

MESSEN VON STOFF- UND ENERGIESTRÖMEN

TECHNISCHE DURCHFLUSSMESSUNG

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Wintersemester 2016/2017

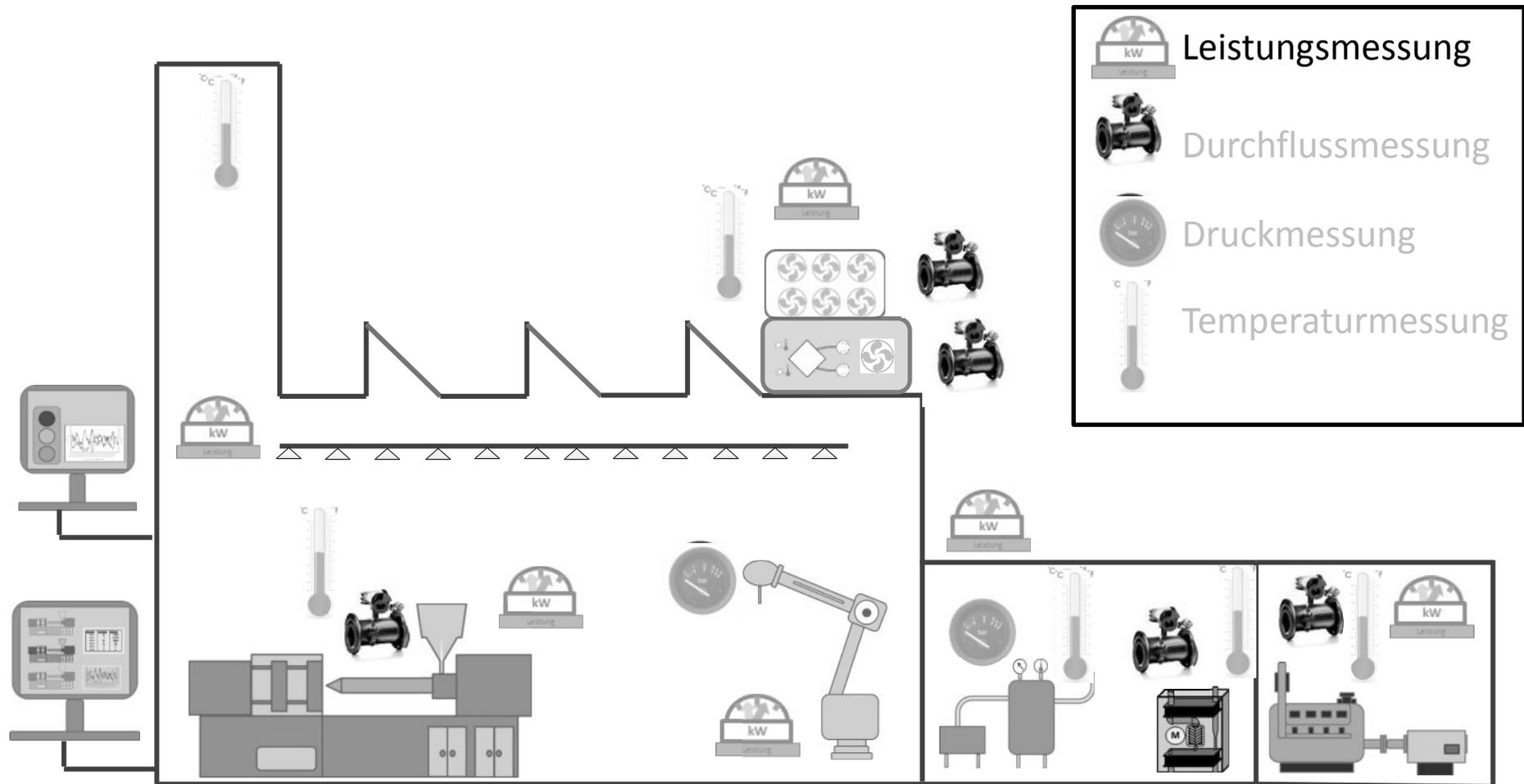


Inhalte der Vorlesung

- **Historie / Einführung**
- **Grundlagen**
- **Stand der Technik**
- **Mengenmesser**
 - Volumetrische Messverfahren
- **Durchflussmesser**
 - Wirkdruckverfahren
 - Laminar-Flow-Elemente
 - Schwebekörper-Durchflussmessung
 - Coriolis-Durchflussmessung
 - Hitzdrahtmethode
 - Lasermessverfahren
 - Magnetisch-induktive Durchflussmessung
 - Wirbelfrequenz-Durchflussmessung
 - Ultraschall-Strömungsmessung
- **Anwendungsbeispiele**

Messtechnik im Industriebetrieb

Durchflussmessung

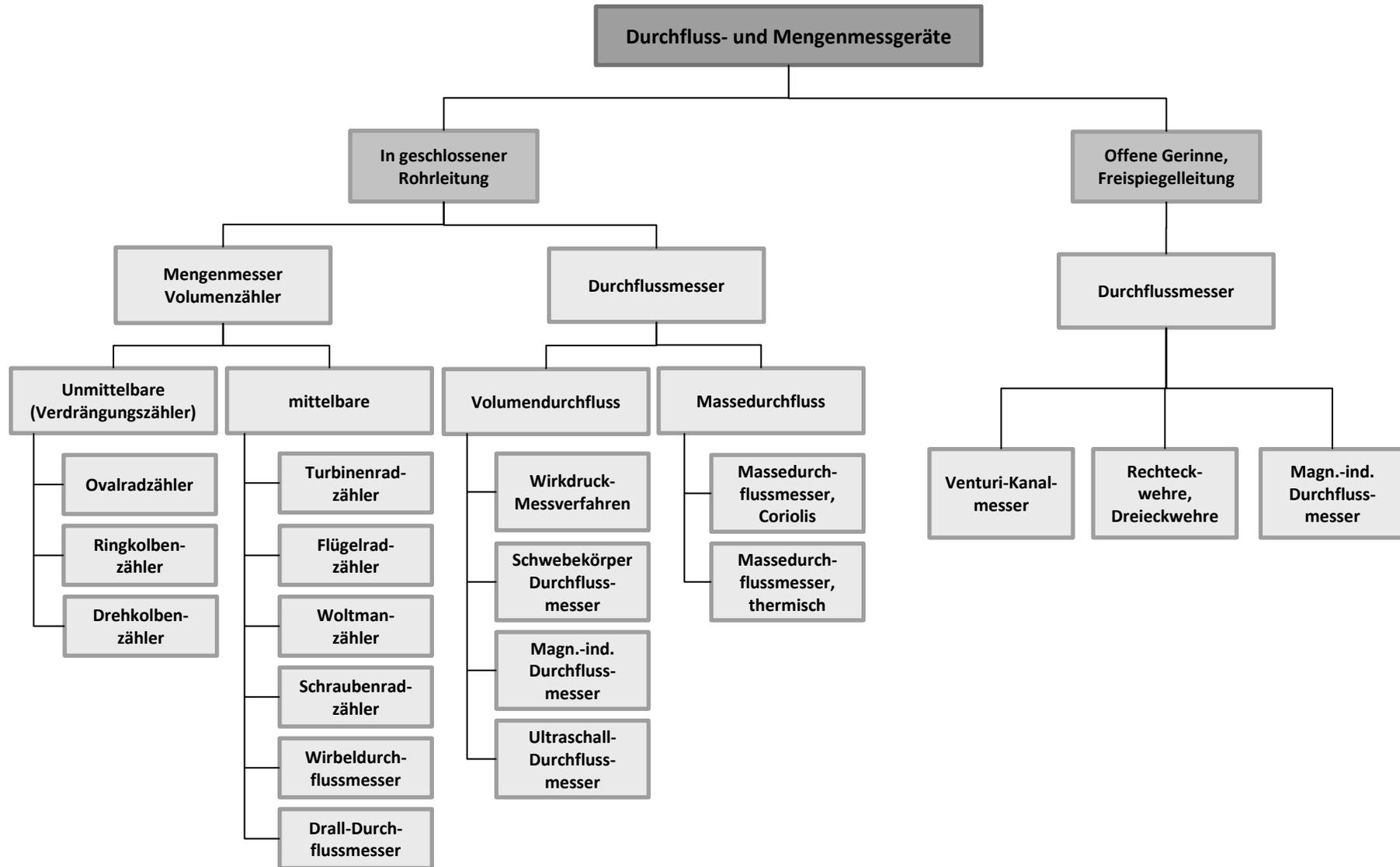


HISTORIE / EINFÜHRUNG

Einführung zur Durchflussmessung

- Die Durchflussmessung ist nach Temperatur und Druck die wichtigste Messgröße in der industriellen Messtechnik
- Sie stellt in der verfahrenstechnischen Industrie eine wesentliche Grundlage in der Prozessautomatisierung dar
- Viele klassische und bewährte Messverfahren konnten insbesondere durch den Einsatz moderner Mikroelektronik weiterentwickelt und ihre Eigenschaften und Funktionen verbessert werden
- In vielen Messgeräten werden Mikroprozessoren zu einer lokalen Vorverarbeitung der Messwerte genutzt
- So wird z.B. die Linearisierung, Filterung, Mittelwertbildung und Berücksichtigung von Fluidparametern wie z.B. Dichte, Temperatur und Viskosität im Durchflussmessgerät realisiert

Übersicht Messtechniken



Mengen- und Durchflussmesser

Unterscheidung

- **Mengenmesser** (Volumenzähler) grenzen Teilvolumina ab und integrieren diese zu Gesamtvolumen
 - **Unmittelbar**: mit beweglichen Messkammern mit eindeutig definiertem Volumen
 - **Mittelbar**: mechanisch über Flügelräder oder elektrisch über mengenproportionale Impulse
- **Durchflussmesser** erfassen die Fließgeschwindigkeit oder kinetische Energie in der Strömung, um indirekt auf den Volumenstrom zu schließen

Durchflussmessung

- Die Messverfahren der Durchflussmessung für die Messung und Automation industrieller Prozesse unterscheiden sich in:
 1. akustische Verfahren
 2. gyroskopische Verfahren
 3. magnetisch-induktive Verfahren
 4. mechanisch-volumetrische Verfahren
 5. optische Verfahren
 6. thermische Verfahren
 7. Wirkdruck-/Stauverfahren

Übersicht Messtechniken

Messgerät	Grundlage	Abhängigkeit	besondere Eigenschaften
Volumenzähler	a) volumetrisch b) Geschwindigkeit	Drehzahl	
Blende Düse Venturidüse Staudruck Rohrkrümmer Gerade Rohre	Wirkdruck Zentrifugalkraft Reibung	Druck	örtlich
Drosselklappe Schwebekörper	Widerstand	Weg	
Höhendifferenz Impfverfahren	konstanter Druck Indikation	Höhe Zeit Konzentration	
Magnetisch-induktiv Ionisationsanemometer Koronaanemometer	elektrisch	Spannung Strom	örtlich
Hitzdraht Thermosonde Kaltleiter Aufheizverfahren	thermisch	Temperatur	örtlich
Wirbel-DFM	Strömungswirbel	Frequenz	
Ultraschall	Schallausbreitung	Laufzeit Abdrift Frequenz (Doppler)	
Kernresonanz	Kernresonanz	Strom	
Laser	Lichtausbreitung	Laufzeit Frequenz (Doppler)	örtlich
Schwingkörper		Dichte	
Korrelationsverfahren		Laufzeit	

Tabelle: Übersicht über unterschiedliche Messverfahren

Auswahl des Messverfahrens

Auswahlkriterien

- Messbereich
 - Genauigkeit
 - Preis
 - Temperaturbereich
 - Baugröße
 - Medium (Gas/Flüssigkeit)
 - Strömungsart (turbulent/laminar)
 - Störungen durch das Messgerät
- Bei der Auswahl eines geeigneten Messverfahrens kann die VDI-Norm „Auswahl und Einsatz von Durchflussmesseinrichtungen“ herangezogen werden (VDI/VDE 2644:2001-09)

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Durchfluss

Definition

- Durchfluss ist das Verhältnis aus der Menge des strömenden Mediums, differenziert nach derjenigen Zeit, in der diese Menge einen Leitungsquerschnitt durchfließt

- Durchfluss in Volumeneinheiten: $q_v = \dot{V} = \frac{dV}{dt}$

- Durchfluss in Masseneinheiten: $q_m = \dot{m} = \frac{dm}{dt}$

- Zwischen den Größen besteht die Beziehung: $q_m = \rho * q_v$

Physikalische Grundlagen

Viskosität

- Vermögen einer Flüssigkeit gegen Formänderungen Widerstand zu leisten
- Ursache ist innere Reibung als Folge der Krafteinwirkung zwischen den Molekülen
- temperaturabhängig

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{\text{Pa} * \text{s} * \text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Physikalische Grundlagen

Reynoldszahl

- Das vorherrschende Strömungsprofil ist von der Reynoldszahl abhängig, diese wiederum vom Massenstrom, der Viskosität und dem Rohrrinnendurchmesser
- Die kritische Reynoldszahl, in deren näherer Umgebung eine laminare Strömung zu einer turbulenten Strömung umschlägt, liegt bei etwa $Re = 2300$

$$Re = \frac{4}{\pi} * \frac{\dot{m}}{d * \eta}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
η	dynamische Viskosität	kg/(m*s)
d	Rohrrinnendurchmesser	m
\dot{m}	Massenstrom	kg/s

Strömungsarten

- Ein Querschnitt durch ein laminares Strömungsprofil ist immer parabelförmig, da das Fluid durch die Reibung an der Rohrwand gebremst wird
- Die Geschwindigkeit in der Rohrmitte ist am größten
- Bei einer turbulenten Strömung ist das Strömungsprofil durch die chaotischen Teilchenbewegungen ausgeglichener

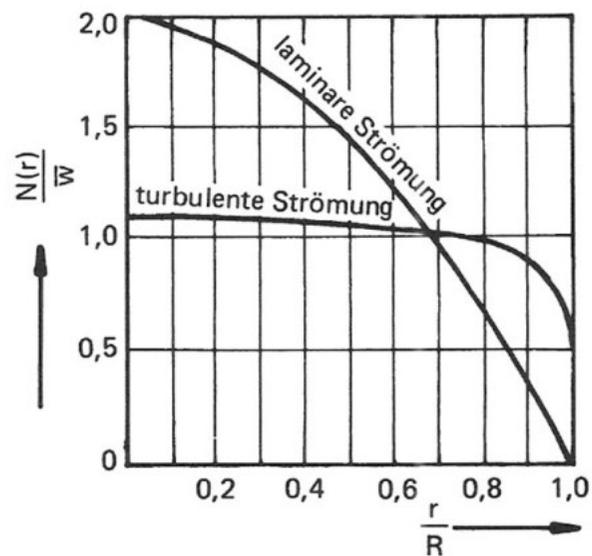


Abb. links: Profil einer realen Strömung

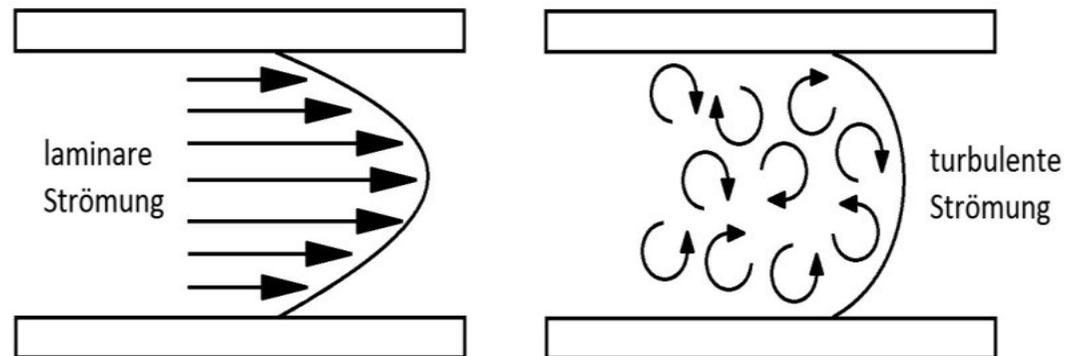


Abb. rechts: Strömungsprofil laminarer und turbulenter Strömung

Strömungsprofile

Reibungsverluste

- Das Fluid wird durch die innere Reibung erwärmt
 - Dieser Beitrag müsste in der Bernoulli-Gleichung als Wärmeenergie berücksichtigt werden
- In einer turbulenten Strömung tritt dabei durch die turbulenten Wirbelbewegungen und den dadurch verstärkten Reibungsverlusten ein höherer Druck- bzw. Energieverlust als bei einer laminaren Strömung auf

