

Hydrometrie

– hydrologisches und meteorologisches Messwesen –

© Dr.-Ing. T. Dose
Bergische Universität Wuppertal

2. Januar 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Allgemeines	3
1.2	Der SI-Standard	3
1.2.1	Vorbemerkungen	3
1.2.2	Der Meter	4
1.2.3	Das Kilogramm	4
1.2.4	Die Sekunde	5
1.2.5	Das Ampere	6
1.2.6	Das Kelvin	6
1.2.7	Die Candela	7
1.2.8	Das Mol	8
1.2.9	Abgeleitete Einheiten	8
1.2.10	Weitere Einheiten mit gesetzlicher Zulassung	10
1.3	Nicht mehr zugelassene Einheiten	10
1.4	Präfixe	11
1.5	Begriffe zum Messwesen	12
1.6	Mathematische Grundlagen der Messunsicherheit	15
2	Hydrometrie	18
2.1	Vorbemerkungen	18
2.2	Fließgeschwindigkeit	18
2.3	Druck	21
2.4	Wasserstand	21
2.5	Durchfluss	22
3	Messwesen in der Meteorologie	23
3.1	Temperatur	23
3.2	Sonneneinstrahlung	23
3.3	Feuchte	24
3.4	Luftdruck	24
3.5	Niederschlag	25

3.6	Wind	26
3.7	Verdunstung	26
3.8	Versickerung	26
4	Ergänzungen	27
4.1	Datensammler	27
4.2	Amerikanische und britische Einheiten	28

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Das Messwesen ist in vielen Bereichen von Wissenschaft und Praxis ein unverzichtbares Hilfsmittel, um eine Datengrundlage zur Untersuchung von Theorien und Problemstellungen, zur Aufstellung von Modellen oder zur Dimensionierung von Bauwerken zu erhalten.

Jedes Messergebnis besteht aus Messwert und Einheit. Messergebnisse weisen eine Unsicherheit auf, die mit dem Ergebnis angegeben werden sollte. Mit Hilfe der Fehlerrechnung können dann die Unsicherheiten von abgeleiteten Größen angegeben werden. Bei der Konzeption von Versuchseinrichtungen sollte darauf geachtet werden, die Fehlermöglichkeiten dadurch zu reduzieren, dass die gewünschte physikalische Größe möglichst direkt, d. h. ohne viele Zwischenschritte bestimmt wird und dass in Anlehnung an die Vermessungstechnik eine Plausibilitätsprüfung erfolgt (z. B. mit Hilfe von geschlossenen Messketten oder dem Vergleich mit theoretisch bestimmten Größen). Trotzdem wird meist nicht die tatsächlich gesuchte Größe gemessen, sondern es werden bekannte oder auch neue Beziehungen der gesuchten Größe zu erfassbaren Messgrößen verwendet! Im SI (Système international d'unités) sind die Basis- sowie die abgeleiteten Einheiten angegeben; daneben existieren noch weitere gesetzlich zugelassene Einheiten. Andere Einheiten dürfen dagegen nicht mehr verwendet werden; ihre Kenntnis ist beim Studium alter Literatur von Vorteil.

1.2 Der SI-Standard

1.2.1 Vorbemerkungen

Ein Großteil der im Abschnitt 'Der SI-Standard' aufgeführten Texte sind dem Internetauftritt des Instituts 'Metrologie und Akkreditierung Schweiz' [1] entnommen und leicht modifiziert worden.

Maßeinheiten dienen zur Bestimmung des Wertes von physikalischen Größen. Ein Einheitensystem ist ein Satz von Regeln, welcher angibt, wie die Maßeinheit jeder in Naturwissenschaft und Technik verwendeten Größe widerspruchsfrei festgelegt wird. Das heute weltweit angewandte Einheitensystem ist das Internationale Einheitensystem, auf französisch *Système International d'Unités* (SI). Es wurde von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im Jahre 1960 eingeführt. In der Folge löste das SI eine Reihe, vor allem in den Naturwissenschaften verwendete Einheitensysteme ab und machte fortan die zum Teil komplizierten Umrechnungen zwischen verschiedenen Systemen überflüssig.

Im Internationalen Einheitensystem unterscheidet man zwei Klassen von Einheiten: Die Basiseinheiten und die abgeleiteten Einheiten.

Die sieben Basiseinheiten lauten:

- Länge (Meter: m)
- Masse (Kilogramm: kg)
- Zeit (Sekunden: s)
- Stromstärke (Ampere: A)
- thermodynamische Temperatur (Kelvin: K)
- Substanzmenge (Mol: mol)
- Lichtstärke (Candela: cd)

1.2.2 Der Meter

Der Meter (m) ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer $1/299\,792\,458$ Sekunde durchläuft.

Wird diese Definition als mathematische Gleichung formuliert, so lautet diese:

$1\text{ m} = ct$, mit $t = 1/299\,792\,458$ s. Daraus folgt $c = 299\,792\,458$ m/s.

m: Meter; s: Sekunde; c: Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum.

Die Meterdefinition weist der Lichtgeschwindigkeit c einen festen Wert zu. Diese Fundamentalkonstante kann somit nicht mehr gemessen werden, sie ist jetzt exakt vorgegeben. Hieraus folgt, dass die Längeneinheit von der Zeiteinheit Sekunde abhängt.

Die physikalische Realisierung der Längeneinheit geschieht in der Regel durch Laser bekannter und hochstabiler Frequenz. Aus der Frequenz ν und der Lichtgeschwindigkeit lässt sich über die bekannte Beziehung $l = c/\nu$ die Wellenlänge l des stabilisierten Lasers berechnen, mit der die zu messenden Längen Längen direkt verglichen werden können. Als Primärnormale meistens Helium-Neon-Laser, deren optische Frequenz auf einen atomaren Übergang, nämlich eine Absorptionslinie des stabilisiert wird. Die Meterbasis am Eidgenössischen Amt für Messwesen besteht aus einer Gruppe von drei mehrheitlich selbstgebauten jodstabilisierten Helium-Neon-Lasern. Sie werden regelmässig untereinander oder gegen gleichartig stabilisierte Laser ausländischer Metrologieinstitute, z. B. des Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) verglichen.

1.2.3 Das Kilogramm

Das Kilogramm (kg) ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps. Es setzt sich zusammen aus dem Präfix 'k' (s. u.) und der Einheit für Gramm 'g'.

Da bisher alle Versuche, die Basiseinheit der Masse mit genügender Genauigkeit auf eine Naturkonstante zurückzuführen, fehlgeschlagen sind, dient das 1889 geschaffene Urkilogramm aus Platin und Iridium heute noch als Bezugsobjekt

für Massebestimmungen. Es wird am Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris aufbewahrt.

Zur Weitergabe dieser Einheit sind an alle, der Meterkonvention angehörenden Nationen Kopien des Pariser Urkilogramms – sogenannte Ländernormale – abgegeben worden. Diese werden in den staatlichen Metrologielaboratorien zur Überprüfung der Arbeitsnormale verwendet, mit denen schließlich die in der Praxis verwendeten Gewichtsstücke und Waagen geeicht werden.

Der Anschluss der 1-kg-Sekundärnormale an die Kopie des Internationalen Kilogramm-Prototyps erfolgt in der Schweiz mit Hilfe eines automatisch arbeitenden Massekomparators, der in einem luftdichten Stahlgehäuse untergebracht ist. Damit ist es möglich, bis zu vier Massennormale in einer von Luftdruck- und Temperaturschwankungen nahezu vollständig geschützten Atmosphäre mit einer Reproduzierbarkeit von $1 \mu\text{g}$ zu vergleichen.

In Anlehnung an die anderen Basiseinheiten wird weiterhin weltweit nach Möglichkeiten gesucht, die Masseinheit auf Naturkonstanten zurückzuführen; so z. B. über quantenphysikalisch realisierte, elektrische Einheiten oder über die Herstellung hochreiner Silizium-Einkristalle mit bekannter Atomzahl.

1.2.4 Die Sekunde

Die Sekunde (s) ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

Die Zeiteinteilung im menschlichen Leben basiert auf der Rotation der Erde um die eigene Achse (Tag) und dem Erdumlauf um die Sonne (Jahr). Immer genauere Zeitmessungen ergaben aber, dass diese Gestirnsbewegungen für hohe Genauigkeitsansprüche nicht konstant genug sind, weshalb die Zeiteinheit heute mit einem atomaren Vorgang festgelegt wird.

Ausgangspunkt dazu ist das Plancksche Gesetz $E = h\nu$, wonach der Differenz E zweier Energieniveaus ausgesuchter Atomelektronen eine elektromagnetische Strahlung der Frequenz ν entspricht. Als besonders geeignet haben sich zwei Niveaus im Cäsiumnuklid der Massenzahl 133 erwiesen, deren Energiedifferenz einer Frequenz im Mikrowellenbereich entspricht. Nach Vergleich der früher gültigen, astronomisch definierten Sekunde mit einer Cäsium-Atomuhr wurde die Dauer der Sekunde 1967 neu auf 9 192 631 770 Perioden des Cs-Strahlungsüberganges festgelegt. Mit einer nach diesem Prinzip aufgebauten Cäsiumuhr lässt sich heute eine Genauigkeit von besser als 1 ns pro Tag erreichen, wogegen die Erdrotation in einigen ms pro Tag unsicher ist.

