

## 7 Durchflussmessung

### Einleitung

Neben der Temperatur und dem Druck ist der Durchfluss eine weitere sehr wichtige Messgrösse für Energieberechnungen (Fragestellungen wie: Wie viel Erdgas/Benzin/Erdöl wurde geliefert, wie gross ist die von einer Heizung abgegebene Leistung wenn Vor- und Rücklaufemperatur bekannt sind, etc), aber auch für z.B. Prozesse in der chemischen Industrie und der Lebensmittelindustrie. Die Durchflussmessung findet allgemein an Fluiden statt, d.h. sowohl an Flüssigkeiten wie auch an Gasen; es gibt Messverfahren die nur für Gase oder nur für Flüssigkeiten funktionieren sowie Verfahren die für beides gehen.

Grundsätzlich muss bei der Durchflussmessung zwischen Massenströmen (auch Massendurchfluss, Massenfluss) und Volumenströmen unterschieden werden:

$$\text{Massenstrom } \dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

$$\text{Volumenstrom } \dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

Bei bekannter (und konstanter) Dichte  $\rho$  können Volumen- und Massenstrom natürlich ineinander umgerechnet werden:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

Da die Dichte je nach Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck) insbesondere bei Gasen schwanken kann, ist der Massenstrom die fundamentalere Messgrösse. Auch wenn es um chemische Reaktionen geht interessiert hauptsächlich die Anzahl Moleküle (d.h. Masse) und nicht das zugeführte Volumen.

### Prinzipien

Bei der Durchflussmessung gibt es eine sehr grosse Anzahl von Messprinzipien; vermutlich mehr als bei jeder anderen Messgrösse! Es stehen unter anderem folgende Verfahren zur Auswahl

- Volumenzähler
- Wirkdruckverfahren
- Stauscheiben und Schwebekörper
- Magnetisch-induktive Durchflussmesser
- Wirbelzähler
- Ultraschall (Laufzeit und Dopplereffekt)
- Thermische Verfahren
- Coriolis

...und selbst diese lange Liste ist noch nicht ganz vollständig! Die beiden letzten Messverfahren messen direkt den Massendurchfluss, die anderen einen Volumendurchfluss; dort muss also eine zusätzliche Dichtemessung bzw eine bekannte Dichte vorliegen, damit auf einen Massenfluss geschlossen werden kann.

Je nach Verfahren wird der Durchfluss über den ganzen Querschnitt integriert, oder aber nur die Strömungsgeschwindigkeit punktuell gemessen. Im zweiten Fall muss das Strömungsprofil bekannt sein, um auf den gesamten Durchfluss zu schliessen. Die verschiedenen Messverfahren unterscheiden sich auch in ihrer Rückwirkung auf das Fluid – es können erhebliche Druckverluste entstehen, die je nach Anwendung unproblematisch oder sehr störend sein können.

Meist ist der dynamische Messbereich bei der Durchflussmessung „klein“ ( $< 1:100$ ) (denken Sie an die Kraftmessung mit DMS zurück wo man problemlos  $1:10'000$  erreicht)

## 7.1 Volumenstrommessungen

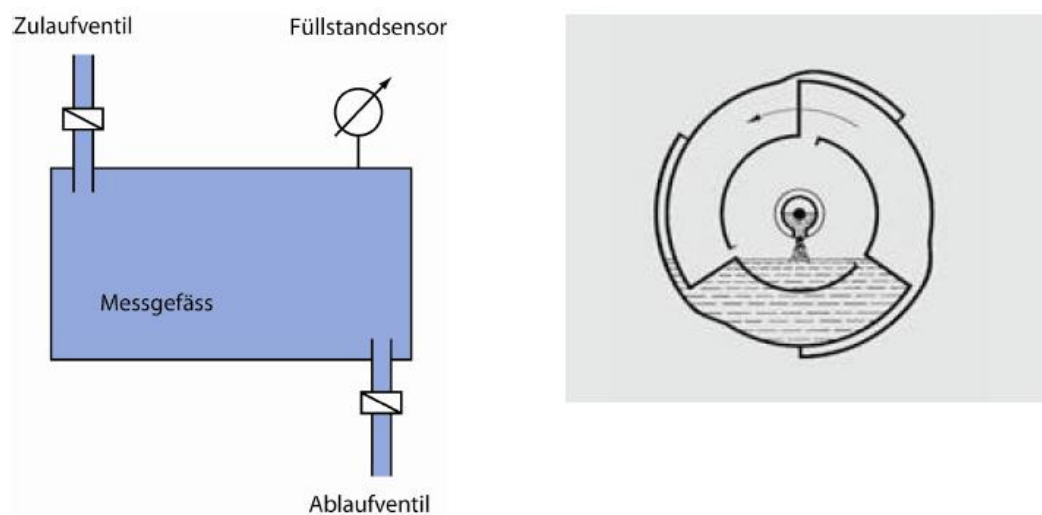
### Volumenzähler, Auslaufzähler

Es gibt verschiedene Sorten von Volumenzählern. Sie erfassen – wie es der Name sagt – Volumenströme.

Die Auslaufzähler basieren alle auf demselben Prinzip wie ein Getränk im Offenausschank: Dort wird ein definiertes Volumen (Glas) mit einem Fluid (Bier) befüllt. Aus der Anzahl Stangen/Stunde kann dann auf den Durchfluss durch den Biertrinker geschlossen werden. Die Flüssigkeit wird also in definierte Pakete aufgeteilt, und die Anzahl dieser Pakete wird gezählt.

Es gibt ganz viele Varianten dieser Grundidee, man kann sie aufteilen in Methoden mit fixen Wänden und Methoden mit beweglichen Wänden (etwas komplizierter).

Bei fixen Wänden kann man eine ganz einfache Variante bauen die der Methode mit dem Bier sehr ähnelt (Auslaufzähler), oder etwas raffinierter wie im Trommelzähler, wo eine Umdrehung einer Trommel eine definierte Volumenmenge bewegt; die Flüssigkeitszufuhr kann im Trommelzähler kontinuierlich erfolgen, anders als beim einfachen Auslaufzähler. Die Trommel fängt an sich zu drehen sobald genügend viel Flüssigkeit in ihr steckt, weil die Flüssigkeit asymmetrisch in der Trommel verteilt ist. Dadurch läuft die Flüssigkeit aus, und der Prozess beginnt wieder von vorne.



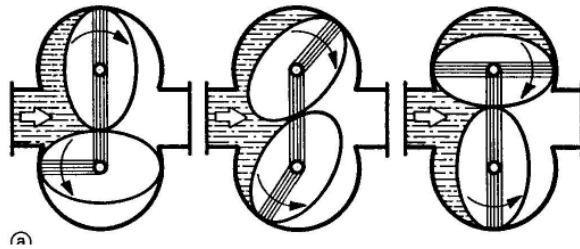
**Abbildung 7-1: einfacher Auslaufzähler mit gesteuerten Zu- und Ablaufventilen (links), Trommelzähler (rechts).**

Im Auslaufzähler wird die Anzahl der Ventilöffnungen pro Zeiteinheit registriert und in den Durchfluss umgerechnet, im Trommelzähler wird der Durchfluss aus der Anzahl Umdrehungen der Trommel errechnet. Während der dargestellte Auslaufzähler über einen Füllstandsensor überwacht und gesteuert werden muss, wird der Trommelzähler durch die Flüssigkeit selbst bewegt.

Die Auslaufzähler mögen altmodisch wirken, sie sind aber sehr präzise, und ebenfalls sehr robust, und eignen sich besonders für Fluide mit vielen Schwebeteilchen (z.B. Schlämme), da es keine empfindlichen Teile in dem Messaufbau hat.

### Verdrängungs- zähler

Bei den Verdrängungszählern sind die Kammerwände der Volumenpakete der Flüssigkeit nicht fest - im Gegensatz zu den Auslaufzählern. Auch die Verdrängungszähler kann man in den verschiedensten Varianten bauen, hier dargestellt ist ein Ovalradzähler, dasselbe Prinzip kann auch anders umgesetzt werden.



**Abbildung 7-2: Prinzip des Ovalradzählers**

In einem Ovalradzähler sind zwei ovale Räder ineinander verzahnt. Bei Flüssigkeitsdurchfluss drehen die Ovalräder und lassen pro Umdrehung jeweils ein definiertes Volumen durch. Da die Ovalräder gut ineinandergreifen müssen, damit die Anordnung dicht ist, resultiert ein merklicher Gegendruck.

Die Umdrehung kann z.B. induktiv erfasst werden, indem ein Magnet in eines der Ovalräder eingebracht wird.

Es gibt noch weitere Verdrängungszähler (Zahnradzähler, Ringkolbenzähler, Treibschieberzähler), die sich durch die geometrische Anordnung, nicht aber durch das Messprinzip unterscheiden.

Allgemein lässt sich festhalten, dass Verdrängungszähler folgende Vorteile aufweisen:

- Hohe Verlässlichkeit
- Hohe Messgenauigkeit (Größenordnung 0.1-0.5%) da die einzelnen Volumina die gezählt werden genau bestimmt werden können
- Auch bei hochviskosen Stoffen einsetzbar (Messprinzip unabhängig von Viskosität und Strömungsprofilen)

Dafür haben Sie auch folgende Nachteile:

- Messung zum Teil nur in eine Fließrichtung möglich (Beispiel Trommelzähler oben, der Ovalradzähler geht in beide Richtungen)
- Durch Volumenpakete entstehen in der Leitung Pulsationen
- Gute Dichtungen sind erforderlich um die einzelnen Volumina richtig voneinander abzugrenzen; Verschmutzung kann Dichtung stören, d.h. das Prinzip eignet sich nicht für dreckige Fluide; Dichtungen gehen mit der Zeit durch Verschleiss kaputt.
- Hoher Druckabfall
- Baugröße proportional zum Durchfluss (ergibt für grosse Flüsse grosse Sensoren)

Aufgrund der hohen Genauigkeit werden diese Zähler an Orten eingesetzt wo es die Genauigkeit auch braucht, z.B. bei Dosiersystemen in der chemischen Industrie, oder an Tankstellen wo es um viel Geld geht.

### Video

Schauen Sie das Video zum Zahnradzähler auf der Webseite und beantworten Sie die Frage dazu.

### Volumenzähler mit Messflügeln

Anstelle von dicht schliessenden Volumenpaketen können Turbinenräder in die Strömung eingebaut werden, die bei Durchfluss rotieren, ohne dass der Durchfluss in diskrete Volumenpakete zerlegt wird (Bauform ähnlich wie eine Windturbine zur Stromerzeugung). Dadurch vermeidet man die Nachteile der Verdrängungszähler (Pulsationen, Verschmutzungsanfälligkeit, Baugrösse, Druckabfall). Selbstverständlich hat dieses Prinzip auch seine Nachteile:

- Das Strömungsprofil muss gut ausgebildet sein, d.h. es braucht im Gegensatz zu den Verdrängungszähler eine „Einlaufstrecke“: über eine bestimmte Länge darf die Leitung keine Krümmungen vor dem Zähler aufweisen (ein typischer Wert für diese Länge ist  $10\text{-}20 \cdot D$ , wo  $D$  der Leitungsdurchmesser ist)
- Die Reibung der Lager sowie die mögliche Rückwirkung der Drehzahlmessung verfälscht das Ergebnis besonders bei tiefen Strömungsgeschwindigkeiten

Die „Turbine“ kann auch radial angeordnet werden; man nennt dies einen Flügelradzähler. Er wird z.B. als Wasserzähler im Haushalt verwendet.

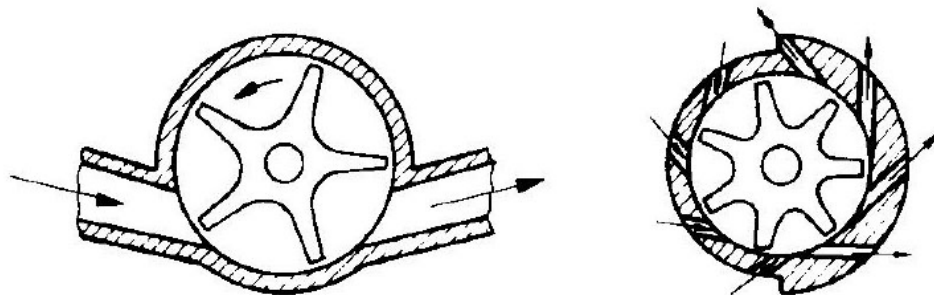


Abbildung 7-3: Flügelradzähler. Links: Einstrahlzähler, Rechts: Mehrstrahlzähler.

Abschliessend können wir festhalten, dass die Volumenzähler umso genauer sind, je dichter ihre Messkammern schliessen. Dadurch steigen aber auch der Strömungswiderstand (und der Gegendruck/Druckabfall), wie auch die mechanische Trägheit, d.h. die genaueren Verfahren haben grössere Ansprechzeiten.

### Aufgabe

Lösen Sie die Aufgabe zum tropfenden Wasserhahn auf der Webseite (unter dem Video Zahnradzähler)

### Flügelräder für Messungen an Lüftungsanlagen

In modernen Gebäuden sind automatische Lüftungsanlagen (Komfortlüftungen) sehr oft anzutreffen. Will man an diesen Lüftungsanlagen messen ob die Luftmengen korrekt eingestellt sind, so ist das oft nicht ganz einfach, u.a. weil die Strömung an Einlass und Auslass nicht symmetrisch ist.

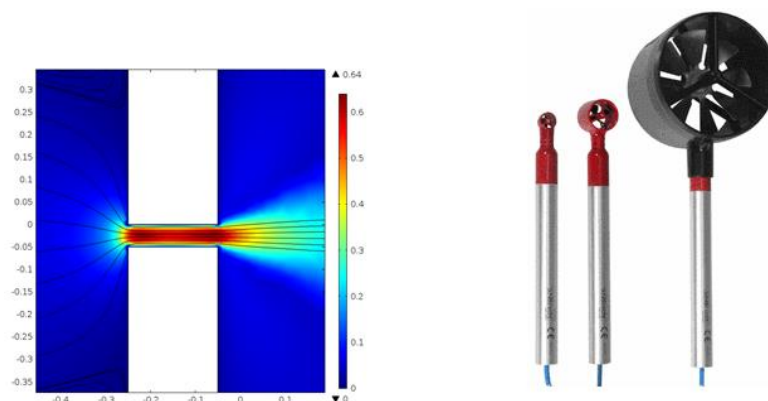


Abbildung 7-4: asymmetrische Strömung bei Einlass (links) und Auslass (rechts) eines Lüftungskanals; Flügelrad-Strömungsmessgeräte mit unterschiedlichen Durchmessern.

### Messung beim Kanalaustritt

Beim Kanalaustritt (Zuluft in den Raum) ist die Strömung meist einigermaßen gerichtet und kann vergleichsweise leicht gemessen werden. Man nimmt praktischerweise ein Messgerät mit einem grossen Flügelrad, das eine integrierende Wirkung hat. Stehen nur kleine Flügelräder zur Verfügung, so muss über den Kanalquerschnitt gemittelt werden. Eine einfache Methode dafür ist, dass man mit dem Gerät gleichmässig über den ganzen Querschnitt fährt und den zeitlichen Mittelwert bildet, oft haben die Messgeräte aus diesem Grund einen Modus in dem ein zeitlicher Mittelwert direkt vom Gerät gebildet werden kann.

### Messung beim Kanaleintritt

Beim Kanaleintritt (Abluft aus dem Raum) sind die Strömungslinien überhaupt nicht parallel, und die Messung ist viel schwieriger als beim Kanalaustritt. Man behilft sich mit sogenannten Strömungstrichtern, die man über den Kanaleintritt stülpt. Der Strömungstrichter produziert eine definierte Messebene in der die Strömungslinien parallel sind.

### Demo Jetair

~~Wir versuchen die Luftmenge eines Jetair-Lüfters im mst-Labor zu bestimmen~~

Schauen Sie statt der Demo das Video zur Kanalströmungsmessung auf der Webseite, das den Einsatz von Messtrichtern demonstriert.

### Wirkdruckverfahren

Eine ganz andere Klasse von Strömungsmessungen basiert auf der Bernoulli-Gleichung; sie bildet die Basis für die sogenannten Wirkdruckverfahren. Entlang einer Stromlinie im Fluid gilt:

$$\frac{\rho}{2} v^2 + \rho gh + p = \text{const}$$

Diese Tatsache kann auf zwei Arten ausgenutzt werden: indem das Fluid nur verlangsamt wird (Blenden/Düsen), oder indem es ganz zum Stillstand gebracht wird (Stauplatte).

### Video Bernoulli

Schauen Sie auf der Webseite das erste Video unter Düse/Blende mit Demo Bernoulli!

### Blenden und Düsen

Verengt man ein Rohr, in dem ein Fluid fliesst, so vergrössert sich die Fliessgeschwindigkeit ( $v$ ) und dadurch sinkt der Druck ( $p$ ). Misst man zwischen der engeren und der weiteren Stelle den Differenzdruck, so kann auf den Durchfluss geschlossen werden.

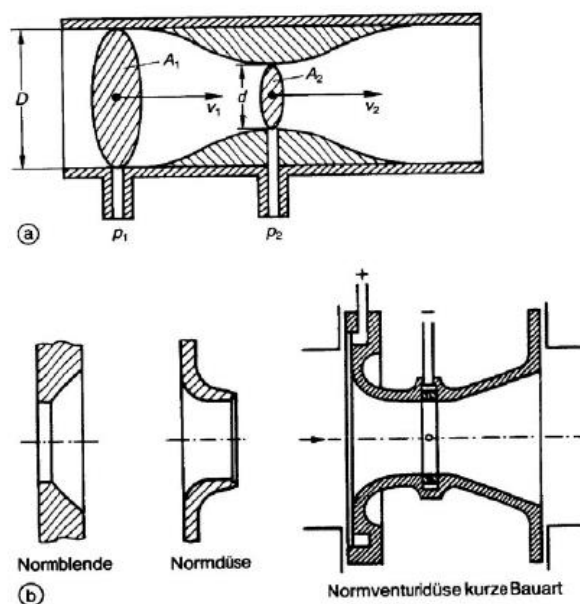


Abbildung 7-5: Bauformen von Blenden und Düsen - die einzelnen Varianten sind in Normen beschrieben

Löst man die Bernoulli-Gleichung nach dem Durchfluss auf (Querschnitt \* Strömungsgeschwindigkeit), so erhält man einen volumetrischen Durchfluss, der proportional zu  $\sqrt{\frac{1}{\rho}(p_1 - p_2)}$  ist. Man erkennt an der funktionalen Abhängigkeit sofort zwei interessante Tatsachen:

- (1) Die Kennlinie ist grundsätzlich nichtlinear (was nie schön ist). Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten kleiner, d.h. der Messfehler wird dort besonders gross.
- (2) Die Dichte geht im Nenner unter der Wurzel in das Resultat ein. Die Differenzdruckmessung ist also weder eine Volumen- noch eine Massenstrommessung! Es braucht für beide Messgrößen noch eine Umrechnung mit Hilfe einer Dichtemessung.

Düsen und Blenden sind billig und einfach und darum auch weit verbreitet, allerdings haben diese Verfahren ernsthafte Nachteile:

- Ein bleibender Druckabfall nach der Messung bedeutet eine deutliche Rückwirkung auf den Prozess bzw. auch einen Energieverlust bei der Messung
- Der Messbereich ist ziemlich eingeschränkt aufgrund der quadratischen Kennlinie (bis ca. 1:10)

Beim Einbau stimmt die Messung gut, später können Rost / mechanische Beschädigung und/oder Verstopfung der Düse die Messgenauigkeit verringern.

#### Video

Schauen Sie auf der Webseite das zweite Video unter Düse/Blende und lösen Sie die Aufgaben dazu

#### Durchflusszahl

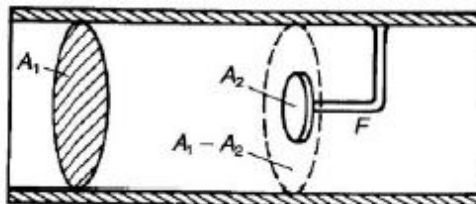
Die genaue Gleichung für den volumetrischen Fluss einer Blende mit Öffnung A ist

$$\dot{V} = vA = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$\alpha$  ist die „Durchflusszahl“ und ist in den Normen angegeben.

#### Stauscheibe

Anstelle der Verlangsamung des Fluids kann es auch ganz zum Stillstand gebracht werden. Man misst dann die Kraft, die auf eine sogenannte Stauscheibe ausgeübt wird:



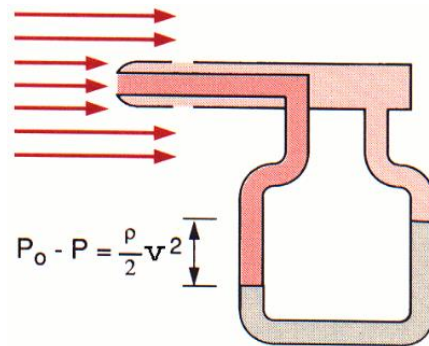
**Abbildung 7-6: Stauscheibe. Die Kraft auf die Stauscheibe wird z.B. mit einem DMS gemessen.**

$$\text{Hier gilt: } F = c_w \cdot A_2 \frac{1}{2} \rho v^2$$

Dabei ist  $c_w$  der „Luftwiderstandsbeiwert“ der Stauscheibe (etwas mehr als 1).

**Pitot- oder Prandtl-Rohr**

Im Pitotrohr bzw Prandtl-Staurohr wird durch geschickte geometrische Anordnung direkt die Druckdifferenz zwischen fließender und stillstehender Strömung gemessen. Der Begriff Prandtl-Rohr ist im deutschsprachigen Raum üblich, der Begriff Pitotrohr im englischsprachigen Raum, aber das Prinzip ist dasselbe:

**Abbildung 7-7: Prandtlisches Staurohr**

Das Prandtlische Staurohr wird gerne auf Flugzeugen zur Luftgeschwindigkeitsmessung eingesetzt. Da die Dichte der Luft ins Ergebnis einfließt muss sie separat gemessen werden.

**Abbildung 7-8: Pitot-Sonde an einem Flugzeug.**

Falls eine der Öffnungen des Rohrs verstopft (wegen Dreck oder Eis) so funktioniert die Messung nicht mehr. Mehrere Flugzeugabstürze sind auf vereiste Pitotsonden zurückzuführen (zB. Air France Flug 447, 2009, oder Saratov-Airlines Flug 703, 2018).

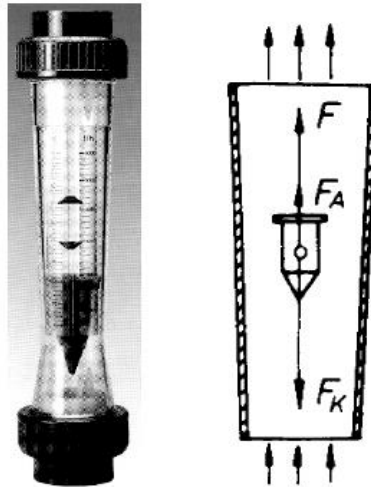
**Eigenschaften der Wirkdruckverfahren**

Die Wirkdruckverfahren sind generell einfach, besitzen keine bewegten Teile und sind darum robust und günstig. Nachteilig ist der eingeschränkte dynamische Messbereich aufgrund der quadratischen Kennlinien.

**Schwebekörper-Durchfluss-Messgeräte**

Anstelle der fest montierten Stauscheibe kann auch ein beweglicher Schwebekörper verwendet werden, der sich in einem vertikalen Rohr befindet. Die Gewichtskraft wird durch die Auftriebskraft und die Kraft, die das Fluid auf den Schwebekörper ausübt, kompensiert. Damit die Position des Schwebekörpers durchflussabhängig wird, macht man das Rohr konisch – oben hat es einen größeren Durchmesser als unten. Dadurch erreicht man, dass der Strömungsquerschnitt grösser wird, wenn sich der Schwebekörper nach oben bewegt, wodurch die Kraft auf den Schwebekörper sinkt, so dass sich ein stabiles Gleichgewicht ausbildet.

Der Schwebekörper wird so gebaut, dass er in der Strömung um seine Achse rotiert, damit er stabiler ist. Die ersten Schwebekörper-Durchflussmesser wurden von einer Firma Rota hergestellt; daher sind diese Instrumente bis heute auch als Rotameter bekannt.



**Abbildung 7-9: Prinzip des Rotameters**

Das Rotameter wird so abgelesen dass die Oberkante des Schwabkörpers mit der Skala verglichen wird. Der angezeigte Messwert hängt von Dichte und Viskosität des Fluids ab (ist also z.B. für jedes Gas unterschiedlich, und druckabhängig!). Der Einbau muss immer vertikal erfolgen. Als Vorteile des Rotameters sind zu nennen: tiefer Preis, Funktionsfähigkeit ohne Hilfsenergie, Messung von sehr kleinen Volumenströmen möglich mittels sehr dünner Rohre.

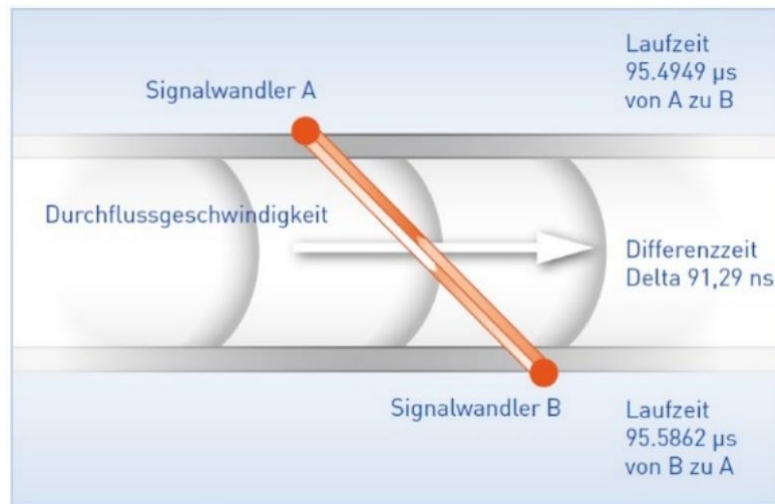
Das klassische Rotameter kann nur manuell abgelesen werden (von Auge). Da das Rohr aus Glas besteht, besteht die Gefahr dass es bei Überdruck bricht. Die Rohre sind daher im Allgemeinen durch ein zweites Gehäuse geschützt. Es gibt auch Rotameter in Ganzmetallausführung für die Messung von Fluiden mit hohem Druck, wo das Glasrohr mechanisch zu wenig stabil wäre. Die Messung der Position des Schwabkörpers im Innern des Metallrohrs kann z.B. magnetisch erfolgen.

## Ultraschall

Ultraschallmessungen kennt man aus dem Alltag vor allem als Abstandsmessungen, z.B. bei Einparkhilfen von Autos. Bei der Ultraschall-Durchflussmessung macht man sich zunutze, dass die Laufzeit eines Ultraschallpulses zwischen Sender und Empfänger in der Flüssigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist. Läuft der Puls mit der Strömung, so ist die Laufzeit etwas kürzer als bei ruhendem Fluid.

Die Schallgeschwindigkeit ist allerdings temperaturabhängig, so dass eine direkte Auswertung der Laufzeit von einem Sender zu einem Empfänger sehr fehleranfällig ist. Man löst dieses Problem indem man einmal mit und einmal entgegen der Strömungsrichtung misst, was in Abbildung 7-10 dargestellt ist. Durch die Laufzeitdifferenzmessung können auch Strömungen in beide Richtungen detektiert werden. Beachten Sie dass die zu messenden Laufzeitdifferenzen sehr kurz sind! Mit heutiger Elektronik ist die Messung dieser kleinen Laufzeitdifferenzen allerdings überhaupt kein Problem mehr.

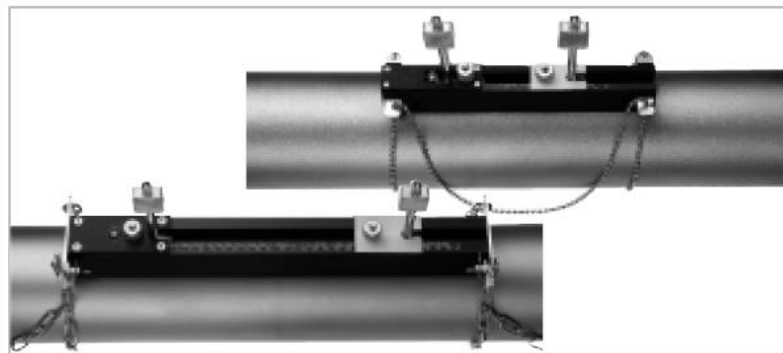




**Abbildung 7-10: Strömungsmessung mit Ultraschall**

Ultraschall-Durchflussmesser haben im Heimbereich als Wärme- oder Kältezähler grosse Verbreitung gefunden (auch "Energiezähler", "Wärmemengenzähler"). Ein Wärmezähler misst gleichzeitig eine Temperaturdifferenz und einen Volumenstrom und kann so auf eine Wärmeleistung schliessen. Im Gebäudebereich werden sie oft eingesetzt, z.B. um eine individuelle Heizkostenabrechnung zu ermöglichen oder um die Arbeitszahl von Wärmepumpen zu überwachen. Kompakte Ultraschall-Wärmezähler sind bereits für wenige hundert CHF erhältlich, und kosten nur unwesentlich mehr als mechanische Wärmezähler, die wie die Wasserzähler im Haushalt mit einem Flügelrad funktionieren.

Besonders interessant am Ultraschall-Durchflussmessverfahren ist, dass es auch ausserhalb des Rohrs angebracht werden kann, d.h. man kann eine Kontrollmessung an einer Anlage durchführen, ohne in den Betrieb einzugreifen.



**Abbildung 7-11: "Clamp-on" Ultraschallmessgerät**

Damit die „Clamp-on“ Ultraschallmessung funktioniert, muss allerdings die Ankopplung ans Rohr genügend gut sein, und die Eigenschaften des Rohrs müssen bekannt sein (der Ultraschall geht auch durch die Rohrwand hindurch!).

Da im Rohr ein Strömungsprofil ausgebildet ist, integriert das Ultraschall-Durchflussmessgerät über den Weg des Ultraschall-Strahls. Für genauere Messungen gibt es Geräte mit mehreren Sendern und Empfängern, so dass das Strahlprofil besser gemessen werden kann.

#### Video Ultraschall

Schauen Sie auf der Webseite das Video zur Ultraschallmessung und lösen Sie die Aufgaben dazu

### Magnetisch-induktive Flusssensoren (MID)

Ein ganz anderes Messprinzip ist für leitende Flüssigkeiten (keine Gase!) anwendbar – das magnetisch-induktive Verfahren (MID). Es ist für leitende Flüssigkeiten (d.h. fast alles was mit Wasser zu tun hat) meist die erste Wahl.

Es erinnert vom Prinzip her stark an den Hall-Sensor zur Strommessung: das Rohr mit dem Fluid durchfließt ein Magnetfeld, das senkrecht zur Flussrichtung steht. Dadurch wirkt auf die elektrischen Ladungen in der Flüssigkeit die Lorentz-Kraft ( $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ ), die die Ladungen so lange verschiebt, bis das dadurch generierte elektrische Feld die Lorentz-Kraft kompensiert. Damit dies funktioniert, muss das Rohr aus einem nichtmagnetischen Material gefertigt sein, und innen isolierte Elektroden aufweisen, an denen die entstehende Spannung gemessen werden kann. Die gemessene Spannung  $U$  ist proportional zu der Fließgeschwindigkeit. Es gilt der einfache Zusammenhang

$$U = k \cdot B \cdot D \cdot v$$

Wobei  $B$  das Magnetfeld,  $D$  der Rohrdurchmesser und  $v$  die Fließgeschwindigkeit sind. Die Proportionalitätskonstante  $k$  hängt von der Gerätegeometrie ab, ist aber ungefähr 1.

Damit das Messprinzip funktioniert, muss die Flüssigkeit eine minimale Leitfähigkeit aufweisen (Größenordnung  $0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), gewisse relevante Flüssigkeiten können mit diesem Messprinzip nicht gemessen werden (z.B. Benzin, Öl). Gut einsetzbar ist es für Wasser & Abwasser, alle Säuren und Laugen, Schlämme, Breie, Pasten, Säfte usw.

Die Vorteile der MID-Sensoren sind unter anderem

- Kein Druckabfall
- Verschleißfrei da keine bewegten Teile
- Lineares Signal
- Auch für aggressive Medien möglich
- Bidirektionale Strömungsmessung

### Video MID

Schauen Sie auf der Webseite das Video zur magnetisch-induktiven Durchflussmessung und lösen Sie die Aufgaben dazu.

### Wirbelzähler

Der MID funktioniert nur für leitfähige Flüssigkeiten und nicht für Gase. Für diese Fälle gibt es eine faszinierende Art, Durchflüsse zu messen: der sogenannte Wirbelzähler (oder Vortex – Englisch für Wirbel). Er macht sich zunutze, dass hinter einem Störobjekt in einer Strömung Wirbel entstehen. Die Wirbel lösen sich regelmässig rechts und links von dem Störobjekt. Dieses Phänomen lässt sich an Brückenpfeilern beobachten, tritt aber auch sonst in der Natur auf.



Abbildung 7-12: Wirbelablösung hinter einem Brückenpfeiler (Grafik: Wikipedia)

Die Anzahl der Wirbel, die sich pro Sekunde ablöst – die Wirbelfrequenz  $f$  – ist gegeben durch

$$f = \frac{v}{d} Sr$$

Wobei  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit,  $d$  die Dimension des Störkörpers und  $Sr$  die Strouhalzahl sind. Über sehr weite Bereiche der Reynoldszahl ( $100 - 10^6$  !) ist  $Sr \approx 0.2$ , d.h. die Wirbelfrequenz  $f$  ist in guter Näherung proportional zu der Strömungsgeschwindigkeit. Bei zu tiefen Reynoldszahlen (laminare Strömung) findet keine Wirbelablösung mehr statt, und das Messprinzip versagt.

Die Wirbel können auf verschiedene Art detektiert werden. Man kann beispielsweise DMS oder Piezoelemente im Rohr montieren, die die Wirbel als Druckschwankung sehen. Die Wirbel können ebenfalls mit Ultraschall nachgewiesen werden. In allen diesen Fällen hat es am Sensor kein einziges bewegliches Teil (!), was ihn besonders robust macht.

Als weitere Möglichkeit bietet sich an, die Wirbelablösung am Störkörper direkt zu detektieren – wegen  $actio = reactio$  führt jede Wirbelablösung zu einer Kraft am Störkörper. Man kann beispielsweise den Störkörper an einem induktiven Wegsensor aufhängen, und kleinste Bewegungen des Störkörpers nachweisen.

Die Vorteile des Wirbelzählers sind

- Kaum Druckverlust
- Wenig empfindlich gegen Viskositäts- Temperatur- und Dichteschwankungen
- Funktioniert für Gas, Flüssigkeiten sowie Dampf
- „Lebenslängliche“ Kalibration da kaum Abnutzung
- Lineare Kennlinie

Natürlich gibt es auch Nachteile

- Mindestdurchfluss erforderlich (man kann nicht unterscheiden ob das Fluid ganz ruht oder noch langsam bewegt)
- Vibrationen der Anlage können den Sensor stören
- Messung nur in einer Strömungsrichtung möglich
- Wirbel nach dem Sensor können Pulsationen erzeugen
- Es braucht sowohl Einlauf- wie auch Auslaufstrecken zum Sensor hin (keine Ventile, Knicke etc. in der Leitung in der Nähe des Sensors)

Wirbelzähler werden oft zur Messung von Dampf (Nass-, Satt-, und überhitzter Dampf) eingesetzt. Da der Wirbelzähler „nur“ einen Volumenstrom misst, man sich aber meist für den Energietransport interessiert, werden Sie häufig mit Druck- und Temperatursensoren kombiniert.

### **Video Wirbelzähler**

Schauen Sie auf der Webseite das Video zum Wirbelzähler und lösen Sie die Aufgaben dazu.

## 7.2 Massenstrommessungen

### Thermische Verfahren

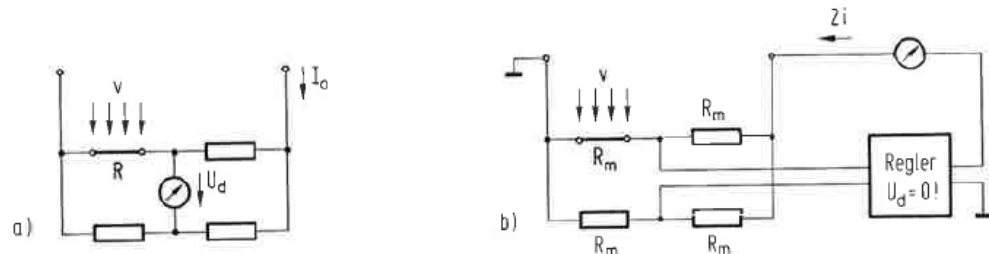
Bei den thermischen Verfahren wird ausgenutzt, dass vorbeiströmendes Gas einen heißen Gegenstand abkühlt. Da die Wärmeübertragung mikroskopisch gesehen auf die einzelnen Moleküle des Gases erfolgt, spielt der Gasdruck dabei keine Rolle; das Verfahren misst die Anzahl Gasmoleküle die zur Abkühlung beitragen, und damit direkt einen Massenstrom. Allerdings sind sowohl die Wärmeleitfähigkeit wie auch die Wärmekapazität von Gasen Stoffeigenschaften, d.h. dieser Sensortyp muss für ein bestimmtes Gas kalibriert werden, und darf dann nur für dieses Gas eingesetzt werden, bzw. nur mit entsprechenden Umrechnungsfaktoren auch für andere Gase.

Es gibt diverse Ausführungen von thermischen Massenflussmessern. Die einfachste Version heisst Hitzdrahtanemometer. In dieser Ausführung wird ein Widerstandsdraht mit einem Konstantstrom  $I$  beheizt, und die am Draht abfallende Spannung  $U$  kann in einen temperaturabhängigen Widerstand  $R$  umgerechnet werden, womit bei Kenntnis der Kennlinie  $R(T)$  die Temperatur bestimmt werden kann, und damit schliesslich der Durchfluss; denn je kühler der Draht ist, desto grösser ist der Durchfluss. Diese Variante ist als CCA bekannt (constant current anemometry) – es ist eine Ausschlagsmethode.

Die entsprechende Kompensationsmethode existiert auch – in ihr wird die Temperatur des Drahts auf einem konstanten Wert gehalten, indem der Strom durch den Draht geregelt wird (CTA für constant temperature anemometry). Hier ist der Strom ein Mass für den Durchfluss. CTA ist besser als CCA, weil der Draht bei konstanter Temperatur weniger schnell altert, und weil die Reaktionszeit viel schneller ist, da sich keine langsamen Temperaturänderungen stabilisieren müssen.

### Auswerteschaltungen

Wie üblich wird die Auswertung über eine Messbrücke vorgenommen. Im Falle von CCA/CTA sieht die entsprechende Messbrücke wie folgt aus:



**Abbildung 7-13: Messbrücke für CCA (links) und CTA (rechts) (aus: Schröder, elektrische Messtechnik, Hanser)**

Die Variante für CCA ist eine Ausschlags-Viertelbrücke (mit entsprechenden Nichtlinearitäten), die Variante für CTA ist eine Abgleichbrücke, und damit auch „von selbst“ genauer.

### Kennlinie

Die Kennlinie der Hitzdrahtanemometer ist nichtlinear, allerdings auf eine „angenehme“ Weise (im Gegensatz zu den Blenden/Düsen): Die Steigung der Kennlinie ist bei tiefen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich grösser als bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, so dass der relative Fehler der Messung etwa konstant ist, d.h. der Fehler kann jeweils in % vom Messwert angegeben werden (Im Gegensatz zu den Blenden/Düsen, wo der Messfehler bei tiefem Durchfluss sogar absolut gesehen ansteigt!). Mathematisch kann die Kennlinie beschrieben werden als:

$$I^2 = a + b \cdot \sqrt{Q}$$

### Umgebungs- einfluss

Bei den bisher besprochenen Hitzdrahtanemometern wurde die Umgebungstemperatur nicht berücksichtigt, d.h. wenn die Umgebungstemperatur steigt, so würde ein kleinerer Durchfluss „detektiert“. Dies ist natürlich ungünstig bzw für eine reale Messung unerwünscht. Man kann entweder einen zusätzlichen Temperatursensor benützen und versuchen diesen Einfluss herauszurechnen, oder, viel besser, eine differentielle Messung ausführen:

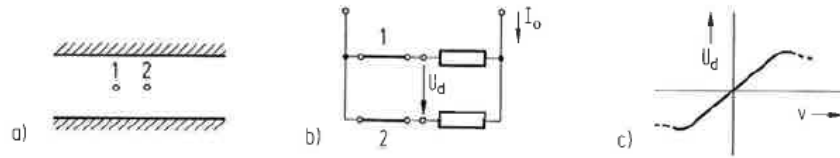


Bild 7.22: Differential-Hitzdraht-Anemometer

- a) In einem Strömungskanal sind die beiden Sonden 1 und 2 hintereinandergeschaltet
- b) Brückenschaltung
- c) Kennlinie

### Abbildung 7-14: differentieller Hitzdrahtsensor (aus: Schrüfer, elektrische Messtechnik, Hanser)

In einer möglichen differentiellen Anordnung werden 2 Hitzdrähte hintereinander in der Strömung montiert, und zusammen in der Messbrücke so verschaltet, dass eine Differenztemperatur gemessen wird. Ist die Strömungsgeschwindigkeit null, so ist die Temperatur der Drähte gleich, und die Ausgangsspannung der Brücke ist auch null. Fließt eine Strömung, so wird der stromabwärts liegende Draht wärmer, da er vom anderen Draht erwärmt wird. Die Ausgangsspannung der Messbrücke ist also ein Mass für den Durchfluss, das nicht mehr von der Umgebungstemperatur abhängt. Als weiterer Vorteil gibt das Vorzeichen der Spannung die Durchflussrichtung an.

Thermische Durchflussmessgeräte können Massenströme messen, sind aber wie die Rotameter stoffabhängig, d.h. nur für ein bestimmtes Gas korrekt kalibriert; wird ein anderes Gas mit ihnen gemessen muss ein Umrechnungsfaktor benützt werden. Mit differentieller Messung in einer Messbrücke können sehr kleine Durchflüsse (ml/min) gemessen werden. Die Kompensationsmethode (CTA) ist – wie üblich – das bessere Messverfahren als das Ausschlagsverfahren (CCA).

### Video thermische Massefluss- sensoren

Schauen Sie auf der Webseite das Video zu den thermischen Masseflussmessern, und das Video mit dem Anwendungsbeispiel dazu

### Kanalströmung

Die Messung von Strömungen in Lüftungskanälen ist in der Klimatechnik relevant, und wir haben bereits früher die Messung mit Flügelradanemometern und Messtrichtern gesehen. Will man im Kanal selber die Strömung messen, dann kommen entweder sehr kleine Flügelräder oder Hitzdrahtanemometer zum Einsatz. Die Hitzdrahtanemometer sind aufgrund der Form der Kennlinie für „kleine“ (typisch  $v < 5\text{m/s}$ ) genauer als die Flügelräder, und umgekehrt.

Will man in einem Kanal eine Strömung messen, so muss man darauf achten dass die Sonde „klein“ ist, d.h. dass sie den Kanalquerschnitt möglichst wenig beeinträchtigt – andernfalls wird die Strömung lokal beschleunigt (wie bei Blenden/Düsen).

Um ein unbekanntes Strömungsprofil auszumessen, teilt man den Kanal in N gleich grosse Querschnitte ein, und misst in der Mitte jedes dieser Teilstücke („Netzmessung“). Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich als Mittelwert der Einzelmessungen. Bei rechteckigen Kanälen ist dies leicht („Schachbrett“), bei Rohren muss man etwas mehr überlegen.

**Coriolis**

Der Coriolis-Durchflussmesser ist das Nonplusultra der Durchflussmesstechnik, ist aber auch entsprechend teuer! Dieser Sensortyp misst einen Massenstrom, unabhängig von der Art des Fluids, und dazu auch gleich noch die Dichte des Fluids. Oft wird auch ein Temperatursensor integriert, so dass man eine sehr vollständige Beschreibung des Fluids erhält.

**Der Coriolis-Effekt**

Der Coriolis-Effekt tritt in rotierenden System auf; man kann ihn sich als eine "Scheinkraft" vorstellen die durch die Rotation des Systems entsteht. Er ist verantwortlich dafür dass Luftströmungen auf der Erde auf der Nordhalbkugel nach rechts, und auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt werden, was zu den bekannten Wolkenmustern auf Satellitenbildern führt.



**Abbildung 7-15: Satellitenbild mit spiralförmigen Wolken aufgrund des Corioliseffekts**

**Video Corioliseffekt**

Falls Sie den Corioliseffekt nicht schon irgendwo erklärt bekommen haben, so schauen Sie das erste Video unter Coriolis auf der Webseite dazu.

Der Coriolis-Sensor basiert auf der Trägheitskraft. Ein gerades Rohr wird um eine U-förmige Schleife ergänzt. Das Rohr wird in Schwingung um seine Achse versetzt. In der Schleife tritt nun die Corioliskraft auf, so dass sich das U-Rohr bei Durchfluss verbiegt. Die Verbiegung ist ein Mass für den Durchfluss, und zwar für den Massenfluss. Die Eigenfrequenz der Schwingung wird langsamer bei grösserer Masse, man kann also von der Frequenz der Schwingung auf die Dichte des Fluids schliessen. Baut man noch einen Temperatursensor ein, so werden gleichzeitig Massenstrom, Dichte und Temperatur des Fluids bestimmt.

**Video Coriolis-Durchflusssensor**

Schauen Sie nun noch das Video zum Coriolis-Durchflusssensor auf der Webseite an.

Abschliessend zeigt die folgende Tabelle die Eignung der einzelnen Durchflussmessprinzipien für verschiedene Einsatzgebiete

	Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte	Schwebekörper-Durchflussmessgeräte	Ultraschall-Durchflussmessgeräte	Masse-Durchflussmessgeräte	Wirbelfrequenz-Durchflussmessgeräte	Durchflusskontrollgeräte
	Seite 8-17	Seite 18-25	Seite 26-33	Seite 34-41	Seite 42-47	Seite 48-53
Flüssigkeiten						
Flüssigkeiten (z. B. Wasser)	x	x	x	x	x	x
Geringe Durchflussraten (<2 l/h)	x	x	-	x	-	-
Hohe Durchflussraten (> 100000 m³/h)	x	-	x	-	-	x
Nichtleitfähige Flüssigkeiten	-	x	x	x	x	o
Viskose Medien	x	o	o	x	o	o
Gase						
Industrielle Gase	-	x	x	x	x	-
Geringe Durchflussraten (< 20 l/min)	-	x	o	x	-	-
Hohe Durchflussraten	-	o	x	x	x	-
Dampf	-	o	x	o	x	-
Spezialanwendungen						
Schlamm, Medien mit Feststoffanteil	x	-	-	o	-	-
Emulsionen (Öl/Wasser)	o	x	o	x	o	o
Korrosive Flüssigkeiten (Säuren, Laugen)	x	x	x	x	o	o
Korrosive Gasströme	-	o	x	o	o	-
Bidirektionale Messung	x	-	x	x	-	o
Ausführung						
2-Leiter	x	x	-	-	x	x
4-Leiter	x	-	x	x	-	-

x = geeignet, o = bedingt geeignet, - = nicht geeignet

Abbildung 7-16: Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Messprinzipien – Massedurchfluss bezieht sich nur auf Coriolis-Durchflussmessgeräte (Quelle: Krohne; [www.krohne.com](http://www.krohne.com))