Physikalische Grundlagen (I)

Energiegleichung und Durchfluss

Energie der Lage:

$$m * g * h$$

Druckenergie:

$$m * \frac{p}{\rho}$$

Kinetische Energie:

$$m * \frac{v^2}{2}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
m	Masse	kg
g	Fallgeschwindigkeit	m/s^2
h	Höhe	m
p	Statischer Druck	Pa
ρ	Dichte	kg/m^3
v	Fließgeschwindigkeit	m/s

Physikalische Grundlagen (II)

Energiegleichung und Durchfluss

$$\frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 + \frac{1}{\rho_1} p_1 = \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 + \frac{1}{\rho_2} p_2$$

mit: $z_1 = z_2$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{\text{öl}}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho_{\text{öl}}} = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)$$

Druckdifferenz aus Hydrostatik:

$$p_1 - p_2 = \rho_{MF} g \Delta_{MF}$$

Kontinuitätsgleichung:

$$\rho_{\text{öl}} c_1 A_1 = \rho_{\text{öl}} c_2 A_2$$

$$c_1 A_1 = c_2 A_2$$

$$c_2 = c_1 \frac{A_1}{A_2} = c_1 \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

Quadriert: $c_2^2 = c_1^2 \frac{d_1^4}{d_2^4}$

Einsetzen in Bernoulli:

$$\frac{\rho_{MF} g \Delta_{MF}}{\rho_{\text{öl}}} = \frac{1}{2} \left(c_1^2 \frac{d_1^4}{d_2^4} - c_1^2 \right)$$

$$\frac{\rho_{MF} g \Delta_{MF}}{\rho_{\text{öl}}} = \frac{c_1^2}{2} \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right)$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{2 \rho_{MF} g \Delta_{MF}}{\rho_{\text{öl}} \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right)}}$$

$$\dot{V} = c_1 \pi \frac{d_1^2}{4}$$

Strömungsprofile

Druckverluste durch eine Blende

- Die Reibung führt zudem zu einem anderen Stromlinienbild
- Die wandnahen Schichten, in der Nähe der Blende, kommen zum Stillstand oder kehren ihre Bewegungsrichtung um

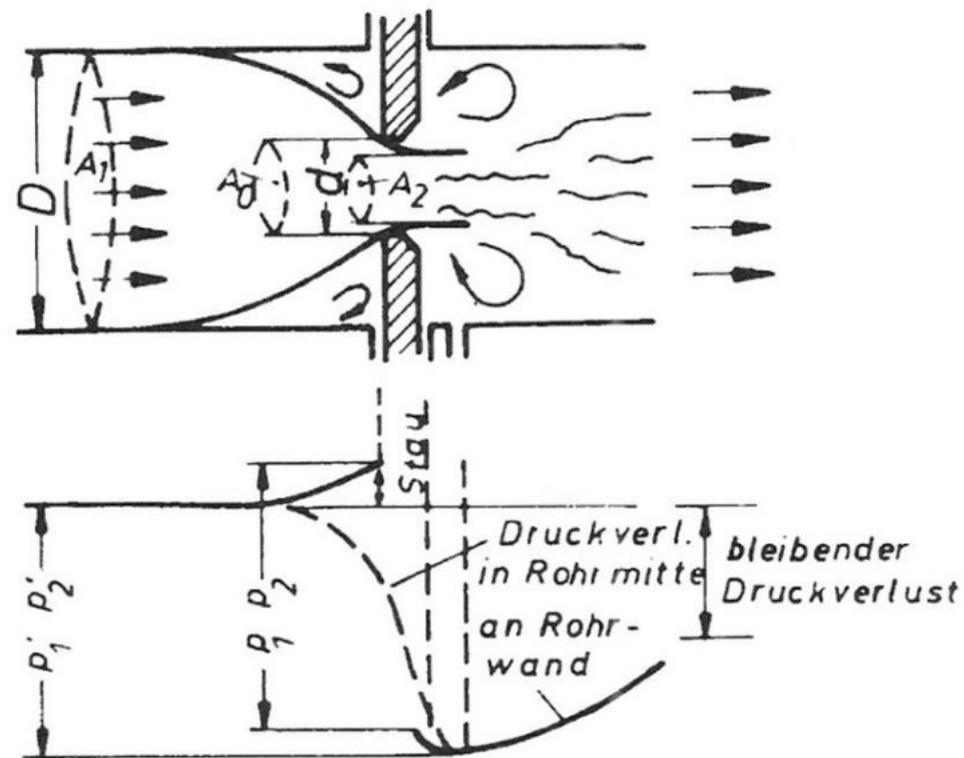


Abb.: Druck- und Strömungsverlauf in einer Blende

Bestimmung des Massendurchflusses

- In der Praxis werden diese Faktoren in Beiwerten zusammengefasst
- Mit diesen errechnet sich der Massendurchfluss:

$$q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{2 \Delta p * \rho}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
α	Durchflusszahl	-
ε	Expansionszahl	-
D	Rohrdurchmesser	m
Δp	Druckdifferenz	Pa
ρ	Dichte	kg/m ³
q_m	Massendurchfluss	kg/s

Durchflusszahl α und Expansionszahl ϵ

Einfluss der Kompressibilität

- Die **Durchflusszahl** hängt bei den genormten Drosselgeräten mit praktisch inkompressiblen Medien nur von der Reynoldszahl ab
 - wird experimentell ermittelt
- Die **Expansionszahl** hängt bei kompressiblen Medien von der Reynoldszahl, vom relativen Wirkdruck und dem Isotropenexponenten des Gases ab
 - wird experimentell ermittelt:
 - beträgt bei kompressiblen Medien < 1 und bei inkompressiblen Medien $= 1$

Durchflusskoeffizient C

- Der Durchflusskoeffizient bietet den Vorteil, dass er in weit geringerem Maße vom Durchmesser Verhältnis abhängt als die Durchflusszahl
- Mit dem Vorgeswindigkeitsfaktor

$$E = (1 - \beta^4)^{-\frac{1}{2}}$$

wird der Durchflusskoeffizient wie folgt definiert:

$$C = \frac{\alpha}{E}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
β	Durchmesser Verhältnis d/D	-

STAND DER TECHNIK

VOLUMETRISCHE MESSVERFAHREN

Volumetrische Messverfahren

Unmittelbare Volumenzähler ↔ Mittelbare Volumenzähler

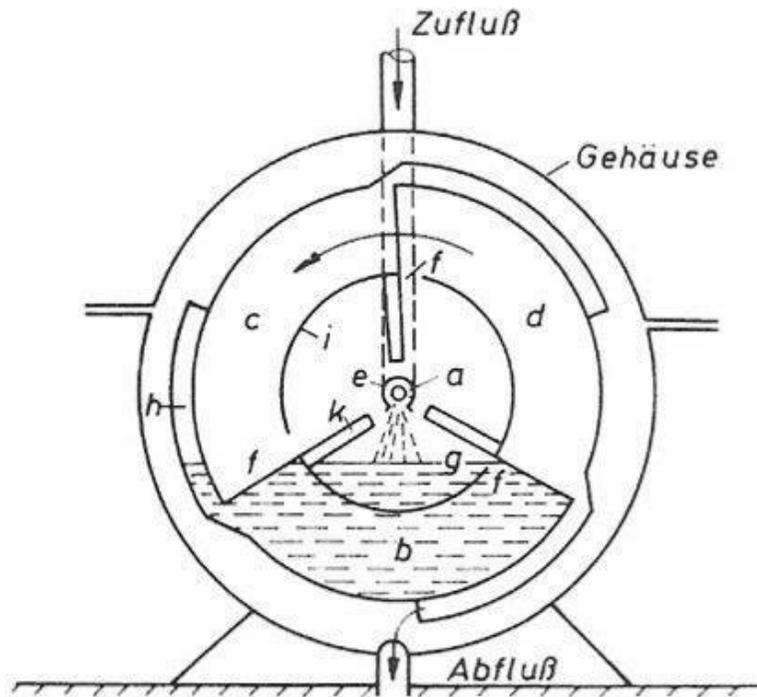
- **Unmittelbare Volumenzähler:**

Diese grenzen während des Messvorganges fortlaufend kleinere Volumina des Messgutes ab, deren Größen durch Messkammern festgelegt und dadurch bekannt sind (z.B. Trommelzähler, Ovalradzähler, Ringkolbenzähler, Ein- und Mehrkolbenzähler).

- **Mittelbare Volumenzähler:**

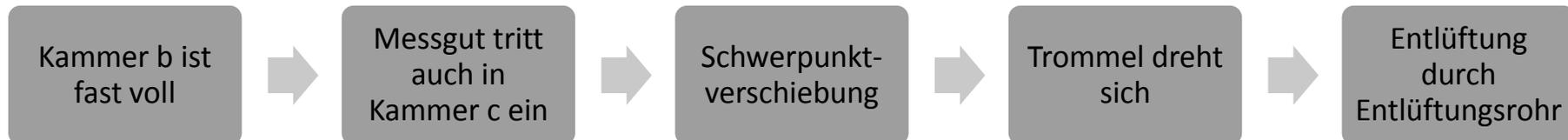
Die Volumenbestimmung erfolgt ohne Messkammern durch indirekte Verfahren (z.B. Flügelradzähler).

Trommelzähler



- a: Achse
- b, c, d: Messkammern
- e: Zuflussrohr
- f: Öffnungen
- g: Messkante
- h: Auslaufkanal
- i: Innenzylinder
- k: Entlüftungsrohre

Abb.: Aufbau eines Trommelzählers [Friebel, 1956]



Fehlerkurve Trommelzähler

- Die Messabweichung Trommelzählers hängt sowohl von der **Oberflächenspannung** des zu messenden Mediums als auch von der **Auslastung des Zählers** selbst ab

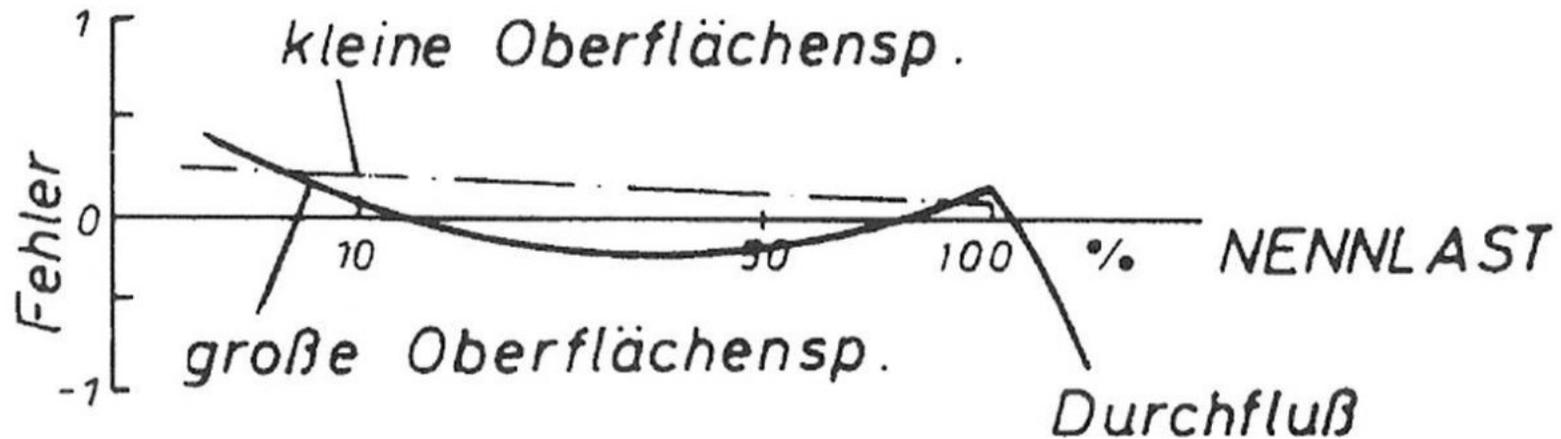
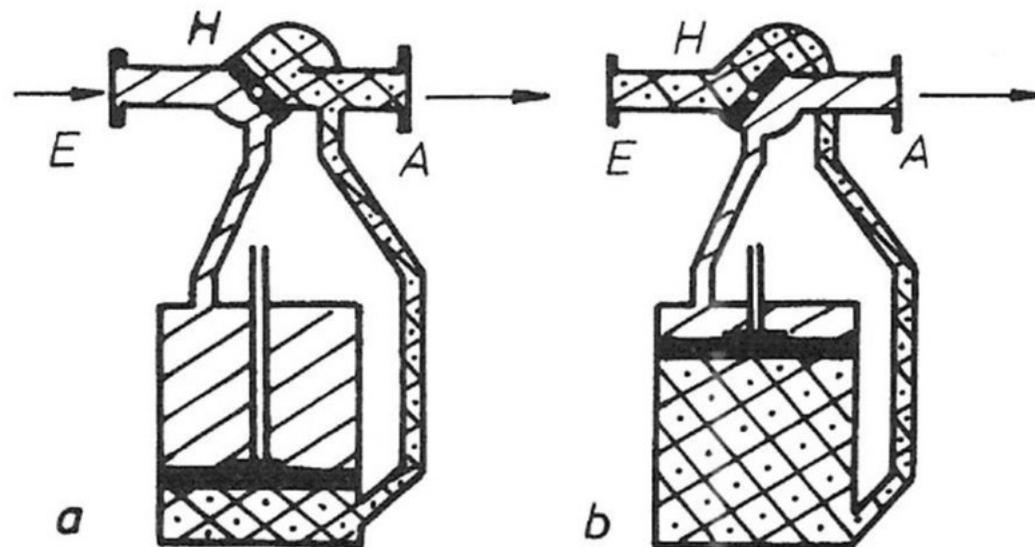


Abb.: Fehlerkurve eines Trommelzählers

Einkolbenzähler

- Die Verwendung von Einkolbenzählern erfolgt bei industriellen Flüssigkeiten von hoher Viskosität, starker Verschmutzung und Betriebsdrücken von bis zu 33 bar
- Problematisch ist die geringe Korrosionsfestigkeit
- Die Messgenauigkeit ist abhängig von der Abdichtung des Kolbens gegenüber der Zylinderwand und von dem dichten Sitz des Hahnes im Hahngehäuse



a:	Zustand a
b:	Zustand b
E:	Zufluss
A:	Abfluss
H:	Hahngehäuse

Abb.: Arbeitsweise eines Einkolbenzählers

Ringkolbenzähler

- Bidirektional gleiche Messgenauigkeit
- Schmutzfänger notwendig
- Ein Gasabscheider sorgt dafür, dass evtl. vorhandene Luft nicht mitgezählt wird
- Die Verwendung von Ringkolbenzählern erfolgt bei Hauswassermessungen und kleinen Durchflüssen mit hoher Genauigkeit

