

- Groten, E. (1980): Geodesy and the Earth's Gravity Field Vol. II: Geodynamics and Advanced Methods. Bonn: Dümmler  
 Torge, W. (1991): Geodäsie. Berlin u. New York: Walter de Gruyter  
 Torge, W. (1989): Gravimetry. Berlin u. New York: Walter de Gruyter

## 1.5 Stoffmenge von Fluiden

### 1.5.1 Allgemeines (L. Narjes)

Unter Stoffmenge wird die physikalische Basisgröße „Stoffmenge“ (Substanzmenge) (s. 9.1.4.1) in der SI-Einheit mol verstanden. Bei der konventionellen Mengemessung von Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) wird die Stoffmenge mittelbar, nämlich über die abgeleitete Größe „Volumen“ oder „Volumenstrom bzw. Volumendurchfluß“, bestimmt, da es für die Mengemessung ruhender oder stationär strömender Flüssigkeiten und Gase auf der Grundlage der Basisgröße Stoffmenge z. Zt. kein unmittelbares, technisch einfaches Meßprinzip gibt. Ein unmittelbares Prinzip wäre z. B. die Teilchenzählung. In der Zwischenzeit hat man diverse andersartige Verfahren zur unmittelbaren Erfassung des „Massenstromes“ weiterentwickelt (s. Landolt-Börnstein (1991)). Einzelne dieser Verfahren haben bereits den Charakter von Präzisionsmeßverfahren erreicht. Man unterscheidet bei der Mengemessung zwischen zwei Verfahren, nämlich dem statischen und dynamischen, je nachdem die Stoffmenge des in Ruhe oder in Bewegung (stationärer Strömungsvorgang) befindlichen Fluids ermittelt wird. Bei der Bestimmung der Größen „Volumen“ bzw. „Volumenstrom“ müssen repräsentativer statischer Druck  $p_r$  und repräsentative Temperatur  $T_r$  im Kontrollvolumenbereich (z. B. eines Volumenzählers) gemessen werden, damit der ermittelte Volumenstrom  $q_v$  thermodynamisch eindeutig im Sinne einer Mengenangabe festgelegt ist. Zur Umrechnung auf einen zu Vergleichszwecken von Volumina oder Volumenströmen erforderlichen Norm- bzw. Referenzzustand benötigt man das Verhältnis zwischen Betriebsdichte  $\varrho_1$  (bezogen auf den Zustand vor dem Meßgerät, d. h.  $p_r = p_1$ ) und Dichte im Norm- bzw. Referenzzustand  $\varrho_n$  des Fluids (mit  $\varrho_{m_n} = 1/(Z_n V_{m_0})$ )

$$\frac{\varrho_1}{\varrho_n} = \frac{\varrho_{m_1}}{\varrho_{m_n}} = \varrho_{m_1} Z_n V_{m_0}, \quad (1.47)$$

worin per definitionem

$$Z_n = \frac{p_n V_{m_n}}{R T_n}$$

ist.  $V_{m_0}$  in Gleichung (1.47) ist die universelle physikalische Konstante des stoffmengenbezogenen (molaren) Volumens des idealen Gases im Normzustand  $V_{m_0} = 0,02241400 \text{ m}^3/\text{mol}$ .  $R$  ist die universelle Gaskonstante.  $Z_n$  ist z. B. nach DIN 1871 der Realgasfaktor eines trockenen ( $\text{H}_2\text{O}$ -frei) Gases im Normzustand (s. DIN 1343). Hiermit hat man einen sehr wichtigen Referenzzustand für die Kalorimetrie gasförmiger Brennstoffe festgelegt.  $Z_n$  bedeutet allgemein den Realfaktor eines Fluids im Referenzzustand. Er kennzeichnet das vom Verhalten des idealen Gases ( $Z_n = 1$ ) abweichende, thermische Zustandsverhalten des Fluids im Referenz- bzw. Normzustand ( $V_{m_n} \neq V_{m_0}$ ). Im allgemeinen mißt man die Betriebsdichte  $\varrho_1$  unmittelbar vor dem Meßgerät oder

ermittelt diese aus dem statischen Druck  $p_1$  und der Temperatur  $T_1$  mittels einer thermischen Zustandsgleichung  $\varrho = \varrho(p, T)$  des Fluids. Nach Baehr (1992) kann man für Flüssigkeiten den in  $T$  und  $p$  linearen Ansatz

$$\frac{1}{\varrho_1} = v_1(T_1, p_1) = v_0[1 + \alpha_{v_0}(T_1 - T_0) - \kappa_0(p_1 - p_0)]$$

als thermische Zustandsgleichung näherungsweise verwenden. Hierin bedeuten

$$\alpha_{v_0} = \frac{1}{v_0} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad \text{Volumenausdehnungskoeffizient}$$

$$\text{und} \quad \kappa_0 = -\frac{1}{v_0} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad \text{isothermer Kompressibilitätskoeffizient}$$

bezogen auf einen Referenzzustand. Zwischen  $\varrho_1$  und der molaren Dichte  $\varrho_{m_1}$ , z. B. in der Einheit mol/m<sup>3</sup>, besteht der Zusammenhang

$$\varrho_{m_1} = \varrho_1/M. \quad (1.48)$$

Die molare Masse  $M$  des Fluids errechnet sich aus ( $x_i$  = Molanteil des Stoffes „i“ des Fluids)

$$M = \sum_i x_i M_i. \quad (1.49)$$

$M$  ist hiernach durch eine Analyse des Fluids festgelegt. Bei Bekanntsein von  $M$  und  $Z_n$  kann der gemessene, stationäre Volumenstrom im Betriebszustand  $q_{v_1} = dV_1/dt = \text{const}$  ( $dV$  = Volumenfortschritt,  $dt$  = Zeitfortschritt) mittels Anwendung der Gleichungen (1.47) bis (1.49) in der Form

$$q_n = q_{v_1} \varrho_1 / \varrho_n = q_{v_1} \varrho_{m_1} Z_n V_{m_0} = q_{v_1} \frac{\varrho_1}{M} Z_n V_{m_0} \quad (1.50)$$

auf den Volumenstrom  $q_n$  im Norm- bzw. Referenzzustand umgerechnet werden. In vielen technischen Fällen weicht  $Z_n$ , z. B. bei Gasen, nicht wesentlich vom Wert 1 ab (ideales Gas). Sind  $M$  und  $Z_n$  nicht bekannt, wird man eine Meßmethode zur direkten Ermittlung der Dichte des Fluids im Norm- bzw. Referenzzustand  $\varrho_n$ , z. B. bei Gasen die Messung mit der Gasdichtewaage, heranziehen. Wendet man Gleichung (1.50) auf den stationären Stoffmengenstrom  $\dot{n}$  gemäß seiner Definition

$$\dot{n} = dn/dt = \text{const} = q_n \varrho_{m_n} = q_n / (Z_n V_{m_0}) \quad (1.51)$$

an, so erhält man

$$\dot{n} = q_{v_1} \frac{\varrho_1}{M}. \quad (1.52)$$

Diese Gleichung ist allgemein auf Fluide, also sowohl auf Flüssigkeiten als auch Gase anwendbar. Stoffmengenströme von Fluiden konstanter und bekannter Teilchenzusammensetzung ( $M = \text{const}$ ) können gemäß Gl. (1.52) miteinander unmittelbar quantitativ verglichen werden, da es sich um Stoffmengenströme im Sinne einer mittelbaren Teilchenzählung handelt.

Gleichung (1.52) kann in besonders einfacher Form zur Ermittlung des Stoffmengenstromes für Fluide wie „ideale Gase bzw. ideale Gasgemische“ angewendet werden gemäß

$$\dot{n} = q_{v_1} \frac{p_1}{RT_1} \quad (1.53)$$

Für den Zustandsbereich „reale Gase und Flüssigkeiten“ – das ist der Bereich bei der betriebsüblichen Großgas- und Flüssigkeitsmengenmessung strömender Fluide unter höherem statischen Druck – ergibt sich gemäß thermischer Zustandsgleichung  $\rho = \rho(p, T) = M \frac{p}{ZRT}$

$$\dot{n} = q_{v_1} \frac{p_1}{Z_1 RT_1} \quad (1.54)$$

worin der Realfaktor  $Z_1$  eine dimensionslose, thermodynamische Zustandsgröße

$$Z_1 = \frac{p_1 V_{m_1}}{RT_1} \quad (1.55)$$

darstellt. Diese Größe repräsentiert als zustandsabhängiger Parameter das thermische Kompressibilitätsverhalten eines realen Fluids ( $Z \geq 1$ ) im Verhältnis zu dem des idealen Gases ( $Z = 1$ ). Bei Gasgemischen ist der Realgasfaktor eine im allgemeinen verwickelte Zustandsfunktion der Art

$$Z = Z(p, T, x_1, \dots, x_n) \quad (1.56)$$

Hierzu hat man z. B. Virialgleichungen für Erdgas entwickelt, die der elektronischen Rechentechnik angepaßt sind und die eine hohe Genauigkeit bei konstanter Gaszusammensetzung sicherstellen (s. Jaeschke (1989 und 1992 VDI)).