Mehrere hundert Cäsiumuhren sind in Zeitlaboratorien auf der ganzen Welt im Einsatz. Aufgrund der Angaben dieser Uhren, wovon 8 bei METAS und 1 im Observatorium Neuenburg stehen, berechnet das Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Paris die internationale Atomzeit (Temps Atomique International, TAI).

Das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung entwickelte eine spezielle Webseite, auf der Sie dank modernster Technologie die offizielle Schweizerzeit mit Ihrer lokalen PC-Zeit vergleichen können.

1.2.5 Das Ampere

Das Ampere (A) ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.

Die meistgebrauchten elektrischen Einheiten sind das Ampere, das Ohm und das Volt. Da sie sich nicht auf die drei Größen der Mechanik (Länge, Masse, Zeit) zurückführen lassen, verlangt ihre Messung die Einführung mindestens einer elektrischen Einheit. Aus den bekannten Gesetzen der Elektrizitätslehre ergibt sich aber, dass $1 \text{ V} = 1 \text{ W} / 1 \text{ A}$, $1 \Omega = 1 \text{ V} / 1 \text{ A}$ ist und eine neue bereits genügt. Als solche wurde schliesslich das Ampere gewählt.

Die heute gültige Definition des Amperes wurde bereits 1946 vom Comité International des Poids et Mesures (CIPM) vorgeschlagen und wurde – zusammen mit den übrigen, damals als 'absolute Einheiten' bezeichneten elektrischen Einheiten – international 1948 angenommen. Als 'absolut' wurden sie deshalb bezeichnet, weil damit auf materialunabhängige Weise nach rein theoretischen Überlegungen einzig die Grösse der elektrischen Einheiten festgelegt werden sollte, nicht aber der praktische Weg ihrer Realisierung. So ist die Definition des Amperes nicht für die praktische Realisierung der Stromeinheit geeignet; sie legt einzig den Wert der magnetischen Feldkonstante μ_0 fest. Berechnet man nämlich mit Hilfe des Ampereschen Gesetzes die Kraft zwischen zwei geraden, parallelen Leitern im Abstand von einem Meter und setzt die Werte der Ampere-Definition ein, so folgt:

$$\frac{F}{l} = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi d} \rightarrow \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

F/l : Kraft pro Meter Leiterlänge; I : Stromstärke; d : Abstand der Leiter

Die Definition des Amperes dient, gleich wie die Definition des Meters, einzig der Festlegung einer Fundamentalkonstante. Mit der Festlegung von μ_0 und der Lichtgeschwindigkeit c (Meterdefinition) ist auch die elektrische Feldkonstante ϵ_0 festgelegt. Mit der Kenntnis dieser Werte und den bekannten Gesetzen der Physik bieten sich viele Möglichkeiten, Absolutwerte von elektrischen Größen für Kalibrierzwecke zu realisieren. In vielen staatlichen Metrologielaboratorien geschieht dies heute mit Hilfe von Quanteneffekten.

1.2.6 Das Kelvin

Das Kelvin (K) ist der 273,16-te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

Der Tripelpunkt des Wassers ist der einzige thermodynamische Zustand, in dem die drei Phasen Wasserdampf, Wasser und Eis im Gleichgewicht koexistieren. Solange alle drei Phasen vorhanden sind, bleiben Temperatur und Druck konstant und sind unabhängig von den Mengen der einzelnen Phasen. Der Tripelpunkt des Wassers und der naturgegebene absolute Nullpunkt definieren die thermodynamische Temperaturskala.

Die praktische Realisierung der Temperaturskala erfolgt in der Regel mit einer Reihe hochstabiler Temperaturfixpunkte, deren thermodynamische Temperaturwerte mittels Primärthermometern – z. B. Gasthermometern – ermittelt und danach per Konvention international festgelegt worden sind: Internationale Temperaturskala 1990 (ITS-90).

Die thermometrische Basis am Eidgenössischen Amt für Messwesen besteht aus rund 30 Temperaturfixpunkt-Zellen, welche den Bereich von -189 °C bis 961 °C redundant abdecken.

Mit Hilfe dieser Zellen können mit Quarzglas gemantelte Normal-Widerstandsthermometer mit einer Drahtspirale aus hochreinem Platin (SPRT: Standard Platinum Resistance Thermometer) an diesen Temperaturfixpunkten kalibriert werden. Die SPRT können in der Folge als Interpolationsinstrumente für Kalibrierungen zwischen den Fixpunkten in Flüssigkeitsthermostaten verwendet werden.

1.2.7 Die Candela

Die Candela (cd) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt pro Steradian beträgt.

An sich würden zur physikalischen Messung des Lichtes keine besonderen Einheiten benötigt, da Licht ja nichts anderes als elektromagnetische Strahlung ist und in den bereits bekannten Einheiten gemessen werden kann. Wegen der zentralen Bedeutung des menschlichen Sehsinnes ist man jedoch übereingekommen, für die subjektive Wirkung der elektromagnetischen Strahlung auf das menschliche Sehorgan eigene Einheiten und aus historischen Gründen auch eine eigene Basiseinheit zu definieren. Mit den photometrischen Einheiten wird Licht somit nicht nur nach seiner physikalischen Natur gemessen, sondern auch nach dem Empfinden des menschlichen Sehorgans.

Die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges ist abhängig von der Wellenlänge bzw. der Farbe des Lichtes und weist zudem individuell leichte Unterschiede auf. Falls man, wie heute in der Photometrie üblich, Licht mit physikalischen Geräten will, bedarf es eines Maßes für die subjektiv empfundene Helligkeit der einzelnen Farbanteile des sichtbaren Lichtes. Dieses Maß liefert der sogenannte Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, dessen Werte für Wellenlängen von 360 bis 830

nm aus Messungen an vielen Versuchspersonen international festgelegt worden sind.

Am METAS wird die Candela mittels einer Gruppe von radiometrisch absolut kalibrierten Beleuchtungsstärkemessern dargestellt. Diese Empfänger bestehen aus Siliziumdetektoren mit 100% Quantenausbeute und einem Filter für die Anpassung an V(1).

1.2.8 Das Mol

Das Mol (mol) ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Nuklids ^{12}C enthalten sind.

Bei Verwendung des Mols müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.

Auf molekularer Ebene können verschiedene Stoffarten im allgemeinen chemisch nicht in beliebigen Verhältnissen miteinander gebunden werden. Die Elektronenhüllen und die räumlichen Eigenschaften lassen die Teilchen nur in ganz bestimmten Zahlenverhältnissen miteinander in Verbindung treten. Gedanklich kann die Stoffvielfalt deshalb durch Abzählen der Teilchen der einzelnen Bestandteile aufgebaut und verstanden werden. Da die Einzelteilchen aber unvorstellbar klein und die Teilchenzahlen in makroskopischen Stoffmengen unvorstellbar gross sind, ist ein normaler Zählvorgang nicht durchführbar. Korrespondierende Zahlen genau definierter Teilchen können bei Kenntnis der molaren Masse nur näherungsweise mittels Wägung erfasst oder hergestellt werden, wobei 1 mol genau so viele Teilchen angibt, wie Atome in 12 g des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind.

Die Zahl der Teilchen in einem Mol ist die Avogadro-Konstante (früher auch Loschmidtsche Zahl genannt). Sie beträgt

$$(6,0221367 \pm 0,0000036) \cdot 10^{23} \text{ 1/mol.}$$

Das Mol wurde erst 1971 von der 14. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) als siebte Basiseinheit im SI aufgenommen.

1.2.9 Abgeleitete Einheiten

Die abgeleiteten Einheiten sind im Folgenden in die fünf Bereiche 'Raum und Zeit', 'Mechanik und Akustik', 'Temperatur und Wärme', 'Wärme', 'Elektrizität, Magnetismus und Licht' und ionisierende Strahlung, Molekularphysik' unterteilt. Dabei werden neue Einheitenbezeichner in der Form *Größe (abgeleitete Einheit: Abk. = Definition auf Basis zuvor definierter Einheiten insbesondere der Basiseinheiten)* aufgeführt und zusätzlich Beispiele für wichtige physikalische Größen angegeben, die auf die zuvor definierten Einheiten einschließlich der Basiseinheiten zurückgreifen.

Raum und Zeit

- Frequenz (Hertz: $\text{Hz} = 1/\text{s}$)
- Ebener Winkel (Radiant: $\text{rad} = \text{m}/\text{m}$)
- Raumwinkel (Steradian: $\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2$)

Weitere wichtige Größen: Fläche (m^2), Volumen (m^3), Geschwindigkeit (m/s), Beschleunigung (m/s^2) und Drehzahl ($1/\text{s}$).

Mechanik und Akustik

- Kraft (Newton: $\text{N} = \text{m kg}/\text{s}^2$)
- Druck, mechan. Spannung (Pascal: $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$)
- Energie, Arbeit, Wärmemenge (Joule: $\text{J} = \text{N m}$)
- Leistung (Watt: $\text{W} = \text{J}/\text{s}$)

Beispiele weiterer wichtiger Größen: Dynamische Viskosität (Pa s), Drehmoment (N m), Oberflächenspannung (N/m).

Temperatur und Wärme

Die Einheiten von Temperatur und Wärme bauen auf den Definitionen des Abschnittes Mechanik und Akustik auf (Wärme ist eine Form von Energie). Beispiele wichtiger Größen sind: (W/m^2), Wärmekapazität (J/K), Spezifische Wärmekapazität und spezifische Entropie ($\text{J}/\text{kg K}$), Spezifische Energie (J/kg), Therm. Leitfähigkeit ($\text{W}/\text{m K}$), (J/mol), Molare Entropie und molare Wärmekapazität ($\text{J}/\text{mol K}$).