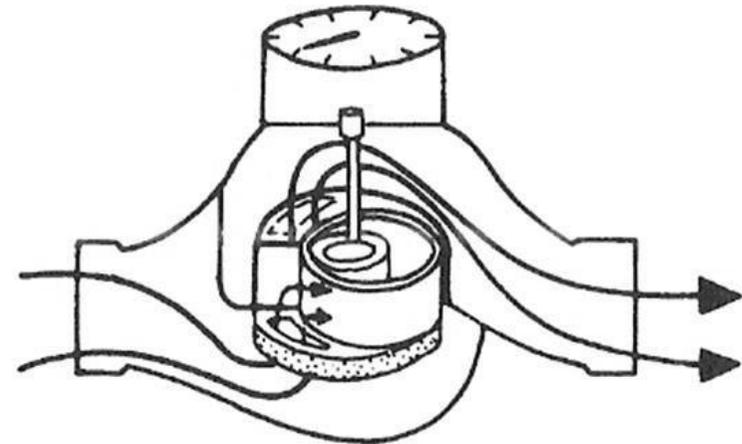
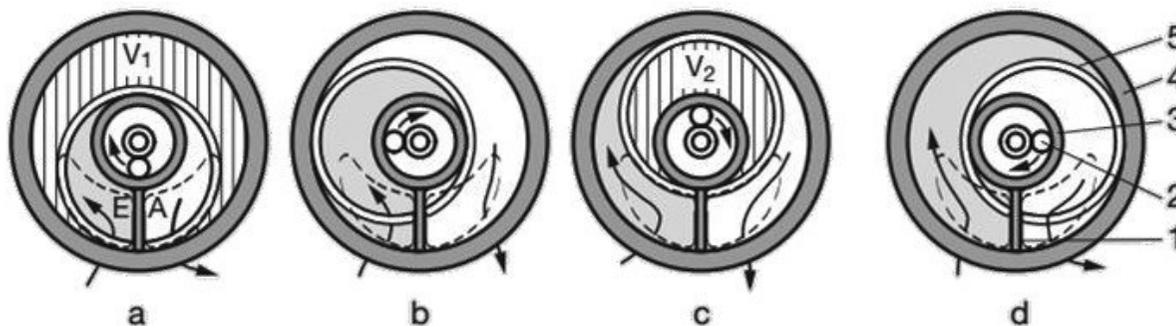


Abb.: Arbeitsweise eines Ringkolbenzählers



- a, b, c, d:** Zustände a, b, c, d
V1, V2: Volumina 1 und 2
E: Zufluss
A: Abfluss
Z: Zähler

Abb.: Arbeitsweise Ringkolbenzähler

Quelle: https://library.e.abb.com/public/acc2ad20c5184c29c12578c0004b8437/D184B075U01-07-07_2011_secure.pdf

Ovalradzähler (I)

- Es können Messfehler aufgrund der Spaltströmung auftreten
 - Diese ist abhängig von der Größe des Spaltes, dem Druckgefälle zwischen Zu- und Abflusseite und der Viskosität des Fluids
- Die Abhängigkeit vom Drehwinkel ist nicht ganz gleichmäßig, daher Ausgleichsgetriebe
- Ovalradzähler sind empfindlich gegen Verschmutzungen
- Um eine fehlerfreie Messung zu gewährleisten sollte ein Gasabscheider verwendet werden

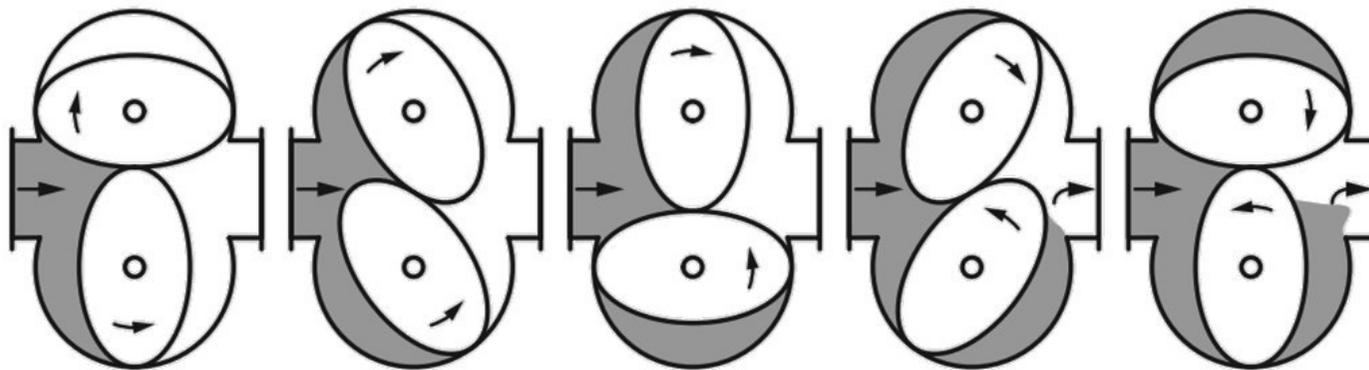
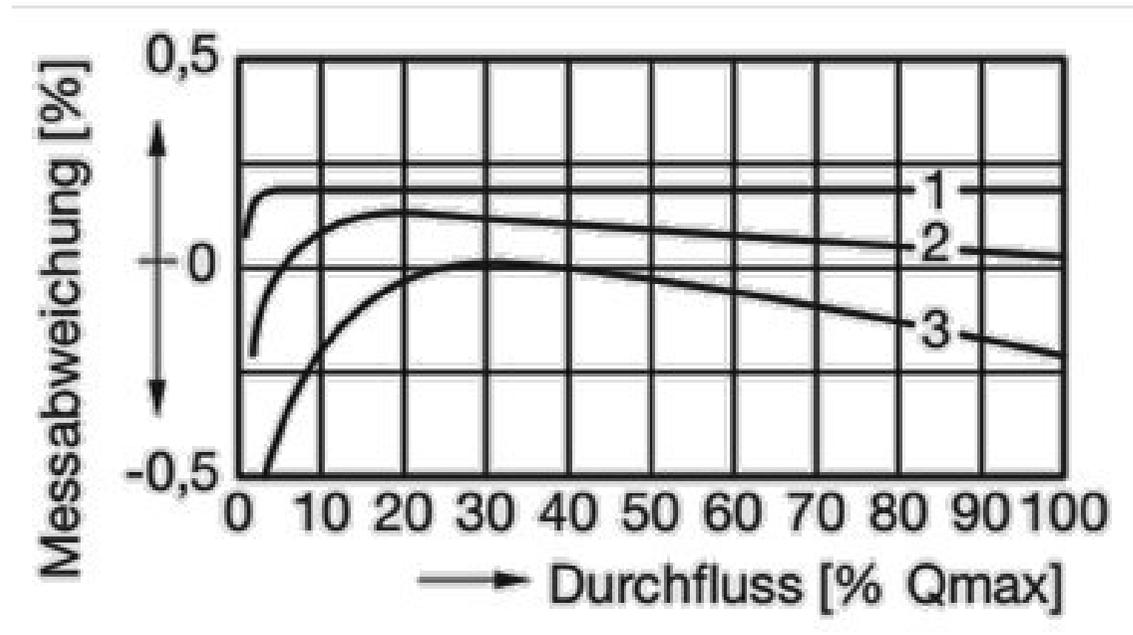


Abb.: Funktionsweise eines Ovalradzählers

Ovalradzähler (II)

Fehlerkurve



- 1 Schmieröl $\leq 3000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
- 2 Heizöl EL
- 3 Benzine

Flügelradzähler (I)

- Ein mit Schaufeln besetztes Laufrad wird durch die Strömung in Umdrehungen versetzt
- Die Frequenz des Flügelrads ist dabei proportional zum Volumenstrom:

$$q_v = c * f$$

- Großer Einsatzbereich
- Viskositätsabhängig
- Empfindlich gegen Verschmutzungen
- Verwendung: Hauswasserzähler

Größe	Beschreibung	Einheit
q_v	Volumenstrom	m ³ /s
c	Konstante	m ³
f	Frequenz	Hz

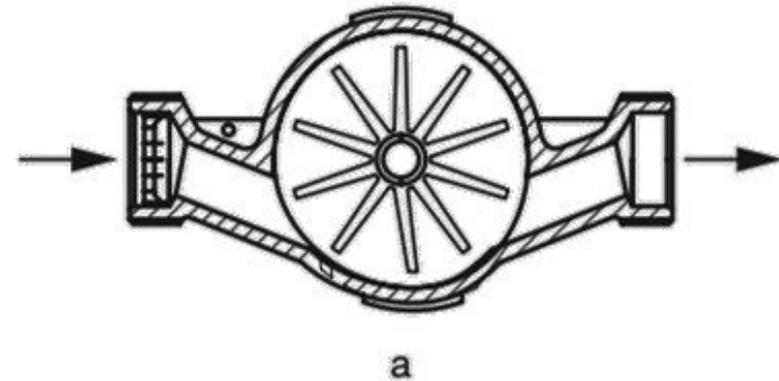


Abb. oben: Flügelradzähler

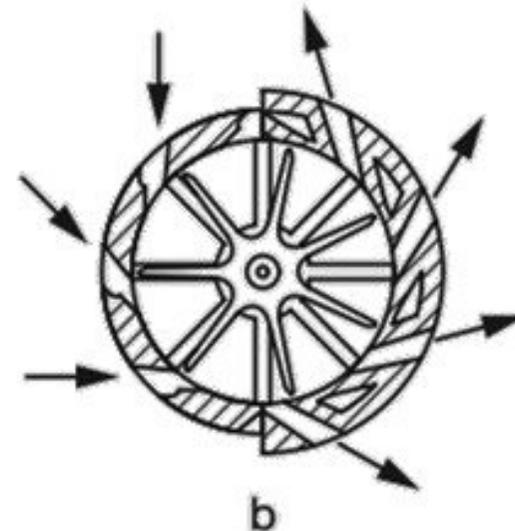


Abb. unten: Aufbau eines Mehrstrahlflügelradzählers

Flügelradzähler (II)

Fehlerkurve

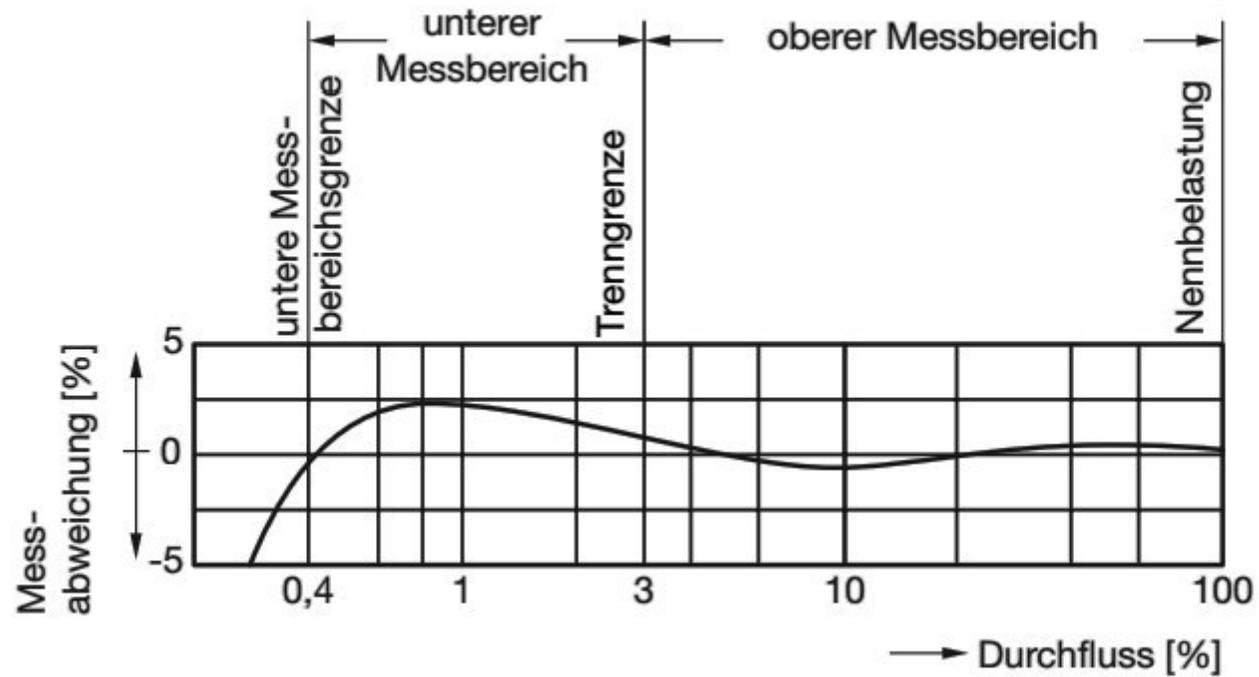
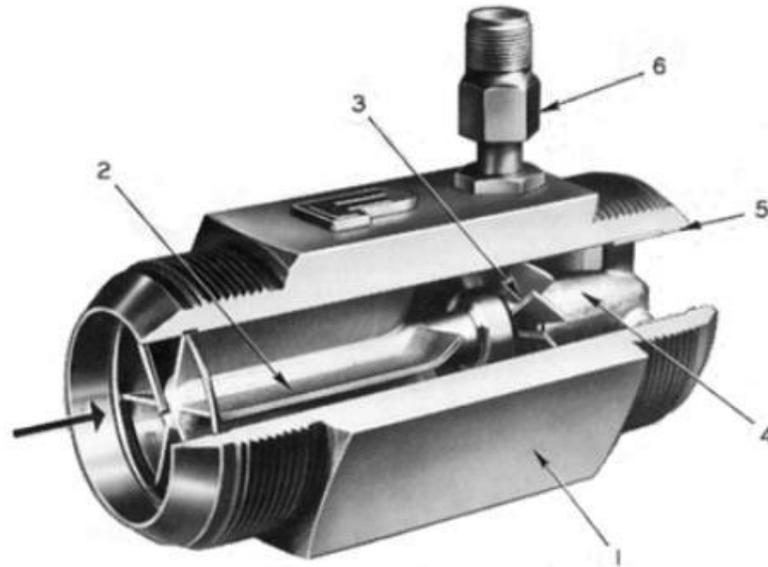


Abb.: Fehlerkurve eines Mehrstrahlflügelzählers

Turbinen-Durchflussmesser

- Abgriff Rotation erfolgt elektrisch



- 1 Gehäuse
- 2 Leitkörper
- 3 Turbinenrad
- 4 Lager
- 5 Auslass
- 6 Elektrischer Anschluss

- Spule in Gehäuse greift Signal ab:
 1. Spule umschließt Magneten. Flügel verzerren Magnetfeld und ein Spannungsimpuls wird induziert
 2. Hochfrequente Wechselspannung fließt durch Spule und Flügel verändert Amplitude der Speisespannung (Sekundärfrequenz)
 3. In allen Fällen wird Frequenz erzeugt, proportional zur Umdrehungszahl und somit Durchfluss

DURCHFLUSSMESSVERFAHREN

WIRKDRUCKVERFAHREN

Wirkdruckverfahren (I)

Messprinzip

- Das Messprinzip basiert auf einer kurzen Verengung des Messrohrquerschnitts
 - Dadurch wird bei gleichem Volumendurchfluss die Strömungsgeschwindigkeit erhöht
- Nach dem Gesetz der Energieerhaltung führt dies auch zu einer Änderung einer anderen Energie (z.B. Lageenergie, Druckenergie, Temperatur)
- Nach der Kontinuitätsgleichung für die eindimensionale Strömung inkompressibler Fluide ist das Produkt aus Querschnitt des Messrohres und Geschwindigkeit des Fluids immer konstant

Wirkdruckverfahren (II)

- meistverwendete Messverfahren
- einfache und robuste Bauweise der Drosselemente, die widrigsten Bedingungen ausgesetzt werden können
- Wartungsarm, da ohne bewegliche Teile
- Einsatz bei:
 - extremen Temperaturen
 - schnellen Strömungen
 - hohen Drücken
 - korrosiven Medien
- geeignet für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe

Wirkdruckverfahren (III)

Mathematische Beschreibung des Messprinzips

- Für das Wirkdruckverfahren gilt: $V_1 = A_1 * s_1$, $V_2 = A_2 * s_2$
- mit $V_1 = V_2$ ergibt sich: $A_1 * s_1 = A_2 * s_2$ (Kontinuitätsgleichung)
- Differenziert nach der Zeit ergibt sich: $\frac{\overrightarrow{V_1}}{\overrightarrow{V_2}} = \frac{A_2}{A_1}$
- Die Strömungsgeschwindigkeit verhält sich somit umgekehrt proportional zu den Querschnittsflächen

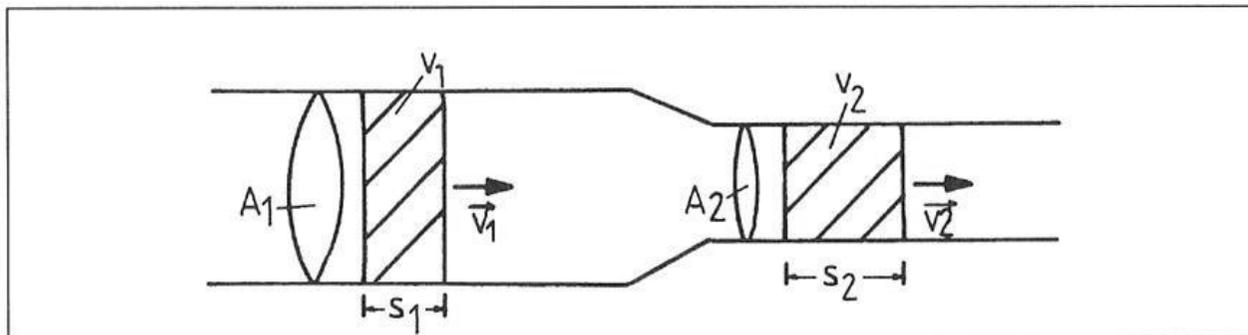


Abb.: Prinzip des Wirkdruckverfahrens

Größe	Beschreibung	Einheit
V	Volumen	m ³
A	Querschnittsfläche	m ²
s	Länge	m

Wirkdruckverfahren (IV)

Mathematische Beschreibung des Messprinzips (Forts.)