Diese augenblicklich bekannteste Methode der Interpolationsfunktionen für z. B. Erdgas wird heutzutage von vielen Großgasversorgungsunternehmen angewendet. Für Flüssigkeiten unter nicht zu hohen statischen Drücken hat man Dichtetabellen gemäß  $\rho_1 = \rho_1(T_1)$  entwickelt. Man beachte auch hierzu den Näherungsansatz von Baehr (s. Seite 66, ohne Druckglied). Den Volumenstrom  $q_{v_1}$  eines Fluids ermittelt man bei Präzisionsmessungen stets im Einphasenzustand (gasförmig oder flüssig) und sorgt bei der Messung von Flüssigkeitsmengen dafür, daß durch geeignete Gasabscheideeinrichtungen praktisch keine gasförmigen Bestandteile mehr im Fluid enthalten sind. Bei der Messung von Gasmenen wird z. B. durch Separatoren bewirkt, daß keine flüssigen Bestandteile mehr im Fluid vorhanden sind.

Den Faktor  $p_1/(Z_1 RT_1) = \rho_1/M = \rho_{m_1}$  in Gleichung (1.54) ermittelt man mit Hilfe von zusätzlichen Meß- und Recheneinrichtungen, die die Erfassung der Größen statischer Druck ( $p_1$ ), Temperatur ( $T_1$ ), Zusammensetzung des Fluids und letztlich sowohl die Berechnung des obigen Faktors als auch die Multiplikation desselben mit dem Volumenstrom  $q_{v_1}$  ermöglichen. Diese Bestimmungsart für den Stoffmengenstrom bezeichnet man als mittelbare Methode. Der Stoffmengenstrom  $\dot{n}$  ist dem Massestrom  $\dot{m}$  proportional gemäß Gleichung (1.52) in der Form  $\dot{m} = q_{v_1} \rho_1 = M \dot{n}$ .

Für Strömungsvorgänge von Flüssigkeiten und Gasen, die nicht durch die Schwerkraft, thermische oder elektrische Einwirkungen beeinflußt werden, spielen vornehmlich zwei stoffspezifische, strömungsphysikalische Eigenschaften des Fluids eine wichtige Rolle, nämlich die Viskosität und die dynamische Kompressibilität (s. 1.5.1.1 und 1.5.1.3).

### 1.5.1.1 Viskosität des Fluids

Bei der Strömung durch geschlossene Kanäle, z. B. Rohre, spielt die Viskosität des Fluids eine gravierende Rolle. In der Nähe der Wände ist bei bestimmter Strömungsform, z. B. Turbulenz, in einer dünnen, an die Rohrwand grenzenden Schicht eine verstärkte Scherkraftwirkung durch Reibungskräfte vorhanden. Diese Schicht bezeichnet man als

Grenzschicht. Auf der Abströmseite von stumpfen Körpern z. B. kommt die Grenzschicht unter bestimmten Bedingungen sogar zur Ablösung. Es tritt dort starke Wirbelbildung auf. Hiermit sind entsprechend hohe Wandlungen von kinetischer in innere Energie des Fluids vorhanden. Diese sind auch in der Grenzschicht und selbst in der Kernströmung vorhanden. Die Intensität der Wandlungen in Grenzschicht als auch Kernströmung hängt vom Geschwindigkeitsgefälle quer zur Wand ab. Man spricht von Energiedissipation, die stets mit einer lokalen Entropieerzeugung (irreversibler Prozeß) gekoppelt ist. Der Einfluß dieser Reibungskräfte wird quantitativ durch die Reynoldszahl

$$Re = \frac{ul\rho}{\eta} = \frac{ul}{\nu}$$

wiedergegeben, die den Quotienten aus Kräften gemäß Impulsdichte  $u\rho$  und Reibungskraft darstellt. Dabei sind  $u$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $l$  = charakteristische Länge,  $\rho$  = Dichte,  $\eta$  = dynamische Viskosität,  $\nu = \eta/\rho$  = kinematische Viskosität (reibungsfreie Strömung:  $Re \rightarrow \infty$ ).

Zwei Strömungen inkompressibler Fluide ( $\rho = \text{const}$ ) sind dann mechanisch vollständig ähnlich, wenn bei geometrischer Ähnlichkeit der Strömungsbedingungen auch die Stromlinienbilder geometrisch ähnlich sind. Dazu ist es erforderlich, daß die  $Re$ -Zahlen beider Strömungen gleich sind (Reynoldssches Ähnlichkeits- oder Modellgesetz). Die  $Re$ -Zahl ist dimensionsfrei und ein geeigneter Parameter der Ähnlichkeitstheorie in ihrer Anwendung auf Strömungen inkompressibler Fluide (Schlichting (1965), Truckenbrodt (1989)).

Bei Flüssigkeitsströmungen muß aus meßtechnischen Gründen der statische Druck im ganzen Strömungsfeld weit genug über dem Dampfdruck (Sättigungsdruck) des Fluids bleiben, damit keine Dampfblasenbildung (Zwei-Phasen-Strömung mit Dampfblasen in der Flüssigkeit) eintritt. Sobald die gasdynamische Kompressibilität vernachlässigt werden kann, besteht zwischen dem Strömungsgesetz einer Flüssigkeit und dem eines Gases keinerlei Unterschied. Man bezeichnet diese Strömungsgesetze jedoch als Hydrodynamik und Aerodynamik. Die Strömungen von kompressiblen, gasförmigen Fluiden bei hohen Geschwindigkeiten beschreibt die Gasdynamik. Hierbei liegen zwei Ähnlichkeitsparameter, die  $Re$ - und  $Ma$ -Zahl (s. 1.5.1.3) vor. Ein Anwendungsbeispiel für die Mengenmeßtechnik bei Schallgeschwindigkeit gasförmiger Fluide, d. h. bei größerer Dichteänderung derselben, stellt die kritisch betriebene ( $Ma=1$ ) Venturidüse dar. Strömungen gasförmiger Fluide können bis  $Ma \leq 0,2$  als im gasdynamischen Sinne quasi-inkompressibel angesehen werden, sofern nicht sehr hohe Genauigkeitsansprüche vorliegen.

### 1.5.1.2 Laminare und turbulente Strömungsvorgänge

Bei kleinen  $Re$ -Zahlen sind Strömungen laminar über den gesamten Strömungsquerschnitt (sog. Schichtenströmung). Dabei findet keine Vermischung benachbarter Schichten statt. Für ein ideales Gas z. B. läßt sich seine dynamische Viskosität aus der kinetischen Gastheorie herleiten. Bei der laminaren Rohrströmung inkompressibler ( $\rho = \text{const}$ ) Fluide sind nach Hagen und Poiseuille die Geschwindigkeit parabolisch und der statische Druck konstant über den Strömungsquerschnitt verteilt. Der hierbei gültige Zusammenhang zwischen Viskosität und Volumenstrom wird z. B. zur meßtechnischen Bestimmung der dynamischen Viskosität benutzt. Bei der laminaren Rohrströmung kompressibler Fluide gelten gemäß den Grundgleichungen der Strömungsmechanik nach Navier-Stokes und den thermodynamischen Grundgleichungen (Zustandsgleichung, 1. und 2. Hauptsatz) andere Verhältnisse für die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung über den Strömungsquerschnitt. Bei großen  $Re$ -Zahlen oberhalb einer

kritischen Reynoldszahl  $Re_{krit.}$  ist die laminare Strömung aus Stabilitätsgründen nicht mehr existent und schlägt in eine turbulente Strömungsform um. Dabei sind starke Vermischungen benachbarter Schichten durch Impulsaustausch (Turbulenzballentransport) und daher eine „scheinbare Schubspannung der Turbulenz“  $\tau = \rho \overline{u'v'}$ , vorhanden. Der typische Unterschied zwischen laminarer und turbulenter Strömung kann optisch durch den Reynoldsschen Farbfadenversuch demonstriert werden. Die turbulente Strömungsform ist die in der Durchflußmeßtechnik am häufigsten vorkommende Form.

