / s

1967 wurde die Sekunde über die Resonanzschwingung des ^{133}Cs (Caesium)¹⁰ Nuklids¹¹ definiert. In Cs Strahlresonatoren (Atomuhren) wird die Resonanzabsorption des ^{133}Cs Atoms bei $f_0 = 9.192.631.770$ Hz für die Ableitung der Sekunde genutzt. (erreichbare Genauigkeiten $\sim 10^{-14}$).

Die Sekunde ist gleich der Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes des Cäsiumatoms ^{133}Cs entspricht.

2.3. Länge - Meter / m

Die Definition der Länge erfolgt seit 1983 über die Vakuum Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 299.792.458$ ms^{-1} und ist definiert als die Strecke, die das Licht in $1/299.792.458$ Sekunden zurücklegt. Die Länge ist somit von der Definition der Zeit abhängig, gilt aber trotzdem als eigenständige Basiseinheit.

Das Meter ist gleich der Strecke, die im leeren Raum von unbegrenzten, ebenen, elektromagnetischen Wellen während der Dauer von $1 / 299\ 792\ 458$ s durchlaufen wird.

2.4. Temperatur - Kelvin / K

Die Definition der Temperatur erfolgt über die *internationale praktische Temperaturskala* (ITPS-68). Die Einheit 1 Kelvin ist hierbei definiert als der 273,16 Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes¹² von Wasser (Nullpunkt der Celsius Skala liegt bei 273,15 K also 0,01 K unter dem Tripelpunkt).

Das Kelvin ist $1 / 273,16$ der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

Der Tripelpunkt ist ein ausgezeichnete Punkt eines Einkomponentensystems, bei dem die drei Phasen im Gleichgewicht miteinander stehen. Dieser ergibt sich durch den Schnittpunkt dreier Phasengleichgewichtskurven im Zustandsdiagramm. Für Wasser H_2O ist dies bei einer Temperatur von $0,0100^\circ\text{C}$ und einem Druck von $610,628$ kPa der Fall. An diesem Punkt existieren alle drei Phasen Eis, Wasser und Wasserdampf gleichzeitig im Gleichgewicht.

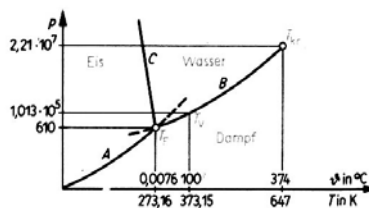


Abb. 2.1. Vereinfachtes Zustandsdiagramm des Wassers, Druck in Pascal **Pa**, Temperatur in Kelvin **K**

Der Tripelpunkt von Wasser ist ein Fixpunkt der internationalen Temperaturskala und liegt bei **273,16 K**.

¹⁰ Die Anwendung von ^{133}Cs in der Resonanzabsorption erweist sich als besonders vorteilhaft, da nur das ^{133}Cs Isotop stabil ist. Alle anderen Cs Isotope haben Halbwertszeiten zwischen einigen Monate und Sekunden.

¹¹ Eine Atomkernart, die sich im Bau bzw. in der Zusammensetzung von anderen Atomkernarten unterscheidet, d.h. eine bestimmte Ordnungszahl Z und Massenzahl A hat.

¹² Jener Punkt im Phasendiagramm, bei dem Wasser in allen drei Phasen vorhanden ist, sowohl fest als Eis, flüssig als Wasser als auch gasförmig in Form von Wasserdampf.

2.5. Elektrische Stromstärke - Ampere / A

Das Ampere ist durch einen Vergleich elektrischer und mechanischer Kräfte dargestellt und setzt die Kenntnis des Meters, der Sekunde und des Kilogramms voraus.

Die Kraft ist hierbei folgendermaßen definiert $F = m \cdot a$ / kg m s^{-2}

Unter der Stromstärke 1A wird die Größe eines Stromes verstanden, der in zwei unendlich langen, geradlinigen, parallel angeordneten Leitern im Vakuum die Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorrufen würde. Praktisch wird das Ampere durch Stromwagen bestimmt.

Das Ampere ist gleich der Stärke des elektrischen Stromes, der durch zwei geradlinige, dünne, unendlich lange Leiter, die in einer Entfernung von 1 Meter parallel zueinander im leeren Raum angeordnet sind, unveränderlich fließend bewirken würde, daß diese Leiter aufeinander eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton je Meter Länge ausüben.

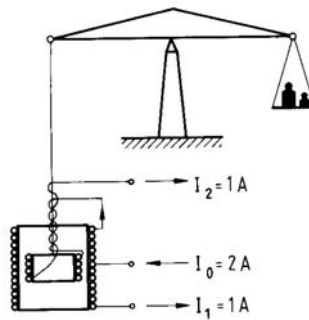


Abb. 2.2. Prinzip einer Stromwaage zur Darstellung des Amperes

2.6. Lichtstärke - Candela / Cd

Die Einheit der Lichtstärke Candela wurde 1979 definiert als die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung, einer monochromatischen Strahlungsquelle der Frequenz $f_0 = 540 \cdot 10^{12}$ Hz deren Strahlungsstärke in Ausbreitungsrichtung $1/683 \text{ Wsr}^{-1}$ beträgt.