- Für das Volumenelement V_1 mit der Masse m_1 gilt:

$$m_1 = \rho * V_1$$

- Es hat die potentielle Lageenergie:

$$E_{pot} = m_1 * g * h_1 = \rho * V_1 * g * h_1$$

- und die kinetische Bewegungsenergie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_1 * v_1^2 = \frac{1}{2} \rho * V_1 * v_1^2$$

- und die Druckenergie:

$$E_D = V_1 * p_1$$

Wirkdruckverfahren (VI)

Mathematische Beschreibung des Messprinzips (Forts.)

- Wenn keine Wechselwirkung mit der Umgebung stattfindet und eine waagerechte Rohrleitung vorliegt, dann gilt:

$$\frac{1}{2} * \rho * v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} * \rho * v_2^2 + p_2 = \mathit{const} \quad (\text{Bernoulli-Gleichung})$$

Größe	Beschreibung	Einheit
M	Masse	kg
V	Volumen	m ³
E	Energie	J
h	Höhe	m
p	Druck	Pa
ρ	Dichte	kg/m ³
v	Geschwindigkeit	m/s
g	Erdbeschleunigung	m/s ²

Wirkdruckverfahren (VII)

Mathematische Beschreibung des Messprinzips (Forts.)

- Mit den bekannten Rohrleitungsquerschnitten und der gemessenen Druckdifferenz

$$\Delta p = p_2 - p_1$$

kann die Strömungsgeschwindigkeit v_1 berechnet werden: $v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}}$

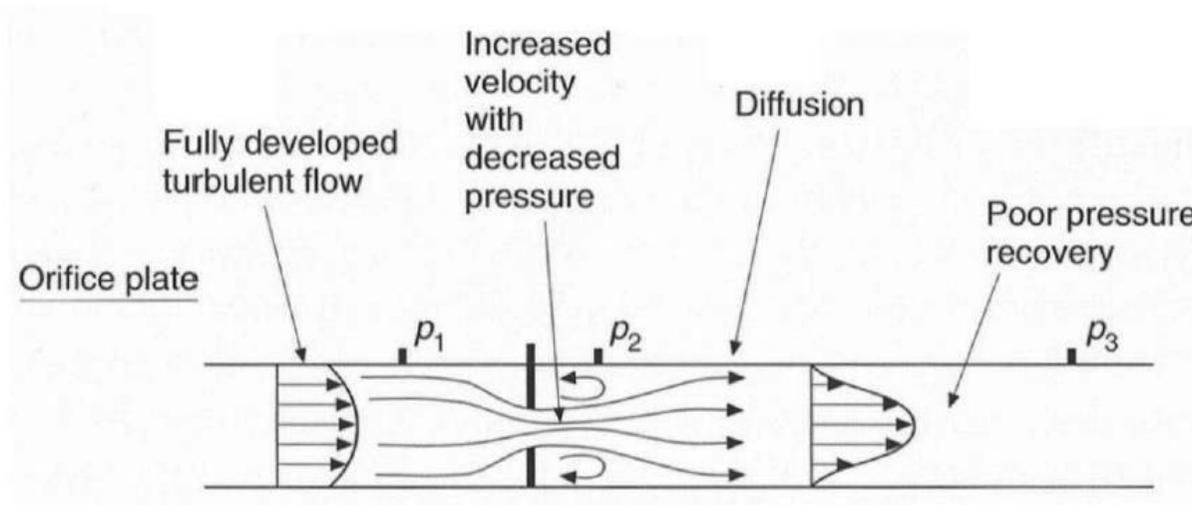


Abb.: Aufbau und Druckmesspunkte beim Wirkdruckverfahren

Quelle: Baker 2002, S.50

Wirkdruckverfahren (VIII)

Vereinfachte Bestimmung des Massendurchflusses

- Es ergibt sich der Massendurchfluss $q_m = A_1 * v_1 * \rho$ zu

$$q_m = \frac{\pi}{4} * d^2 * \sqrt{2\Delta p * \rho}$$

- Gleichung enthält eine Reihe von Vereinfachungen
- Alle Gase und teilweise auch Flüssigkeiten sind kompressibel, wodurch eine Abhängigkeit der Dichte vom Druck besteht
 - Dadurch verändert das betrachtete Volumenelement bei Eintritt in die Verengung seine Größe und die Kontinuitätsgleichung verliert ihre Gültigkeit

Größe	Beschreibung	Einheit
d	Durchmesser	m
Δp	Druckdifferenz	Pa
q_m	Massendurchfluss	kg/s
A_1, v_1	Fläche, Geschwindigkeit	m ² , m/s

Überblick über Wirkdruckverfahren

- Wirkdruckverfahren besitzen eine maximale Genauigkeit von 0,6-1,5% vom Messwert
- Für hohe Genauigkeiten ist eine scharfe Abrisskante an der Blende erforderlich
 - Diese nutzt sich im Betrieb ab oder verschmutzt. Daraus folgt, dass wenn eine hohe Genauigkeit gewünscht ist, die Blende öfter ausgetauscht werden muss
- Wirkdruckverfahren verursachen Druckverluste in der Leitung
- Der Wirkdruck steigt quadratisch mit dem Durchfluss an
 - Deswegen müssen die Drucksensoren eine große Messspanne abbilden können

LAMINAR-FLOW-ELEMENTE

Laminar-Flow-Elemente (I)

- Durchflussmessung mit Laminar-Flow-Elementen (LFE) basiert auf dem durch Reibung verursachten Druckverlust einer laminaren Strömung
- Integration von Einbauten in Rohre, die den Strömungsquerschnitt über Kapillare in viele kleine Einzelkanäle unterteilen
- Da die Reynoldzahl, abhängig von dem Rohrdurchmesser ist, bilden sich aus der vormals turbulenten Strömung im LFE viele kleine laminare Strömungen aus
- entstehende Beschleunigungen müssen vermieden oder durch Korrekturen berücksichtigt werden

Laminar-Flow-Elemente (II)

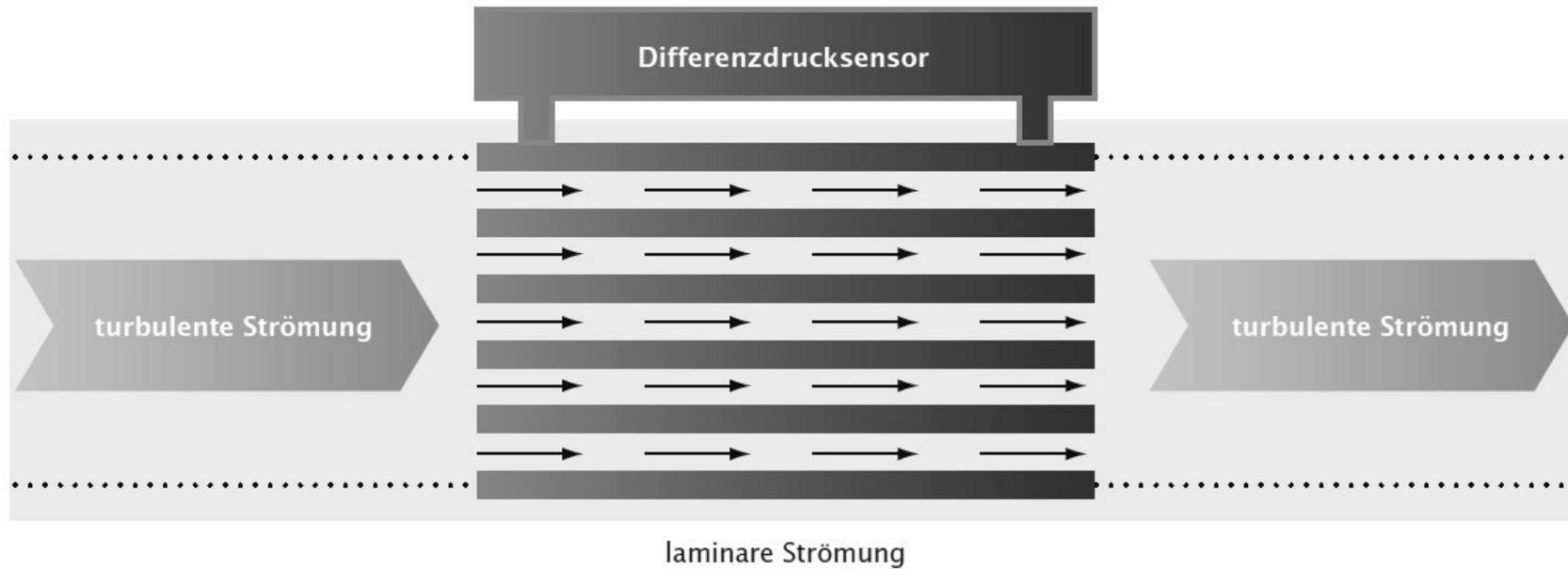


Abb.: Prinzipieller Aufbau eines LFE

Quelle: Hesselbach 2012, S.81

Laminar-Flow-Elemente (III)

Voraussetzungen für die Druckentnahme

- Nach gut abgerundeten Einläufen in das Messrohr bedarf es zur Ausbildung des Profils noch einer geraden Anlaufstrecke von

$$l = 0,06 Re_d * d$$

bis zur ersten Druckentnahme

- Nach dieser Anlaufstrecke hat sich die Geschwindigkeit in der Rohrmitte bis auf etwa 1% dem endgültigen Wert angenähert

Laminar-Flow-Elemente (IV)

Druckentnahme

- Da sich das Profil im LFE zunächst ausbilden muss, sind die Drücke also nicht im Ein- und Auslauf, sondern inmitten der Kapillare zu entnehmen
- Am einfachsten ist es, die Kapillare durchzuschneiden und es mittels einer Muffe wieder zusammenzusetzen
 - Hierbei bleibt ein Spalt, an dem Druck entnommen wird

SCHWEBEKÖRPER

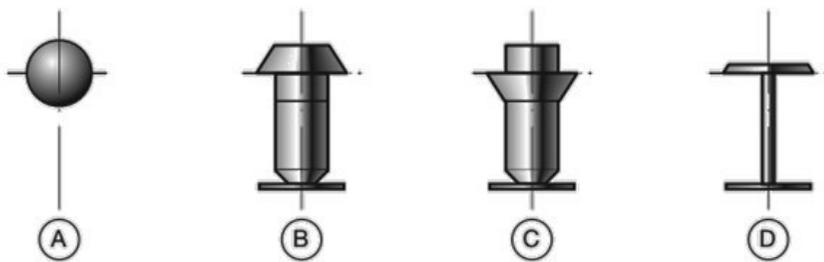
Schwebekörper (I)

- Dieses Verfahren ist nach dem Wirkdruckverfahren eines der häufigsten Durchflussmessverfahren
- Schwebekörperdurchflussmesser finden häufig im Labor Anwendung. In Produktionsanlagen dienen sie oftmals als redundante Durchfluss-anzeigen
- Bei einem Schwebekörperdurchflussmesser wird ein Widerstandskörper von einem Medium von unten nach oben angeströmt. Entweder ist der Widerstandskörper in einem konischen Messrohr oder ein konischer Widerstandskörper ist in einer Messblende eingebaut
- Durch die konische Bauweise ändert sich der Widerstandsbeiwert c_w des Schwebekörpers in Abhängigkeit von der Höhenstellung und somit die Kraft F , die vom Medium auf ihn ausgeübt wird

Schwebekörper (II)

Aufbau

- Gewicht und Auftrieb des Körpers bleiben konstant
- Widerstandsbeiwert ändert sich durch das konische Rohr mit der Hubhöhe des Köpers



- A Kugelschwebekörper
- B Viskositätsunabhängiger Schwebekörper
- C Viskositätsbeeinflusster Schwebekörper
- D Schwebekörper für niedrigen Druckverlust

Abb.: Bauformen Schwebekörper

Quelle: Bonfig 2002, S. 90

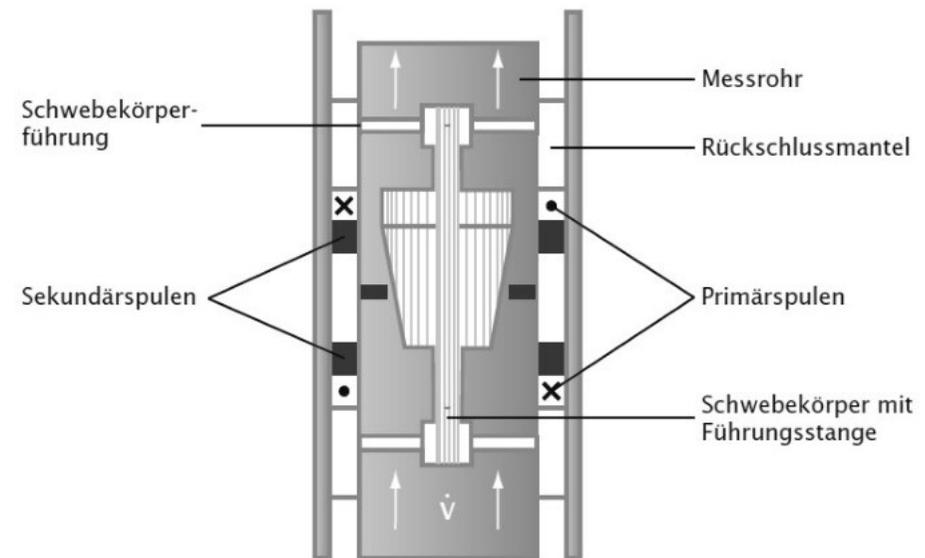


Abb.: Prinzip eines Schwebekörpers mit konischem Messkörper und elektrischer Abtastvorrichtung

Schwebekörper (III)

Widerstandsgesetz

- Strömungswiderstand F_S :
$$F_S = c_w * A_S * \frac{\rho_m * v^2}{2}$$
- Gewichtskraft F_G :
$$F_G = V_S * \rho_S * g$$
- Auftriebskraft F_A :
$$F_A = V_S * \rho_m * g$$

Größe	Beschreibung	Einheit
v	Fließgeschwindigkeit des Messmediums	m/s
ρ_m	Dichte des Messmediums	kg/m ³
ρ_S	Dichte des Schwebekörpers	kg/m ³
A_S	Querschnittsfläche des Schwebekörpers an der Ablesekante	m ²
c_w	Widerstandsbeiwert	-
V_S	Volumen des Schwebekörpers	m ³
g	Erdbeschleunigung	m/s ²