Bei turbulenter, insgesamt stationärer Strömung ist der zeitlich mittleren Bewegungsgröße z. B.  $\bar{u}$  eine unregelmäßige (statistische) Schwankungsgröße  $u'$ , die sogenannte turbulente Schwankungsbewegung, überlagert, so daß  $u = \bar{u} + u'$  wird. Im allgemeinen sind Strömungen turbulenter Natur mit unterschiedlichem Turbulenzgrad

$$Tu = \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)}$$

entsprechend den Randbedingungen (Einlaufstörungen) behaftet. Die turbulente Strömung hat weniger Ablösungsneigung als die laminare Strömung. Der Umschlag laminar-turbulent wird bestimmt durch die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit.}$ . Beim Kreisrohr ergibt sich  $Re_{krit.} = (ud/v)_{krit.} = 2300$  ( $d$ =Rohrdurchmesser). Für eine längsangeströmte ebene Platte ist die Grenzschicht am Anfang laminar, dahinter turbulent, sofern die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit.}$  überschritten wird. Der Abstand  $x$  der Umschlagstelle von der Vorderkante ist je nach Turbulenzgrad der Außenströmung gegeben durch  $Re_{krit.} = (ul/v)_{krit.} = 5 \cdot 10^5$  bis  $3 \cdot 10^6$ . Bei der Einlaufströmung in einem Rohr ergeben sich entsprechende Grenzschichtverhältnisse.

### 1.5.1.3 Gasdynamische Kompressibilität des Fluids

Ist die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids sehr klein gegen die örtliche Schallgeschwindigkeit desselben, so spielt seine gasdynamische Kompressibilität keine Rolle. Dann kann die Dichte des Fluids  $\rho$  in Näherung als konstant angenommen werden, (d. h. inkompressibles Fluid s. 1.5.1.1). Ist letzteres nicht der Fall, so spielt der Quotient  $u/c = Ma$  aus Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und örtlicher Schallgeschwindigkeit  $c = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_s}$  eine besondere Rolle. Dabei ist  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störwellen kleiner Amplitude in dem Fluid (isentropie Verdichtung und Verdünnung, d. h.  $s = \text{konst.}$ )  $Ma = u/c$  wird als Machzahl bezeichnet. Sie ist ein Ähnlichkeitsparameter, der das gasdynamische Kompressibilitäts- bzw. Elastizitätsverhalten des Fluids quantitativ wiedergibt (Machsches Modellgesetz) (Truckenbrodt (1992)).

Ein besonderer, meßtechnischer Anwendungsfall ist, wie zuvor erwähnt, durch die bei überkritischem Druckverhältnis betriebene Venturidüse gegeben. Hierbei tritt im engsten Querschnitt derselben die örtliche Schallgeschwindigkeit des Gases als Strömungsgeschwindigkeit ( $Ma = 1$ ) auf. Diese Düsenströmung ist außerordentlich stabil, aber leider von der Gaszusammensetzung, insbesondere im Niederdruckbereich von der Feuchte ( $H_2O$ ), abhängig (s. Aschenbrenner (1974)). Überkritisch betriebene Düsen werden in Prüfständen zur präzisen Mengenummessung bevorzugt (s. Aschenbrenner (1989)).

## 1.5.2 Mengenummessung ruhender Fluide (M. Zander)

Die Menge ruhender Fluide wird entweder als Volumen  $V$  oder als Masse  $m$  angegeben. Vorzuziehen sind Massenangaben, weil die Masse im Gegensatz zum Volumen unabhängig von Druck und Temperatur ist. Dennoch wird die Menge von Fluiden

überwiegend durch eine Volumenmessung bestimmt, da sie gegenüber der Massebestimmung viele Vorteile aufweist. Zur Umwertung von Volumenangaben in Massenangaben und umgekehrt entsprechend der Beziehung

$$m = \rho V \quad (1.57)$$

muß die Dichte  $\rho$  des Fluids bekannt sein.

Die Masse eines Fluids in einem Behälter kann auf einfache Weise durch Wägung unmittelbar bestimmt werden (Wägeverfahren s. 1.1.4). Anstelle der Masse wird bei gasförmigen Stoffen (z. B. Methan, Stickstoff, Sauerstoff) in Behältern der Fülldruck bei der Bezugstemperatur von 15°C angegeben; er ist bei gegebenem Behältervolumen der Gasmasse annähernd proportional.

Das Volumen eines Fluids wird in Ausnahmefällen ebenfalls durch Wägung, d. h. aus Masse und Dichte nach Gl. (1.57) mittelbar bestimmt. Vorteilhafter ist es, das Fluidvolumen entweder durch Ausmessen mit Meßbehältern bekannten Inhalts (Messung vollständiger Füllungen) oder, wenn es sich um Flüssigkeiten handelt, durch Messung der Flüssigkeitshöhe (Messung von Teilfüllungen) zu ermitteln.

Volumenmeßgeräte für Laboratoriumszwecke s. 1.2.3.2 und 1.2.3.3.

### 1.5.2.1 Messung vollständiger Füllungen

Diese einfache Methode besteht darin, daß das Fluid in einen Meßbehälter mit bekanntem Volumen gefüllt und daraus wieder abgegeben wird. Die Meßbehälter für die Volumenmessung von Flüssigkeiten im eichpflichtigen Verkehr sind in der Eichordnung (Anlage 4: Volumenmeßgeräte für Flüssigkeiten in ruhendem Zustand) behandelt.

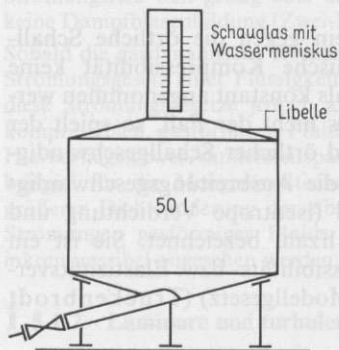


Fig. 1.30  
Eichkolben aus Metall

Für Prüfzwecke werden vorwiegend Eichkolben verwendet, die aus Glas (bis zu 10 l) oder aus Metall hergestellt sind. Fig. 1.30 zeigt einen Eichkolben mit einem Inhalt von 50 l. Er besteht aus einem zylindrischen Teil mit kegelförmigen Böden, einem Hals mit zwei gegenüberliegenden Schaugläsern und einer Skala zur Ablesung des Flüssigkeitsvolumens. Der Halsquerschnitt ist so gewählt, daß eine Volumenänderung von 0,1% den Flüssigkeitsspiegel um etwa 10 mm verschiebt. Beim Entleeren ist das Absperrorgan voll zu öffnen und nach einer festgelegten Abtropfzeit (meist 30 s) zu schließen. Sie beginnt, wenn der Flüssigkeitsstrahl abreißt, d. h. die Flüssigkeit nicht mehr zusammenhängend herausläuft. Damit wird immer eine hinreichend gleiche Benetzung des Eichkolbens erreicht. In derselben Weise ist der Eichkolben vor jeder Messung zu benetzen.

Die höchste Meßgenauigkeit für ein abgegebenes Wasservolumen wird mit Überlaufpipetten (50 l oder 100 l Inhalt) erreicht, die zum Ausmessen größerer Meßbehälter dienen. Bei Überlaufpipetten wird das Füllvolumen durch den Rand des Pipettenhalses begrenzt, der erheblich eingengt ist. Der

Durchmesser des Pipettenhalses wird so gewählt, daß eine relative Volumenänderung von etwa  $3 \cdot 10^{-6}$  den Flüssigkeitsspiegel um 1 mm verschiebt. Das von der Überlaufpipette abgegebene Wasservolumen wird vor ihrer ersten Verwendung gravimetrisch bestimmt, wobei eine Meßunsicherheit von  $\Delta V/V = 5 \cdot 10^{-5}$  erreichbar ist. Für die Volumenbestimmung, die in regelmäßigen Zeitabständen zu wiederholen ist, ist destilliertes Wasser zu verwenden, dessen Dichte sehr genau bekannt ist (s. Tab. T 3.10 in Band 3).

Die Volumenmessung von Gasen wird erschwert durch die starke Abhängigkeit des Gasvolumens von Druck und Temperatur. Zur Messung eines abgegebenen Gasvolumens bei konstantem Druck und konstanter Temperatur eignet sich die Gasmessglocke. Das Gas befindet sich in der zylindrischen Glocke, die in senkrechter Richtung beweglich aufgehängt ist und mit ihrem offenen Ende in ein Flüssigkeitsbecken eintaucht. Der Gasinhalt der Glocke über dem Flüssigkeitsspiegel ist an einer Skala abzulesen.