Radioaktivität, ionisierende Strahlung, Molekularphysik

- Radioaktivität (Becquerel: $\text{Bq} = 1/\text{s}$)
- Absorbierte (Strahlen-)Dosis (Gray: $\text{Gy} = \text{J}/\text{kg}$)
- äquivalentdosis (Sievert: $\text{Sv} = \text{J}/\text{kg}$)

Beispiele weiterer wichtiger Größen: Exposition und Ionendosis (C/kg), absorbierte Dosisrate (Gy/s).

Elektrizität, Magnetismus und Licht

Auch der Bereich des Messwesens im Wasserbau kommt ohne die elektrischen Größen nicht aus, da viele Messgeräte Zusammenhänge zwischen elektrischen Größen und z. B. mechanischen Größen wie beim Dehnungsmessstreifen einer Druckmessdose nutzen.

- elektrische Ladung (Coulomb: $\text{C} = \text{s A}$)
- elektrische Spannung (Volt: $\text{V} = \text{W}/\text{A}$)
- Kapazität (Farad: $\text{F} = \text{C}/\text{V}$)
- elektrischer Widerstand (Ohm: $\text{W} = \text{V}/\text{A}$)

- elektrischer Leitwert (Siemens: $S = A/V$)
- magnetischer Fluss (Weber: $Wb = V s$)
- magnetische Induktivität (Tesla: $T = Wb/m^2$)
- Induktivität (Henry: $H = Wb/A$)
- Lichtstrom (Lumen: $lm = cd sr$)
- Beleuchtungsstärke (Lux: $lx = lm/m^2$)

Beispiele weiterer wichtiger Größen: Elektrische Feldstärke (V/m), elektrische Ladungsdichte (C/m^3), elektrische Flussdichte (C/m^2), Influenz (F/m) und Permeabilität (H/m).

1.2.10 Weitere Einheiten mit gesetzlicher Zulassung

Neben den SI-Einheiten gibt es noch (länderspezifisch) gesetzlich zugelassene Einheiten, die insbesondere im Alltagsleben eine wichtige Rolle spielen, aber insbesondere bei internationalen Publikationen vermieden werden sollten:

Volumen	Liter: l
Zeit	Stunde: h, Tag: d, Minute: min
Geschwindigkeit	Kilometer pro Stunde: km/h
Drehzahl	Umdrehungen pro Minute bzw. Sekunde: 1/min, U/min, U/s
Masse	Tonne: t, Gramm: g
Druck	Bar: bar
Energie	Kilowattstunde: kWh
Temperatur	Grad Celsius: °C

1.3 Nicht mehr zugelassene Einheiten

Im Folgenden sind einige nicht mehr zugelassene Einheiten und deren Umrechnung in eine SI-Einheit aufgelistet:

*Länge*Fermi: 1 fm = 10^{-15} mÅngström: 1 Å = 10^{-10} m

Seemeile: 1 sm = 1,852 km

Astron: 1 AE = $1,496 \cdot 10^{11}$ mParsec: 1 pc = $3,0857 \cdot 10^{16}$ m*Geschwindigkeit*

Mach : 1 M = ca. 340 m/s

1 Knoten: 1 kn = 0,514444 m/s

*Beschleunigung*1 Gal = 10^{-2} m/s²*Kraft*

1 kp = 1 kgf = 9,80665 N

1 dyn = 10^{-5} N*Druck*1 at = 1 kp/cm² = 0,980665 bar

1 atm = 760 Torr = 1,01325 bar

1 Torr = 1,33322 mbar

1 barye = 0,1 Pa

Piëze: 1 pz = 103 Pa

Energie, Arbeit

Kalorie: 1 cal = 4,1868 J

1 erg = 10^{-7} J

thermie: 1 th = 4,1855 MJ

1 SKE = 29,3076 MJ

Leistung

1 PS = 75 kp m/s = 0,735499 kW

1 kcal/h = 1,163 W

*Dynamische Viskosität*Poise: 1 P = 10^{-1} Pa s*Kinematische Viskosität*Stokes: 1 St = 10^{-4} m²/s*Magnetischer Fluss*Maxwell: 1 Mx = 10^{-8} Wb*Magnetische Flussdichte*Gauss: 1 G = 10^{-4} T*Ionendosis*

Röntgen: 1 R = 0,000258 C/kg

1.4 Präfixe

Präfixe dienen der Vergrößerung bzw. Verkleinerung von Einheiten um eine oder mehrere Zehnerpotenzen (z. B. E-9 = 10^{-9}). Sie werden entsprechend dem Namen der Einheit ohne Leerzeichen vorangestellt und treten demzufolge nicht einzeln auf (Beispiel: kN = kilo-Newton = 1.000 N).

Vergrößern			Verkleinern		
E1	deca	da	E-1	deci	d
E2	hecto	h	E-2	centi	c
E3	kilo	k	E-3	milli	m
E6	mega	M	E-6	micro	μ
E9	giga	G	E-9	nano	n
E12	tera	T	E-12	pico	p
E15	peta	P	E-15	femto	f
E18	exa	E	E-18	atto	a
E21	zetta	Z	E-21	zepto	z
E24	yotta	Y	E-24	yocto	y

1.5 Begriffe zum Messwesen

Der Begriff (*messbare*) *Größe* bezeichnet eine physikalische Größe, die qualitativ beschrieben und quantitativ ermittelt werden kann. Die *spezielle Messgröße*, der Gegenstand einer Messung, kurz als *Messgröße* bezeichnet, wäre beispielsweise der Durchfluss Q an einem Pegel zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Messgröße kann sowohl die "gemessene Größe" als auch die "zu messende Größe" sein und muss nicht unmittelbarer Gegenstand der Messung sein. Diese Aussage trifft auch für den Durchfluss Q zu, welcher indirekt über bekannte physikalische Beziehungen mit denjenigen Größen zusammenhängt, die unmittelbar gemessen werden. Der *Messwert* oder auch *Größenwert* ist der Wert einer Messgröße bestehend aus Zahl und Einheit und der Ausgabe einer Messeinrichtung zugeordnet. Der Durchfluss in m^3/s wird z. B. auf einer Anzeigetafel, einem Drucker oder einer Schreibrolle ausgegeben. Das *Messergebnis* ist der durch Messung gewonnene Wert und mit der Messgröße verbunden. Seine vollständige Angabe erfordert auch eine Information über die Messunsicherheit.

Unter der *Messeinrichtung* wird die Gesamtheit aller Messgeräte sowie zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses verstanden. Die *Messkette* bezeichnet die Folge von Elementen von der Aufnahme der Messgröße bis zur Bereitstellung der Ausgabe. Das erste Element in der Messkette, welches unmittelbar auf die Messgröße anspricht und die Messgröße in ein elektrisches Messsignal umwandelt, wird als (*Messgrößen-*)*Aufnehmer* bezeichnet.

Die *Messung* selbst ist die Gesamtheit der (ggf. automatisch) ablaufenden Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwerts. Die *Messmethode* bezeichnet die allgemeine Beschreibung der logischen Abfolge von Handlungen zur Durchführung von Messungen. Die im einzelnen beschriebene Ausführung einer speziellen Messung bezeichnet man als *Messverfahren*. Das *Messprinzip* beschreibt die wissenschaftliche Grundlage eines Messverfahrens; beispielsweise wird die Wassertiefe durch den physikalischen Zusammenhang zwischen Druck und Höhe der Wassersäule ermittelt.

Für Messungen, die unter *Wiederholbedingungen* ablaufen, sind alle beherrschbaren Bedingungen konstant zu halten. Auch die Messgröße selbst darf Ihren

Wert nicht verändern. Beide Bedingungen sind außerhalb eines Labors und im Besonderen für natürliche Fließgewässer selten realisierbar.

Die *Messabweichung* allgemein ist das Messergebnis abzüglich des nicht feststellbaren "wahren Wertes" (daher im Folgenden als "richtiger Wert" oder auch "bester Wert" der Messgröße bezeichnet). Wird die absolute Abweichung auf die Ausgangsspanne bzw. die Messgröße bezogen, so bezeichnet man dies als *relative Abweichung*. Nach traditioneller Auffassung hat die Messabweichung eine zufällige und eine systematische Komponente, welche allerdings beide nicht exakt bestimmbar sind. Die Abweichung bezieht sich auf den einzelnen Messwert, so dass sich in der Regel ihre Größe infolge der zufälligen Einflüsse für jeden Messwert ändert.

Systematische Messabweichungen $e_s(x)$, auch Bias genannt, sind definiert als der Mittelwert, welcher sich aus einer unbegrenzten Anzahl von unter Wiederholbedingungen durchgeführten Messungen derselben Messgröße ergeben würde, abzüglich des richtigen Werts der Messgröße: $e_s(x) = \bar{x} - x_w$. Systematische Abweichungen sind meist über den gesamten Messbereich konstant (Nullpunktsfehler F_0), können aber auch in Abhängigkeit von den Einflussgrößen variieren. Dazu zählen z. B. die durch Messgrößenaufnehmer hervorgerufenen Steigungsfehler $F_S(x)$, Linearitätsfehler $F_L(x)$ und Hysteresefehler $F_H(x, \mathcal{H})$ (mit \mathcal{H} für die Historie). Generell ändern sich die systematischen Abweichungen unter Wiederholbedingungen nicht. Weiterhin können die Abweichungen über die Zeit variieren, was bei langsamer zeitlicher Änderung als *Drift* und bei sprunghafter Zu- oder Abnahme des Wertes eines messtechnischen Merkmals als *Shift* bezeichnet wird. Ein Anteil der systematischen Messabweichung $e_{s,b}(x)$ ist generell einschließlich Vorzeichen bestimmbar und kann somit als bekannt vorausgesetzt und korrigiert werden; es verbleibt aber ein unbekannter Anteil, welcher mit $e_{s,u}(x)$ bezeichnet wird. In der folgenden Auflistung sind mögliche Ursachen systematischer Abweichungen zusammengestellt:

- Unvollkommenheit der Messgeräte in Bezug auf Justierung, Kalibrierung, Übertragungsverhalten und Einstelldauer, Ansprechschwelle, Empfindlichkeit und Auflösung, sowie Einflüsse aus Eigenerwärmung, Abnutzung oder Alterung,
- nicht oder unzureichend berücksichtigte Auswirkungen von Einflussgrößen,
- Abweichungen von den tatsächlichen Werten der erfassten Einflussgrößen,
- Verwendung einer nicht der tatsächlichen Beziehung entsprechenden Verknüpfung zwischen mehreren Messgrößen bzw. eine nicht vollständige Erfassung des Messobjekts,
- Rückwirkung durch das Messgerät bei der Erfassung der Messgröße (d. h. das Messgerät wird durch die zu messende Größe selbst beeinflusst),
- Beobachter, welche die Anzeige unkorrekt ablesen, andere "menschliche" Einflüsse sowie Übertragungsfehler bei elektronischer Datenerfassung.

Zufällige Messabweichungen $e_r(x)$ werden aus der Differenz zwischen dem Messwert und dem Mittelwert berechnet, welcher sich aus einer unbegrenzten Anzahl von Messungen, ausgeführt unter Wiederholbedingungen, ergeben würde: $e_r(x) = x - \bar{x}$. Sie unterliegen den statistischen Gesetzmäßigkeiten und lassen sich in ihrer Gesamtheit durch Verteilungsfunktionen und statistische Kennwerte erfassen. Vorher sollten systematische Abweichungen korrigiert worden sein.

Für die Bestimmung der zufälligen Messabweichungen genügt also eine unter Wiederholbedingungen durchgeführte Messreihe. Zufällige Messabweichungen sind statistisch betrachtet im Mittel über den Messbereich konstant und haben ihre Ursachen in

- nicht beherrschbaren Einflüssen der Messgeräte,
- nicht beherrschbaren Änderungen der Werte der Einflussgrößen,
- nicht beherrschbaren Änderungen der Werte der Messgröße,
- nicht einseitig gerichteten Einflüssen des Beobachters bei der Ablesung.

Eine eigene Gruppe bilden die *groben Fehler*, welche durch Plausibilitätsuntersuchungen oder Vergleichsmessungen erkannt werden können. Grobe Fehler betreffen meist nur einzelne Messwerte und treten infolge von Störungen oder durch äußere Beeinflussung der Messapparatur auf.

Die *Korrektur* Δ_x ist ein algebraisch zum unberichteten Messwert x addierter Wert, der einen Ausgleich hinsichtlich der geschätzten systematischen Messabweichung zum richtigen Wert $e_s(x)$ ermöglicht. Sie entspricht damit der (bekannten) systematischen Messabweichung mit entgegengesetztem Vorzeichen: $\Delta_x = -e_{s,b}(x)$. Analog ist ein *Korrektionsfaktor* möglich, mit dem ein Steigungsfehler ausgeglichen wird: $K_x = e_{s,b}(x)/x$. Beide betreffen zum einen die *Eingangsgroßen*, zum anderen sind sie aufgrund von *Einflussgrößen* nötig, welche nicht Gegenstand der Messung sind, jedoch die Messgröße systematisch beeinflussen.

Mit der Differenzenrechnung werden die Auswirkungen von N unabhängigen Eingangsgroßen auf das Messergebnis infolge der Abweichungen $F_{x_1}, F_{x_2}, \dots, F_{x_N}$ berechnet. Bei genügend kleinen Messabweichungen können die endlichen Abweichungen F_{x_i} durch Differentiale dx_i ausgedrückt werden, so dass sich die Änderung des Messergebnisses durch Berechnung des totalen nach Gleichung 1, bekannt als Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz, bestimmt. Dabei wird die Bestimmungsgleichung jeweils partiell nach den Eingangsgroßen x_1, x_2, \dots, x_N abgeleitet und mit den zugehörigen Abweichungen dx_1, dx_2, \dots, dx_N multipliziert.

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_N} dx_N \quad (1)$$

1.6 Mathematische Grundlagen der Messunsicherheit

Die folgenden grundlegenden Ausführungen zur Messunsicherheit stützen sich auf den *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen* [8].

Im weitesten Sinne bedeutet *Messunsicherheit*, dass Zweifel an der Richtigkeit eines Messergebnisses bestehen. Der Begriff *Genauigkeit* ist nur qualitativ zu verwenden.

Durch Angabe der Messunsicherheit wird dem Messergebnis ein quantitativer Parameter zur Kennzeichnung der Streuung der Messwerte entsprechend den vorhandenen Kenntnissen zugeordnet. Dieser für jeden Messwert identische Schätzwert für die wahrscheinliche Nähe zum besten Wert wird in [8] als Varianz der Unsicherheit $u^2(x)$ bzw. als Standardunsicherheit $u(x)$ eingeführt, wobei die Beziehung $u(x) = \sqrt{u^2(x)}$ gilt. Die Standardunsicherheit $u(x)$ ist einfacher zu deuten, da sie absolut in der Einheit der Messgröße x oder relativ in Prozent vom Messwert in der Form $u_{\text{rel}}(x)$ oder $u'(x)$ angegeben wird, wobei gilt: $u(x) = u_{\text{rel}}(x)x$ bzw. $u_{\text{rel}}(x) = u(x)/x$.

Die Messunsicherheit $u(x)$ lässt sich in Abhängigkeit von ihrer Ermittlung in zwei Kategorien A und B unterteilen. Wird die Messunsicherheit durch statistische Auswertung von mehrmaligen Beobachtungen gewonnen, bezeichnet man sie als Standardunsicherheit vom Typ A. Bei der Ermittlungsmethode B gründet die Standardunsicherheit auf einer wissenschaftlichen Beurteilung, die sich auf alle verfügbaren Informationen über die mögliche Streuung der Messgröße x stützt. Die zufälligen Abweichungen der Messgröße werden für die angegebene Standardunsicherheit $u(x)$ als normalverteilt angenommen, so dass der Bereich $\pm u(x)$ 68,27% der Messwerte einschließt.

Die Standardunsicherheit nach *Ermittlungsmethode A* basiert auf der Berechnung der statistischen Parameter Mittelwert \bar{x} und Varianz $s^2(x)$ einer Messreihe mit n Beobachtungswerten x_1, x_2, \dots, x_n (Gl. 2 und 3). Allgemein ist die empirische Varianz $s^2(x)$ ein Maß für die Streuung von n Messwerten um ihren Mittelwert \bar{x} . Führt man die Messungen unter Wiederholbedingungen aus, so lässt sich mit Gleichung 3 die Varianz der Einzelmesswerte berechnen, welche um den als arithmetisches Mittel \bar{x} geschätzten richtigen Wert streuen.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (2)$$

$$s^2(x) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \quad (3)$$

Die Kovarianz nach Gleichung 4 bildet ein Maß für den wechselseitigen linearen Zusammenhang zweier Variablen x_i und x_j , wenn diese jeweils von einer weiteren Variablen x_k abhängen.

$$s(x_i, x_j) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)(x_{j,k} - \bar{x}_j) \quad (4)$$

Mit Gleichung 5 bestimmt sich allgemein die Varianz des Mittelwertes \bar{x}' einer aus n Werten bestehenden Stichprobe in bezug auf den Mittelwert \bar{x} aller zur Verfügung stehenden Messwerte. Eine nicht unter Wiederholbedingungen durchgeführte Messreihe, bei der im Speziellen eine variierende Messgröße aufgezeichnet wurde, kann durch arithmetische Mittelwertbildung geglättet werden, d. h. die Streuung aufgrund der zufälligen Abweichungen nimmt ab. Ist die Standardunsicherheit für Einzelwerte bekannt, so lässt sich mit Gleichung 5 die die Mittelwerte berechnen.

$$s^2(\bar{x}') = \frac{s^2(x)}{n} \quad \text{bzw.} \quad s(\bar{x}') = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Gleichzeitig wird durch die Mittelwertbildung die zeitliche Auflösung der Messwerte reduziert. Werden beispielsweise im Abstand von 15 Minuten Wasserstände mit einer Standardunsicherheit von $s(x) = 1$ cm gemessen und jeweils 96 Werte zu einem Tages-Mittelwert \bar{x} zusammengefasst, so verringert sich die Standardunsicherheit des Mittelwertes auf $s(\bar{x}') = 1 \text{ cm}/\sqrt{96} = 0,102$ cm. Gleichung 5 bezieht sich auf zufällige Änderungen der Messgröße oder auf zufällige Unsicherheiten der Messeinrichtung; die Messgenauigkeit kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden, da sie maßgeblich durch die Auflösung der Aufnehmer bestimmt wird [3]. Mit einem normalen Metermaß kann beispielsweise auch durch vielfache Messung nicht eine Genauigkeit von einem Zehntel Millimeter erreicht werden.

Zusammenfassend ergibt sich für die Messunsicherheit vom Typ A $u(x) = s(x)$ oder bei einer geglätteten Messdatenreihe $u(x) = s(\bar{x}')$, wobei diese im Folgenden nicht mehr unterschieden werden.

Kann Methode A nicht angewendet werden, um eine Aussage zur Messunsicherheit zu treffen, so steht alternativ bzw. zusätzlich zusätzlich die *Ermittlungsmethode B* zur Verfügung, die Auswertung folgender Informationen basiert:

- Daten aus früheren Messungen,
- Erfahrungen mit der Messunsicherheit der relevanten Messgeräte,
 - nach Angaben des Herstellers,
 - aufgrund von Daten aus Kalibrierscheinen,
 - aufgrund von Referenzdaten aus Handbüchern.

Die daraus gewonnene Messunsicherheit wird ebenfalls mit $u(x)$ bezeichnet. Stehen Daten aus früheren Messungen zur Verfügung, welche ebenfalls nach Methode A bestimmt wurden, so ist die Verteilung entsprechend wieder eine Normalverteilung und die Messunsicherheit kann einfach übernommen werden. Für die Berücksichtigung der Messgeräteunsicherheiten nach Angaben eines Herstellers

oder aufgrund von Kalibrierzertifikaten muss zusätzlich die jeweils zugrunde gelegte Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt sein. Enthalten die Unterlagen Angaben über eine *erweiterte Messunsicherheit* U_e , so ist diese durch den *Erweiterungsfaktor* k_p zu dividieren. In Abhängigkeit vom angegebenen Vertrauensgrad sind nachfolgend, eine Normalverteilung vorausgesetzt, die Faktoren für die erweiterte Messunsicherheit aufgelistet [8].

Grad p des Vertrauens (%)	Erweiterungsfaktor k_p
68,27	1,000
90,00	1,645
95,00	1,960
95,45	2,000
99,00	2,576
99,73	3,000

Für Messgeräte, bei denen die Messwerte mit 50 %iger Wahrscheinlichkeit in einem Bereich $[-a; +a]$ liegen, kann die Messunsicherheit als Normalverteilung mit $u(x) = 1,48a$ angesetzt werden. Mit der Angabe, dass die Messwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Dritteln im Bereich $[-a; +a]$ liegen, beträgt die Messunsicherheit $u(x) = a$.

Betrachtet man die angegebenen Grenzen $\pm a$ als maximalen Abweichung, so setzt man die Abweichungs-Wahrscheinlichkeit als Rechteck-Verteilung an. Günstiger, d. h. mit einer geringeren Unsicherheit behaftet, ist eine Trapez- bzw. Dreieck-Verteilung, wie aus den Varianzen der Gleichungen 6 bis 8 ersichtlich ist. κ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und geht im Grenzfall in die Dreieck- bzw. Rechteck-Verteilung über. Zum Vergleich beträgt die Varianz einer Normalverteilung, bei der die äußeren Grenzen zu $a = \pm s(x)$ gewählt wurden, $u^2(x) \approx a^2/9$.

$$\text{Rechteck-Verteilung: } u^2(x) = a^2/3 \quad (6)$$

$$\text{Trapez-Verteilung: } u^2(x) = a^2(1 + \kappa^2)/6 \quad (7)$$

$$\text{Dreieck-Verteilung: } u^2(x) = a^2/6 \quad (8)$$

Die dem Messergebnis y zugeordnete *kombinierte Standardunsicherheit* $u_c(y)$ fasst die Unsicherheiten sämtlicher Eingangs- und Einflussgrößen mit Hilfe des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes zusammen, ohne eine Unterscheidung bezüglich der Methoden A oder B vorzunehmen. Gleichung 9 berücksichtigt die Korrelationen bei voneinander abhängigen Eingangsgrößen und die nächsthöheren Glieder der Taylor-Reihenentwicklung, wenn bei der Funktion f eine signifikante Nichtlinearität vorliegt. In Gleichung 10, dem vereinfachten Kovarianzfortpflanzungsgesetz, wird Linearität vorausgesetzt. Die enthaltenen Unsicherheiten der Kovarianzen berechnen sich jeweils nach Gleichung 11. Unter der Voraussetzung, dass alle Variablen voneinander unabhängig sind, entfallen die gemischten Glieder und es kann mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz (Gl. 12) gerechnet werden.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (9)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (10)$$

$$u(x_i, x_j) = \sum_{l=1}^L \frac{\partial F}{\partial q_l} \frac{\partial G}{\partial q_l} u^2(q_l) \quad (11)$$

$$\text{mit } x_i = F(q_1, q_2, \dots, q_L) \quad \text{und} \quad x_j = G(q_1, q_2, \dots, q_L)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (12)$$

Auf Basis der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ kann eine erweiterte Unsicherheit $U_e = k_p u_c(x)$ angegeben werden. Die in den folgenden Abschnitten bestimmten Messunsicherheiten sind als einfache Standardunsicherheiten, d. h. ohne Erweiterungsfaktor k_p angegeben.

2 Hydrometrie

2.1 Vorbemerkungen

In DIN 4049, Teil 1, ist die Hydrologie als die 'Wissenschaft von Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche' definiert. Die Hydrometrie umfasst das Messwesen für diesen Bereich.

Im nächsten Abschnitt wird das Messwesen in der Meteorologie beschrieben, worunter hier alle Prozesse vor der Bildung des Effektiv-Niederschlages zu verstehen sind.

Im Folgenden werden die wesentlichen Messgrößen sowie prinzipielle Möglichkeiten zu deren Bestimmung angeführt. In der Regel werden keine spezifischen Messgeräte erläutert. Auch Angabe von Messunsicherheiten entfällt somit. Gerätehersteller sind z. B. Ott Hydrometrie (www.ott-hydrometrie.de), Quantum (www.quantum-hydrometrie.de), Dantec (www.dantecmt.com) und Seba (www.seba.de). Hier können die aktuellen Messgeräte und deren Messunsicherheiten nachgesehen werden.

2.2 Fließgeschwindigkeit

Das einfachste Verfahren zur Fließgeschwindigkeitsmessung besteht in der Messung der Zeit t , die ein Schwimmkörper für eine festgelegte Fließstrecke s be-

nötigt. Die Geschwindigkeit v berechnet sich somit aus $v = s/t$. Durch die Ausführung des Schwimmkörpers kann die Geschwindigkeit in einer bestimmten Höhenlage des Fließgewässers bestimmt werden. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für sehr kleine Geschwindigkeiten. Ein noch sehr verbreitetes Verfahren ist der Einsatz des hydrometrischen Flügels. Dieser besteht aus einem strömungsgünstig geformten Propeller und einer Zählvorrichtung für die Umdrehungen n . Nach Kalibrierung in bei der der hydrometrische Flügel mit einer konstanten Geschwindigkeit durch das ruhende Wasser gezogen wird, kann aus der Anzahl der Umdrehungen auf die Fließgeschwindigkeit an der Messstelle geschlossen werden. Die Messungen sind über den Querschnitt zur Aufstellung eines Geschwindigkeitsprofils zu wiederholen. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit besteht im Einsatz von Ultraschallanlagen nach dem Laufzeitverfahren. Dabei wird die Differenz der Laufzeiten eines Ultraschallsignals mit und entgegen der Strömung bestimmt [12]. Die Schallgeschwindigkeit in Wasser $c_0 \approx 1465$ m/s überlagert sich mit der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente der Strömung im Messstrahl; der Winkel zur Hauptströmungsrichtung wird mit ϕ bezeichnet. In Fließrichtung addieren sich die Geschwindigkeiten 14, flussaufwärts reduziert sich die effektive Schallgeschwindigkeit (15). Die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Messebene wird mit v bezeichnet.

$$c_{1-2} = c_0 + v \cos \phi \quad (13)$$

$$c_{2-1} = c_0 - v \cos \phi \quad (14)$$

Mit dem bekannten Abstand L zwischen den beiden Sende-/Empfangseinheiten werden die Laufzeiten $t_1 = L/c_{1-2}$ und $t_2 = L/c_{2-1}$ eingeführt, deren Differenz mit $\Delta t = t_2 - t_1$ abgekürzt wird.

$$\Delta t = \frac{2Lv \cos \phi}{c_0^2 - v^2 \cos^2 \phi} \quad (15)$$

Aus Gleichung 15 folgt mit der Vereinfachung $v^2 \ll c_0^2$ die Gleichung 16 für die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Messebene v .

$$v = \frac{c_0^2}{2L \cos \phi} \Delta t \quad (16)$$

Aus einem angenommenen bzw. durch zusätzliche Messungen bestimmten Geschwindigkeitsprofil kann dann auf die mittlere Geschwindigkeit im Fließquerschnitt geschlossen werden.

Bei Ultraschallanlagen mit dem Dopplereffekt wird die Frequenzverschiebung von Ultraschallwellen genutzt. Ein Sender strahlt Ultraschallwellen mit einer konstanten Frequenz aus. Treffen diese auf ein sich bewegendes Teilchen und

werden zum Empfänger reflektiert, so kann dort zum einen aus der Laufzeit auf die Entfernung des Teilchens und zum anderen aus der Frequenzverschiebung auf die Geschwindigkeitskomponente des Teilchens in Richtung des Strahlenganges geschlossen werden. Zum mobilen Einsatz stehen ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) zur Verfügung, mit denen durch entsprechende Anordnung der Sender und Empfängereinheit alle 3 Geschwindigkeitskomponenten erfasst werden können. Die Ortsbestimmung erfolgt ebenfalls mit dem ADCP in bezug auf die Flusssohle. Schwierigkeiten entstehen daher bei bewegter Sohle. Ein ADCP benötigt je nach Typ eine bestimmte Mindestwassertiefe.

Der Doppler-Effekt wird auch mit Radar-Strahlen oder Laser genutzt. Der Laser ermöglicht nahezu punktuelle Messungen im Labor.

Beim magnetisch-induktiven Verfahren wird die Spannung gemessen, die infolge der durch ein Magnetfeld strömenden elektrisch geladenen Teilchen induziert wird. Aus der induzierten Spannung, die von der Größe des (bekannten) Magnetfeldes, der Fließgeschwindigkeit und der Teilchenkonzentration abhängt, lässt sich die Fließgeschwindigkeit berechnen. Die Konzentration elektrisch geladener Teilchen muss dabei bekannt sein; sie wird in der Regel gleichzeitig mit der Spannung gemessen. Beim Einsatz im Labor bzw. in einem Rohrsystem kann das Magnetfeld durch einen Ring relativ einfach über den gesamten Querschnitt aufgebaut werden. Bei Messungen in einem Fließgewässer wird das magnetisch-induktive Verfahren ähnlich wie der hydrometrische Flügel zur punktuellen Messung eingesetzt.

Für sehr langsame Fließgeschwindigkeiten (und ruhiger Wasseroberfläche) kann ein visuelles Verfahren eingesetzt werden, bei dem Luftperlen von der Flusssohle aufsteigen und bis zur Wasseroberfläche eine von der Fließgeschwindigkeit abhängige Entfernung zurücklegen. Dies sollte über den gesamten Querschnitt erfolgen und erfordert den Einsatz einer Kamera, die von oben auf das Fließgewässer gerichtet ist und durch Bildauswertung die zurückgelegte Strecke der Luftblasen erfasst. Es handelt sich um ein integrierendes Verfahren, d. h. es wird die mittlere Fließgeschwindigkeit über den Querschnitt bestimmt.

Ein für den Laboreinsatz gut geeignetes Verfahren ist PIV (Particle Image Velocimetry). Dabei werden optisch gut sichtbare Partikel in die Flüssigkeit gestreut, deren Eigenschaften (insbesondere die Dichte) denen der Flüssigkeit entspricht. Die Bewegungen der Partikel werden gefilmt und aus den bei der Auswertung ermittelten Bahnlinien der Partikel kann auf die momentanen Geschwindigkeiten geschlossen werden. Je nach eingesetzter Messtechnik ist eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung möglich. Insbesondere Wirbel lassen sich dadurch erfassen.

In Rohrsystemen kann auch durch Messung des Drucks (siehe unten) bei bekannter Energiehöhe (und abgeschätztem Energieverlust) auf die jeweilige Geschwindigkeit geschlossen werden: $v = \sqrt{2g(H - \frac{p}{\rho g} - h_v)}$.

2.3 Druck

Die Druckmessung im Wasserbau erfolgt entweder über Manometer, bei denen die Höhe eines Flüssigkeitsspiegels eine Aussage zum Druck in einem geschlossenen Behälter, Rohrsystem oder auch in einem offenen Gewässer gestattet. Im Labor kam in der Vergangenheit insbesondere die Wasserstandsharfe zum Einsatz, bei der verschiedene Drücke direkt miteinander verglichen werden können. Hierbei gilt das Prinzip der Schlauchwaage.

Beim Einperlverfahren wird der Messschlauch durch Einpressen von Luft wasserfrei gehalten. Der Luftdruck entspricht dann genau dem Wasserdruck an der Einperlöffnung. An der eigentlichen Druckmesseinheit ist kein Wasser, sondern nur Luft.

Druckmessdosen werden direkt im Wasser angebracht. Die eigentliche Messmembran ist durch einen Ölpuffer und einer zusätzlichen Membran geschützt. Die durch den Druck hervorgerufene Durchbiegung der Membran wird entweder über einen Dehnungsmessstreifen (DMS) oder kapazitiv in eine elektrische Spannung umgewandelt, die dann als Maß für den Druck dient.

2.4 Wasserstand

Der Wasserstand kann im einfachsten Fall durch Ablesung an einem Lattenpegel bestimmt werden. Eine kontinuierliche Aufzeichnung erfolgt z. B. mit einem Schwimmer und einer damit in Verbindung stehenden Schreibrolle.

Der Wasserspiegel kann auch mit einem Lot (bei Kontakt mit der Wasseroberfläche erfolgt ein akustisches oder optisches Signal), einem Laser oder durch Ultraschall (Laufzeit der von der Wasseroberfläche reflektierten Welle) erfolgen. Das Lot wird vornehmlich für nicht kontinuierliche Grundwasserstandsmessungen eingesetzt.

Im Labor werden häufig so genannte Wellenpegel eingesetzt. Dabei werden zwei vertikal stehende Elektroden in das Wasser eingetaucht. Die Elektroden berühren sich nicht, aufgrund der Leitfähigkeit von Wasser ist aber eine elektrische Verbindung vorhanden. Je höher das Wasser steht, desto größer ist die Fläche, über die die Elektronen von einer zur anderen Elektrode fließen können, wodurch sich die zu messende Leitfähigkeit erhöht. Nach einer Kalibrierung ist dies ein Maß für den Wasserstand. Bei einer anderen Variante wird die sich verändernde Kapazität gemessen, die aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstante von Wasser und Luft entsteht.

Des Weiteren kommen die bereits erläuterten Messverfahren zur Druckmessung zum Einsatz, bei denen über die Beziehung $p = \rho gh$ auf die Wassertiefe bzw. den Wasserstand geschlossen wird.

2.5 Durchfluss

Das der Einheit des Durchflusses Q entsprechende Messprinzip umfasst die Messung der Zeit t , die zur Füllung eines geeichten Volumens V benötigt wird: $Q = V/t$. Dies wird als volumetrische Durchflussmessung bezeichnet und ist nur für kleinere Durchflüsse geeignet. Das Ergebnis gibt den Mittelwert des Durchflusses in dem erfassten Zeitraum an.

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung des Durchflusses ist der Einsatz von Markierungsstoffen, so genannten Tracern. Tracer sind meist anionische Markierstoffe, die sich in Wasser nachweisen lassen (z. B. fluoreszierende Stoffe, Salze). Tracer sollten konservativ sein, d. h. keine Reaktion mit dem Träger eingehen.

Die dem Gewässer zugesetzten Stoffe, deren Konzentration c_0 im Labor bestimmt wurde, werden entweder kurzzeitig oder über einen längeren Zeitraum in das Gewässer gegeben. Bei kontinuierlicher Zugabe mit der Tracermenge q kann der Durchfluss an der Stelle 1 mit der dort gemessenen Gesamtkonzentration c_1 wie folgt bestimmt werden: $c_0q = c_1(Q + q)$, mit q vernachlässigbar gegen über Q ergibt sich daraus $Q = (c_0/c_1)q$. Die Konzentration c_1 muss für den Beharrungszustand bestimmt werden. Bei momentaner Einspeisung mit der Tracermenge A (entspricht bei Injektion einer Tracerlösung dem Produkt aus deren Konzentration und Volumen) wird kontinuierlich die Konzentration c_1 an der Messstelle gemessen. Der Durchfluss Q ergibt sich wie folgt: $Q = A / \int_{t_1}^{t_2} c_1 dt$. Tracer werden vornehmlich im Grundwasserleiter und in kleinen Gebirgsbächen eingesetzt, bei denen andere Messprinzipien versagen.

Insbesondere im Labor und in kleinen Gewässern kommen Messwehre zum Einsatz. Hierbei ist der Durchfluss eine Funktion des Wehrbeiwertes μ , der Breite b , der Höhe der überfallkante w sowie der gemessenen Wassertiefe h . Verbreitet sind Rehbock- und Thomson-Wehre. Ausschlaggebend ist, dass der gemessene Oberwasserstand unabhängig vom Unterwasserstand ist. Dies trifft auch für den Venturikanal, bei dem es aufgrund der Einengung zu einem Fließwechsel kommt. In Rohrsystemen kommen auch Messblenden und Venturidrüsen zum Einsatz. Hierbei ist der Durchfluss eine Funktion der gemessenen Druckdifferenz Δp .

Für gestaute Fließgewässer steht auch das sogenannte ΔW -Durchflussmessverfahren zur Verfügung. Hierbei wird der Durchfluss Q auf Basis des gemessenen Wasserspiegelgefälles $I_W = \Delta W/L$ zwischen zwei in einem größeren Abstand (z. B. $L = 200$ m) montierten Wasserstandsmessern bestimmt.

Generell kommen nach der Kontinuitätsbeziehung $Q = vA$ alle Verfahren zum Einsatz, mit denen die Geschwindigkeit v gemessen werden kann (s. o.), die dann mit der zugehörigen Fläche A meist in Form eines Integrals $Q = \int_A v dA$ multipliziert wird. Die Gesamtdurchflussfläche A wird aus der aufgemessenen Geometrie des Gerinnes und der Wassertiefe h ermittelt.

3 Messwesen in der Meteorologie

3.1 Temperatur

Die Temperatur wird in der Regel über eine Längen- oder Volumenänderung von temperaturempfindlichen Stoffen mit möglichst linearem Verhalten gemessen. Die bekannteste Ausführung ist das Quecksilberthermometer. Beim Thermograph wird ein Bimetall eingesetzt; die durch das unterschiedliche Verhalten der beiden Metalle bedingte Verformung bzw. Auslenkung kann mit einer Schreibrolle kontinuierlich aufgezeichnet werden.

Es gibt auch elektrische Bauteile (NTC oder PTC), bei denen sich der elektrische Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur nahezu linear ändert.

Ein Thermoelement besteht aus 2 verschiedenen Metallen (z. B. Kupfer und Eisen, wobei der Kupferkern zwischen zwei Eisenstreifen angeordnet ist). Beim Übergang von einem Material zum anderen baut sich in Abhängigkeit von der Temperatur eine elektrische Spannung auf. Bei gleicher Temperatur an beiden Eisenstreifen heben sich die Spannungsdifferenzen auf. Wird der eine Eisenstreifen auf einer konstanten Bezugstemperatur gehalten und der andere auf die zu messende Temperatur gebracht, so baut sich eine Spannungsdifferenz auf, die zu einem Stromfluss führt. Dieser wird gemessen und ist ein Maß für die gesuchte Temperatur.

3.2 Sonneneinstrahlung

Die Sonneneinstrahlung wird durch Umwandlung in Wärme mit Hilfe einer geschwärzten Fläche und somit schließlich über die Messung einer Temperatur bestimmt. Die Unterscheidung direkter Strahlung bzw. der Globalstrahlung wird durch entsprechende Aufstellung und durch den Einsatz von Blenden erreicht.

Beim Ångströmschen Kompensations-Pyrheliometer wird die Temperaturdifferenz zwischen einem beschatteten Streifen und dem der Sonnenstrahlung ausgesetzten Streifen gemessen. Sodann kann durch Zufuhr eines elektrischen Stromes i der beschattete Streifen aufgeheizt werden, bis die Temperaturdifferenz Null beträgt. Mit der Apparatekonstante k kann die Intensität der direkten Sonnenstrahlung mit $I = ki^2$ bestimmt werden. Das Ångströmsche Kompensations-Pyrheliometer ist ein Absolutmessgerät.

Das Bimetallaktinometer von Michelson-Büttner ist dagegen ein Relativmessgerät. Der eingesetzte geschwärzte Bimetallstreifen verformt sich entsprechend der Temperatur. Die Verschiebung n kann gegen eine Skala abgelesen werden: $I = kn$. Bei der Messung der Sonneneinstrahlung ist es wichtig, dass die Messstreifen nicht dem Wind oder gar dem Niederschlag ausgesetzt sind. In der Regel werden daher zwei Glaskalotten über der Fläche angebracht. Durch das Glas wird zusätzlich auch die Wärmestrahlung abgeschirmt. Auch die Umkehr ist möglich, d. h. es kann die Ausstrahlung der Wärmestrahlung gemessen werden, wobei dann statt Glas die Abschirmung mit Kunststoff erfolgt.

3.3 Feuchte

Die klassische Messung der Feuchte erfolgt mit hygroskopischen, d. h. feuchteempfindlichen Substanzen. Hierzu werden insbesondere Haare von Menschen verwendet. Die Längenänderung des Haares mit der Feuchte kann auf einen Zeiger oder Schreibarm übertragen werden und damit vergrößert abgelesen werden. Dieses Gerät nennt man Haarhygrometer bzw. in der Variante mit Schreibarm Hygrograph.

Ein Psychrometer besteht aus zwei gleichen Thermometern (gewöhnlich Quecksilberthermometer), die nebeneinander montiert sind. Der Behälter des einen Thermometers wird mit einem dünnen Strumpf umhüllt, der mit Wasser getränkt ist. Es ist darauf zu achten, dass der Strumpf immer nass bleibt. Des weiteren wird für eine Ventilation gesorgt. Das eine Thermometer misst dann die Temperatur der umgebenden Luft, während das befeuchtete Thermometer die Feuchttemperatur misst, die aufgrund der bei der Verdunstung entzogenen Wärmeenergie niedriger ist. Die Verdunstung (und damit die Temperaturdifferenz) nimmt mit höherer (trockener) Lufttemperatur und bei niedrigerem Feuchtegehalt der Luft zu. Aus der Psychrometertabelle lässt sich somit in Abhängigkeit der absoluten Lufttemperatur sowie der Temperaturdifferenz zwischen dem trockenen und feuchten Thermometer die Luftfeuchte ablesen.

In diesem Zusammenhang sei auch auf das Frostpunkt- bzw. Taupunkt-Hygrometer hingewiesen. Hierbei wird ein blankpolierter Spiegel abgekühlt, bis die Luftfeuchtigkeit auf dem Spiegel sublimiert bzw. kondensiert. Dadurch tritt am Spiegel eine diffuse Reflexion auf, die durch eine Fozelle erfasst wird. Die dabei gemessene Temperatur der Spiegeloberfläche gibt die Frostpunkt- bzw. Taupunkt-Temperatur an.

3.4 Luftdruck

Der Luftdruck wird z. B. mit Hilfe eines einseitig geschlossenen Quecksilberbarometer gemessen. Die Höhe der Quecksilbersäule ist ein Maß für den Luftdruck.

Bei einem Aneroidbarometer wird in der so genannten Aneroiddose ein Unterdruck erzeugt. Das Zusammendrücken aufgrund des höheren Luftdrucks wird mit Hilfe einer Feder verhindert; der Federweg ist gleichzeitig ein Maß für den Luftdruck.

In einem offenen Gefäß kocht Wasser, wenn der Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes gleich dem herrschenden Luftdruck ist. Der Sättigungsdruck ist nur eine Funktion der Temperatur. Dieser Effekt wird beim Siedebrometer (Hypsometer) genutzt, indem die Temperatur des Wasserdampfes gemessen wird und somit auf den Luftdruck der Umgebung geschlossen werden kann. Einer Luftdruckdifferenz von 0,1 mbar entspricht nur eine Temperaturdifferenz von 0,0028 °C; es ist daher eine große Sorgfalt bei der Anwendung dieser Methode erforderlich.

3.5 Niederschlag

Generell wird der Niederschlag durch Auffangen mit einem Behälter (Regenmessner nach Hellmann) erfasst. Bei manueller Ablesung der Niederschlagshöhe wird meist nur der Tageswert bestimmt. Mit Hilfe von Schwimmer, dem Einsatz von Kippchalen oder auch der Wägung des Behälterinhalts kann der Niederschlag quasi kontinuierlich gemessen werden. Es sind aber nach wie vor punktuelle Messungen, so dass mit Hilfe verschiedener Methoden erst der Gebietsniederschlag berechnet werden muss.

Generell besteht bei Niederschlagsmessgeräten das Problem des Windeinflusses, einerseits durch die bei seitlichem Wind kleinere effektive Auffangfläche, andererseits durch Turbulenz aufgrund umstehender Hindernisse. Außerdem ergeben sich aufgrund der Verdunstung sowie bei festem Niederschlag Abweichungen von der tatsächlichen Niederschlagsmenge.

Eine weitere Methode zur Messung des Gebietsniederschlags mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung (bis zu 1 km^2 bzw. 5 min) ist der Einsatz einer Radarstation, die einen Wirkungsradius von etwa 200 km hat und somit ein Gebiet von über $100\,000 \text{ km}^2$ abdeckt. Radarmessungen werden heute in den USA, Europa und Japan durchgeführt.

Ein Radar funktioniert nach folgendem Prinzip: Eine gerichtete Antenne strahlt in Impulsen elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von etwa 3 bis 10 cm (Mikrowellenbereich) ab. Trifft die Strahlung in der Atmosphäre auf einen Partikel, der größer als 0,2 mm ist, so wird sie von diesem reflektiert. Ein Teil dieser Strahlung wird von dem Empfangsgerät des Radars aufgenommen und gemessen, bevor der nächste Impuls ausgestrahlt wird. Die Zeit zwischen ausgesandtem Impuls und dem dazugehörigen Echo entspricht also der, die die Strahlung benötigt, um die doppelte Entfernung zum reflektierenden Gegenstand zurückzulegen. Die Strahlung bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit, so dass sich der Abstand berechnen lässt.

Die reflektierenden Partikel sind hierbei die Wassertröpfchen und Eiskristalle. Es ist jedoch noch problematisch, die Stärke des Echos richtig zu interpretieren. Sie ist abhängig von der normalen Tropfengröße, der Tropfengrößenverteilung, der Anzahl von Tropfen pro Volumeneinheit, ihrer Form sowie davon, ob es sich um festen oder flüssigen Niederschlag handelt. Außerdem muss der Unterschied zwischen der Höhe, in der das Radar misst, und dem Boden berücksichtigt werden, denn durch Verdunsten oder Koaleszenz (Zusammenwachsen von Tröpfchen) kann sich die Tropfengröße ändern. Daher ist immer eine Kalibrierung der Radarwerte mit Daten von Niederschlagsmessern nötig. Fernerkundungsdaten sind noch nicht genau genug, um Bodenmessgeräte zu ersetzen, sie können jedoch zur Vorhersage herangezogen werden.

3.6 Wind

Der Wind besteht aus zwei wesentlichen Parametern: der Windgeschwindigkeit (m/s) und der Windrichtung (90° entspricht Wind aus Osten, 180° aus Süden, 270° aus Westen und 360° Wind aus Norden. 0° steht für Windstille). Die Windgeschwindigkeit wird mit dem Anemometer bzw. dem Schalenkreuzanemometer gemessen; die Windrichtung wird mit der Windfahne bestimmt. Die Windstärke nach Beaufort ist eine heutzutage 18-stufige Skala (0 bis 17, früher nur 0 bis 12), die die Wirkung des Windes beschreibt.

3.7 Verdunstung

Die Verdunstung wird mit dem Atmometer bzw. dem Atmograph bestimmt. Er besteht aus einem Filterpapier oder einer Keramikscheibe und simuliert somit die Verdunstung über einem (freien) Bodenkörper.

Verdunstungsgefäße wie z. B. das Class-A-Pan simulieren die Verdunstung über einer offenen Wasserfläche.

(Wägbare) Lysimeter dienen zur Bestimmung der Verdunstung über bewachsenen Bodenkörpern. Dabei handelt es sich um einen Bodenmonolithen, der durch Seitenwände vom umgebenden Boden abgetrennt ist und zusätzlich das durchsickernde Wasser am Grund des Monolithen auffängt. Bei den wägbaren Lysimetern wird des weiteren das Gewicht bestimmt und dadurch über die Gewichtsabnahme (abzüglich des versickerten Wassers) die Verdunstung bestimmt.

3.8 Versickerung

Auch die Versickerung wird mit wägbaren Lysimetern bestimmt (s. o.).

Des weiteren können Bodenproben im Labor auf ihre Versickerungseigenschaften hin untersucht werden. Die Übertragung auf natürliche Verhältnisse ist aber problematisch, da ungestörte Bodenproben schwierig zu entnehmen sind und vor allem die Variation der Bodenarten in der Natur groß ist.

Auch das Doppelring-Infiltrometer liefert stark schwankende und schwer reproduzierbare Ergebnisse. Im Prinzip wird ein unten offenes Wassergefäß auf den zu untersuchenden Boden gestellt und die Zeit gemessen, in der der Wasserstand um einen gewissen Betrag sinkt. Der äußere Ring soll einheitliche Randbedingungen sicherstellen.

4 Ergänzungen

4.1 Datensammler

Mit Datensammlern werden die interessierenden Messgrößen in regelmäßigen Zeitabständen aufgezeichnet. Die Messgröße wird dabei in der Regel elektrisch als Stromstärke im Bereich 4 mA bis 20 mA oder als Spannung im Bereich 1 bis 5 V übertagen und im Datensammler über einen Analog-Digital-Wandler in eine Zahl umgewandelt und abgespeichert. Meist stehen mehrere Kanäle zur Verfügung, mit denen eine entsprechende Anzahl Messgrößen gleichzeitig aufgezeichnet werden können. Zu einem komfortablen Datensammler gehört auch die Möglichkeit der Fernabfrage. Wichtig ist in erster Linie eine hohe Datensicherheit; auch bei einem Stromausfall darf der Datenbestand nicht verloren gehen.

4.2 Amerikanische und britische Einheiten

Name der Einheit	Zeichen	Umrechnung in SI-Einheit
<i>Länge</i>		
inch	in	1 in = 25,4 mm
foot	ft	1 ft = 12 in = 0,3048 m
yard	yd	1 yd = 3 ft = 0,9144 m
mile (statue)	mi	1 mi = 1760 yd = 1,609344 km
nautical mile (int.)	nmi	1 nmi = 1,852 km
<i>Geschwindigkeit</i>		
knot (int.)	kn	1 kn = 1 nmi/h = 0,5144 m/s
mile per hour	mph	1 mi/h = 0,4470 m/s
<i>Fläche</i>		
square inch	sq in	1 sq in = 6,4516 cm ²
square foot	sq ft	1 sq ft = 144 sq in = 929,030 cm ²
square yard	sq yd	1 sq yd = 9 sq ft = 0,836127 m ²
	rood	1 rood = 1210 sq yd = 1011,71 m ²
	acre	1 acre = 4 roods = 4046,86 m ²
square mile	sq mi	1 sq mi = 640 acres = 2,5899888 km ²
<i>Volumen</i>		
cubic inch	cu in	1 cu in = 16,3871 cm ³
cubic foot	cu ft	1 cu ft = 28,3168 dm ³
cubic yard	cu yd	1 cu yd = 0,764555 m ³
Britische UK fluid ounce	UK fl oz	1 fl oz = 28,4131 cm ³
<i>Hohlmasse</i>		
UK gill	UK gill	1 gill = 5 fl oz = 0,142065 dm ³
UK pint	UK pt	1 pt = 20 fl oz = 0,568261 dm ³
UK quart	UK qt	1 qt = 2 pt = 1,13652 dm ³
UK gallon	UK gal	1 gal = 4 qt = 4,54609 dm ³
Amerik. US fluid ounce	US fl oz	1 fl oz = 29,5735 cm ³
<i>Flüssigkeitsmasse</i>		
US gill	gi	1 gi = 4 fl oz = 0,118294 dm ³
US liquid pint	liq pt	1 liq pt = 4 gi = 0,473176 dm ³
US liquid quart	liq qt	1 liq qt = 2 liq pt = 0,946353 dm ³
US gallon	US gal	1 gal = 4 liq qt = 3,78541 dm ³
US barrel (oil)	bbbl	1 bbl = 42 gal = 158,987 dm ³
<i>Amerikanische Trockenhohlmasse</i>		
US dry pint	dry pt	1 dry pt = 0,550610 dm ³
US dry quart	dry qt	1 dry qt = 2 dry pt = 1,10122 dm ³
US peck	pk	1 pk = 8 dry qt = 8,80976 dm ³
US bushel (oil)	bu	1 bu = 4 pk = 35,2391 dm ³

Name der Einheit	Zeichen	Umrechnung in SI-Einheit
<i>Masse</i>		
grain	gr	1 gr = 0,064799 g
dram (avoir dupois)	dr	1 dr = 27,34375 gr = 1,77185 g
ounce (avdp)	oz	1 oz = 16 dr = 28,3495 g
troy ounce	oz tr	1 oz tr = 480 gr = 31,1035 g
pound (avdp)	lb	1 lb = 16 oz = 0,453592 kg
troy pound	lb tr	1 lb tr = 12 oz tr = 0,373242 kg
stone (UK)		1 stone = 14 lb = 6,35029 kg
hundertweight (UK)	cwt	1 cwt = 112 lb = 50,8023 kg
(long) ton (UK)	ton	1 ton = 2240 lb = 1016,05 kg
short hundertweight (US)	sh cwt	1 sh cwt = 100 lb = 45,3592 kg
short ton (US)	sh ton	1 sh ton = 2000 lb = 907,185 kg
<i>Kraft</i>		
poundal	pdl	1 pdl = 0,138255 N
pound-force	lbf	1 lbf = 4,44822 N
UK ton-force UK	tonf	1 tonf = 2240 lbf = 9964,02 N
US ton-force = 2 kip US	tonf	1 tonf = 2000 lbf = 8896,44 N
<i>Druck</i>		
pound-force/sq ft	lbf/ft ²	1 lbf/ft ² = 47,8803 Pa
pound-force/sq in	lbf/in ² , psi	1 lbf/in ² = 6,89476 kPa
<i>Energie</i>		
foot pound-force	ft·lbf	1 ft·lbf = 1,35582 J
<i>Wärmemenge</i>		
British thermal unit	Btu	1 Btu = 1,05506 kJ
	therm	1 therm = 105 Btu = 105,506 MJ
	QUAD	1 QUAD = 1015 Btu = 1,05506 EJ = 293,07 TWh
Ton of oil equivalent	Toe	1 Toe = 41,87 GJ = 11,63 MWh
<i>Leistung</i>		
British thermal unit/h	Btu/h	1 Btu/h = 0,293071 W
horsepower	hp	1 hp = 550 ft·lbf/s = 745,700 W
<i>Temperatur</i>		
Grad Fahrenheit	°F	Temp.[°C] = (Temp.[°F]-32)·5/9
Temp.-Differenz	°F	1°F = 5/9°C = 5/9 K

Literatur

- [1] Metrologie und Akkreditierung Schweiz, <http://www.metas.ch>, 2002
- [2] <http://www.geographie.uni-muenchen.de/iggf/multimedia/start.htm>, 2002
- [3] Baule, Bernhard: Die Mathematik des Naturforschers und Ingenieurs - Variationsrechnung, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1968
- [4] Boiten, W.: Hydrometry, IHE Delft Lecture Note, Balkema, Rotterdam, Niederlande, 2000
- [5] DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [6] Dyck, S.: Angewandte Hydrologie, Teil 1 (Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse), Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 2. Auflage, 1977
- [7] Dyck, S.: Angewandte Hydrologie, Teil 2 (Der Wasserhaushalt der Flussgebiete), Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 2. Auflage, 1977
- [8] ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (Vornorm), Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [9] Hänsel, Horst: Grundzüge der Fehlerrechnung, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 3. Auflage, 1967
- [10] Liljequist, Gösta H. und Cehak, Konrad: Allgemeine Meteorologie, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2. Auflage, 1979
- [11] Ulrich Maniak: Hydrologie und Wasserwirtschaft, Springer Verlag, Berlin, 4. Auflage, 1977
- [12] Morgenschweis, Gerd und Franke, Peter: Experience with Ultrasonic Flowmeters in the Bottom-Outlet of the Bigge Dam, Proceedings of Commission internationale des grands barrages, Beijing, pp. Q.79-R.7, 2000