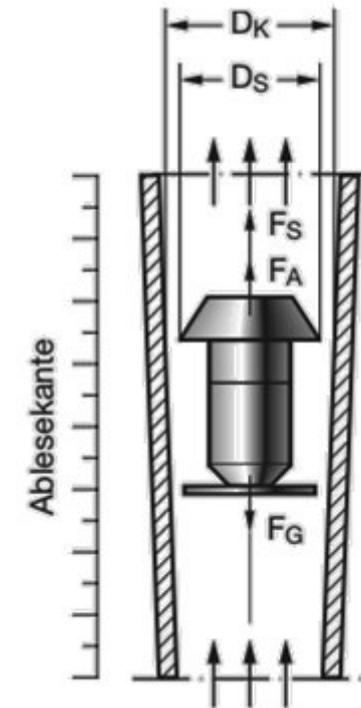


Abb.: Schwebekörper

Schwebekörper (IV)

Gleichgewichtsgleichung

$$V_S * g * (\rho_S - \rho_m) = c_w * A_S * \frac{\rho_m}{2} * v^2$$

- Bei der Schwebekörper-Durchflussmessung besteht ein Gleichgewicht zwischen der Gewichtskraft des Schwebekörpers auf der einen Seite und der Auftriebskraft des Schwebekörpers und der Kraft die das strömende Medium auf den Schwebekörper ausübt auf der anderen Seite
- Bei einer vorgegebenen Messanordnung ändert sich bei einer Änderung von v nur c_w
- c_w ist allerdings abhängig von der Hubhöhe des Schwebekörpers und der Reynoldszahl
- Diese Abhängigkeit muss empirisch durch Eichung ermittelt werden

Schwebekörper (V)

Durchflussmesser mit konischem Messkörper

- direkt ablesbar mit Glaskonus oder über Messgerät (magnetisch induktiv)
- Eventuelle Verunreinigungen stören nicht
- keine gerade Einlaufstrecke erforderlich
- Es entsteht ein nur geringer Druckverlust
- Genauigkeiten bis zu 1 oder 2% möglich
- Eine Verwendung ist bei allen gasförmigen und flüssigen Medien möglich
- Der Einbau muss funktionsbedingt senkrecht erfolgen

CORIOLIS-VERFAHREN

Coriolis-Verfahren (I)

- Bei dem gyrostatischen Prinzip der Massendurchflussmessung wird die nach dem Physiker Coriolis benannte Kraft ausgenutzt, die bei rotierenden oder schwingenden Systemen neben der Zentrifugalkraft auftritt
- Eine Coriolis-Kraft wird auf jeden sich in einem rotierenden System bewegendem Körper ausgeübt und ist senkrecht zur Drehachse und zur Bewegungsrichtung gerichtet

$$\vec{F} = 2m(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

Größe	Beschreibung	Einheit
\vec{F}	Corioliskraft	N
m	Masse des Körpers	kg
$\vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
\vec{v}	Geschwindigkeit des Körpers	m ²

Coriolis-Verfahren (II)

Messprinzip

- Bei bekannter Winkelgeschwindigkeit ist die Coriolis-Kraft somit direkt proportional zum Produkt aus Masse und Geschwindigkeit
- Problem ist, dass der Masseneffekt sehr klein ist
- Zur Verstärkung des Messsignals wird daher der Körper senkrecht zur Bewegungsrichtung beschleunigt (Vektorprodukt)
- Das Medium wird durch ein geeignet geformtes Rohr geleitet, das senkrecht zur Durchflussrichtung beschleunigt wird
- Durch die Coriolis-Kraft wird auf das Rohr ein mechanisches Moment ausgeübt, das entweder am Rohr oder an den Halterungen gemessen werden kann

Coriolismessung in U-Rohrausführung (I)

Messprinzip

- Anordnung besteht aus einem U-förmigen Rohr, das am Ein- und Auslauf fest eingespannt ist, und einer T-förmigen Blattfeder als Gegenstück zur Realisierung einer Stimmgabel
- Rohrschwingung wird elektromagnetisch erzeugt
- Um eine gute Messgenauigkeit zu erreichen, muss die Schwingbewegung des Messrohres ausbalanciert sein

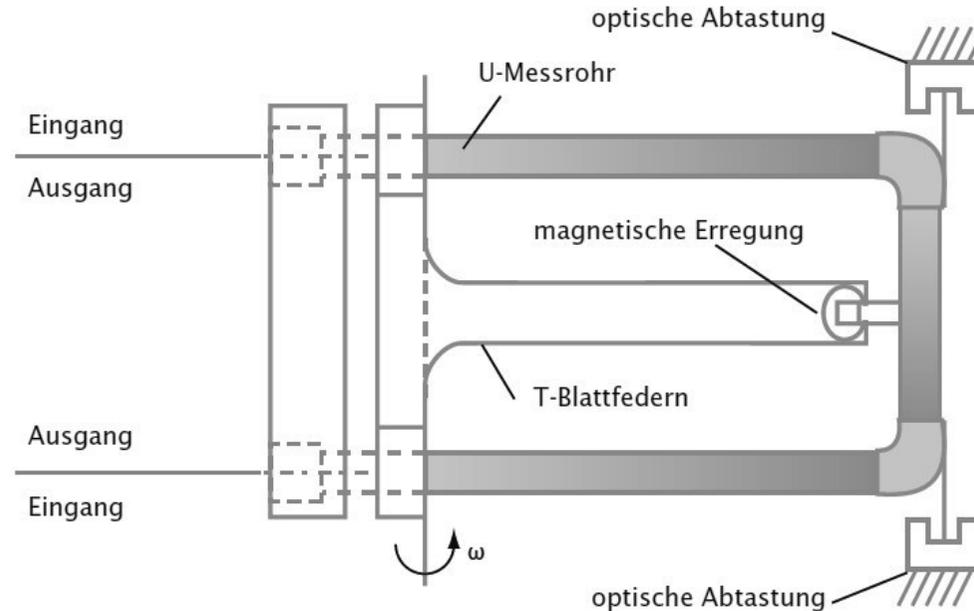


Abb.: Prinzip der Coriolismessung in U-Rohrausführung

Quelle: Bonfig 2002, S.217

Coriolismessung in U-Rohrausführung (II)

Drehmomenterzeugung

$$dM = dF_1 r_1 + dF_2 r_2$$

- Aufgrund der Symmetrie und da beide Kraftanteile gleich groß sind, ergibt sich:

$$dM = 2dFr = 4mv\omega r$$

- Wobei der Produktanteil mv dem Massendurchfluss entspricht
- Durch Integration ergibt sich:

$$M = 4r\omega q_m$$

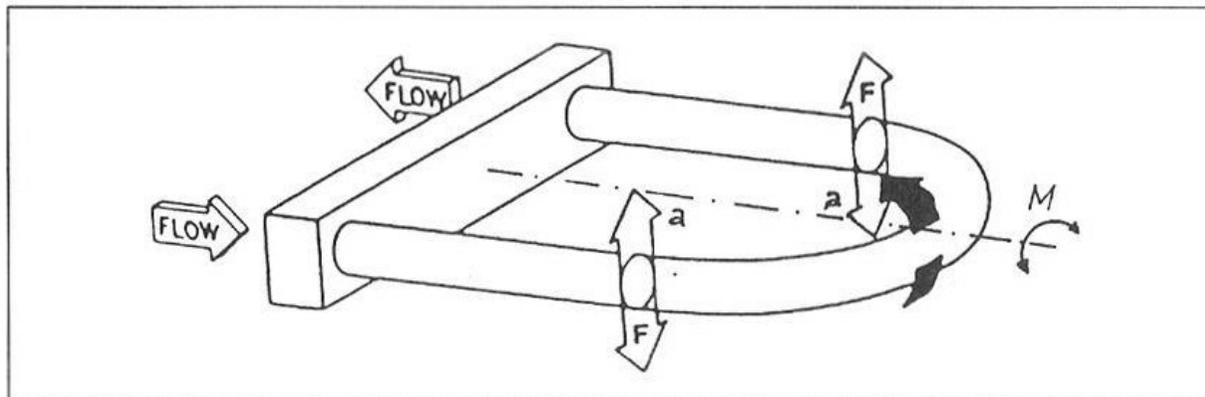


Abb.: Bei einer Rohrschwingung erzeugt die Coriolis-Kraft ein Drehmoment um die Mittelachse

Coriolismessung in U-Rohrausführung (III)

Schwingungszyklus

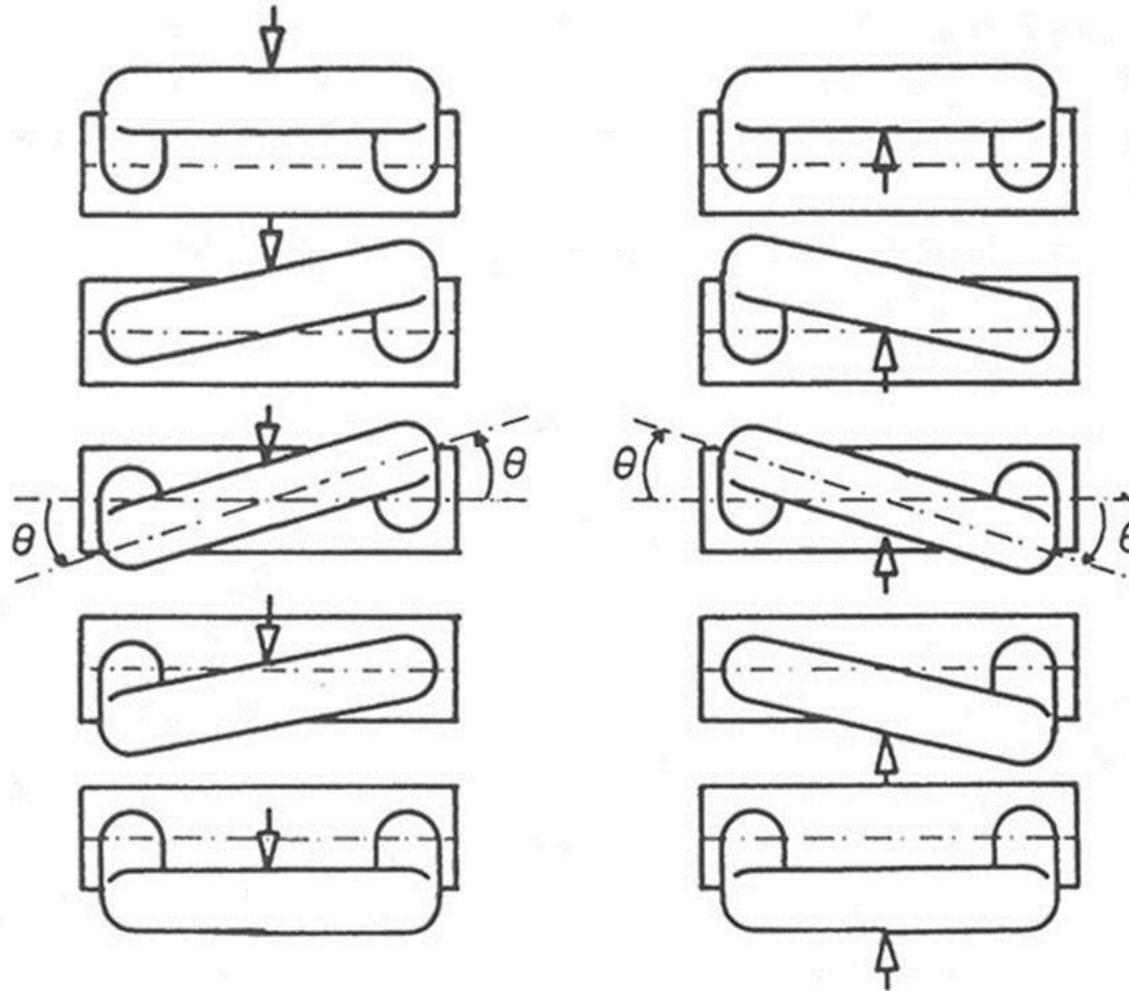


Abb.: Darstellung des Drehwinkels innerhalb eines Schwingungszykusses

Coriolismessung in U-Rohrausführung (IV)

Abhängigkeit des Massendurchflusses vom Drehwinkel

- Der Drehwinkel ist eine Funktion der Federkonstanten und des Moments:

$$\Theta = \frac{M}{K}$$

- Der Massendurchfluss ist deshalb auch proportional zum Drehwinkel des U-Rohres:

$$\Theta = \frac{4r\omega q_m}{K}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
K	Federkonstante	N/m

Coriolismessung in U-Rohrausführung (V)

Abhängigkeit des Massendurchflusses zum Drehwinkel

- Bei einem sinusförmigen Auf- und Abschwingen des Rohres am U-Bogen kann man für einen kleinen Bereich um die Ruhelage davon ausgehen, dass die Geschwindigkeit konstant ist
- Die Zeitdifferenz mit der die beiden U-Rohr-Schenkel die Nulllage passieren beträgt für kleine Drehwinkel:

$$\Delta t = \frac{2r\theta}{v}$$

- Die Geschwindigkeit mit der ein Punkt des Rohres sich bewegt, hängt von der Winkelgeschwindigkeit und von der Entfernung des Punktes zur fest eingespannten Schwingungsachse ab

Coriolismessung in U-Rohrausführung (VI)

Abhängigkeit des Massendurchflusses zum Zeitabstand Nulldurchgang

- Es ergibt sich:

$$\Delta t = \frac{8r^2}{KL} q_m$$

- Der Massendurchfluss ist damit direkt proportional zu dem Zeitabstand, mit dem die beiden Rohrschenkel die Nulllage passieren

Überblick Coriolis-Messverfahren

Eigenschaften

Vorteile	Nachteile
Coriolis-Durchflussmessgeräte sind nahezu unabhängig von Stoffkonstanten des Mediums (Temperatur, Dichte, Viskosität)	<ul style="list-style-type: none">• Relativ hoher Beschaffungspreis (bei einer Messgenauigkeit von 0,15% v.M.)
<ul style="list-style-type: none">• Es ist eine Erfassung von 2-Phasen-Strömungen (z.B. Wasser und Wasserdampf) möglich	<ul style="list-style-type: none">• Einsatzgrenzen bei mehrphasigen Messmedien oder hohem Gasanteil
<ul style="list-style-type: none">• Voraussetzung bei Mehrphasenströmungen ist, dass der gesamte Messstoff vollständig der Bewegung der Rohre folgt. Also kein Bestandteil sich relativ dazu bewegt	<ul style="list-style-type: none">• Ablagerungen oder Abrasion können zu Fehlern, besonders in der Dichtemessung führen
<ul style="list-style-type: none">• Es sind sehr kleine Messfehler bis zu 0,2% vom Messwert möglich	<ul style="list-style-type: none">• Begrenzte Materialauswahl für messmediumberührte Teile, Korrosion ist besonders zu prüfen

THERMISCHE VERFAHREN

Hitzdrahtmethode (I)

- Ein elektrisch beheizter Metalldraht, dessen Widerstand temperaturabhängig ist, wird in einen Gasstrom gebracht und von diesem abgekühlt
- Die Wärmeabgabe ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit des vorbeistreichenden Gases, von dessen physikalischen Daten (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte) und von der Differenz zwischen Draht- und Gastemperatur

$$U_a^2 = (A + B \left(\rho v^n\right) * (T_S - T_M))$$

Größe	Beschreibung	Einheit
U_a	Ausgangsspannung	V
A, B	Konstanten, abhängig vom Strömungsmedium	-
ρ	Dichte des Mediums	kg/m ³
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
T_S	Sensortemperatur	K
T_M	Mediumstemperatur	K

Hitzdrahtmethode (II)

Verfahren mit konstanter Spannung

- Heizspannung oder Heizstrom werden konstant gehalten
 - Bei dieser Methode wird die Heizspannung so eingestellt, dass das Brückengalvanometer im Ruhezustand keinen Ausschlag zeigt
 - Der Galvanometerauschlag ist ein Maß für die Geschwindigkeit
 - Nur bei kleinen Geschwindigkeiten empfindlich (v bis zu 0,5 cm/s)
 - Constant Current Anemometer (CCA)