Auch Kolbenmeßgeräte haben sich zur Messung von Gasvolumina bewährt. Das Gas befindet sich z. B. in einem stehenden zylindrischen Behälter, der oben durch den Kolben begrenzt ist. Bei der Gasabgabe bewegt sich der Kolben durch die Schwerkraft nach unten und verdrängt das Gas bei konstantem Druck und konstanter Temperatur. Der Kolbenweg ist proportional dem abgegebenen Gasvolumen. Auch Systeme mit waagrecht zwangsbewegtem Kolben sind in Gebrauch.

### 1.5.2.2 Messung von Teilfüllungen (Füllstandsmessung)

Durch Messung des Füllstandes (Flüssigkeitshöhe) kann die Flüssigkeitsmenge im Behälter erfaßt werden, wenn der Zusammenhang zwischen Füllstand und Füllinhalt bekannt ist. Die Volumenbestimmung aus dem Füllstand  $h$  ist bei Behältern mit konstanter Querschnittsfläche  $A$  aus  $V = Ah$  leicht möglich. Für Kugelbehälter mit dem Durchmesser  $d$  gilt

$$V = \pi h^2 \left( \frac{d}{2} - \frac{h}{3} \right), \quad (1.58)$$

jedoch liegt in der Praxis eine einwandfreie Kugelform im allgemeinen nicht vor. Deshalb ist es auch bei geometrisch einfachen Behälterformen zweckmäßig, das Volumen in Abhängigkeit des Füllstandes mit Wasser stufenweise auszumessen (mit Eichkolben) oder nach dem Wägeverfahren mit Hilfe der Wasserdichte zu bestimmen.

Große Lagerbehälter in Form stehender Zylinder werden „naß“ oder „trocken“ ausgemessen. Beim nassen Verfahren (Ausliterung) wird die Zuordnung zwischen Volumen und Füllstand durch Einfüllen von Wassermengen, die mit einem Volumenzähler gemessen werden, ermittelt. Beim trockenen Verfahren wird der Behälter geometrisch vermessen, wobei in verschiedenen Höhen der mittlere Durchmesser bestimmt wird. Neben den Verfahren mit Meßband und Lot werden hierfür auch optische Meßverfahren eingesetzt.

Der Füllstand kann nach sehr unterschiedlichen Meßverfahren bestimmt werden (Richtlinie VDI/VDE 3519, Hengstenberg (1980), Strohrmann (1987), VDI-Berichte 231, Profos (1974), Bonfig (1972)). Es sind Verfahren, die auf eine Längenmessung zurückgeführt werden (Peilstab, Peilband, Schauglas, Standglas, Schwimmer), Verfahren, bei denen Drücke oder Kräfte gemessen werden (Manometer, Perlrrohr, Verdränger, Waage), oder es werden andere physikalische Effekte ausgenutzt (Kapazität, Radioaktivität, Ultraschall).

**Peilstab, Peilband** Ein Peilstab oder Peilband wird in den Behälter eingesenkt und die Eintauchtiefe in die Flüssigkeit (Benetzungsgrenze) wird festgestellt. Peilstäbe werden für Füllstände bis zu etwa 3 m benutzt. Bei stehenden zylindrischen Behältern werden Peilbänder verwendet, die am unteren Ende mit Spangengewichten beschwert werden. Die Peilung erfolgt im allgemeinen gegen einen

Peiltisch. Die Peilmethode ist geeignet für drucklose Behälter, bei denen nur gelegentlich der Füllstand gemessen wird, und zur Kontrolle kontinuierlich anzeigender Meßeinrichtungen.

**Schauglas** Durch Einbau einer mit einer Skala versehenen Glasscheibe in die Behälterwand läßt sich der jeweilige Füllstand optisch ermitteln. Wenn man mehrere Schaugläser seitlich versetzt übereinander anordnet, lassen sich auch größere Meßbereiche erfassen.

**Standglas** Den Flüssigkeitsstand kann man auch an seitlich angebrachten Standgläsern beobachten, die nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren arbeiten und durch Ventile abgesperrt werden können (Fig. 1.31). Der Innendurchmesser des Standglases ist so zu wählen, daß Kapillarkräfte vernachlässigbar sind.

Falls die Temperaturen und somit auch die mittleren Dichten der Flüssigkeit im Behälter und im Standglas voneinander abweichen, muß die Anzeige des Standglases  $h_s$  korrigiert werden

$$h = h_s \frac{\rho_s - \rho_D}{\rho_B - \rho_D} \quad (1.59)$$

$\rho_B$  Dichte der Flüssigkeit im Behälter

$\rho_s$  Dichte der Flüssigkeit im Standglas

$\rho_D$  Dichte des Dampfes (Gases) über der Flüssigkeit

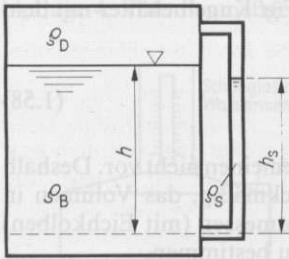


Fig. 1.31 Füllstandsmessung mit Standglas

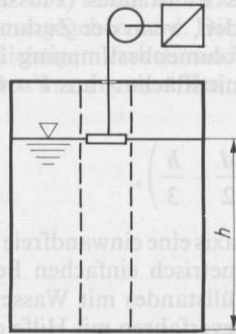


Fig. 1.32 Füllstandsmessung mit Schwimmer

**Schwimmer** Der Füllstand wird durch einen Schwimmer erfaßt, der – an einem dünnen Seil hängend – an der Flüssigkeitsoberfläche schwimmt (Fig. 1.32). Die Niveauänderungen, denen der Schwimmer folgt, werden über das Seil auf eine Meßtrommel übertragen und können örtlich angezeigt und fernübertragen werden. Als „Schwimmer“ hat sich die massive Tastplatte bewährt, die schwerer ist als die von ihr verdrängte Flüssigkeit. Der größte Teil ihres Gewichtes wird durch eine Gegenkraft ausgeglichen, so daß die Tastplatte nur sehr wenig in die Flüssigkeit eintaucht. Dichteänderungen der Flüssigkeit bewirken eine Änderung der Eintauchtiefe. Um diesen Einfluß gering zu halten, wählt man eine Tastplatte mit möglichst großem Durchmesser. Bei störenden Flüssigkeitsbewegungen ist der Schwimmer zu führen oder durch ein perforiertes Rohr zu schützen.

**Manometer** Der von der Flüssigkeit hervorgerufene hydrostatische Druck wird als Differenz zwischen dem Bodendruck  $p_b$  und dem Druck an der Flüssigkeitsoberfläche  $p_0$  gemessen und daraus der Füllstand (Flüssigkeitshöhe)  $h$  gegenüber dem Meßort des Bodendruckes bestimmt

$$h = \frac{p_b - p_0}{\rho g} \quad (1.60)$$



Hierin sind  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit (Mittelwert) und  $g$  die örtliche Fallbeschleunigung. Bei Behältern, die unter Druck stehen, ist immer die Druckdifferenz ( $p_b - p_0$ ) zu messen. Bei offenen Behältern genügt in vielen Fällen eine einfache Messung des Bodendrucks gegenüber dem Atmosphärendruck.

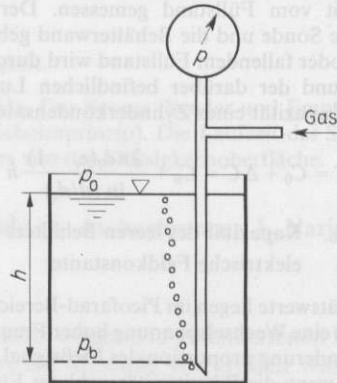


Fig. 1.33  
Füllstandsmessung mit Perlrohr

**Perlrohr** Ein Rohr wird bis zum Boden des offenen Behälters eingetaucht, durch das Luft oder Stickstoff kontinuierlich in die Flüssigkeit eingepert wird. Der Druck, der sich im Perlrohr einstellt, entspricht dem Bodendruck am offenen Ende des Perlrohres (Fig. 1.33). Mit einem Manometer wird der Druck im Perlrohr als Überdruck gegenüber dem Atmosphärendruck gemessen und daraus der Füllstand nach Gl. (1.60) berechnet.

Bewährt haben sich Perlrohre (Innendurchmesser 10–25 mm), die am unteren Ende abgeschrägt sind, damit sich bereits kleine Gasblasen ablösen. Bei kleinem Gasstrom kann der Strömungswiderstand im Perlrohr vernachlässigt werden. Die Perlmethode ist auch für Behälter, die unter Druck stehen, geeignet; es wird dann die Differenz zwischen dem Druck im Perlrohr und dem Druck an der Flüssigkeitsoberfläche gemessen.