Die Candela ist gleich der Lichtstärke in Richtung der Normale einer Fläche von $1 / 600\,000$ Quadratmeter der Oberfläche des schwarzen Körpers bei der Temperatur des unter dem Druck von $101\,325$ Pascal erstarrenden Platins.

2.7. Stoffmenge - Mol / mol

Ein Mol ist die Stoffmenge eines spezifizierten Systems, das aus ebensovielen Teilchen besteht, wie Atome in 12g des Nuklides ^{12}C enthalten sind. Hierbei müssen die Teilchen spezifiziert sein: Atome, Moleküle, Ionen usw.

Das Mol ist gleich der Stoffmenge eines Systems, das ebensoviele Teilchen enthält, wie Atome in $0,012 \text{ kg}$ Kohlenstoff ^{12}C enthalten sind. (Die Art der Teilchen ist gesondert anzugeben, z.B. Atome, Moleküle, Ionen oder Elektronen, etc.)

2.8. Abgeleitete Größen

Aus den oben genannten Grundgrößen können alle anderen Größen und Einheiten abgeleitet werden (*derived units*) wobei hierbei folgende Kategorien unterschieden werden:

Kohärenten Einheiten – Ableitung aus den Basisgrößen ohne von Eins verschiedene Faktoren.

z.B: Kraft (kg ms^{-2}), Ladung (As)

Inkohärenten Einheiten – Ableitung aus Basisgrößen mit beliebigen von Eins verschiedenen Faktoren

z.B: magnetische Induktion $B = \mu_0 H$ (Vakuum).

Eine Aufstellung über die wichtigsten in der Elektrotechnik verwendeten Größen gibt folgende Tabelle:

Größe – Name	Formelzeichen	SI Einheit – Name	Zeichen
Energie	W	Joule	J
Leistung	P	Watt	W
Elektrische Spannung	U	Volt	V
Elektrischer Strom	I	Ampere	A
Elektrische Ladung	Q	Coulomb	C
Elektrischer Widerstand	R	Ohm	Ω
Elektrischer Leitwert	G	Siemens	S
Magnetischer Fluß	Φ	Weber	Wb
Magnetische Flußdichte	B	Tesla	T
Elektrische Induktivität	L	Henry	H
Elektrische Kapazität	C	Farad	F
Frequenz einer Schwingung	F	Hertz	Hz
Periodendauer einer Schwingung	T	Sekunde	s

2.9. Normale

Die wichtigsten Normale für die Elektrotechnik stellen die Spannungsnormale (Primär- und Sekundärnormale) und Normalwiderstände¹³ dar. Die Normale stellen die für eine Messung nötigen Vergleichsbasis dar. Durch den Vergleich mit einem Normal kann der jeweilige numerische Zahlenwert einer Meßgröße festgelegt werden.

1. Spannungsnormale:

Die Spannungsnormale werden in **Primär-** und **Sekundärnormale** unterschieden, wobei die **Primärnormale** mit bestmöglicher Genauigkeit hergestellt werden und in Eichinstituten aufbewahrt werden. Die Sekundärnormale werden auf die Primärnormale referenziert, haben aber geringere Genauigkeit.

¹³ Es ist bis heute noch nicht gelungen ein praktisch verwendbares Normal für die Größe des elektrischen Stromes herzustellen. Dies mag zum Teil damit zusammenhängen, daß als elementare Bauelement im allgemeinen nur Spannungsquellen, z.B.: Batterien und Akkumulatoren aber keine Stromquellen zu finden sind

<http://www.pegasus-sys.net/FheServices.htm>

Josephson Normal: Erzeugung der Normalspannung über **Josephson-Effekt**. Durch Serienschaltung von 1500 Josephson Elemente wird ein Spannungsnormale im Bereich 1V mit einer erreichbare Genauigkeit von 10^{-9} V realisiert.

Normalelement: Wird durch ein galvanisches Elemente realisiert. Diese Normale dürfen nicht belastet werden (kein Stromfluß) und müssen bei konstanter Temperatur eingesetzt werden. z.B. Weston Element ($U_0 = 1,01865\text{V}$ bei 20°C). Erreichbare Genauigkeit $\sim 100\text{ppm}$ (10^{-4}).

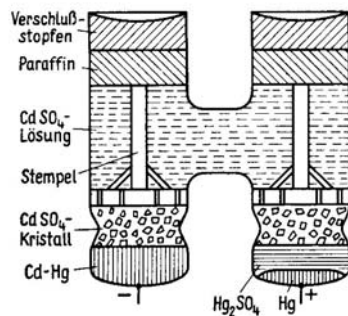


Abb. 2.3. Internationales gesättigtes Weston Element

Heutige verfügbare elektronische Normale liegen in der Genauigkeit im allgemeinen 1 bis 2 Zehnerpotenzen unter der Genauigkeit des Weston Normalelementes (Exemplarstreuungen sind dem entsprechend einen Faktor 10 ... 100 größer). Einen wichtigen Einflußfaktor auf die Normalspannung stellt auch der **Temperaturkoeffizient TK** und die Alterung dar. Die beiden Größen beschreiben das Driftverhalten des Normalelementes.

Als Beispiel für eine monolithisch integrierte Spannungsreferenz mit Ausgangsspannung von 10V und 0,2% Grundgenauigkeit:

REF 01 von **Burr-Brown**. - <http://www.burr-brown.com/products/>

Siehe auch application bulletins. - <http://www.burr-brown.com/applications/>

2. Normalwiderstände:

Edelmetallschichten auf Keramikträgermaterial (Cermet), getrennter Abgriff für Spannungs- und Stromzuführung. Erreichbare Genauigkeiten $\sim 10 \dots 100\text{ppm}$.

Normalwiderstände werden vor allem für die Realisierung von Spannungsteilern und Meßbrücken verwendet. Weiters auch als Nebenwiderstände (englisch: Shunts) zur Umwandlung eines Stromes in einen Spannungsabfall.

Für Beispiele von Präzisionswiderständen und Potentiometer siehe auch:

Bourns Inc. - <http://www.bourns.com/html/datasheets.htm>

Allgemein wird versucht alle Normale auf quantenphysikalische Vorgänge zurückzuführen, da diese ausschließlich auf physikalischen Grundlagen beruhen und somit alle makroskopischen Einflußgrößen ausgeschaltet werden können.

Der erste Standard dieser Art waren die bereits erwähnten Atomuhren. Diese beruhen ausschließlich auf den Eigenschaften des ^{133}Cs Nuklids und sind somit universell gültig. 1990 wurden über den **Josephson-** und **Hall Effekt Standards** für Spannung und Widerstand geschaffen. Aktuell wird am **NIST (National Institute of Standards and Technology)** an einem Standard für die Kapazität gearbeitet.

Wenn es erforderlich erscheint zusätzlich zur Größe die Einheit anzugeben sollte dies in unten angeführter Form erfolgen¹⁴.

F A L S C H			R I C H T I G		
U [V]	U [V]	U in [V]	U	U / V	U in V
0,1	0,1	0,1	0,1 V	0,1	0,1
1 μ	1 μ	1 μ	1 μ V	10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶

3. Meßverfahren

Bevor im folgenden die verschiedenen Meßverfahren hinsichtlich signal- als auch verfahrenstypischer Gesichtspunkte klassifiziert werden, sollen kurz einige Begriffe aus dem Bereich der Meßtechnik erläutert werden:

Messen, Meßvorgang: Einer zu messenden Größe ein Vielfaches einer Einheit oder eines Normal zuzuordnen. Im erweiterten Sinne durch experimentelle Wege eine quantitative Aussage über eine unbekanntes Größe zu treffen.

Meßgröße¹⁵: Physikalische Größe die durch die Messung quantitative erfaßt werden soll, z.B. Druck, Temperatur, Länge.

Meßwert: Ist der gemessene spezifische Wert der unbekanntes Größe. Ergibt sich aus dem Produkt des Vielfachen der Einheit und der Einheit selbst, z.B. 3Pa, 125°K, 12,5m.

Meßobjekt: Derjenige Teil eines physikalischen Systems der Träger der unbekanntes Meßgröße oder Information ist.

Meßeinrichtung: Summe aller Geräte und Einrichtungen die zur Erfassung der Meßgröße notwendig sind. Umfaßt alle Einrichtungen von der Quelle bis zur Senke, also auch Datenverarbeitungsgeräte zur Umwandlung oder Berechnung der Meßgröße.

Meßprinzip: Physikalisches Prinzip, das zur Umwandlung der unbekanntes, nicht direkt erfaßbaren Größe in eine meßbare Größe dient, z.B. Temperaturmessung über Widerstandsänderung eines bestimmten Materials (z.B. Platinwiderstand), Beschleunigungsmessung über Dehnungsmeßstreifen oder Tachogenerator zur Drehzahlmessung.

3.1. Direkte und Indirekte Meßverfahren

Direkte Messungen sind im engeren Sinne durch den *direkten Vergleich* der zu messenden Größe mit dem Normal derselben Meßgröße gekennzeichnet (z.B.: Gewichtsmessung durch Vergleich mit Gewichtsnormalen, Längenmessung durch Vergleich mit Metermaß). Im erweiterten Sinne werden hierzu alle direktanzeigenden Meßeinrichtungen, deren Skala in Einheiten der Meßgröße geteilt ist, gerechnet (z.B.: Drehspulinstrument - Momentenvergleich).

Bei der **indirekten Messung** wird die gesuchte Größe auf andere physikalische Größen zurückgeführt und unter Verwendung bekannter formaler Zusammenhänge ermittelt (z.B.: Druckmessung über Kolbenfläche

¹⁴ Dies sollte auch bei der Ausführung von Meß- oder Laborprotokollen beachtet werden.

¹⁵ Physikalische Größen im allgemeinen beschreiben Eigenschaften von Körpern, Zuständen oder Vorgängen. Grund oder Basisgrößen sind voneinander unabhängig definiert.

A_0 , aufgelegte Masse m und Gravitationskraft g führt auf $P = \frac{mg}{A_0}$ oder pH Wert Messung über die Nernst'sche Gleichung).

3.2. Analoge und Digitale Verfahren

Nach der Definition von Abschnitt 1 ist der Meßwert als Produkt der Maßzahl x und der Dimension des Normales gegeben. Im Verlauf des Meßvorganges wird diese Maßzahl x über mehrere Funktionsgruppen übertragen. Die **analogen Meßverfahren** sind durch eine ständige analoge Übertragung der Information über die Meßgröße gekennzeichnet (z.B.: Tachometer im Kfz). Im Gegensatz dazu wird bei **digitalen Verfahren**¹⁶ eine numerische Information (im allgemeinen in binärer Form) über die Meßgröße weiterverarbeitet (z.B.: Frequenzzähler).

Moderne **elektronischer digitale** Verfahren zeigen hier zusätzlich noch eine Quantisierung bei der Informationsdarstellung. Diese Quantisierung der Darstellung ergibt sich aus der endlichen Zahl von verschiedenen Kombinationen für eine gegebene Darstellungsbreite. Für z.B.: 2 Stellen beträgt diese 100 wenn von einem dezimalen System ausgegangen wird. Der Übergang von einer Kombination zur nächsten erfolgt *sprunghaft*, z.B.: 27 auf 28 – Es kann keinerlei Information über Zwischenzustände abgeleitet werden (Möglichkeiten bietet hier die Statistik über längere Beobachtungszeiträume).

Ein mechanische Zählwerk (z.B.: Kilometerzähler in älteren Autos) zeigt diese Quantisierung nicht, obwohl auch hier der Meßwert digital angezeigt wird. An der letzten Stelle kann auch Information über Zwischenzustände abgelesen werden, da hier der Übergang kontinuierlich erfolgt.

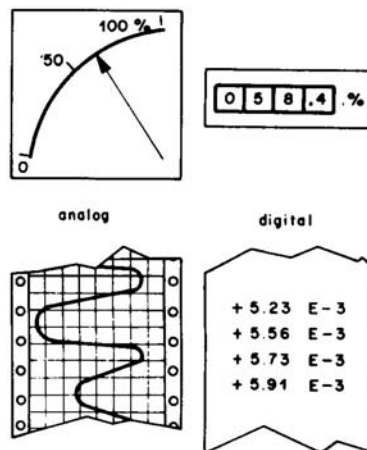


Abb. 3.1. Analoge und digitale Darstellungen des Meßwertes

Die Vorteile der analogen Verfahren sind in der leichteren Erfassbarkeit als auch Darstellbarkeit von Zeitverläufen des Meßwertes zu suchen, überdies arbeiten analoge Verfahren stets kontinuierlich. Für digitale Verfahren gilt im allgemeinen eine wesentlich höher Genauigkeit und die einfache Weiterverarbeitung und Speicherung der Daten über ein Rechnersystem.

¹⁶ Hinsichtlich der Ablesegenauigkeit gilt für digitale Verfahren, daß diese nur vom Quantifizierungsfehler (springen der letzten Stelle) bestimmt ist (es sei angemerkt, daß eine hohe Ablesegenauigkeit keineswegs eine hohe Meßgenauigkeit bedingt!). Bei analogen Verfahren ist das endgültige Festlegen der Maßzahl dem Bediener überlassen, da hier das Meßergebnis in Form des Zeigerausschlages zur normierten Skala dargestellt wird (z.B.: Federwaage).

3.3. Zeitlich kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren

Zeitlich **kontinuierliche** Systeme sind durch ein kontinuierliches Arbeiten *aller* Systemkomponenten gekennzeichnet. **Diskontinuierliche** Systeme enthalten hingegen mindestens ein zeitdiskretes System (z.B.: Abtast-Halteglied für A/D Wandlung, Meßstellenumschalter – analog und digital arbeitende Multiplexer).

3.4. Ausschlags- und Kompensationsverfahren

Beim **Ausschlagsverfahren** wird der durch die Meßgröße bewirkte Zeigerausschlag direkt mit der, in Form der Skala vorhanden „Eichinformation verglichen“ und das Verfahren ist durch eine gerichtete Wirkungskette charakterisiert. Der größte Nachteil des Ausschlagsverfahrens kann in der Rückwirkung auf den Prozeß gesehen werden (z.B.: Federwaage, Drehspulinstrument, Membran-Manometer¹⁷). Ein wesentliches Charakteristikum des Ausschlagsverfahrens ist, daß die Information über den Prozeß immer aus einer Rückwirkung auf diesen gewonnen wird. Es ist also notwendig dem Prozeß immer ein gewisses Maß an Energie zu entziehen um daraus den Meßwert oder die anzuzeigende Information abzuleiten.

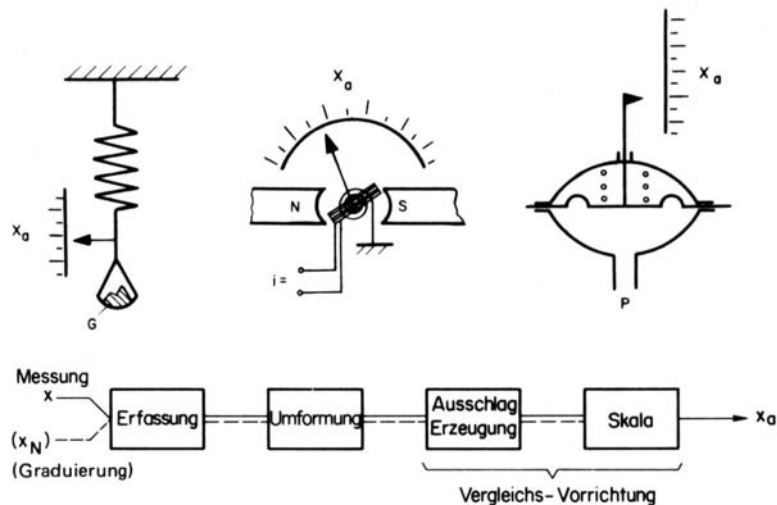


Abb. 3.2. Verschiedene Meßprinzipien und Wirkungskette für Ausschlagsverfahren

Im Gegensatz zu obigen Ausschlagsverfahren ist das **Kompensationsverfahren** (oder auch vergleichendes Verfahren) dadurch gekennzeichnet, daß keinerlei oder minimale Rückwirkungen auf den Prozeß auftreten. Das Meßprinzip ist dadurch gekennzeichnet, daß der **quantitativ unbekannt** Größe eine **quantitativ bekannte** Größe gegenübergestellt wird. Eine wichtige Einschränkung des Kompensationsverfahren besteht darin, das immer nur auf **Gleichheit** verglichen werden kann. So ist es z.B. mit einer Balkenwaage nicht möglich festzustellen „um wieviel schwerer“ das Gewicht einer Seite als das der anderen Seite ist.

Die bekannte Größe wird solange variiert, bis Sie der unbekannt Größe exakt entspricht. Die Gleichheit der unbekannt und bekannten Größe wird über ein geeignetes Hilfsmittel oder ein Anzeigegerät festgestellt. Die Meßgröße wird somit unmittelbar an der Vergleichsstelle kompensiert – Eine Veränderung der Prozeßparameter wird hierdurch verhindert. Bei elektrischen Größen werden zur „Feststellung der Gleichheit“ sogenannte **Nulldetektoren**¹⁸ (Instrument zur Bestimmung der Gleichheit) verwendet. Diese

¹⁷ Durch die, für die Anzeige notwendige Volumenvergrößerung kann natürlich der Prozessablauf in manchen Parametern empfindlich gestört werden.

¹⁸ Das Kennzeichen von Nulldetektoren ist, daß sie nie für die Messung der absoluten Größe einer Meßgröße herangezogen werden. Sie haben im allgemeinen keine geeichte Skala und sind im Prinzip zur Detektion „des Nichtvorhandenseins jeglicher Anregung“ konstruiert.

<http://www.pegasus-sys.net/FheServices.htm>

sind immer minimalen Belastungen ausgesetzt und haben ihre maximale Empfindlichkeit um den Nullpunkt. Die Skala ist stets symmetrisch zum Nullpunkt.

Der Nachteil des Kompensationsverfahrens ist die Notwendigkeit variabler Normale hohe Güte¹⁹, da für eine vollständige Kompensation das Normal immer der unbekanntes Größe nachgeführt werden muß.

Die Wirkungskette des Kompensationsverfahrens ist nicht mehr einfach gerichtet, sondern zeigt die Eigenschaften rückgekoppelter Systeme (z.B.: Balkenwaage, Meßbrücken, Kolbenmanometer).

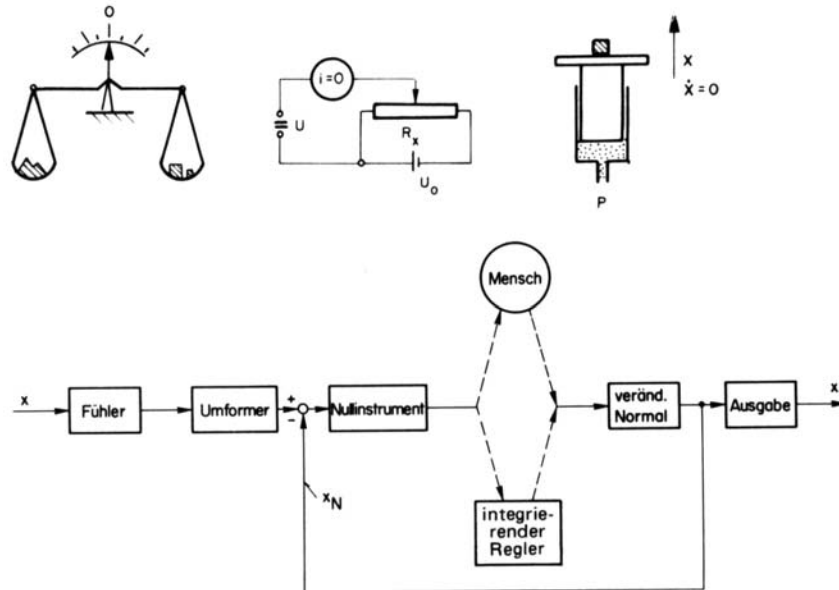


Abb. 3.3. Wirkungskette für Kompensationsverfahren (rückgekoppeltes System)

Abschließend sollen noch folgende Begriffe erläutert werden:

- Meßtechnik:** Beinhaltet die Erfassung (Messung) der unbekanntes Größe und wenn notwendig deren elektronische Aufbereitung (analog oder digital) für eine sinnvolle Weiterverarbeitung.
- Steuerungstechnik:** Auf Grund der gewünschten Prozeßparameter wird der zu steuernde Prozeß mit einer gewissen Größe beaufschlagt. **Es existiert keinerlei Information über die tatsächliche Prozeßgröße.**
- Regelungstechnik:** Aus der Verbindung von Steuer und Meßtechnik entsteht die Regelungstechnik. Der gewünschten Prozeßparameter stellt den **Sollwert** des Prozesses dar, der gemessene Prozeßparameter stellt den **Istwert** dar. Die Größe mit der der Prozeß beaufschlagt wird ergibt sich hierbei aus einem **Vergleich von Sollwert und Istwert**. Die Regelungstechnik zeigt somit ähnlich dem Kompensationsverfahren eine nicht mehr einfach gerichtet Wirkungskette.

¹⁹ Variable Normale sind im allgemeinen nicht verfügbar. Man arbeitet deshalb mit fixen Normalen und teilt die Ausgangsgröße des Normalen über fixe Präzisionsspannungsteiler auf das gewünschte Maß. Diese Spannungsteiler können auch stufenförmig kaskadiert aufgebaut sein um feinere Teilungen zu ermöglichen.

4. Allgemeine Konventionen

Im folgenden sollen die gebräuchlichsten in der Elektrotechnik verwendeten Konventionen kurz vorgestellt werden.

Da die verwendeten Größen in der Elektrotechnik, also auch der Meßtechnik einen Größenbereich von über **30 Zehnerpotenzen** überstreichen können, empfiehlt es sich Abkürzungen für diese zu definieren.

Symbol	Prefix	Exponent	Symbol	Prefix	Exponent
y	yocto-	10^{-24}	Y	Yotta-	10^{24}
z	zepto-	10^{-21}	Z	Zetta-	10^{21}
a	atto-	10^{-18}	E	Exa-	10^{18}
f	femto-	10^{-15}	P	Peta-	10^{15}
p	pico-	10^{-12}	T	Tera-	10^{12}
n	nano-	10^{-9}	G	Giga-	10^9
μ	mikro-	10^{-6}	M	Mega-	10^6
m	milli-	10^{-3}	k	kilo-	10^3

Tab. 1. Gebräuchliche Vorsatzzeichen (Abkürzungen) für wissenschaftliche Notation

Bei der Angabe von Meßergebnissen wird stets mit Vorsatzzeichen gearbeitet. Folgende Schreibweise für die Angabe einer Strommessung ist inakzeptabel und sollte daher stets vermieden werden:

$$I_M = 0,000000000000012A$$

Besser ist:

$$I_M = 12 \cdot 10^{-15}A \quad \text{oder praktisch} \quad I_M = 12fA$$

Physikalische Phänomene werden qualitativ und quantitativ durch physikalische Größen beschrieben. Jeder spezielle Wert einer Größe kann als Produkt aus Zahlenwert und Einheit dargestellt werden. Wenn sich die Einheit ändert (durch den Gebrauch von Vorsatzzeichen) ändert sich auch der Zahlenwert.

Das **Produkt** aus **Einheit und Zahlenwert** bleibt also **konstant**, es ist invariant gegenüber einem Wechsel der Einheit (z.B.: bei der Angabe $U = 0.1V$ und $U = 100mV$ handelt es sich um denselben Größenwert).

Andere in der Meßtechnik gebräuchliche Zusammenhänge zwischen der Auflösung eines Meßgerätes und der notwendigen Stellenzahl stellt nachfolgende Tabelle zusammen. Als Beispiel sei die Zeile mit **3** angezeigten Digits herangezogen. Der Umfang des darstellbaren Zahlenbereichs reicht von 000 ... 999 – also 1000 verschiedenen Zahlen. Für einen angenommenen Meßbereich von 10V maximal liegt die kleinste feststellbare Änderung somit bei $10V / 1000 = 0,01V$ oder **10mV**. Für eine Darstellung von 1000 verschiedenen Zahlen im binären Zahlensystem werden 10 Bit benötigt. Der mittels 10 Bit darstellbare Zahlenbereich ist 0000 ... 1023.

Die für einen gewissen Darstellungsbereich notwendige Bitzahl läßt sich nach folgender Beziehung berechnen:

$$\text{Bitzahl} = ld(N) = \frac{\ln(N)}{\ln(2)} \quad \text{mit } N \text{ als maximaler Darstellungsbereich.}$$

$ld(N)$... Logarithmus dualis - Logarithmus zur Basis 2

Angezeigte Digits	Auflösung ²⁰ (bei 10V)	Prozent	ppm ²¹	bit	dB [decibel]
1	1000,0mV	10	100.000	3,3	-20
2	100,0mV	1	10.000	6,6	-40
3	10,0mV	0,1	1.000	10,0	-60
4	1,0mV	0,01	100	13,3	-80
5	0,1mV	0,001	10	16,6	-100
6	0,01mV	0,0001	1	19,9	-120
7	0,001mV	0,00001	0,1	23,3	-140
8	0,0001mV	0,000001	0,01	26,6	-160

Tab. 2. Zusammenhang zwischen angezeigten Digits und Auflösung von Meßgeräten

Die letzte Spalte obiger Tabelle zeigt das Verhältnis zwischen Auflösung und Meßgröße (10V maximal) in Dezibel [dB]. Das Dezibel ist ein in der Meßtechnik häufig verwendetes Maß und soll deshalb näher vorgestellt werden.

4.1. Das Dezibel und seine Verwendung

Das Dezibel stellt das **logarithmierte Verhältnis** zweier Leistungspegel dar und wird im allgemeinen zur Charakterisierung eines Systems verwendet. Hierbei werden die Leistungspegel am Eingang und Ausgang eines Systems zueinander in Relation gesetzt. **Es stellt also kein absolutes Maß dar.**

$$\text{Verstärkung}[A_p] = \frac{\text{Ausgangsleistung}[W]}{\text{Eingangsleistung}[W]} \quad \text{Die Verstärkung ist also dimensionslos.}$$

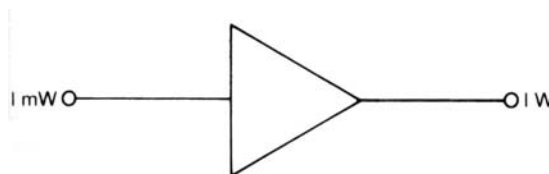


Abb. 4.1. Verstärkung der am Eingang eines Verstärkers vorhandenen Leistung

Die Verstärkung stellt somit ein relatives Maß zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße dar. Obiges Beispiel zeigt die Verstärkung eines Eingangssignals durch einen Verstärker²². Welche Größen ein- und ausgangsseitig betrachtet werden ist für die Berechnung der Verstärkung irrelevant – Sie **müssen** lediglich **gleich** sein. Die Verstärkung kann aus folgender Beziehung berechnet werden:

²⁰ Die Auflösung eines Meßgerätes gibt an wie groß die Änderungen der Meßgröße sein müssen um detektiert werden zu können. Die Auflösung ist aber keinesfalls mit der Genauigkeit des Meßgerätes gleichzusetzen. Die Genauigkeit liegt im allgemeinen 1-2 Zehnenpotenzen „unter“ der Auflösung. **Die beiden Größen lassen sich nicht direkt vergleichen, da sie verschieden Eigenschaften eines Meßgerätes beschreiben.**

²¹ Die Abkürzung ppm steht für **p**arts **p**er **m**illion

²² In der Elektrotechnik wird in vielen Fällen von einer sinusförmiger Anregung ausgegangen.

$$A_p = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Eingangsleistung}} = \frac{1W}{1mW} = 1000$$

Praktisch können die Verstärkungsfaktoren A_p auch wesentlich größere Werte annehmen. Um diese sehr großen Verhältniswerte praktisch und schnell überschaubar darzustellen, werden diese, nach *Alexander Graham Bell*, logarithmisch dargestellt.

$$A_p = \log \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \log \frac{1W}{1mW} = \log(1000) = 3\text{Bel}^{23} \quad \text{oder} \quad A_p = 10 \log \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = 30\text{dB}$$

Durch die Verwendung logarithmierter Verstärkungsmaße ergeben sich stark vereinfachte Rechenregeln für die Behandlung von Meßketten (kaskadierter Systeme). Werden die Verstärkungsfaktoren in **dB** angegeben, können diese einfach summiert werden.

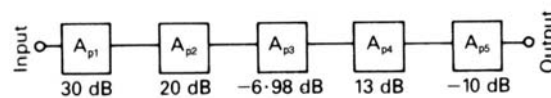


Abb. 4.2. Meßkette mit Verstärker und Abschwächer

Die Gesamtverstärkung ergibt sich zu $A_G = \sum_n^{i=1} A_{p_i} = 30 + 20 - 6,98 + 13 - 10 = 46,02\text{dB}$.

Eine Pegeländerung von **0,00 dB** bedeutet nicht, daß am Ausgang kein Signal vorhanden ist, sondern daß am **Eingang** und **Ausgang** des Systems **gleiche Pegel vorliegen**. Im Gegensatz hierzu hat eine Verstärkung A_p von **0,00** keine Darstellung innerhalb der **dB** Skala und bedeutet immer **Null** – oder kein Signal – am Ausgang unabhängig vom Eingangssignal.

Das **dB** kann aber nicht nur für Leistungspegel angewendet werden, sondern läßt sich auch einfach für Spannungspegel anwenden. Mit $P = U^2/R$ ergibt sich für A_U :

$$A_U = 10 \cdot \log \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = 10 \cdot \log \frac{U_{OUT}^2}{U_{IN}^2} \cdot \frac{R_{IN}}{R_{OUT}} = 10 \cdot \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}$$

Für die Ableitung wurde $R_{IN} = R_{OUT}$ vorausgesetzt.

Viele Kenngrößen von elektronischen Systemen werden auf eine gewisse Verstärkung oder Abschwächung des Systems bezogen. So bezieht sich z.B. die Grenzfrequenz f_G von Filtern im allgemeinen auf eine Abschwächung des Signalpegels um **3 dB**. Folgend sollen deshalb markante **dB** Werte und die entsprechenden Verstärkungsfaktor gegenüber gestellt werden.

²³ Da das Bel für praktische Verhältnisse eine viel zu große „quasi Einheit“ ist, wird mit dem deci-Bel [Abkürzung dB] gearbeitet.

Verstärkung[U]	0,01	0,1	0,5	1	$\sqrt{2}$	2	10	10^3	10^5
dB	-40	-20	-6,02	0	+3,01	+6,02	+20	+60	+100

Für viele Anwendungsfälle ist es sinnvoll die relativen **dB** Maße auf eine sogenannte **Referenz** – oder einen Referenzpegel zu beziehen um auch absolute Größenangaben zu ermöglichen. Ein Beispiel hierfür ist die Akustik. Hier werden alle Schallpegel auf einen Referenzpegel von $1 \cdot 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ bezogen und als **dB_a** bezeichnet. Der Referenzwert **J₀** der Schallstärke von $1 \cdot 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ stellt die durchschnittliche Hörschwelle des menschlichen Ohres dar. Hierzu ergibt sich der Schallpegel zu:

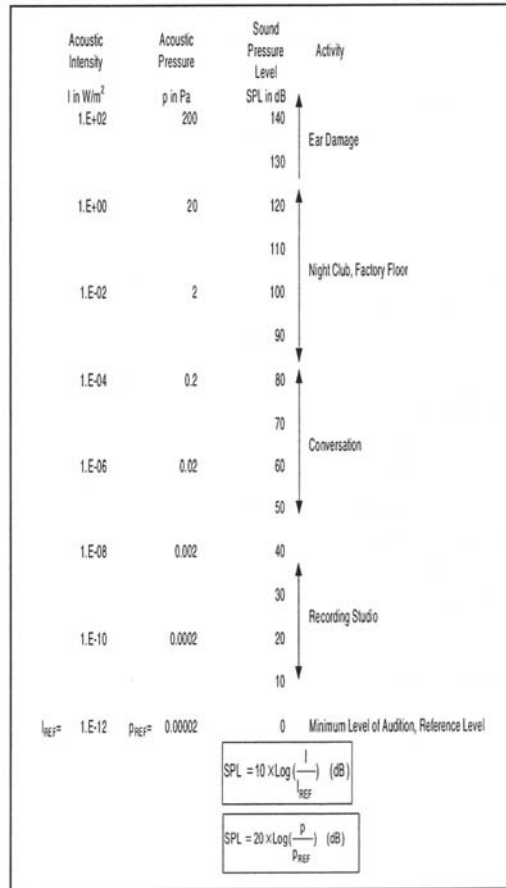
$$\text{Schallpegel:} \quad L = 10 \cdot \log \frac{J}{J_0} \quad \text{in dB}_a \text{ bei Schallstärke } J$$

Absolute Pegelangaben in dB: dB _m	...	Leistungspegel bezogen auf 1mW
dB _u		Spannungspegel bezogen auf 1mW @ 600Ω entspricht einer Spannung von 0,7746V_{EFF}
dB _{μV}	...	Spannungspegel bezogen auf 1μV_{EFF}
dB _a	...	Akustischer Leistungspegel bezogen auf $1 \cdot 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$

Als Pegel wird somit das logarithmierte Verhältnis zweier Leistungs- oder Feldgrößen bezeichnet, wenn die Nennergröße ein festgelegter Wert einer Bezugsgröße gleicher Dimension wie die Zählergröße ist. Als Einheit wird das Dezibel (dB) verwendet. Der Wert der Bezugsgröße sollte stets bei der Nennung von Pegeln mit angeführt werden.

Die Differenz der Pegel eines Signals an zwei verschiedene Stellen einer Übertragungseinrichtung wird als **Pegelmaß** bezeichnet.

Die Differenz der Pegel zweier verschiedener Signale an ein und derselben Stelle einer Signalübertragungseinrichtung wird als **Pegelabstand** bezeichnet.



5. Weiterführende Literatur

- /1/ C. Kittel, W.D. Knight, A:C: Helmholtz, Berkeley Physik Kurs MECHANIK, Vieweg Braunschweig, Wiesbaden 1981
- /2/ H. Kuchling, Taschenbuch der Physik, Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main 1979
- /3/ H. Hofmann, Das elektromagnetische Feld – Theorie und grundlegende Anwendungen, Verlag Springer, Wien New York 1982
- /4/ G. Heyne, Elektronische Meßtechnik – Eine Einführung für angehende Wissenschaftler, Verlag R. Oldenbourg, München Wien 1999
- /5/ P. Kopacek, W. Washietl, Einführung in die Steuerungs- und Regelungstechnik, Verlag R. Oldenbourg, München Wien 1980
- /6/ M. Stöckl, K. H. Winterling, Elektrische Meßtechnik, B. G. Teubner, Stuttgart Wien 1978
- /7/ R. P. Patzelt, H. Schweinzer, Elektrische Meßtechnik, Zweite Auflage, Verlag Springer, Wien New York 1996
- /8/ R. Lerch, Elektrische Meßtechnik - analog und digitale Verfahren, Verlag Springer, Wien New York 1996
- /9/ John C. Morris, Analogue Electronics – Second edition, Arnold Publications, London Sydney Auckland 1999
- /10/ Michael J. Gelb, Das Leonardo Prinzip – Die sieben Schritte zum Erfolg, Delacorte Press Bantam Doubleday, Dell Publishing, New York 1998
- /11/ Wolfgang Schmusch, Elektronische Meßtechnik – Elektronik 6, Vogel Verlag und Druck GmbH, ISBN 3-8023-1769-6, Würzburg 4. Auflage 1998