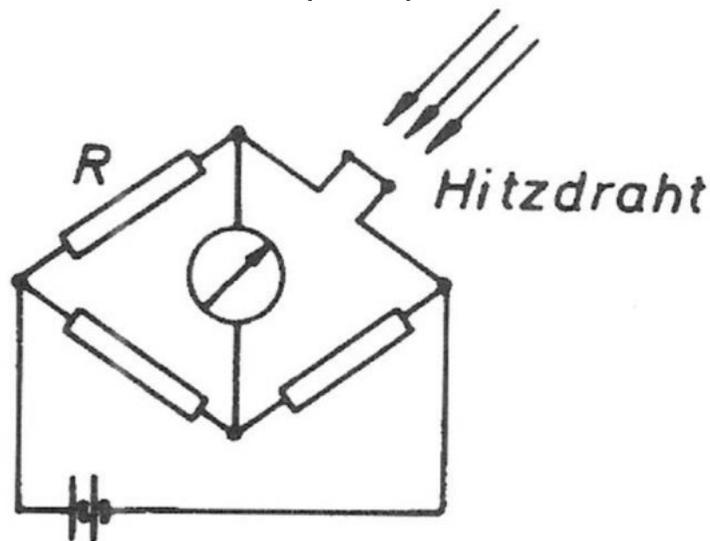


Abb.: Hitzdrahtanemometer mit konstanter Speisespannung

Hitzdrahtmethode (III)

Verfahren mit konstantem Widerstand

- Widerstand wird durch Nachregeln der Heizspannung konstant gehalten
 - Heizspannung bzw. Heizstrom bei stromlosen Galvanometern sind Maß für die Geschwindigkeit des Mediums
 - Empfindlichkeit nimmt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit ab
 - Constant Temperature Anemometer (CTA)

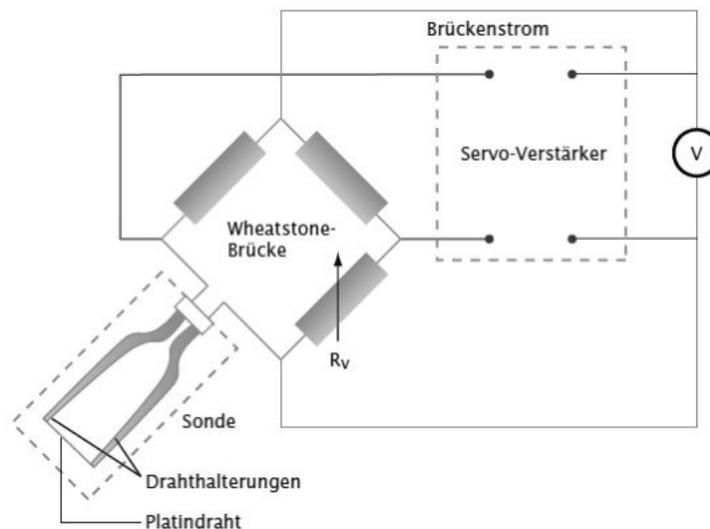


Abb.: Hitzdrahtanemometer mit konstantem Heizdrahtwiderstand

Quelle: Hesselbach 2012, S.83

Überblick Hitzdrahtmethode

- besonders geeignet zur Messung kleiner und mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten (Empfindlichkeit)
- abnehmende Empfindlichkeit mit wachsender Geschwindigkeit
- bei hohen Temperaturen Verdampfung des Drahtes möglich

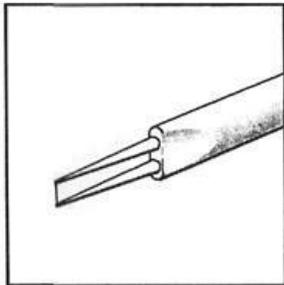


Abb. links: Konstant-Temperatursonden

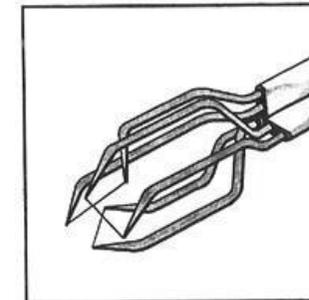
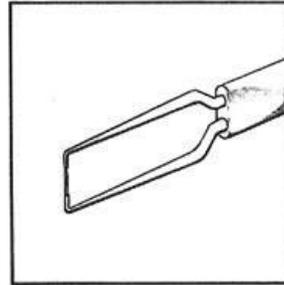
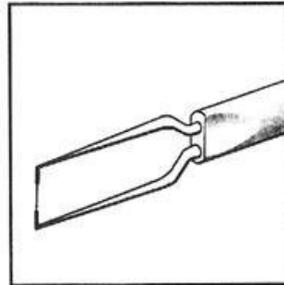


Abb. rechts: CTA-Sonde

LASERMESSVERFAHREN

Lasermessverfahren

Messarten

1. Laufzeitmessung
2. Ausnutzen des Dopplereffekts

Laufzeitmessung (I)

Messprinzip

- Das Verfahren misst die Durchgangszeit eines Staubteilchens zwischen zwei Laserstrahlen
- Ein Laserstrahl durchläuft zwei konvexe Linsen und wird durch ein Prisma in zwei parallele Strahlen gleicher Intensität geteilt
- Die Strahlen durchlaufen das Rohr senkrecht zur Durchflussrichtung und haben voneinander den Abstand d

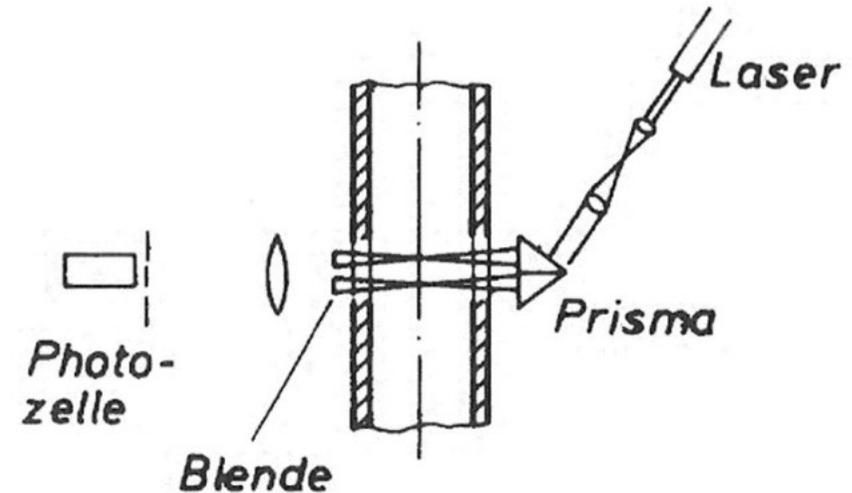


Abb.: Aufbau des Durchflussmessers

Laufzeitmessung (II)

Messprinzip (Forts.)

- Durchfliegt ein Staubteilchen nacheinander die beiden Brennpunkte im Rohrzentrum, wird das Licht an diesem Teilchen gestreut
- Das gestreute Licht wird durch ein Linsensystem gesammelt und durch Photozellen aufgenommen und in ein elektrisches Signal umgeformt
- Durch die Zeitdifferenz der beiden aufeinander folgenden Impulse erhält man die Geschwindigkeit des Teilchens

Laufzeitmessung (III)

Erforderliche Größe des Staubteilchens

- Die Staubteilchen benötigen eine bestimmte Größe, um das Laserlicht ausreichend zu streuen
- Ob ein Staubteilchen ausreichend groß ist, lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$\alpha = \frac{2\pi R}{\lambda}$$

- Bei $\alpha > 1$ ist der Staubteilchenradius größer als die Wellenlänge des Laserlichts

Größe	Beschreibung	Einheit
R	Radius des Staubteilchens	nm
λ	Wellenlänge des Laserlichts	nm

Überblick Laufzeitmessung

- Die Lasermessung per Laufzeitverfahren kann bei Geschwindigkeiten von 200 m/s an aufwärts eingesetzt werden
- Die Messgenauigkeit liegt bei etwa 3%
- Der Vorteil liegt insbesondere bei der direkten Geschwindigkeitsmessung ohne störende Einbauten und Rückwirkungsfreiheit

Dopplereffekt (I)

Messprinzip

- Sendet eine ruhende Quelle eine Welle mit der Frequenz f_0 aus, so beobachtet ein ruhender Beobachter die gleiche Frequenz
- Bewegt sich allerdings der Beobachter relativ zur Quelle, so nimmt er mehr oder weniger Schwingungen je Zeiteinheit wahr ($f_0 + \Delta f$ oder $f_0 - \Delta f$)
- Fällt ein Lichtstrahl in ein strömendes Medium ein, so wird Licht von den im Medium befindlichen Partikeln aus dem Strahl gestreut
- Bei diesem Streuprozess tritt der Dopplereffekt zweimal auf
- Zuerst ist das Teilchen bewegter Beobachter, darauf folgend sendet das Teilchen dieses Licht als bewegte Quelle wieder aus

Dopplereffekt (II)

Streuung des Lichts

- Monochromatische Lichtquelle mit Frequenz f_0 und dem Wellenvektor k_0
- Gestreuter Lichtstrahl mit dem Winkel Θ , mit der Frequenz f_s und dem Wellenvektor k_s
- Bewegt sich das Teilchen mit der Geschwindigkeit v , gilt mit $k = k_0 - k_s$:

$$f = -\frac{2nv}{\lambda_0} \sin \Theta / 2 \cos \alpha$$

Größe	Beschreibung	Einheit
n	Brechungsindex des strömenden Mediums	-
λ_0	Wellenlänge des Laserlichts im Vakuum	nm
α	Winkel zwischen k und v	grad

Dopplereffekt (III)

Streuung des Lichts

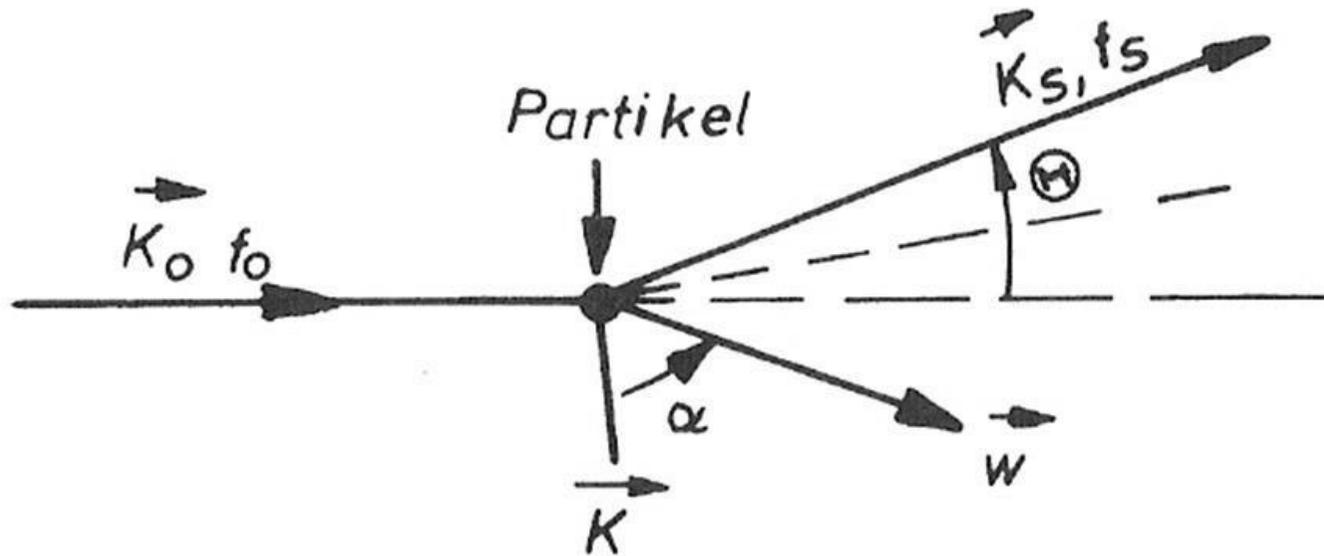


Abb.: Streuung des Lichts an einem Partikel

Dopplereffekt (IV)

Ausführungsarten

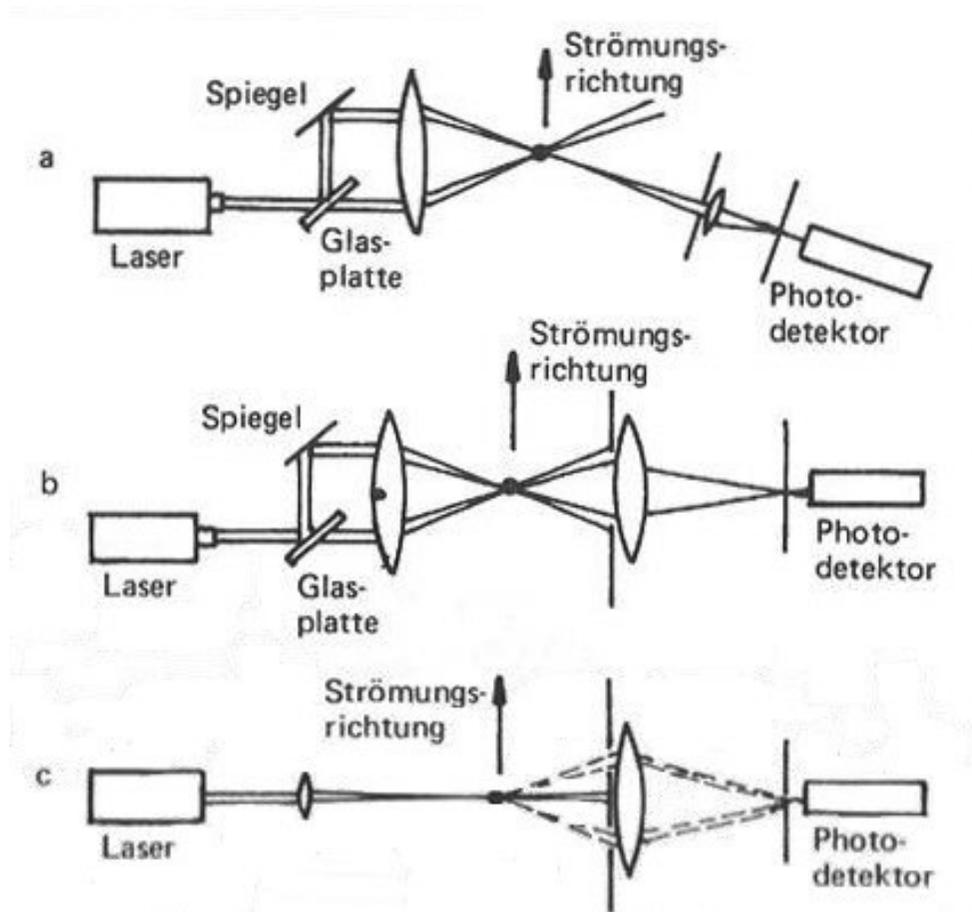


Abb.: a) Referenzstrahlmethode
b) Differentialmethode (Kreuzstrahlverfahren)
c) Symmetrisches Überlagerungsverfahren

MAGNETISCH-INDUKTIVE VERFAHREN

Magnetisch-induktive Durchflussmessung MID (I)

- Bei diesem Verfahren wird durch die Wechselwirkung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit und einem Magnetfeld eine elektrische Spannung erzeugt.
- Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz existiert in einer durch ein Magnetfeld fließenden elektrisch leitenden Flüssigkeit eine elektrische Feldstärke.

$$\Delta\phi = \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B})$$

Größe	Beschreibung	Einheit
ϕ	Potenzial	V
\vec{v}	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
\vec{B}	Magnetische Induktion	T
Δ	Laplace-Operator	-

MID (II)