**Verdränger** Man verwendet einen stabförmigen Meßkörper (Verdränger), der senkrecht in die Flüssigkeit eintaucht und bestimmt den durch den Auftrieb bedingten Gewichtsverlust des Verdrängers. Damit der Verdränger nicht zum Schwimmer wird, muß er schwerer sein als die von ihm verdrängte Flüssigkeit. Der Auftrieb, der dem Füllstand proportional ist, wird gemessen und in eine Anzeige umgeformt. Damit der Verdränger nie voll eintaucht, soll seine Länge (bis zu 3 m) etwa 10% größer sein als der Meßbereich.

**Waage** Der Füllstand läßt sich auch durch Wägung des Behälterinhaltes ermitteln. Diese Methode wird vor allem dann angewandt, wenn außer dem Füllstand auch die Masse der Füllung bestimmt werden soll. Hierzu wird der Behälter meist auf eine oder mehrere Wägezellen gelagert. Angezeigt wird unmittelbar die Masse der Füllung nach Abzug der Behältermasse (Tariereinrichtung).

Zwischen der Masse  $m$  einer Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho$  und ihrem Füllstand  $h$  besteht folgender Zusammenhang

$$m = \rho V(h) = \rho \int_0^h A(h) dh. \quad (1.61)$$

$V(h)$  Volumen der Flüssigkeit

$A(h)$  Querschnitt des Behälters

Für einen Behälter mit konstantem Querschnitt gilt

$$h = \frac{m}{\rho A} \quad (1.62)$$

**Kapazität** Bei dem kapazitiven Meßverfahren wird die Kapazitätsänderung eines Kondensators in Abhängigkeit vom Füllstand gemessen. Der Kondensator wird durch eine in das Füllgut eintauchende Sonde und die Behälterwand gebildet (Fig. 1.34). Die Kapazitätsänderung  $\Delta C$  mit steigendem oder fallendem Füllstand wird durch die unterschiedlichen Permittivitätszahlen  $\epsilon_r$  der Flüssigkeit und der darüber befindlichen Luft (Dampf) im Behälter hervorgerufen. Für die elektrische Kapazität eines Zylinderkondensators gilt

$$C = C_0 + \Delta C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)}{\ln(d/d_s)} h \quad (1.63)$$

mit  $C_0$  Kapazität des leeren Behälters  
 $\epsilon_0$  elektrische Feldkonstante.

Die Kapazitätswerte liegen im Picofarad-Bereich. Zur Erzielung eines genügend großen Meßeffektes muß man eine Wechselspannung hoher Frequenz (20 kHz bis 1 MHz) verwenden, mit der ein der Kapazitätsänderung proportionales Meßsignal erzeugt wird. Das kapazitive Meßverfahren ist nur anwendbar, wenn die Permittivitätszahl des Füllgutes konstant bleibt.

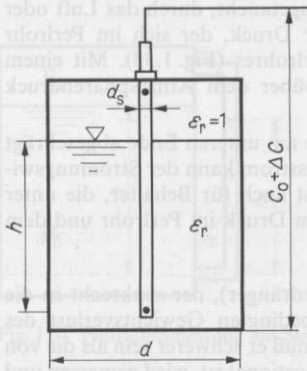


Fig. 1.34 Kapazitive Füllstandsmessung  
 $d$  Durchmesser des zyl. Behälters  
 $d_s$  Sondendurchmesser

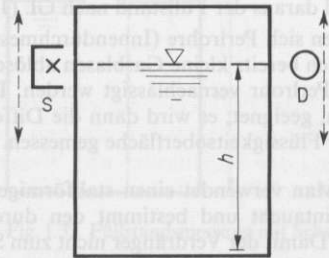


Fig. 1.35 Radioaktive Füllstandsmessung  
 $S$  Strahler  $D$  Detektor

**Radioaktivität** Bei der Füllstandsmessung auf Isotopenbasis wird die Absorption von radioaktiver Strahlung durch das Füllgut ausgenutzt. An dem Behälter wird auf der einen Seite die Strahlenquelle, ein radioaktives Isotop Co 60 oder Cs 137, und auf der gegenüberliegenden Seite ein Detektor (z. B. Geiger-Müller-Zählrohr) angeordnet (Fig. 1.35).

Die  $\gamma$ -Strahlung durchdringt geradlinig den Behälter. Durch die Bestrahlung mit  $\gamma$ -Quanten spricht das Zählrohr an und gibt elektrische Impulse ab, die in einen Gleichstrom umgewandelt werden. Es wird entweder nur ein Grenzstand detektiert oder die Messung wird über mehr oder weniger fein unterteilte Abschnitte (mehrere Detektoren, mehrere Strahler) durchgeführt. Wenn Strahler und Detektor dem Füllstand nachgeführt werden, kann der Füllstand kontinuierlich gemessen werden.

**Ultraschall** Die Grundlage der Füllstandsmessung mit Ultraschall beruht auf der Laufzeit des Schalls und seiner Reflexion an einer Flüssigkeitsoberfläche. Sender und Empfänger werden am

Behälterboden unterhalb der Flüssigkeit untergebracht. Der Sender gibt in kurzen Zeitabständen Schallimpulse ab. Die Schallwellen werden an der Flüssigkeitsoberfläche reflektiert und vom Empfänger aufgenommen. Die Laufzeit  $t$  des Schalls, die zwischen dem Aussenden und Empfangen des Impulses verstreicht, ist dem Füllstand  $h$  proportional

$$h = \frac{ct}{2} \quad (1.64)$$

$c$  Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit.

Als Schallfrequenzen eignen sich 50 kHz bis 5 MHz. Der Sensor (Sender und Empfänger) kann auch an der Behälterdecke angeordnet werden (Echolotprinzip). Die Laufzeit des Schalls in der Luft ist dann ein Maß für den Abstand des Sensors von der Flüssigkeitsoberfläche.

## 1.5.3 Mengenummessung strömender Fluide (A. Aschenbrenner, L. Narjes)

### 1.5.3.1 Einleitung

Die Mengenummessung strömender Fluide wird überwiegend in geschlossenen Rohrleitungen ausgeführt. Bei Flüssigkeiten insbesondere zur Messung von großen Wassermengen gibt es auch Meßverfahren, die in offenen Gerinnen oder Kanälen angewendet werden. Bei den meisten Meßgerätearten werden unmittelbar das Volumen und nur in wenigen Fällen die Masse bestimmt.

Folgende Meßprinzipien werden unterschieden:

- Zählermessung (Volumenzähler und Massezähler)
- Durchflußmeßverfahren mit Integration über der Zeit (Volumen oder Masse)
- Netzmessung: Geschwindigkeitsmessung an netzförmig über dem Strömungsquerschnitt verteilten Punkten und Integration über den Querschnitt und über der Zeit (primär Volumen).

Die Abgrenzung zwischen Zählermessung und Durchflußmeßverfahren läßt sich dabei nicht immer eindeutig festlegen. Die meisten Durchflußmeßgeräte lassen sich durch Anschluß eines geeigneten über der Zeit integrierenden Gerätes (eines Integrators) zu einem Zähler komplettieren. Umgekehrt kann man viele Zählerarten auch durch Anschluß nach der Zeit differenzierender Geräte für Durchflußmessungen einsetzen.

Für die Auswahl des richtigen Meßgerätes für den jeweiligen Zweck sind eine ganze Reihe von Kriterien zu beachten: Preis, Genauigkeit, Fluid (Flüssigkeit - Gas), Durchfluß (klein - groß, stationär - veränderlich oder pulsierend), Druck (niedrig - hoch), Temperatur, Viskosität, Fluid: sauber - verschmutzt, neutral - aggressiv, usw.

Folgende Anforderungen sind in der Regel an das Fluid zu stellen:

Das Fluid muß einphasig sein. Kolloidale Lösungen können dabei als einphasig angesehen werden. Die meisten Meßgeräte erfordern saubere Fluide, nur wenige Meßverfahren sind auch für schmutzhaltige Fluide, z. B. Abwasser, geeignet.

Bei Flüssigkeiten begnügt man sich häufig mit einer reinen Volumenmessung, da bei ihnen die Dichte nur in geringem Maße vom Druck und von der Temperatur abhängt. Bei Gasen, Dämpfen und verflüssigten Gasen dagegen ist diese Abhängigkeit so groß, daß zur Mengenbestimmung als Masse oder als Volumen in einem definierten Bezugszustand (z. B. Normzustand) zusätzlich zur Volumenmessung eine Messung der Dichte oder von Druck und Temperatur erforderlich ist.

Zusatzeinrichtungen (zusätzliche Meßgeräte), die während der Messung von Gasen kontinuierlich oder quasikontinuierlich das gemessene Volumen auf die Masse oder das Volumen im Normzustand umrechnen, heißen Umwerter (s. Albrecht (1979), Krebs (1993)).

### 1.5.3.2 Zähler

**Volumenzähler** Bei diesen unterscheidet man vom Meßprinzip her volumetrische (unmittelbare) Zähler und Strömungszähler (mittelbare Zähler, s. Schröder (1979), Orlicek (1971), Hengstenberg (1980), Matschke (1982), VDI-Berichte Nr. 254, Nr. 375 u. Nr. 768). Zähler müssen durch Vergleich mit Normalgeräten kalibriert werden. Als Basis-Normalgeräte werden Meßbehälter, Eichkolben, Meßglocken oder Kolbenmeßgeräte verwendet (s. 1.5.2 und 1.5.2.1). Die fundamentale Bestimmung der Normalgeräte erfolgt bei Flüssigkeiten über eine Wägung oder auch über eine geometrische Vermessung, bei Gasen über eine Verdrängung durch eine Flüssigkeit oder eine geometrische Vermessung. Eine direkte Wägung wird u. a. bei Gasen unter Hochdruck angewendet (s. Narjes (1978)).

Das Meßwerk der volumetrischen Zähler hat eine oder mehrere Meßkammern definierten Volumens, die periodisch gefüllt und entleert werden. Entsprechend ihrem Konstruktionsprinzip weisen diese Zähler einen mehr oder weniger großen periodischen Fehler auf, d. h. der Drehwinkel der Meßwerkswelle und das durchgeströmte Volumen sind im Verlauf einer Wellenumdrehung nicht proportional zueinander. Es gibt auch den Extremfall, daß bei einer hin- und hergehenden Bewegung der beweglichen Trennwand (Kolben) das Zählwerk springend fortgeschaltet wird. Volumetrische Zähler können Belastungsänderungen (Durchflußänderungen) recht gut folgen. Wegen des periodischen Fehlers sind sie meistens weniger geeignet zur Messung kleiner Volumina, es sei denn, man kann ganzzahlige Meßwerksumläufe bzw. -hübe anwenden. Erst nach einer mehr oder weniger großen Anzahl von Meßwerksumläufen wird der Einfluß des periodischen Fehlers vernachlässigbar.

Bei den Strömungszählern unterscheidet man Flügelrad- und Turbinenradzähler, bei denen ein mit Schaufeln versehenes Rad durch Strömungskräfte in Drehung versetzt wird, Wirbel- und Drallzähler, bei denen – durch entsprechende Einbauten erzeugte – periodische Strömungswirbel für die Zählung benutzt werden. Die Drehfrequenzen von Flügel- oder Turbinenrad bzw. die Wirbelfrequenzen sind proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit, d. h. zum Volumendurchfluß. Strömungszähler sind besonders gut für mittlere und große Durchflüsse geeignet.

Man unterscheidet folgende Volumenzähler-Bauarten (s. Tab. 1.4):

#### Volumetrische Zähler

– Zähler mit beweglichen Meßkammern (Trommelzähler). Sie besitzen eine Trommel, die in 3 bis 5 Kammern unterteilt ist. Da die Drehzahl sehr gering ist, ist das Bauvolumen groß. Trommelzähler für Flüssigkeiten werden vornehmlich zur Messung von Alkohol und anderen Flüssigkeiten niedriger Viskosität bei kleineren Durchflüssen eingesetzt.

Bei den Trommelgaszählern ist das Gehäuse bis zu etwa  $\frac{2}{3}$  mit einem dünnflüssigen Öl (Sperrflüssigkeit) mit geringem Dampfdruck gefüllt. Sie werden vornehmlich als Normalgeräte und Laborgeräte verwendet. Je nach Kammerzahl und Genauigkeitsansprüchen sind 3 bis 15 Meßwerksumdrehungen erforderlich, damit der periodische Fehler vernachlässigbar wird.

– Zähler mit verformbaren Trennwänden (Balgengaszähler). Bei ihnen werden zwei Räume durch Balgen oder Membranen in 4 Meßkammern unterteilt. Die Steuerung der Füllung und Entleerung der Meßkammern erfolgt meistens durch 2 Muschelschieber, seltener durch Ventile. Ihre Drehzahl ist etwa 8- bis 10mal höher als die von Trommelgaszählern. Etwa 25 Meßwerksumdrehungen sind erforderlich, damit der periodische Fehler vernachlässigbar wird.

– Zähler mit beweglichen Trennwänden. Für Flüssigkeiten sind Hubkolben-, Ringkolben-, Scheiben-, Treibschieber-, Drehklappen- und Ovalradzähler verbreitet. Für Gase gibt es Drehkol-

Tab. 1.4 Volumenzähler-Bauarten

Bezeichnung	Medium	Fehlergrenzen	Durchflußbereich	besondere Eigenschaften
Trommelzähler	Flüssigkeiten Gase	$\pm 0,5\%$	bis 1:100	niedrige Drehzahlen, d. h. großes Bauvolumen, relativ teuer, große periodische Fehler, maximale Durchflüsse bis $100 \text{ m}^3/\text{h}$
Balgzähler (Membranzähler)	Flüssigkeiten Gase	$\pm 0,5\%$ $\pm 2\% (\pm 3\%)*$	1:10 1:160	mittlere bis niedrige Drehzahlen, preiswert bei kleinen Durchflüssen, Bauvolumen und Preis hoch bei großen Zählern, große periodische Fehler, max. Durchflüsse bis etwa $400 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Gasen
Hubkolben-, Ringkolben-, Scheiben-, Treibschieber-, Drehklappen- und Ovalradzähler	Flüssigkeiten	$\pm 0,5\%$	1:10	mittlere Drehzahlen, Eignung für kleine bis mittlere Durchflüsse, kleinere periodische Fehler, maximale Durchflüsse bis $600 \text{ m}^3/\text{h}$
Drehkolbenzähler (DKZ) Drehsehleusen-	Gase	$\pm 1\% (\pm 2\%)*$	1:10 bis 1:100	mittlere Drehzahlen, wirtschaftlich für mittlere Durchflüsse, kleine periodische Fehler, Gefahr von Pulsationen und Resonanzschwingungen in den Rohrleitungen bei DKZ, maximale Durchflüsse bis $6500 \text{ m}^3/\text{h}$ , jedoch sehr teuer bei großen Durchflüssen
Flügelradzähler	Flüssigkeiten (Wasser)	$\pm 2\% (\pm 5\%)*$	1:50 bis 1:200	hohe Drehzahlen, preiswert, für kleine und mittlere maximale Durchflüsse bis $30 \text{ m}^3/\text{h}$
Turbinenzähler Wirbelzähler Drallzähler	Wasser andere Flüssigkeiten Gase	$\pm 2\% (\pm 5\%)*$ $\pm 0,5\%$ $\pm 1\% (\pm 2\%)*$	1:25 bis 1:100 1:10 1:10 bis 1:50	hohe Drehzahlen, für mittlere bis größte Durchflüsse, bei Flüssigkeiten bis $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ , bei Gas bis $25000 \text{ m}^3/\text{h}$ , empfindlich auf Störungen in der Zuströmung
Ultraschallzähler	Gase	$\pm 2\% (\pm 3\%)*$ $\pm 1\% (\pm 2\%)*$	1:160 1:50	für Haushaltsgaszähler für Großgasmessung

\*) Im unteren Teil des Durchflußbereiches sind die Fehlergrenzen größer.

ben- und Drehschleusenzähler. Diese Zähler sind schnellläufig. Zur Verringerung oder Vermeidung des periodischen Fehlers läßt man bei Hubkolbenzählern häufig mehrere Kolbenmeßwerke mit entsprechendem Kurbelversatz auf eine gemeinsame Kurbelwelle wirken. Für Ovalradzähler wurde hierzu ein besonderes Ausgleichsgetriebe entwickelt, bei dem das Übersetzungsverhältnis eine Funktion des Drehwinkels ist.

Bei Drehkolbengaszählern kommt es wegen des periodischen Fehlers zu Druck- und Durchflußpulsationen in den angeschlossenen Rohrleitungen. Im Resonanzfall können die Meßeigenschaften des Zählers beeinflußt werden (s. Eujen (1963)).