Messprinzip und math. Berechnung

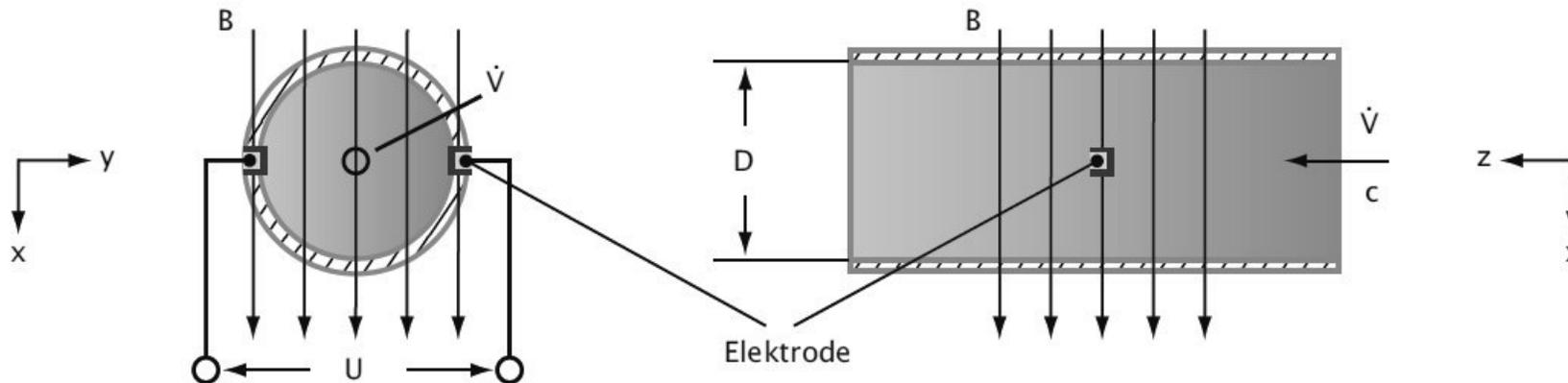


Abb.: Prinzip der Magnetisch-induktiven Durchflussmessung

Quelle: Bonfig, 2002, S.108

- Unter Voraussetzung eines homogenen Magnetfeldes und eines rotationssymmetrischen Strömungsprofils erhält man:

$$q_v = \frac{D^2 \pi}{4} \bar{v} = \frac{1 \pi D}{k 4 B} U$$

MID (III)

Eigenschaften

- Nur einsetzbar bei Flüssigkeiten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von mindestens $5 \mu\text{S}/\text{cm}$
- weitestgehend unabhängig von Viskosität, Druck, Temperatur und Strömungsprofil des Mediums
- Im Inneren des Messrohres gibt es keine Einbauten, so dass kein zusätzlicher Druckverlust auftritt
- Einlaufstrecken von $5-10 \cdot D$ und Auslaufstrecken von $2-5 \cdot D$ notwendig
- geringer Wartungsaufwands
- Bei dem gängigen „galvanischen Abgriff“ der Signalspannung sind die Elektroden in die Rohrwand eingelassen und stehen in direktem Kontakt mit dem Medium
 - Das setzt ein korrosionsbeständiges Material der Elektroden voraus

WIRBELFREQUENZ-DURCHFLUSSMESSUNG

Wirbelfrequenz-Durchflussmessung (I)

Messprinzip

- Wird ein Gegenstand in ein strömendes Fluid eingefügt, so entstehen an beiden Seiten wechselseitig Wirbel
- Durch die Strömung lösen sich Wirbel ab → Wirbelstraßenbildung
- Hinter dem Anströmkörper stellt sich in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit ein konstantes Verhältnis von Wirbelabstand und Wirbelfolge ein
- Ein Piezosensor erfasst die Frequenz der Wirbel

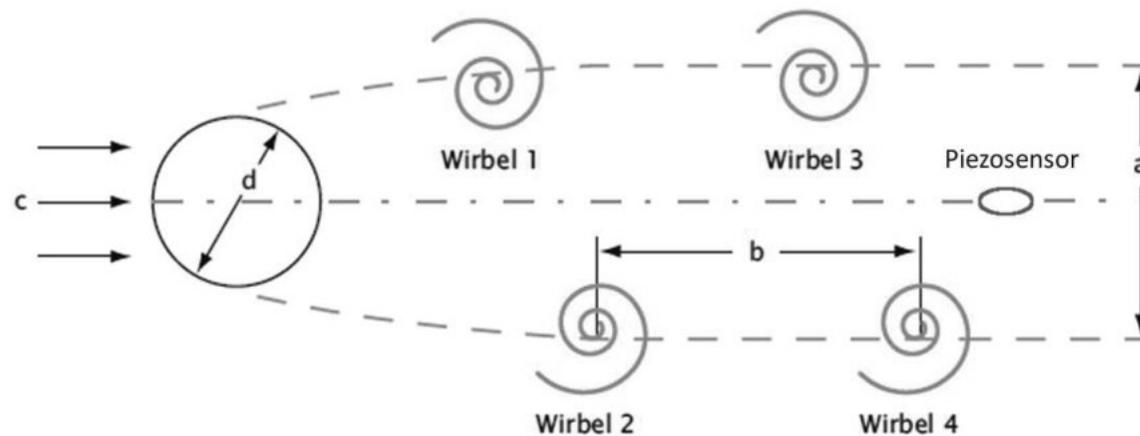


Abb.: Prinzip der Wirbelstrommessung mit einem zylindrischen Prallkörper ($a/b = \text{konst.}$)

Quelle: Hesselbach 2012, S.84

Wirbelfrequenz-Durchflussmessung (II)

Beschreibung Messprinzip

- Die Frequenz f der Wirbelablösung ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und indirekt proportional zur Breite des Störkörpers
- Bei optimaler Dimensionierung des Störkörpers ergibt sich über einen sehr weiten Reynolds-Zahl-Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen Wirbelfrequenz und Durchflussgeschwindigkeit, unabhängig von Messstoffdichte und Viskosität
- Die aus der Wirbelablösung resultierenden lokalen Druckänderungen werden durch einen Piezosensor bzw. kapazitiven Drucksensor detektiert und in elektrische Impulse entsprechend der Wirbelfrequenz umgewandelt

Wirbelfrequenz-Durchflussmessung (III)

Eigenschaften

- Einsatz möglich bei Flüssigkeiten, Gasen und Dampf
- Die weiteste Verbreitung findet sich bei Dampf
- Hindernisse im Einlauf erfordern teils lange Einlaufstrecken (Bis zu $50 \cdot D$ bei Regelventilen)
- Auslaufstrecken bis $5 \cdot D$
- max. $\pm 0,75$ % vom Messwert bei Flüssigkeiten
- max. ± 1 % vom Messwert bei Gasen und Dämpfen

ULTRASCHALL-STRÖMUNGSMESSUNG

Ultraschall-Strömungsmessung (I)

Messarten

- Laufzeitmessung, direkt
- Laufzeitmessung, Impulsdifferenzverfahren
- Phasendifferenzmessung
- Abdriftmethode
- Dopplereffekt

Ultraschall-Strömungsmessung (II)

Prinzip

- Wird ein Ultraschallerreger am Rohr angebracht und ein Empfänger versetzt an einer gegenüberliegenden Stelle, durchläuft das Signal einmal das gesamte Geschwindigkeitsprofil des Fluids im Rohr und es lässt sich die mittlere Geschwindigkeit bestimmen

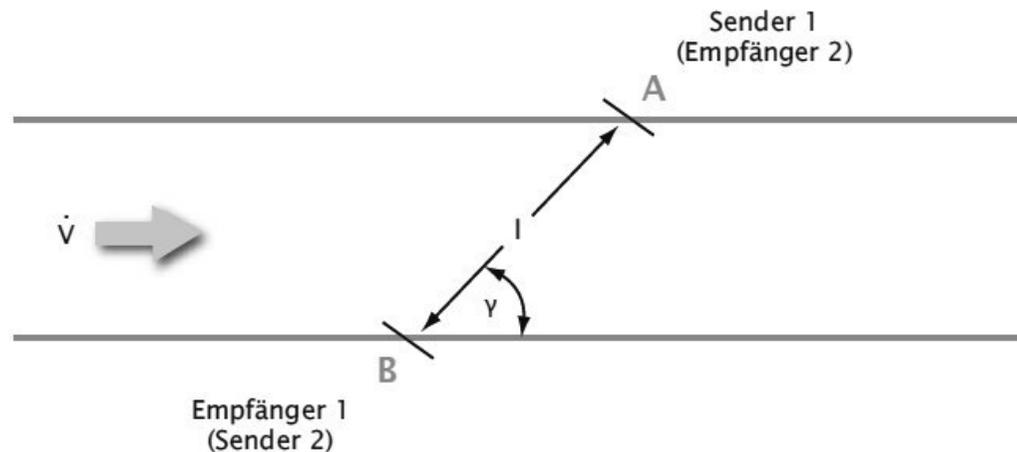


Abb.: Prinzipieller Aufbau der Durchflussmessung mittels Ultraschall

Quelle: Hesselbach 2012, S.86

Ultraschall-Strömungsmessung (III)

Prinzip Laufzeitmessung

- Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Schallwellen in einem Fluid ändert sich mit der Geschwindigkeit des Fluids relativ zum ruhenden Betrachter
- Mit der Strömungsrichtung addieren sich die Geschwindigkeitsvektoren aus Fluid- und Schallgeschwindigkeit, gegen die Strömungsrichtung subtrahieren sie sich
- Aus den Laufzeitunterschieden eines Signals, welches durch ein Rohr geschickt wird, lässt sich die Geschwindigkeit des Mediums errechnen

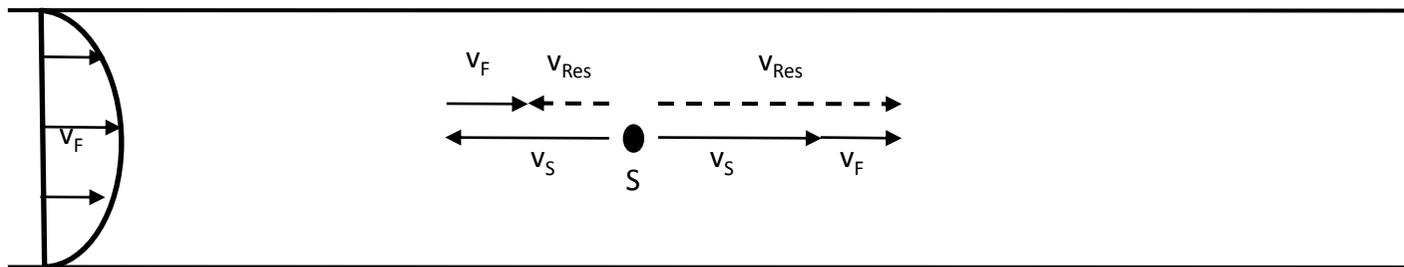


Abb.: Prinzip der Laufzeitmessung

Ultraschall-Strömungsmessung (IV)

Prinzip Laufzeitmessung

- Gegen die Strömungsrichtung benötigt das Signal die Zeit

$$t_1 = \frac{l}{c_{Schall} - c_F}$$

und in Strömungsrichtung

$$t_2 = \frac{l}{c_{Schall} + c_F}$$

- Durch Subtraktion der beiden Formeln, kann die Schallgeschwindigkeit eliminiert werden
 - Dies ist sehr vorteilhaft, da sich diese mit der Temperatur ändert und eine Korrektur in Abhängigkeit der aktuellen Fluidgeschwindigkeit notwendig wäre

Ultraschall-Strömungsmessung (V)

Prinzip Laufzeitmessung

- Die mittlere Fluidgeschwindigkeit lässt sich aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale bestimmen zu:

$$c_{F,m} = \frac{l}{\cos(\gamma)} * \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

- Dies erfordert allerdings, wie dargestellt, ein so genanntes Zweikanalsystem, welches auf beiden Seiten jeweils einen Empfänger und Sender besitzt

Ultraschall-Strömungsmessung (VI)

Einflüsse (Fluidtemperatur)

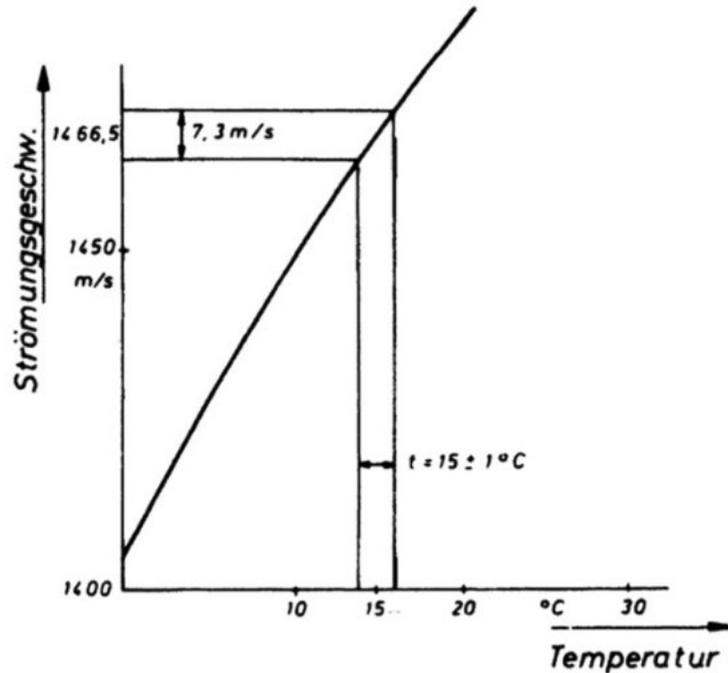


Abb.: Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit zur -temperatur
Quelle: Technische Durchflussmessung: unter besonderer Berücksichtigung neuartiger ...
von Karl W. Bonfig

- Die Schallgeschwindigkeit ändert sich mit der Fluidtemperatur

Einflüsse (Material)

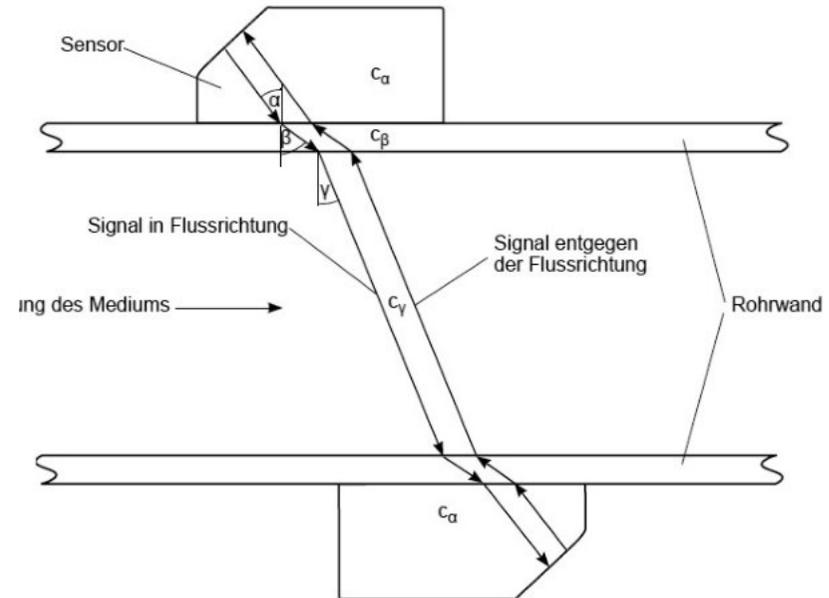


Abb.: Schallgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Materialien
Abb. aus: http://www.flexim.com/files/tsfluxus_f601v1-5de_leu.pdf

- Die Schallgeschwindigkeit ändert sich mit dem zu durchdringenden Material

Ultraschall-Strömungsmessung (VIII)

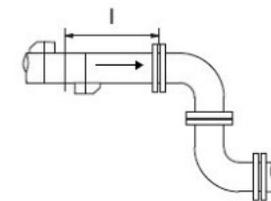
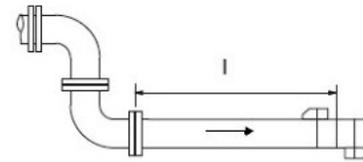
Einflüsse (Rohreinlauf und -auslauf)

- Bei Rohreinbauten müssen Ein- und Auslaufstrecken berücksichtigt werden, die es dem Strömungsprofil erlauben sich vollständig auszubilden
- Die Strecken werden immer mit dem Vielfachen des Rohrdurchmessers D angegeben