### Strömungszähler

– Beim Flügelradzähler wird ein mit radialen Schaufeln versehenes Rad tangential mit einem oder mehreren Flüssigkeitsstrahlen beaufschlagt (Einstrahl- und Mehrstrahlzähler).

– Turbinenradzähler werden überwiegend als Axialturbinen gebaut. Besondere Bauarten für Wasser werden auch als Woltmanzähler bezeichnet. Die Meßeigenschaften von Turbinenradzählern können u. U. durch Vorstörungen beeinflußt werden. Es empfiehlt sich deshalb, ein gerades Einlaufrohr mit einer Länge vom 5- bis 10fachen des Durchmessers vorzusehen. Turbinenradzähler, bei denen die Masse des rotierenden Turbinenrades (Trägheitsmoment) groß ist im Verhältnis zur durchströmenden Masse des Fluids (z. B. bei Zählern für Gas bei geringem Druck) können plötzlichen Durchflußänderungen nicht rasch folgen. Bei Fluiden geringer Dichte sollte deshalb der Durchfluß stationär sein.

Flüssigkeits-Turbinenradzähler sind besser für niedrigviskose Flüssigkeiten geeignet, es sei denn, sie haben eine Einrichtung zur Viskositätskompensation.

– Beim Wirbelzähler nutzt man den Effekt aus, daß die Wirbelfrequenz der Kármánschen Wirbelstraße hinter einem geeignet geformten Störkörper in einem größeren Reynoldszahlbereich direkt proportional zum Volumendurchfluß ist. Die Wirbel werden elektronisch gezählt, indem man z. B. die ausgelösten Druckschwankungen mit Piezokristallen oder die Geschwindigkeitsschwankungen mit Thermistoren detektiert.

– Beim Drallzähler wird der Strömung durch feststehende Leitschaufeln ein starker Drall erteilt. Im Austrittsdiffusor des Zählers wird der Wirbelkern dieser Drallströmung nach außen abgelenkt und damit zu einer Präzessionsbewegung auf einem Kegelmantel veranlaßt. Die Anzahl der Umläufe des Wirbelkerns ist ein Maß für das durchströmte Volumen. Die Zählung der Umläufe erfolgt ähnlich wie beim Wirbelzähler.

**Massezähler** mit unmittelbarer Erfassung und Zählung der Masse (direkte Massezähler) wurden bisher nur in einigen Bauarten für Flüssigkeiten und Hochdruckgase bis zur Serienreife entwickelt. Unterschiedliche physikalische Prinzipien können angewendet werden (s. Schröder (1979), S. 99–100, VDI-Berichte 254, S. 163–171, Landolt-Börnstein (1991), S. 2186/87)). Bei all diesen Prinzipien werden Trägheitskräfte des strömenden Fluids zur Messung ausgenutzt.

Bei einem Gerät z. B. wird dem Fluid durch einen Rotor ein konstanter Drall erteilt, der in einem nachfolgenden Strömungs-Gleichrichter wieder aufgehoben wird. Dabei wird auf diesen Gleichrichter ein Drehmoment ausgeübt, welches proportional zum Massedurchfluß ist und durch Integration über der Zeit die Masse ergibt.

In letzter Zeit wurden Systeme zur direkten Messung des Massenstromes (auch Massezähler) nach dem Coriolis-Prinzip unter Ausnutzung ausgefeilter elektronischer Hilfsmittel weiterentwickelt und auf Präzisionsprüfständen kalibriert (s. Mencke (1989)).

### 1.5.3.3 Durchflußmeßverfahren

Von den vielen bekannten Durchflußmeßgeräten sollen hier nur diejenigen beschrieben werden, die mittels integrierender Einrichtungen zu einer Volumen- oder Massezählung führen.

**Laminar-Durchflußmesser** Bei laminarer Strömung gilt für ein Rohr mit Kreisquerschnitt mit dem Innendurchmesser  $D$  und der Länge  $l$  folgende Durchflußgleichung für den Volumendurchfluß  $q_v$

als Funktion von Druckverlust  $\Delta p$  und Viskosität  $\eta$ :

$$q_v = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \eta l} \quad (1.65)$$

Das Meßverfahren setzt voraus, daß die Viskosität innerhalb der Verwendungsbedingungen (Grenztemperaturen) hinreichend konstant ist. Laminare Strömung herrscht in Rohren nur bei Reynoldszahlen  $Re < 2300$ . Dies erfordert bei vielen niedrigviskosen Fluiden die Verwendung von engen Kapillaren. Zur Messung größerer Durchflüsse werden viele Kapillaren in einem Drosselgerät parallel angeordnet.

**Durchflußmessung mit genormten Drosselgeräten** Die Durchflußmessung mit genormten Drosselgeräten wie Blenden, Düsen oder Venturirohre (s. VDI-Berichte 375, DIN 1952 u. ISO-Standard 5167) ist ein Verfahren zur Mengenummessung, bei dem der Meßwertgeber nicht mit dem Fluid kalibriert werden muß. Aus dem am Drosselgerät entstehenden Wirkdruck  $\Delta p$  errechnet sich der Durchfluß nach einer der folgenden Durchfluß-Gleichungen.

$$q_v = \frac{\pi d^2 C \varepsilon_1}{4 \sqrt{1 - (d/D)^4}} \sqrt{2 \Delta p / \rho_1} \quad \text{Volumendurchfluß im Betriebszustand} \quad (1.66)$$

$$q_m = \frac{\pi d^2 C \varepsilon_1}{4 \sqrt{1 - (d/D)^4}} \sqrt{2 \Delta p \rho_1} \quad \text{Massedurchfluß} \quad (1.67)$$

$$q_n = \frac{\pi d^2 C \varepsilon_1}{\rho_n^4 \sqrt{1 - (d/D)^4}} \sqrt{2 \Delta p \rho_1} \quad \text{Volumendurchfluß im Normzustand} \quad (1.68)$$

Der Durchflußkoeffizient  $C$  und die Expansionszahl  $\varepsilon$  sind aus der Norm zu entnehmen.  $D$  ist der Rohrdurchmesser,  $d$  ist der Öffnungsdurchmesser des Drosselgerätes. Außer dem Wirkdruck muß noch die Dichte des Fluides gemessen werden oder bekannt sein. Nachteilig für das Verfahren ist es, daß der Wirkdruck in den Gleichungen unter der Wurzel steht. Bei einem Durchflußbereich von 1:10 ergibt sich also ein Wirkdruckbereich von 1:100. Bei entsprechendem Aufwand lassen sich Meßunsicherheiten von 1% bis 2% erzielen.

**Ultraschalldurchflußmesser** Sowohl der Dopplereffekt als auch die Änderung der Laufzeit von Schallsignalen infolge der Strömungsgeschwindigkeit kann zur Geschwindigkeits- und damit Volumenmessung ausgenutzt werden. Letzteres Verfahren wird bevorzugt angewendet. Damit das Meßergebnis nicht von der Schallgeschwindigkeit des Fluids abhängt, läßt man das Schallsignal einmal schräge mit der Strömung durch das Rohr und einmal unter gleichem Winkel  $\varphi$  über die gleiche Weglänge  $l$  gegen die Strömung laufen. Der arithmetische Mittelwert  $u$  der Geschwindigkeit (Komponente in Richtung der Rohrachse) ergibt sich aus den Laufzeiten  $t_1$  und  $t_2$  zu:

$$u = \frac{l}{2 \cos \varphi} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (1.69)$$

Je nach Form der Geschwindigkeitsverteilung ist ein unterschiedlicher „Formfaktor“ zu berücksichtigen, der durch eine Kalibrierung bestimmt werden muß. Vorstörungen (unsymmetrische Geschwindigkeitsverteilungen) können sich stark auswirken. Das Verfahren erfordert zwar eine längere, gerade, störungsfreie Rohrleitung, erzeugt aber keinen zusätzlichen Druckverlust. Durch Anwendung der Durchschallung des Strömungsfluids in mehreren Ebenen erreicht man hohe Genauigkeit. Der Ultraschallzähler gewinnt daher zunehmende Bedeutung im amtlichen als auch gesetzlichen Meßwesen (s. Haefele (1991)).

**Magnetisch-induktive Durchflußmesser** Erzeugt man quer zu einem Rohr ein magnetisches Feld, so wird nach dem Faradayschen Induktionsgesetz in einer durch das Rohr fließenden, leitfähigen Flüssigkeit eine elektrische Spannung induziert, deren Höhe proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist.

Bei modernen Geräten sind die Pole der Elektromagnete und die Elektroden für den Spannungabgriff so ausgebildet, daß alle Flächenelemente des Rohrquerschnittes nahezu gleich bewertet werden. Schmutzige Flüssigkeiten, selbst Abwasser, Schlämme oder dicke Breie können gemessen werden. Das Fluid muß je nach Geräteausführung mindestens eine Leitfähigkeit von etwa  $1 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  bis  $10 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  haben.

### 1.5.3.4 Netzmessung

Bei der Netzmessung wird die Ermittlung eines Volumendurchflusses auf eine punktweise (Netzkpunkte) Geschwindigkeitsmessung und Integration über den Querschnitt zurückgeführt. Das Meßprinzip ist insbesondere für große und größte Strömungsquerschnitte geeignet. So kann z. B. der Durchfluß in Flußläufen oder in Kanälen von Wasserkraftwerken bestimmt werden. Da die Geschwindigkeitsmessung auf die Messung der Basisgrößen Weg und Zeit zurückzuführen ist, kann das Verfahren auch zur Kalibrierung anderer Volumendurchflußmeßgeräte dienen (s. VDI-Berichte Nr. 254, Schröder (1979), S. 98–99).

Folgende Geschwindigkeitsmeßverfahren werden angewendet:

– Messung des Staudruckes mittels Strömungs sonden, z. B. Pitot-Rohr oder Staurohr nach Prandtl.

Beim Staurohr nach Prandtl (s. Fig. 1.36) wird an der Anströmseite des Sondenkopfes der Gesamtdruck (Ruhedruck)  $p_g$  und an seitlichen Bohrungen oder Schlitzen der statische Druck  $p_s$  abgegriffen. Aus der Differenz  $p_g - p_s$ , dem Staudruck, errechnet sich für die inkompressible Strömung die Geschwindigkeit  $u$  zu:

$$u = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_g - p_s)} \quad (1.70)$$

- Hitzdrahtanemometer.
- Hydrometrischer Flügel, Flügelrad- oder Schalenkreuzanemometer.
- Laser-Doppler-Anemometer. Diese ermöglichen äußerst präzise Messungen (s. Durst (1976), Dopheide (1980), (1982) u. (1990)).

Die Geschwindigkeitsmessung muß bei instationärer Strömung an allen Netzknoten gleichzeitig erfolgen (hoher Geräteaufwand); bei stationärer Strömung können die Messungen mit nur einem Gerät nacheinander an den einzelnen Netzknoten ausgeführt werden.

Zu den Fehlern der Geschwindigkeitsmessungen addieren sich die Fehler bei der Integration. Bei Düsenströmungen (nahezu rechteckförmiges Geschwindigkeitsprofil) kann der Integrationsfehler

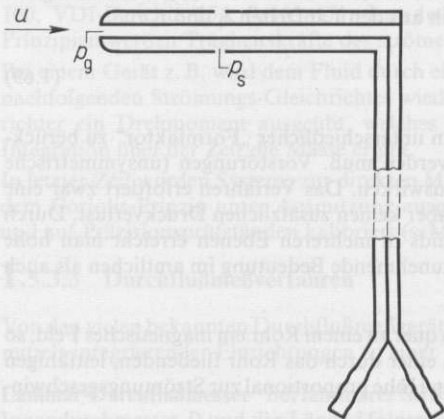


Fig. 1.36  
Staurohr nach Prandtl



auf Bruchteile eines Promille herabgedrückt werden. Bei Rohren mit Kreisquerschnitt liegt er im Promillebereich. Bei Rohren mit Rechteckquerschnitt und sehr ungünstigen Geschwindigkeitsverteilungen kann er auch ein oder mehrere Prozent erreichen.

### Literatur zu 1.5

- Albrecht, A. (1979): PTB-Prüfregeln Bd. 14, Zustands-Mengenurwerter
- Aschenbrenner, A. (1989): Calibration of the new test rig for large gas meters of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt. VDI-Berichte Nr. 768, ISSN 0083-5560, S. 11-22
- Aschenbrenner, A.; Narjes, L. (1974): Untersuchung des Feuchteinflusses auf den Durchfluß durch Düsen bei überkritischem Druckverhältnis. PTB-Mitt. **84**, 381-385
- Baehr, H. D. (1992): Thermodynamik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Bonfig, K. W.; Liske, A. (1972): Füllstand-Meßtechnik. Bad Wörlshofen: Hans Holzmann
- Dopheide, D.; Narjes, L. (1980): Volumendurchflußmessung von Gasen mit einem Laser-Doppler-Anemometer. VDI-Bericht Nr. 375, S. 37-46. Düsseldorf: VDI
- Dopheide, D.; Strunck, V.; Krey, E.-A. (1993/94): Three-component Laser Doppler Anemometer for Gas Flowrate Measurements up to 5500 m<sup>3</sup>/h. Metrologia **30**, 453-469
- Dopheide, D.; Taux, G.; Krey, E.-A. (1990): Entwicklung eines neuen fundamentalen Meßverfahrens zur genauen Durchflußmessung von Gasen mittels Laser-Doppler-Anemometrie. PTB-Mitt. **100**, 333-342
- Durst, F.; Melling, A.; Whitelaw, J. H. (1976): Principles and Practice of Laser - Doppler-Anemometry. London, New York, San Francisco: Academic Press
- Eujen, E. (1963): Untersuchungen über die Meßeigenschaften von Hochdruckgaszählern, I. Teilbericht. GWF **104**, 301-312
- Haefele, G. (1991): Gaszähler nach dem Ultraschallprinzip. GWF **132**, S. 507-511
- Hengstenberg, J.; Sturm, B.; Winkler, O. (1980): Messen, Steuern und Regeln in der Chemischen Technik, S. 191-445, 589-639. Bd. I. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Jaeschke, M.; Andibert, S.; van Caneghem, P.; Humphreys, A. E.; Janssen-van Rosmalen, R.; Pellei, Q.; Michels, J. P. J.; Schouten, J. A.; Ten Seldam, C. A. (1988/1989): High Accuracy Compressibility Factor Calculation for Natural Gases and Similar Mixtures by Use of an Truncated Virial Equation. GERG Technical Monograph TM2 (1988) und Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6 (1989) Nr. 231
- Krebs, H.; Joest, R.; Krüger, G.; Feuerbach, W.; Hauser, H.; Jarosch, B.; Märkl, W. (1993): PTB-Prüfregeln Band 20: Elektronische Mengenumwerter für Gas
- Landolt-Börnstein (1991): Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik. Neue Serie Einheiten und Fundamentalkonstanten in Physik und Chemie, Teilband a: Einheiten in Physik und Chemie (2.3.1.2 Volumes; 2.3.1.9 Mass Flow)
- Matschke, R.; Schlieter, H.; Aschenbrenner, A. (1982): PTB-Prüfregeln Bd. 4, Volumengaszähler
- Matschke, R. (1983): Volumenmessung strömender Gase, Grundlagen und Praxis. Düsseldorf: VDI Verlag
- Mencke, D. (1989): Mass Flow Measurement, Proc. Int. Conf., London: IBC Technical Services Ltd
- Narjes, L.; Spencer, E. A.; Eujen, E. (1978): Proc. of FLOMEKO. Amsterdam, New York, Oxford: North Holland Publishing Company, p. 553
- Orlicek, A.; Reuther, F. (1971): Zur Technik der Mengen- und Durchflußmessung von Flüssigkeiten. München, Wien: Oldenbourg
- Profos, P. (1974): Handbuch der industriellen Meßtechnik, S. 289-304. Essen: Vulkan
- Richtlinie VDI/VDE 3519 (1982): Füllstandmessung von Flüssigkeiten und Feststoffen (Schüttgütern). Düsseldorf: VDI
- Sauer, R. (1960): Einführung in die theoretische Gasdynamik, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Schlichting, H. (1965): Grenzschicht-Theorie, 5. Aufl. Karlsruhe: G. Braun
- Schröder, A. (1979): Durchflußmeßtechnik - eine Übersicht, Technisches Messen, S. 91-100, 145-149, 179-188
- Shapiro, A. H. (1953/54): The Dynamics and Thermodynamics of compressible Fluid Flow, Vol I and II: New York: The Ronald Press Company
- Strohrmann, G. (1987): Meßtechnik im Chemiebetrieb. München, Wien: Oldenbourg
- Truckenbrodt, E. (1989 u. 1992): Fluidmechanik Band 1 (1989) u. 2 (1992). Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- VDI-Berichte Nr. 231 (1975): Füllstand-Meßtechnik, Düsseldorf: VDI Verlag
- VDI-Berichte Nr. 254 (1976): Durchfluß-Meßtechnik. Düsseldorf: VDI Verlag