Störquelle: 2x 90°-Krümmer in gleicher Ebene

Einlauf: $l \geq 25 D$

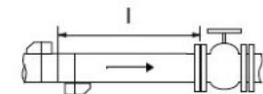
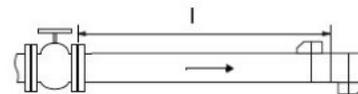
Auslauf: $l \geq 5 D$



Störquelle: Ventil

Einlauf: $l \geq 40 D$

Auslauf: $l \geq 10 D$



Störquelle: Pumpe

Einlauf: $l \geq 50 D$

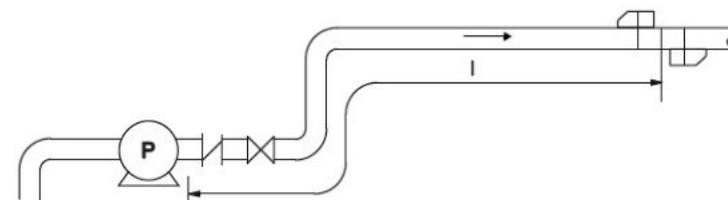


Abb.: Verschiedene Störquellen

Abb. aus: http://www.flexim.com/files/tsfluxus_f601v1-5de_leu.pdf

Ultraschall-Strömungsmessung (IX)

Impulsdifferenzlaufzeitmessung, Aufbau Messprinzip

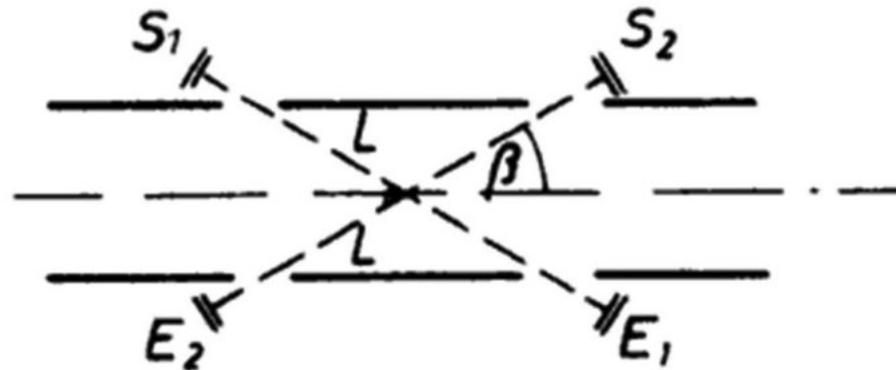


Abb. oben: Vereinfachtes System des „Sing-Around-Verfahrens“

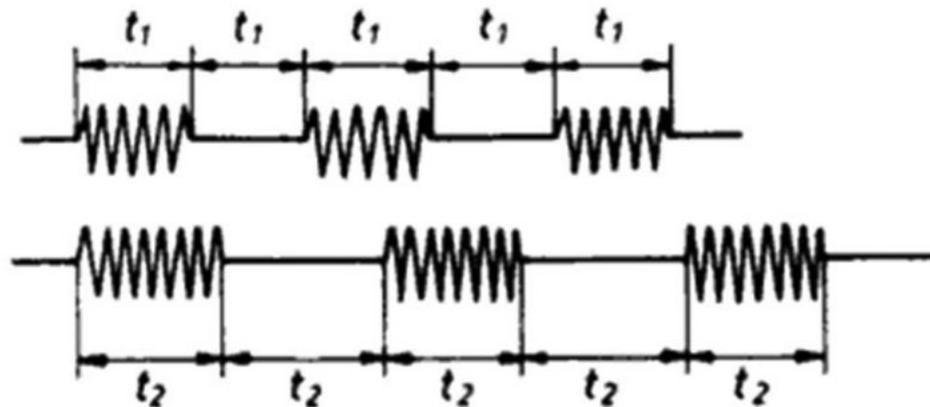


Abb. unten: Impulsfolge beim Sende-Empfangsbetrieb mit Laufzeitmessung

Quelle: Technische Durchflussmessung: unter besonderer Berücksichtigung neuartiger ...

Ultraschall-Strömungsmessung (X)

Impulsdifferenzlaufzeitmessung, Beschreibung Messprinzip

- Der Sender S1 sendet so lange, bis ein Schallimpuls im Empfänger E1 registriert wird
- Ein Schalter unterbricht das Senden, bis kein Signal mehr empfangen wird – danach beginnt der Zyklus erneut
- Dasselbe gilt für S2-E2 bei gleicher Sendefrequenz wie bei S1
- Es ergeben sich zwei Impulsfolgen mit gleichen Intervallen

Ultraschall-Strömungsmessung (XI)

Messprinzip Phasendifferenzmessung

- Messung eines konstanten Sinussignals längs der Strömung mit bekannter Schallgeschwindigkeit des Mediums
- Phasenverschiebung des gesendeten Signals zum ursprünglichen Signal ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit

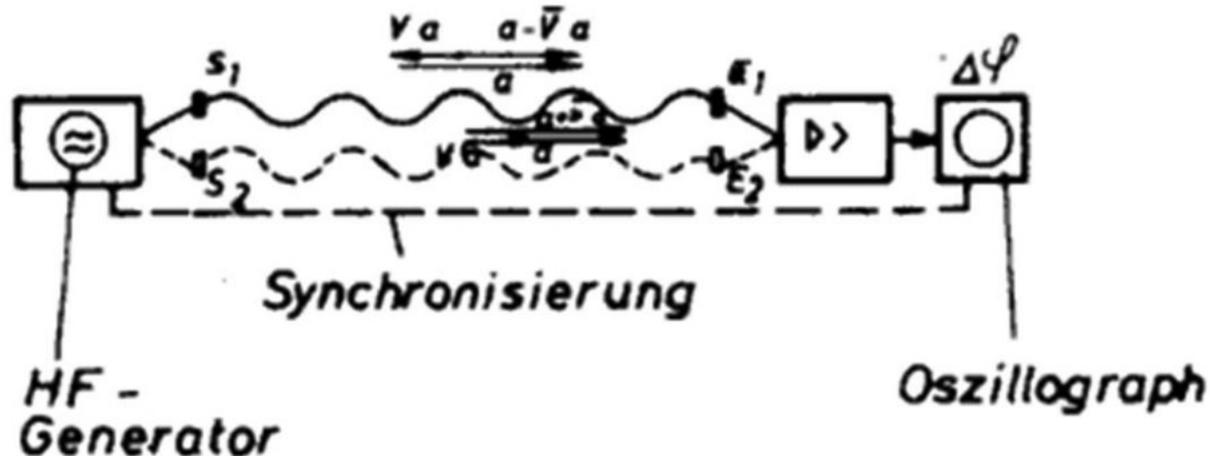


Abb.: Prinzip der Phasendifferenzmessung

Quelle: Technische Durchflussmessung: unter besonderer Berücksichtigung neuartiger ...

Ultraschall-Strömungsmessung (XII)

Messanordnung der Sender und Empfänger

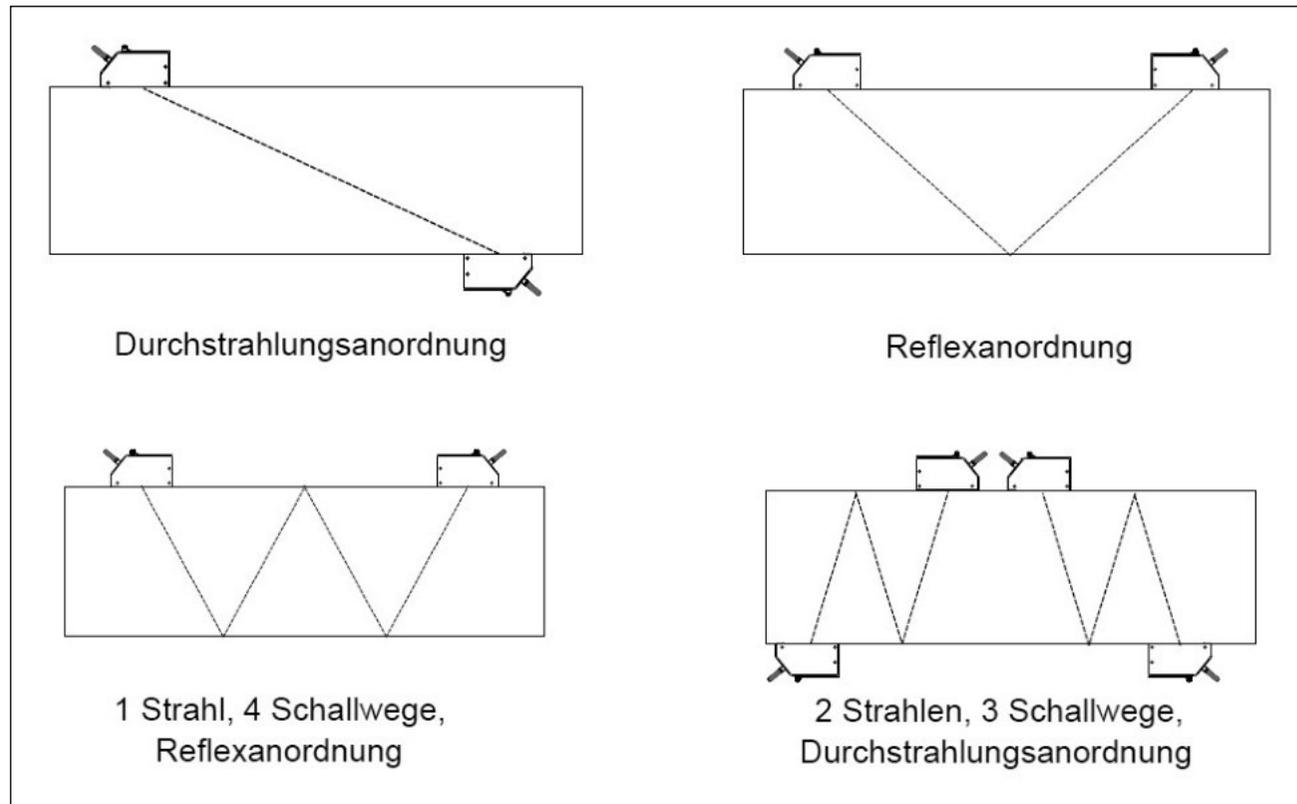


Abb.: Messanordnungen bei Ultraschallmessungen

Abb. nach: http://www.flexim.com/files/tsfluxus_f601v1-5de_leu.pdf

ANWENDUNGSBEISPIELE

Ultraschalldurchflussmesser



Abb.: Ultraschall-Durchflussmessgerät

Quelle: http://www.usinenouvelle.com/industrie/medias/3/8/7/000186783_4.jpg

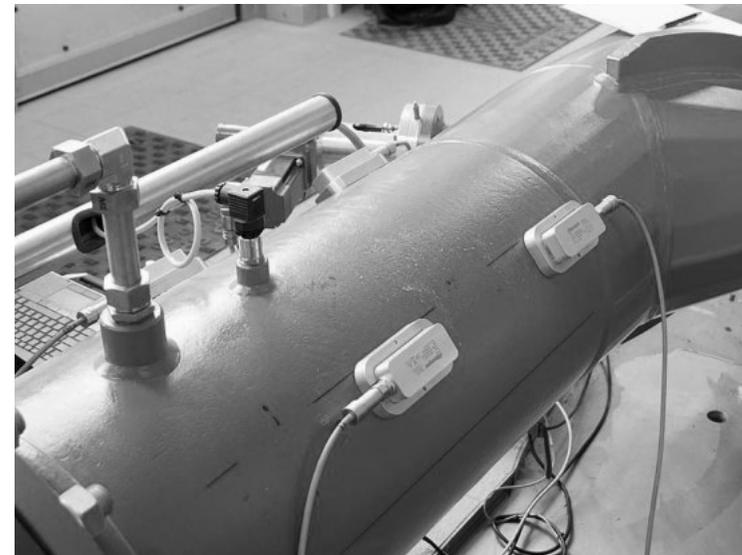
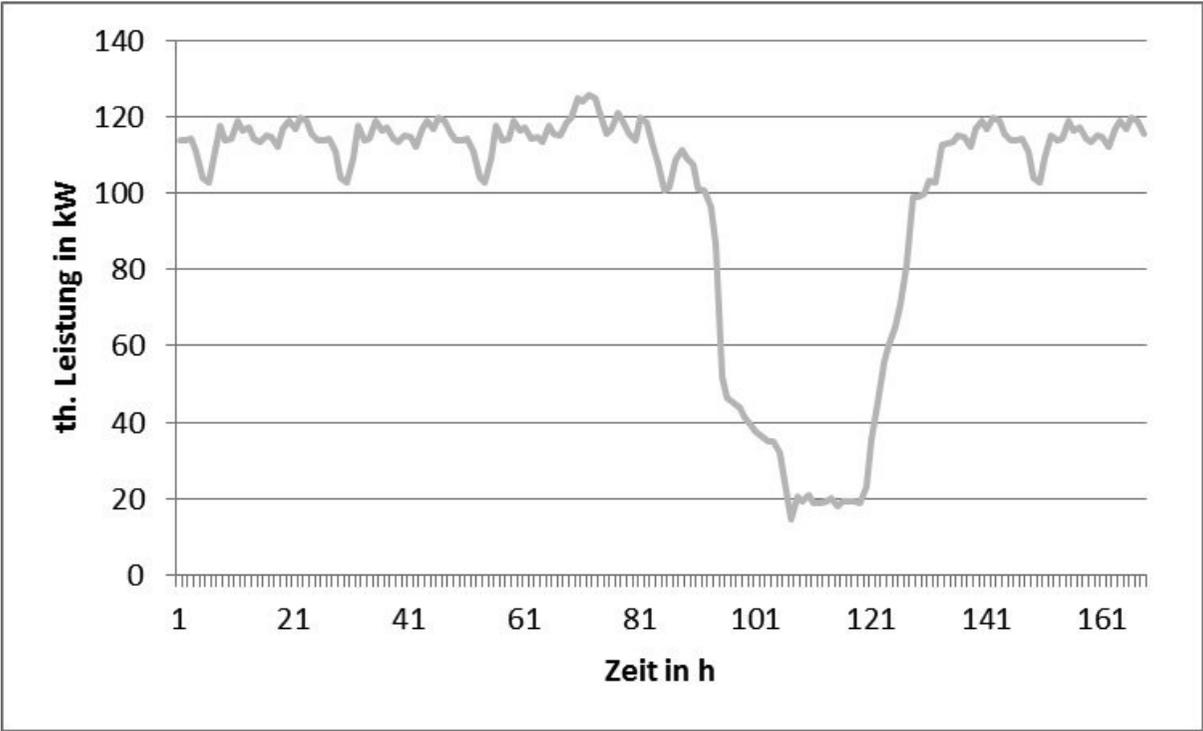


Abb.: Versuchsstand

Quelle: http://www.hfm.tugraz.at/fileadmin/_processed_/csm_ultraschall-clamp-on-durchflussmessung-clamp-on-sensoren_81238c7ba4.jpg

Kältelastprofil



Messverfahren im Vergleich

Praktikums-Prüfstand upp

	Mittelwert in l/min	Abweichung in l/min
Prowirl Coriolis	39,70 38,67	-1,03
Promag Coriolis	39,29 41,11	1,81
Ultraaschall Coriolis	39,34 39,35	0,01
Schwebekörper Coriolis	39,00 38,90	-0,10

VIELEN DANK

Quellen (Auszug)

- Bonfig, Karl: **Technische Durchflussmessung**. Essen: Vulkan-Verlag, 2001.
- Hoffman, Jörg et al.: **Handbuch der Messtechnik**. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- Baker, Roger C. **Flow Measurement**. Zweite Auflage. London: Professional Engineering Publishing Limited, 2002.
- Hesselbach, Jens et al.: **Energie- und klimaeffiziente Produktion**. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.

Quellen (Auszug)

- Altendorf et al., Matthias. **Durchfluss Handbuch**. Vierte Auflage. Reinach, 2003
- Brucker et al., Armin. **Durchflussmesstechnik**. Erste Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008
- https://library.e.abb.com/public/acc2ad20c5184c29c12578c0004b8437/D184B075U01-07-07_2011_secure.pdf

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT