

# Messtechnik 2 – Übersicht

Grundlagen ✓

Geometrische und mechanische Größen ✓

Optische Größen  
Messen aus Bildern



Schwerpunktthema ✓

Temperatur ✓

Druck ✓

Durchfluss, Füllstand, Dichte, Viskosität

Akustische Größen

Ionisierende Strahlung

# Durchfluss

*Durchfluss eines Fluids in gefüllter Leitung:  
Durch den Querschnitt fließende Stoffmenge*

Volumendurchfluss  $q_V = dV / dt$

Massendurchfluss  $q_m = dm / dt$

- komplizierter, teurer
- *besser*: unabhängig von Dichte  $\rho$ , daher auch von Druck, und Temperatur

Bei  $\rho = \text{const}$ :  $q_m = \rho q_V$

# Durchfluss – physikalische Grundlagen

Gleichung von Bernoulli für reibungsfreie, stationäre Strömungen

$$\frac{\rho}{2} v^2 + \rho g h + p = \text{const.}$$

Volumendurchfluss

$$q_V = vA$$

Kontinuitätsgleichung

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$\rho$  ... Dichte

$v$  ... Strömungsgeschwindigkeit

$h$  ... Höhe

$p$  ... Druck

$A$  ... Strömungsquerschnitt

$g$  ... Erdbeschleunigung

→ energetische Beziehungen zur Durchflussmessung nutzen

# Wirkdruckverfahren

Das meistverwendete Verfahren

Drosselemente

Messen einer Druckdifferenz  $\Delta p$

→ Volumendurchfluss  $q_V$

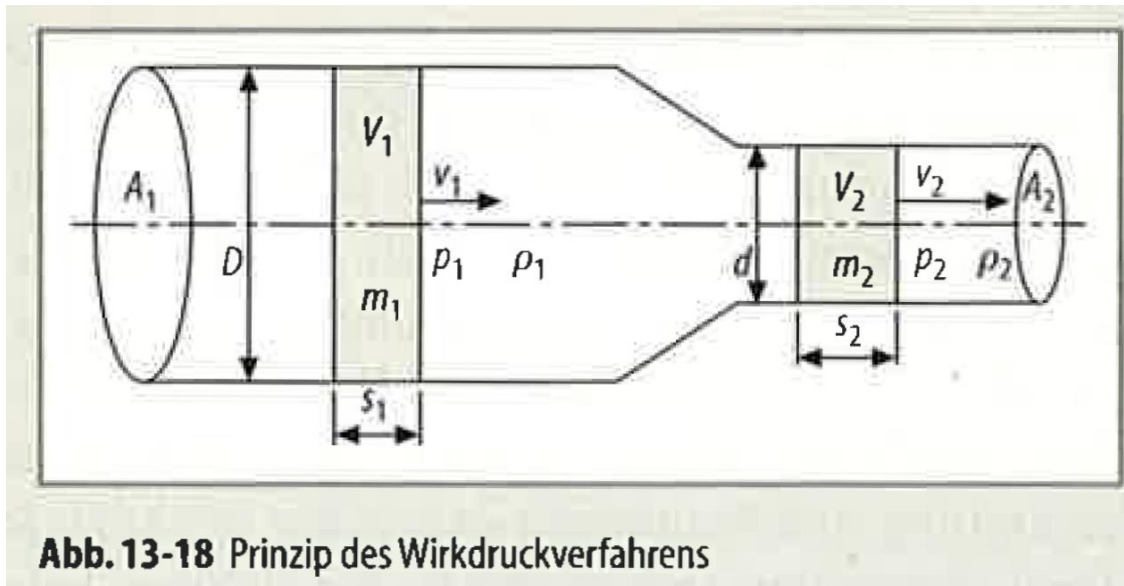


Abb. 13-18 Prinzip des Wirkdruckverfahrens

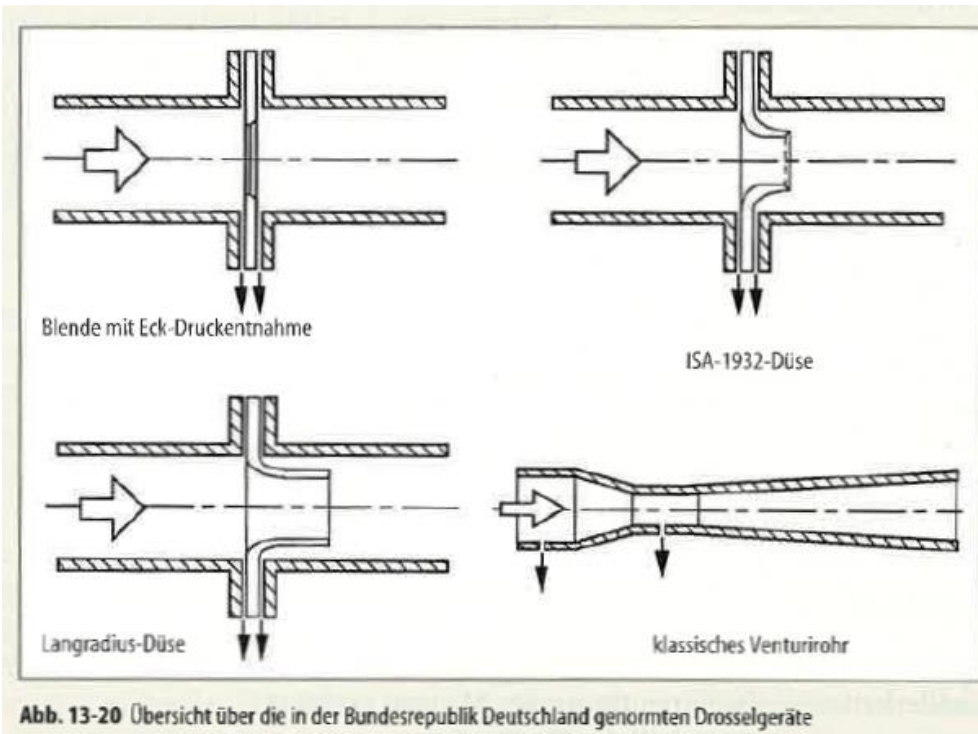
[Tränkler, Obermeier. Sensortechnik]

Konstante, abhängig vom Aufbau des Drosselements

$$q_V = c \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

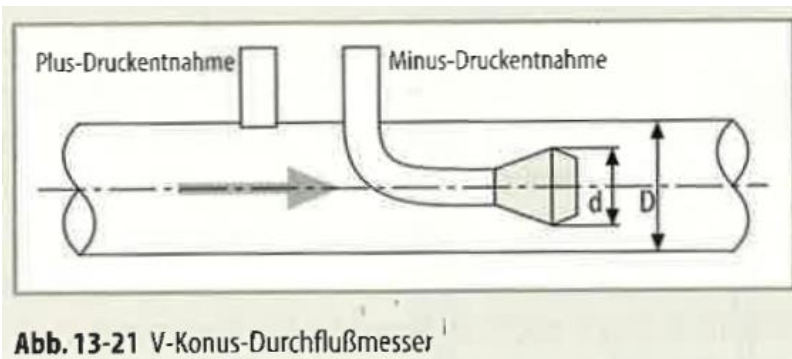
→ **Druckverminderung!**

# Wirkdruckverfahren: Bauarten, Eigenschaften



- + International genormt
- + keine Kalibrierung nötig

- große Ein- und Auslaufstrecken
- empfindlich gegen Verschmutzung
- empfindlich gegen Änderungen des Strömungsprofils
- nichtlinear



[Tränkler, Obermeier. Sensortechnik]

# Volumenzähler

Mit Kammern

$$V = \Delta V z$$

- $\Delta V$  ... Messkammerinhalt
- $z$  ... Anzahl der Füllungen

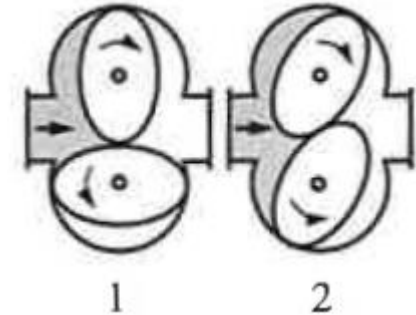


Bild 3.34 Wirkungsweise des Ovalradzählers

[Hoffmann, TB der MT]

Mit Messflügeln

$$q_V = c f$$

- $c$  ... Konstante, bauartabhängig
- $f$  ... Umdrehungen / s
- Energie für Antrieb kann extern zugeführt werden ( $\Delta p$  vor und nach Zähler = 0)

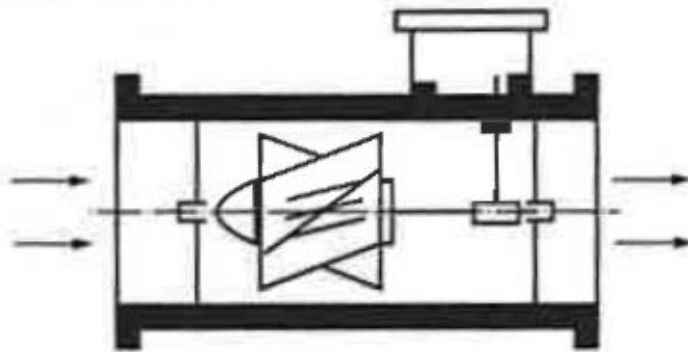


Bild 3.35 Zähler mit Axialflügel

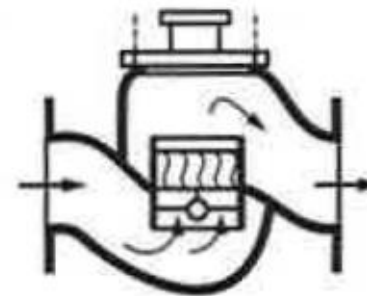


Bild 3.36 Zähler mit Senkrechtflügel

[Hoffmann, TB der MT]

# Volumenzähler – Eigenschaften

- + großer Messbereich
- viskositätsabhängig
- empfindlich gegen Verschmutzungen (bewegte Teile)

# Schwebekörper-Durchflussmessung (1)

Senkrechtes *konisches* Rohr

Querschnitt  $A(h)$  variabel

$F = \text{Gewicht} - \text{Auftrieb} = \text{const.}$

„Auftrieb“ aufgrund der Strömung!

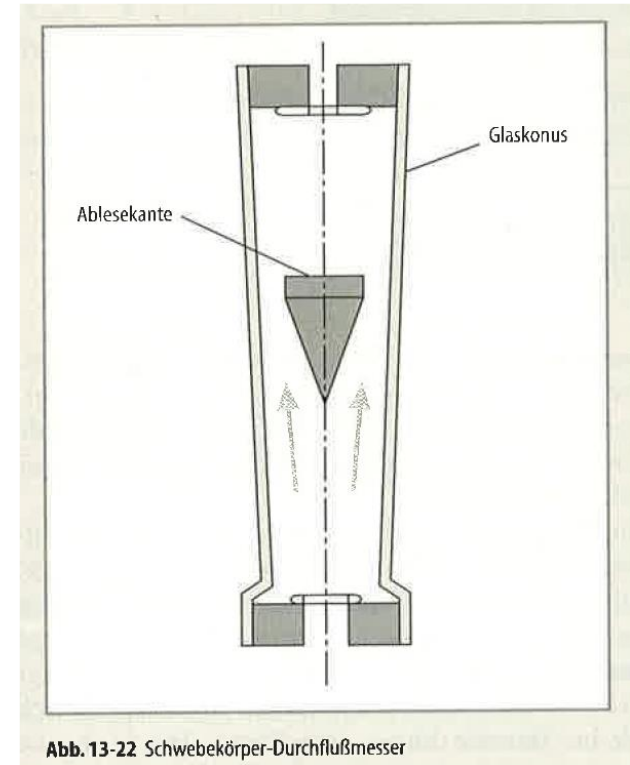
(vs. Auftriebsmethode bei der Dichtemessung!)

Ausführung:

- Glasrohr
- Ganzmetall mit magnetischer Kopplung

Ähnliches Messprinzip:

Federscheibe,  $F = \text{Federkraft} - \text{Vortrieb}$



[Tränkler, Obermeier. Sensortechnik]



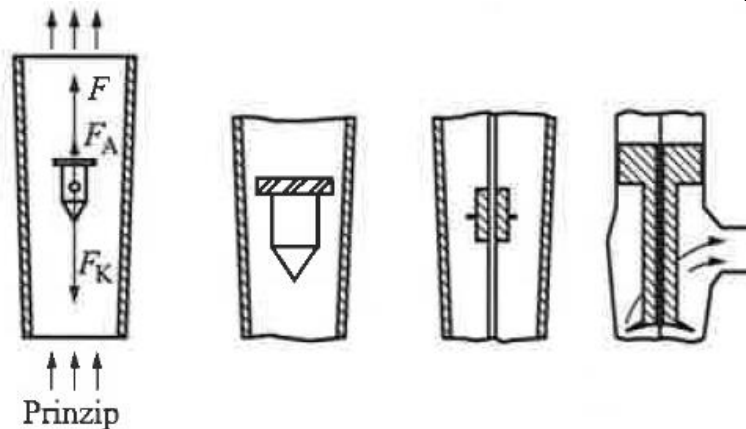
# Schwebekörper-Durchflussmessung (2)

Strömungswiderstand des Auftriebskörpers → „Auftriebskraft“

$$F = C \frac{\rho v^2}{2} = C \frac{\rho}{2} \left( \frac{q_V}{A} \right)^2$$

Messeffekt: Durchflussmessung durch Höhenmessung

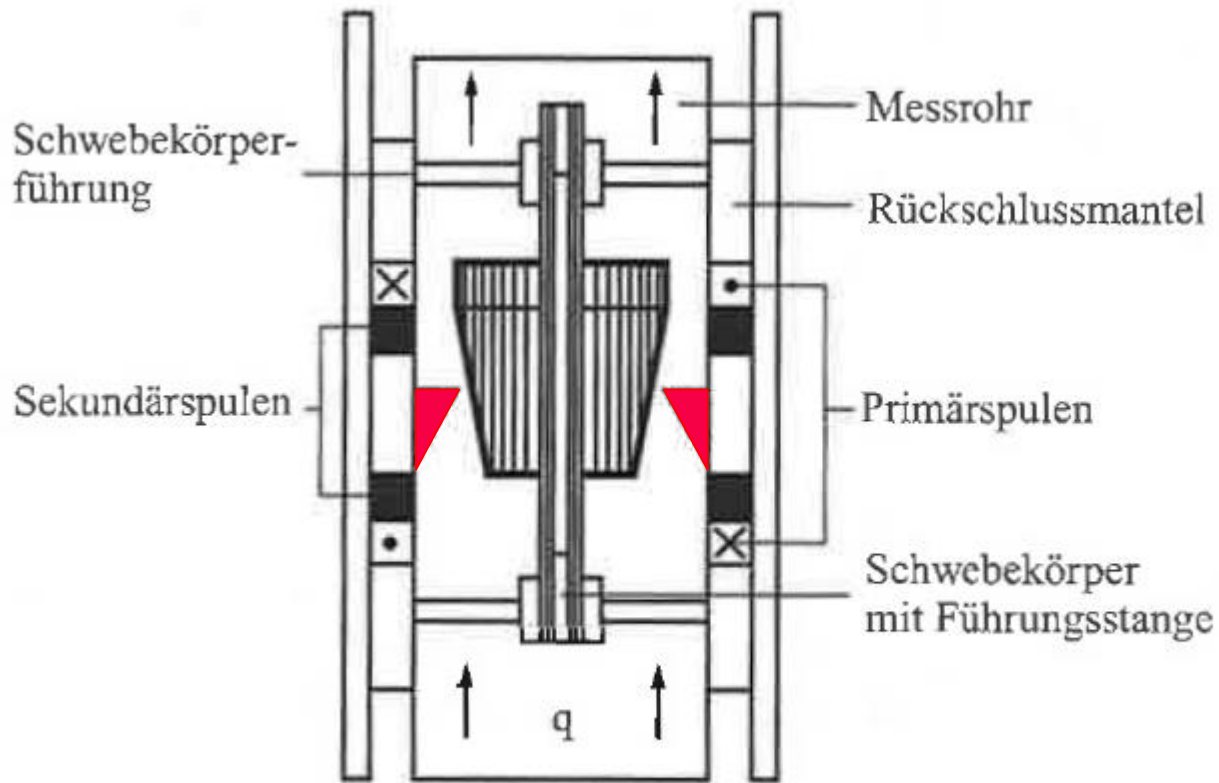
$$q_V = \frac{CA(h)}{\sqrt{p}}$$



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.37 Verschiedene Formen des Schwebekörper-Durchflussmessers

# Schwebekörper-Durchflussmessung (3)



Achtung!  
 Zylindrisches Rohr,  
 konischer Auftriebskörper.  
 Skizze ist ohne **Blende**  
 sinnlos!

Bild 3.38 Schwebekörper-Durchflussmesser mit Blende und konischem Messkörper

[Hoffmann, TB der MT]

# Schwebekörper-Durchflussmessung

## Eigenschaften

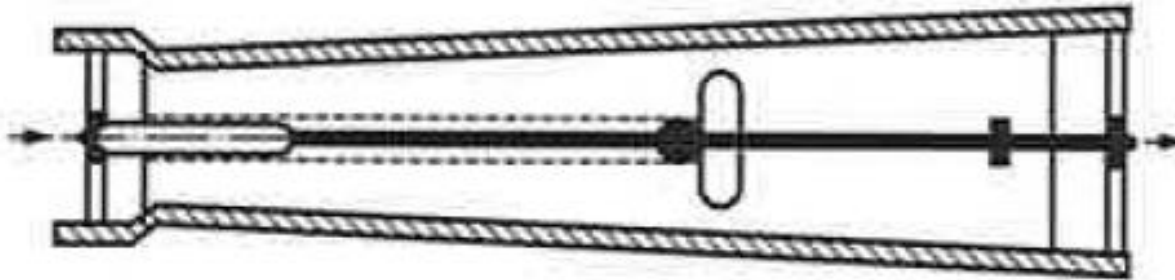
- + unempfindlich gegen Verschmutzung
- + keine Einlaufstrecke nötig
  
- Einbau muss senkrecht erfolgen
- nichtlinearer Messeffekt

# Federscheiben-Durchflussmessung

Wie Schwebekörper

Federkraft ersetzt Gewichtskraft

Einbau waagrecht möglich



*Bild 3.39 Federscheiben-  
Durchflussmesser*

[Hoffmann, TB der MT]

# Magnetisch-induktive Durchflussmessung

Für alle *elektrisch leitenden* Flüssigkeiten

Faraday'sches Induktionsprinzip:

$$\vec{E} \propto \vec{v} \times \vec{B}$$

Wenn Messaufbau so, dass  $\vec{E} \perp \vec{v} \perp \vec{B}$  abgegriffen wird:

$$U = dvB, \quad d \dots \text{Elektrodenabstand}$$

Rohr innen isoliert, 2 Elektroden

sonst *keine Einbauten* im Rohr

*linearer* Zusammenhang  $q_V = c U$

kein Einfluss von  $T, \rho, \nu$ , Viskosität

*breiter Einsatz!*

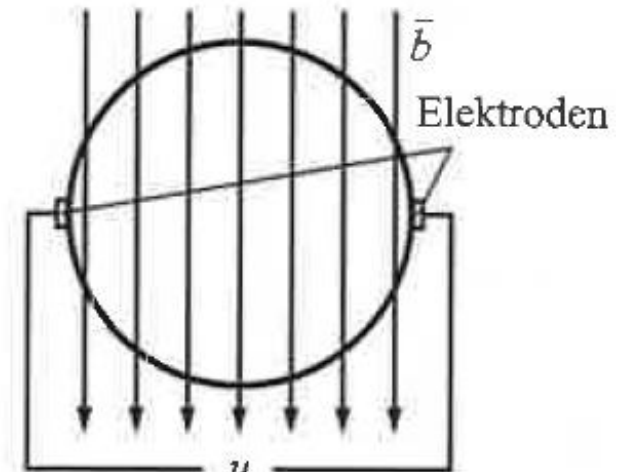


Bild 3.40 Magnetisch-induktive Durchflussmessung

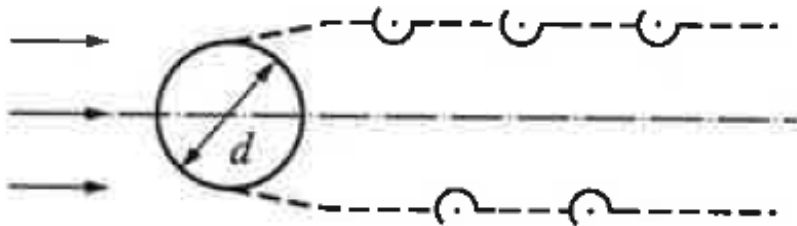
[Hoffmann, TB der MT]

# Wirbelstrasse

Prallkörper in die Strömung einbringen

Frequenz der Wirbelablösung  $\propto$  Strömungsgeschwindigkeit

Oszillation  $f$  des Prallelementes wird gemessen  $\rightarrow q_V = cf$



*Bild 3.41 Wirbelbildung durch einen in der Strömung befindlichen Körper*

- + für Gase und Flüssigkeiten
- + großer Messbereich
- + Frequenzmessung einfach + genau
- + geringer Verschleiß
- große Ein- und Auslaufstrecken

[Hoffmann, TB der MT]

# Laufzeitmessung über Korrelation

## Impfen mit `tracer`

- Laufzeit von Injektion zu Detektion

## Rauschen im Strömungsmittel

- Laufzeit  $\Delta t$  von Det.1 zu Det.2
- Kreuzkorrelation

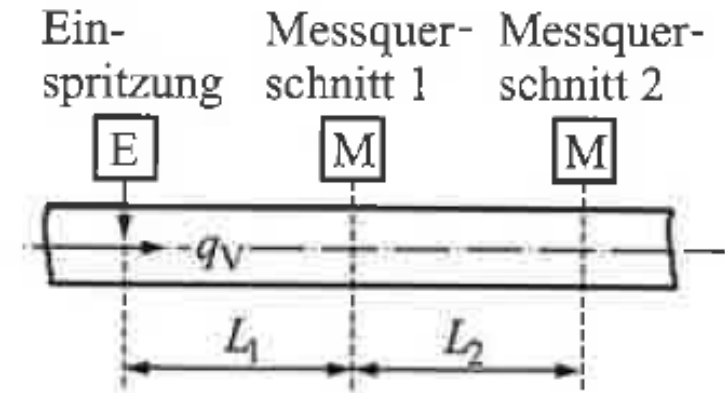


Bild 3.44 Prinzip des Laufzeitverfahrens

$V$  ... Volumen zwischen Det.1 und Det.2

$$q_V = \frac{V}{\Delta t}$$

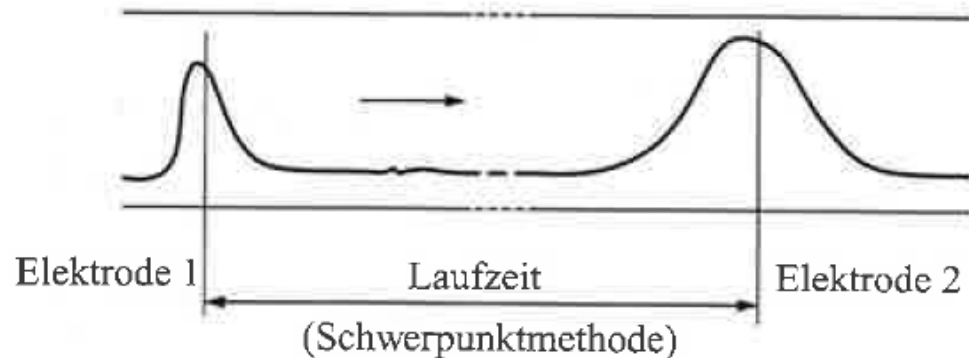
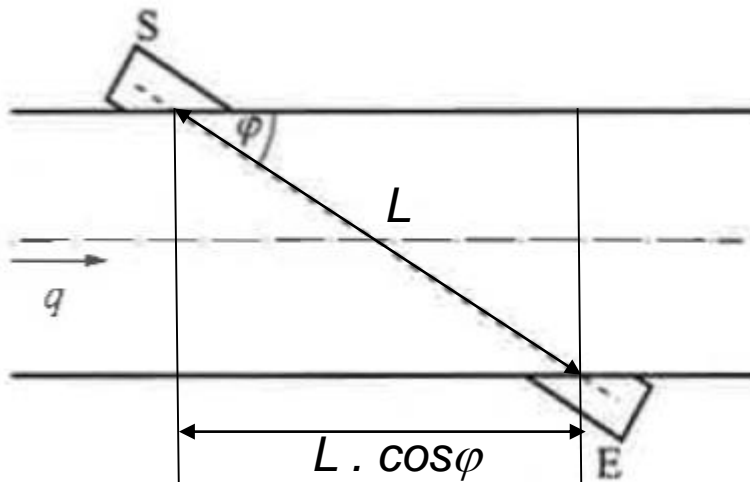


Bild 3.43 Salzlösungsverfahren nach van Allen

[Hoffmann, TB der MT]

# Laufzeitmessung mit Ultraschall (1)

## 1 Sender / Empfänger



[Hoffmann, TB der MT]

$$\bar{v} = \frac{\left(\frac{L}{t} - c\right)}{\cos\varphi}$$

$\bar{v}$  ... mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$L$  ... Streckenlänge

$t$  ... Laufzeit

$c$  ... Schallgeschwindigkeit im Medium

$A$  ... Querschnitt des Rohres

$$q_V = \bar{v}A$$

-  $c$ -abhängig



# Laufzeitmessung mit Ultraschall (2)

## 2 Sender / Empfänger; Differenzmessung

- leading-edge Methode

$$\bar{v} = \frac{L}{2\cos\varphi} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

- Frequenzdifferenz (sing-around)

$$\Delta f = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}$$

$$\bar{v} = \frac{L\Delta f}{2\cos\varphi}$$

$$q_V = \bar{v}A$$

+ *c-unabhängig* !

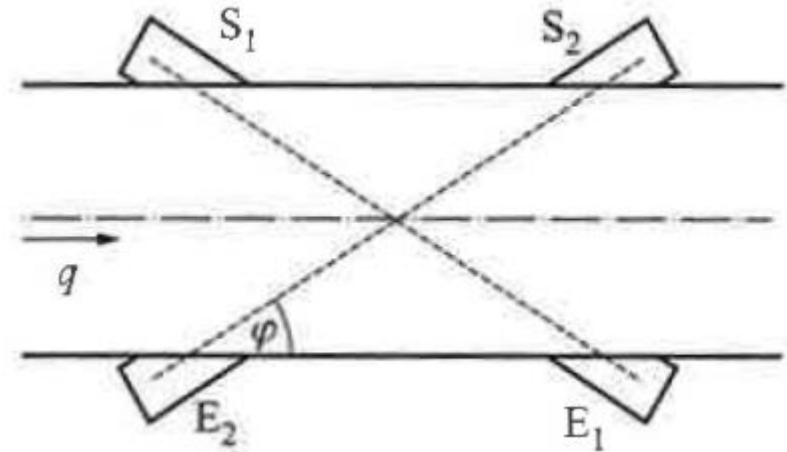


Bild 3.46 Bestimmung der Laufzeit in und entgegen der Strömungsrichtung

[Hoffmann, TB der MT]

# Ultraschall – Eigenschaften

- + auch bei großen Querschnitten
- + linear
- + keine Querschnittsänderung → keine Rückwirkung auf den Strömungsverlauf
- + auch für nichtleitende od. verschmutzte Fluide
  
- aufwändig

# Massendurchflussmessung Coriolis-Prinzip

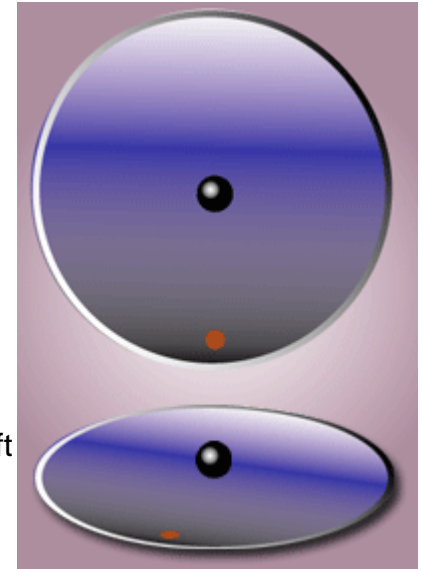
*Physikal. Effekt:*

$$\text{Coriolis Kraft: } \vec{F} = 2m(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

Nichtlinear beschleunigte Masse

→ Torsion des Messrohres

<https://de.wikipedia.org/wiki/Corioliskraft>

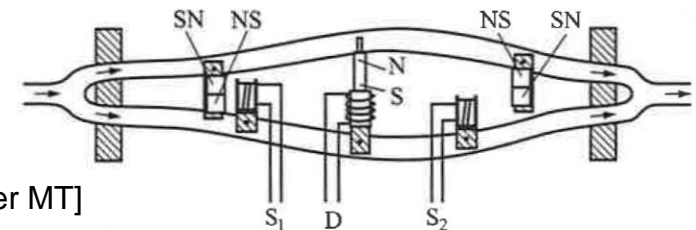


U-förmige Schleifen

(auch nahezu gerade Rohrführung möglich)

Messung der elastischen Verformung durch induktive Wegaufnehmer

Massendurchfluss  $q_m$



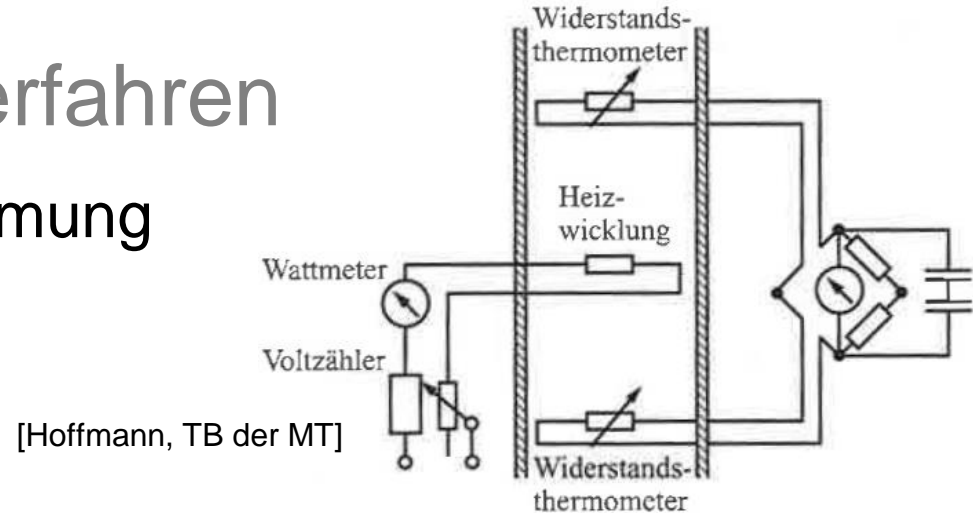
[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.47 Coriolis-Massendurchflussmesser mit gerader Rohrführung

# Thermische Verfahren

Wärmeabfuhr durch die Strömung

Massendurchfluss  $q_m$



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.50 Durchflussmesser nach dem Aufheizverfahren (Thomas-Messer)

# Doppler Verfahren

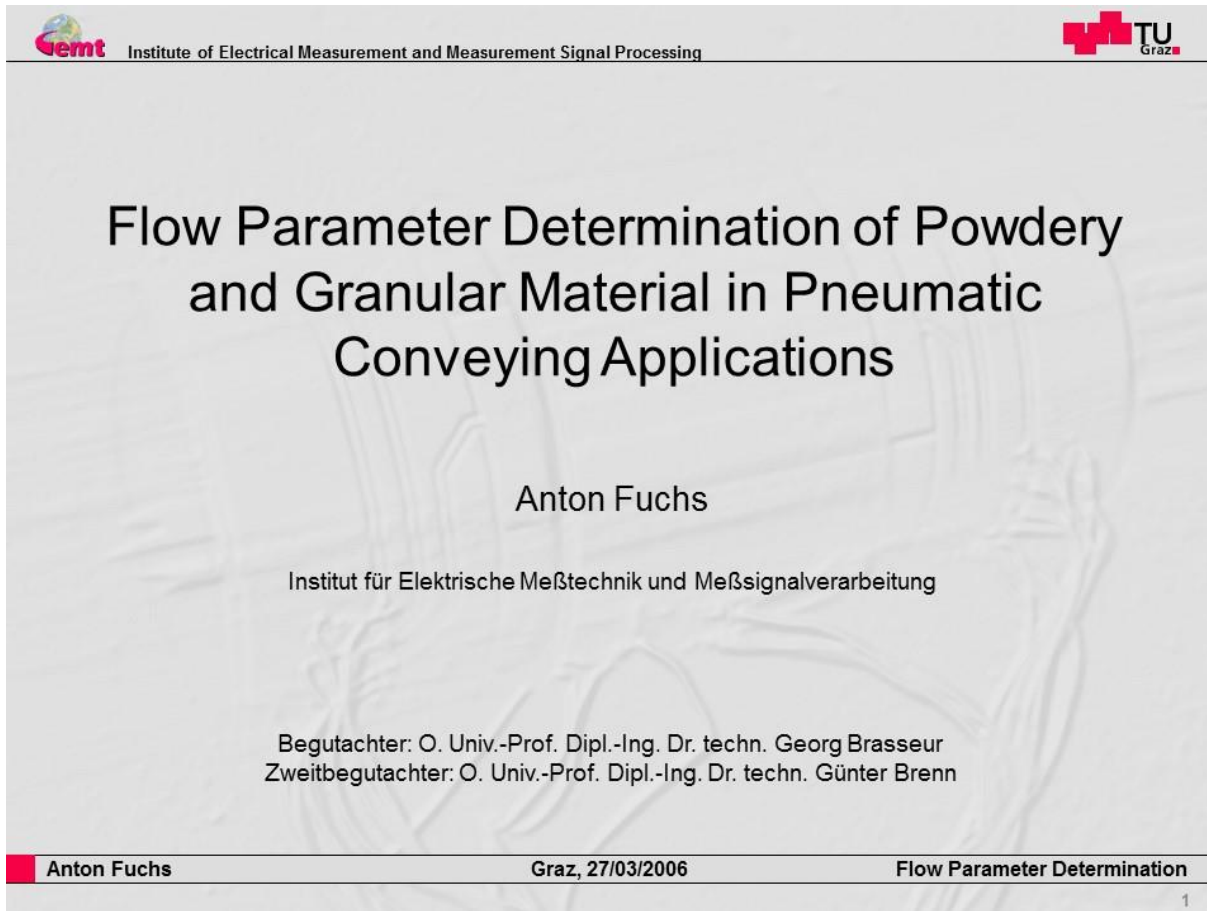
Ultraschall oder Laser-Doppler-Anemometrie

Streuung an Partikeln  $\rightarrow$  Frequenzverschiebung

Volumsdurchfluss  $q_v$

# Pneumatische Förderung von Schüttgut

Mehl, Zement, Granulat, Sand, ... → Dissertation Anton Fuchs



emt Institute of Electrical Measurement and Measurement Signal Processing

TU  
Graz

## Flow Parameter Determination of Powdery and Granular Material in Pneumatic Conveying Applications

Anton Fuchs

Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung

Begutachter: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Brasseur  
Zweitbegutachter: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günter Brenn

Anton Fuchs      Graz, 27/03/2006      Flow Parameter Determination

1

[2006, Rigorosumsvortrag

Bilder und Videos auf den  
folgenden Seiten aus dieser  
Präsentation von Dr. Fuchs]

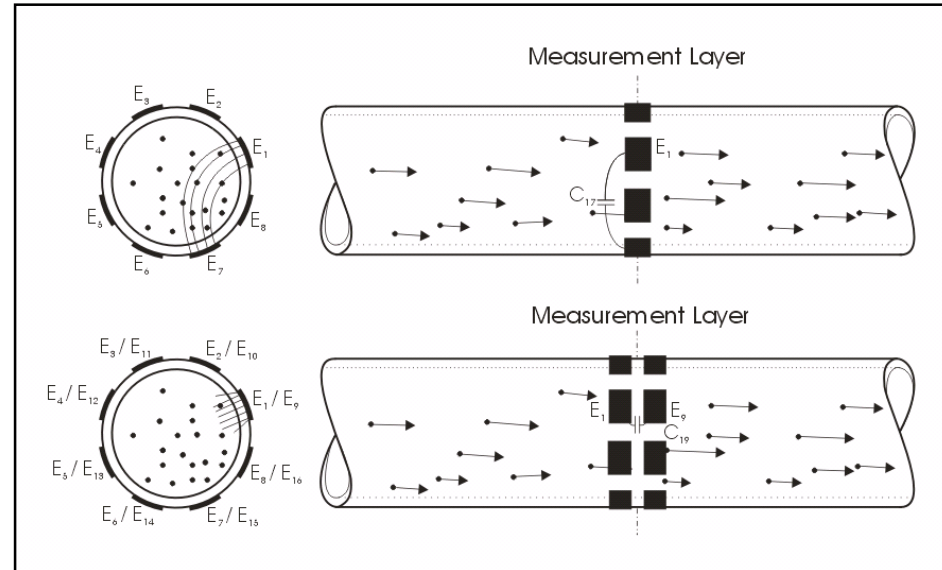
# Sensor Anforderungen



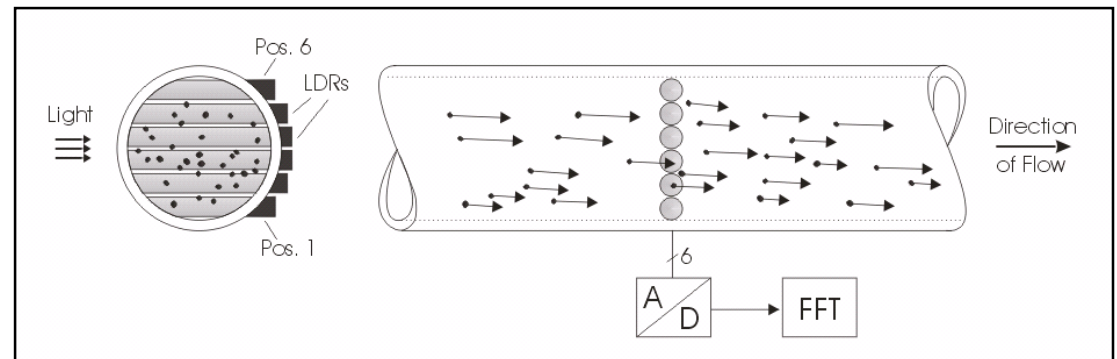
Nicht-invasives Messprinzip zwingend!!

# Sensoren mit Räumlicher Filterung

kapazitive Sensoren:



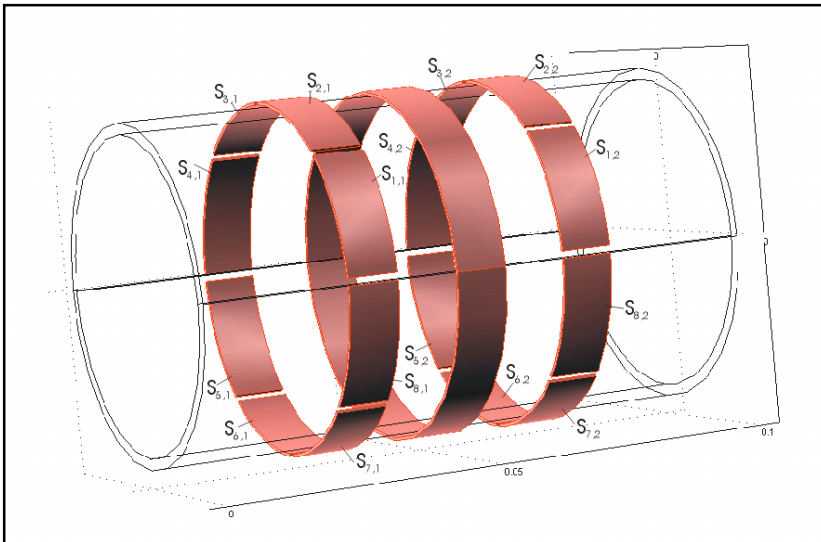
optischer Sensor:





# Kreuzkorrelations Sensoren - Kapazität

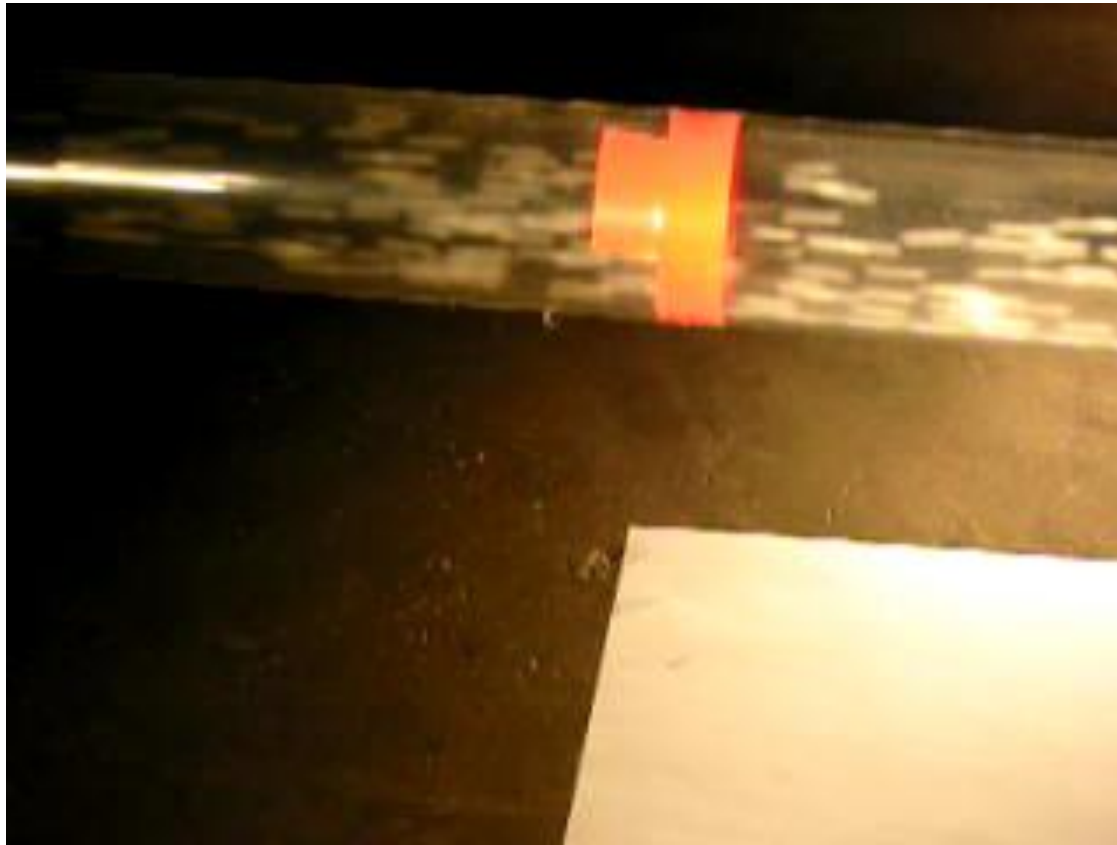
- Zwei Ringe von Sendesegmenten
- Gemeinsamer Empfängerring





# Pneumatische Förderung – Beispiele

Granulat, „dünner“ Durchfluss – “dilute” flow



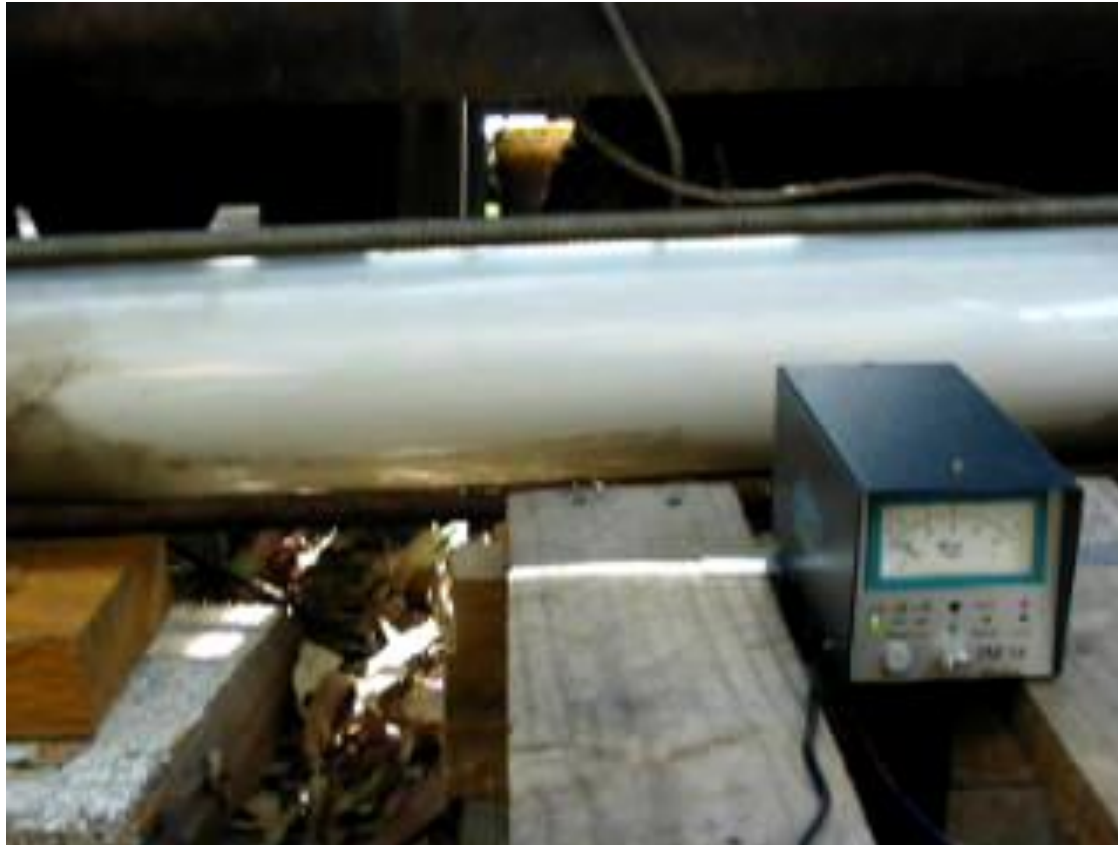
# Pneumatische Förderung – Beispiele

Granulat, „dichter“ Durchfluss – “dense” flow



# Pneumatische Förderung – Beispiele

Pulver



# Füllstand / Grenzstand

## Höhenstand von Flüssigkeiten in Behältern

### Weg / Positionsmessung

#### Füllstand:

- kontinuierlich

#### Grenzstand:

- maximale / minimale Füllhöhe

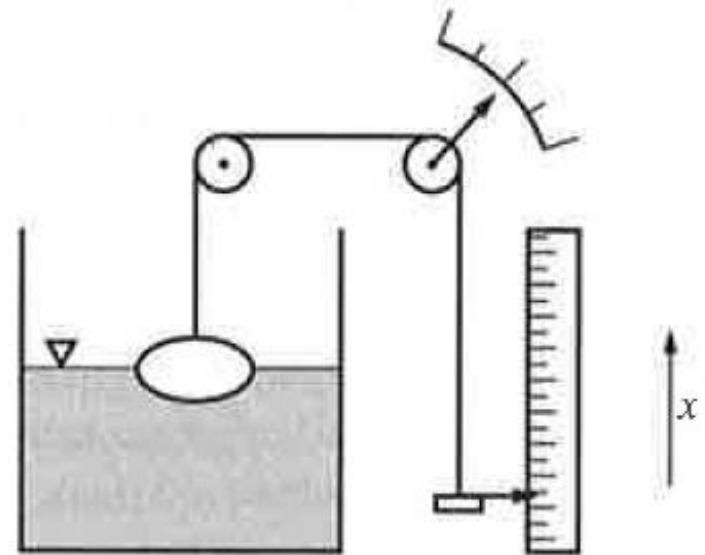
# Schwimmer und Tastplatten

Schwimmer:  $\rho_{\text{Schwimmer}} < \rho_{\text{Flüssigkeit}}$

Tastplatte: Servomechanismus

Messwertübertragung

- Mechanisch (Seil, ...)
- Messung der Zugkraft
- ...



[Hoffmann, TB der MT]

*Bild 3.51 Flüssigkeitsstandsmessung mit Schwimmern*

# Kapazitiv (1)

## Voraussetzungen:

- $\epsilon_r$  bekannt und konstant
- Elektrisch nicht leitende Fluide

## Parallelschaltung

- $C_1$  (eingetaucht),  $C_2$  (Luft)

## Platten

- Behälterwand + Platte
- Eingetauchter Plattenkondensator

## Zylinderkondensator

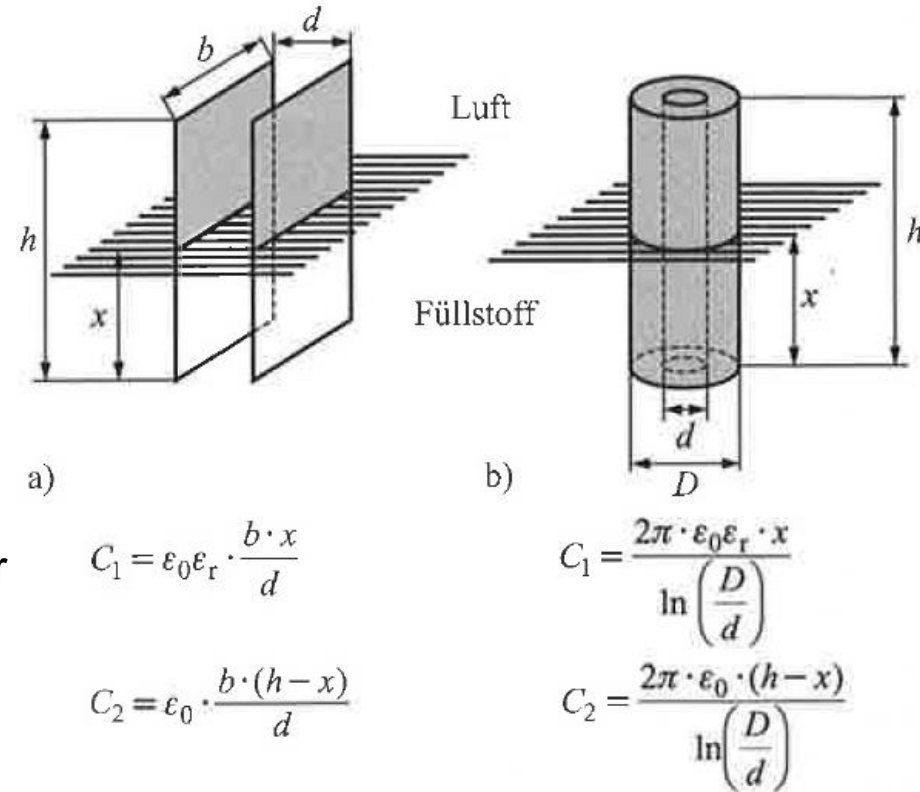


Bild 3.52 Füllstandsmessung mit  
a) Plattenkondensator, b) Zylinderkondensator

[Hoffmann, TB der MT]

# Kapazitiv (2)

## Leitende Fluide:

- Sonde mit dielektrischer Isolierschicht ( $\epsilon_{r1}$ )
- z.B. isolierter Stab in zylindrischem Behälter
- $\epsilon_0, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$

## Generell:

- $C_{ges} = k_1(h) + k_2x$
- Lineare KL

Grenzstand: weniger kritisch,  $\epsilon_r$  beliebig, auch bei inhomogenen Flüssigkeiten

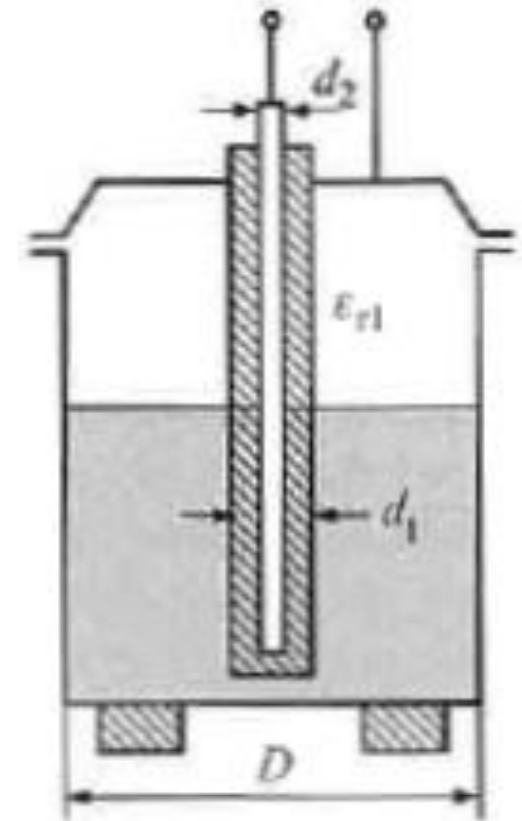


Bild 3.53 Kapazitive Füllstandsmessung bei leitenden Flüssigkeiten

[Hoffmann, TB der MT]

# Konduktiv

Leitende Fluide

Elektrode schließt bei Eintauchen den Stromkreis

Niederfrequente Wechselspannung

- Vermeidet Elektrolyse

Viele Elektroden:

- Stufenweise Abtastung des Füllstandes



# Thermisch

Flüssigkeit hat die bessere Wärmeleitung

Unterschiedliche Temperatur

- Füllgut ↔ Luftraum
- Wasser ↔ Dampf

z.B.: Kette von Thermoelementen an der Außenwand

Bei kaltem Medium

- Beheizter Stab wird im Medium besser gekühlt

# Radiometrisch

Radioaktive Bestrahlung (Gammastrahler)

Absorption durch das Füllgut

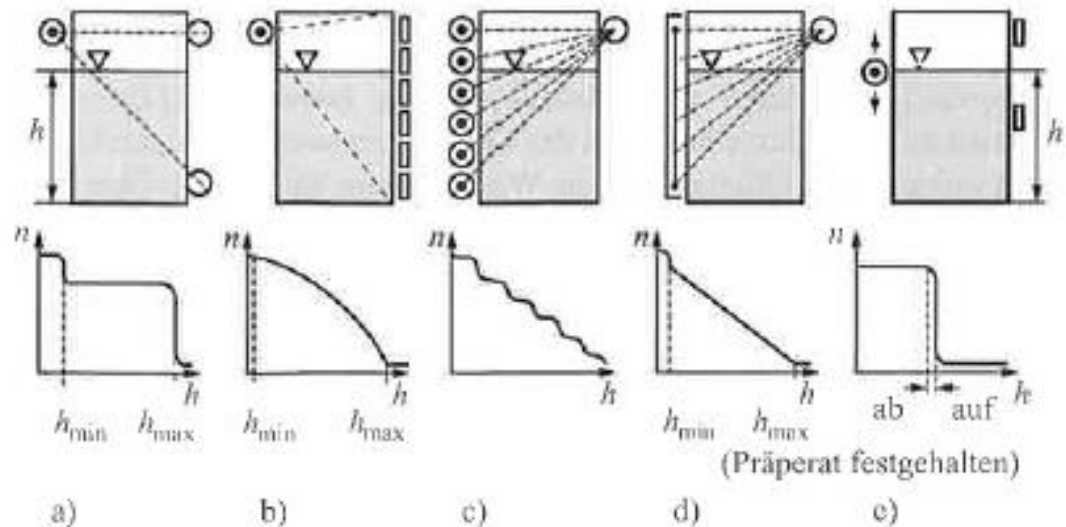
Gammastrahler → Behälter → Abschwächung → Detektor

Alle Komponenten außerhalb des Behälters

- Keine nachträglichen baulichen Maßnahmen

Geeignet für

- Grenzstand
- Stufenweise
- kontinuierlich



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.54 Strahleranordnungen für die radiometrische Füllstandsmessung und die dazugehörigen Kennlinien

# Ultraschall

## Reflexion an der Grenzschicht

### Sender+Empfänger

- Am Boden (geringere Verluste)
- Am Deckel

### Probleme

- Zusätzliche  $T$ -Messung, da  $c$   $T$ -abhängig
- Bei unbek. Konzentration:  $c$ -Referenzmessung
- Nebenechos
- Signalverarbeitung

# Optisch

## Lichtschranke

## Glasfaser

- Dämpfung am Ende ändert sich beim Eintauchen
- Viele Fasern hängen unterschiedlich tief in den Behälter („Faserlineal“)
- Füllstand auf 0.1mm genau möglich

## Laser

- Interferenz
- Triangulation
- Laufzeitverfahren

# Mikrowellen (Radar)

Sender + Empfänger im Deckel

Laufzeit Sender → Oberfläche → Empfänger

Signalverarbeitung

- Erkennung von Neben-Reflexionen
- Messbereichsfenster
- Plausibilitätskontrolle
- Integrationszeit, etc.

z.B. Siemens „sitrans“

**Warum mehr Geld ausgeben als nötig?**  
SITRANS LR 200 zur kostengünstigen Füllstandsüberwachung

Schnupperangebot:  
Euro 750,-\*  
Gültig bis 30. April 2004

SIEMENS

1960  
1550 mA

sitrans

# Weitere Verfahren

## Füllstand über Kraft- oder Druckmessungen

- Wiegen
- Verdrängung → Auftriebskraft
- Druck
  - Auf die Unterlage / Aufbau eines Gegendruckes
  - Membran, Messung kapazitiv, induktiv, piezoresistiv, ...

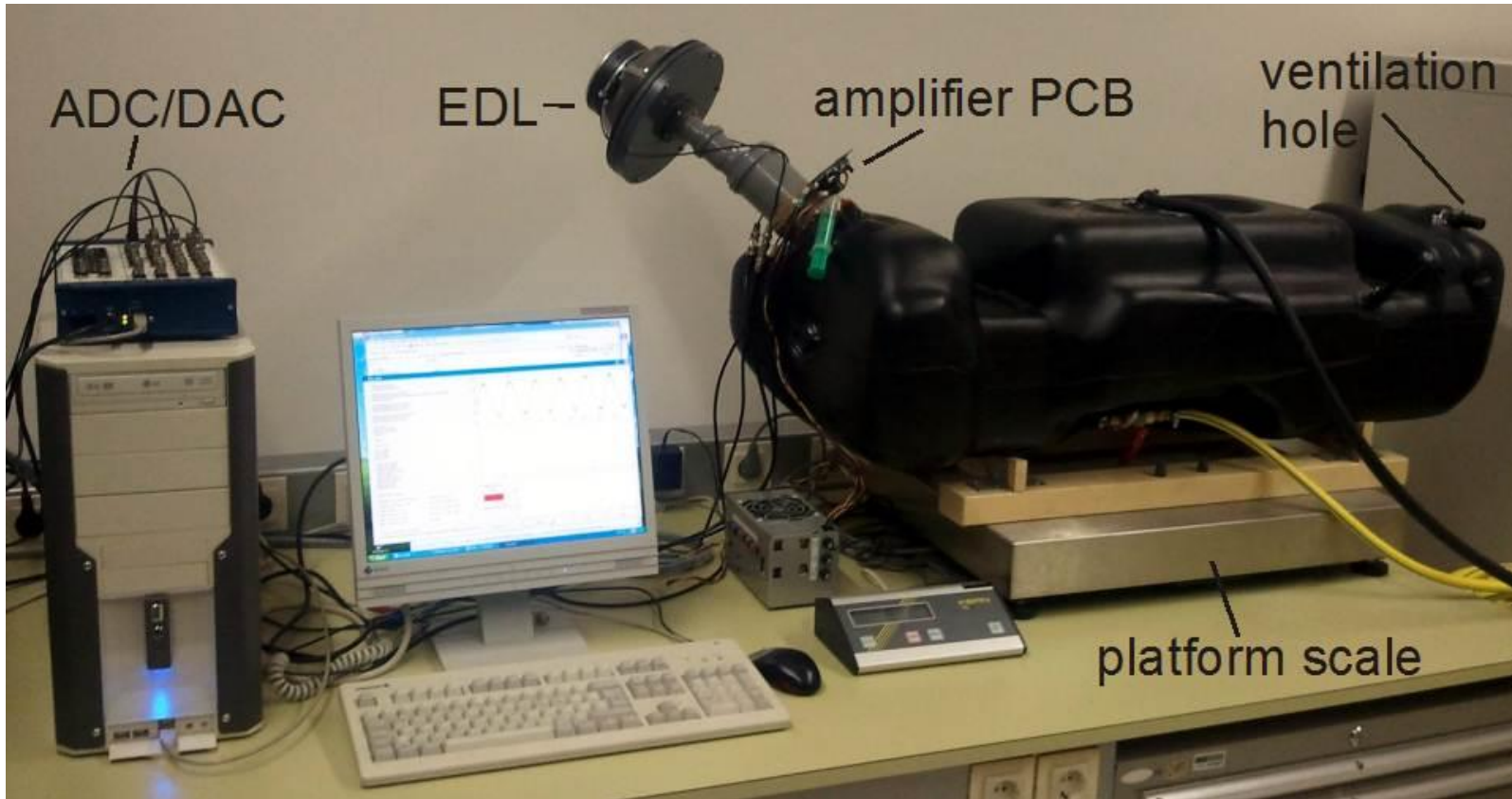
## Grenzstand mit Schwinggabel

- Schwingung wird gedämpft

## Füllstand mit Flügelrad

- Von oben absenken → Bremsung bei Eintauchen

# Pneumatic Volume Gauging: Setup



Rudolf Brunnader, Gert Holler, Georg Brasseur

# Dichte

Masse / Volumen

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\rho] = \text{g/cm}^3$$

Wichte, spezifisches Gewicht:  $\gamma = \frac{G}{V} = \frac{g \cdot m}{V} = g \cdot \rho$

Dichtemessung:

- Massenmessung
- Volumenmessung



Wägemethode

Mess-Verfahren:

Wägemethode  
Auftriebsmethode

+ weitere...



Die beiden *wichtigsten*  
Methoden.  
Für *alle drei*  
Aggregatzustände!



# Aspekte bei der Dichtemessung

## Dichte abhängig von Druck und Temperatur

- Betriebsdichte  $\rho$
- Zustandsbezogene Dichte  $\rho_n$  im Normzustand  $V_n$  bei  $T_n, p_n$

## Aggregatzustände:

fest – flüssig – gasförmig

## Messung von Flüssigkeiten und Gasen:

Kontinuierlich – diskontinuierlich

# Die Wägemethode (erklärt für feste Körper)

Masse  $m$  durch Wägung ermitteln

Volumen  $V$

- Aus den Abmessungen
- Verdrängung von Flüssigkeit

$$\rightarrow \rho = \frac{m}{V}$$

# Die Auftriebsmethode (erklärt für feste Körper)

Archimedisches Prinzip: Körper vollständig in Flüssigkeit mit bekannter Dichte  $\rho_1$  eintauchen

Auftrieb =  $gV\rho_1$  = Gewicht der verdrängten Flüssigkeit

Dichte ermitteln durch

- Wägung des Körpers in Luft  $G_L$
- Bestimmung des Gewichtes  $G_{res}$  in Flüssigkeit (vollständig untergetaucht, an Faden aufgehängt)

$$G_{res} = g \cdot \rho_2 \cdot V - g \cdot \rho_1 \cdot V = gV(\rho_2 - \rho_1)$$

- $\rho_1$  ... Flüssigkeit,  $\rho_2$  ... Körper

$$\frac{G_{res}}{G_L} \rightarrow \dots \rightarrow \boxed{\rho_2 = \frac{\rho_1 G_L}{G_L - G_{res}}} \rightarrow \text{„Auftriebsmethode“}$$

bedeutet: *2x wiegen*

# Wägemethode für Flüssigkeiten

## Diskontinuierlich

- Gefäß mit bekanntem Volumen (5-30ml)
- Leeres Gefäß wiegen
- Mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß wiegen
- Sehr genau → Kalibrierung von Geräten

## Kontinuierlich

- U-Rohr mit konstantem Volumen wiegen
- $G = G_0 + g\rho V$
- Für inhomogene Stoffe, hohe Drücke, ätzende Flüssigkeiten, etc.

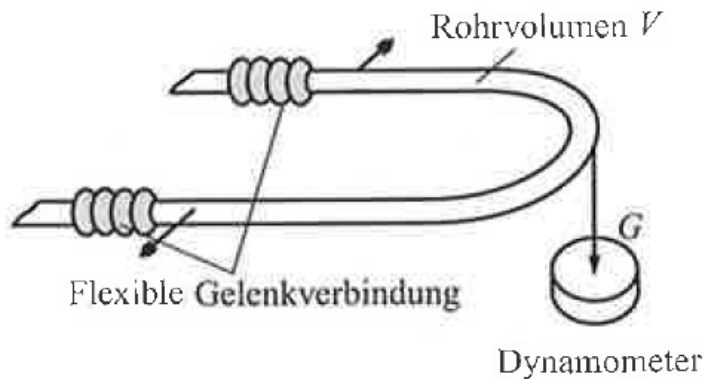


Bild 3.55 Kontinuierliche Dichtemessung nach Wägemethode

[Hoffmann, TB der MT]

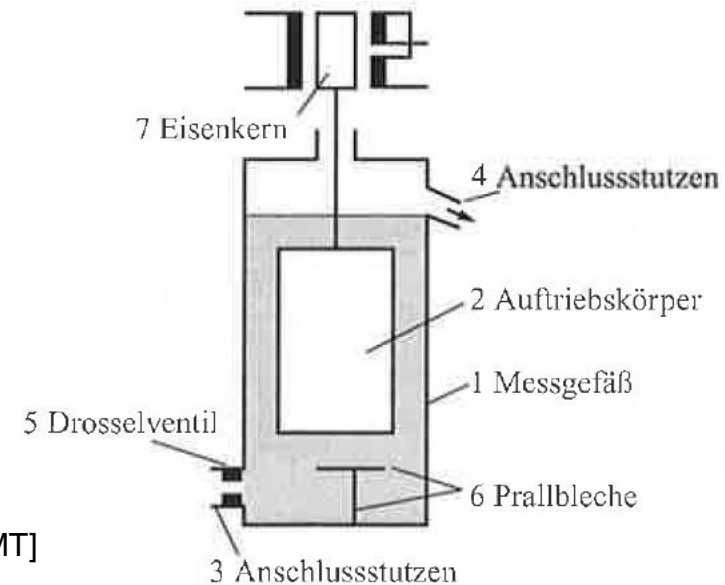
# Auftriebsmethode für Flüssigkeiten

## Diskontinuierlich

- Aräometer mit bekanntem Volumen
- Gewicht  $G_L$  in Luft,  $G_F$  in Flüssigkeit
- $G_L - G_F \rightarrow$  Gewicht der verdrängten Flüssigk.

## Kontinuierlich

- Eintauchtiefe / Auftriebskraft messen
- z.B. induktiv



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.56 Dichtemesseinrichtung mit schwimmendem Auftriebskörper

[<https://de.wikipedia.org/wiki/Aräometer>]

# Hydrostatische Dichtemessung von Flüssigkeiten

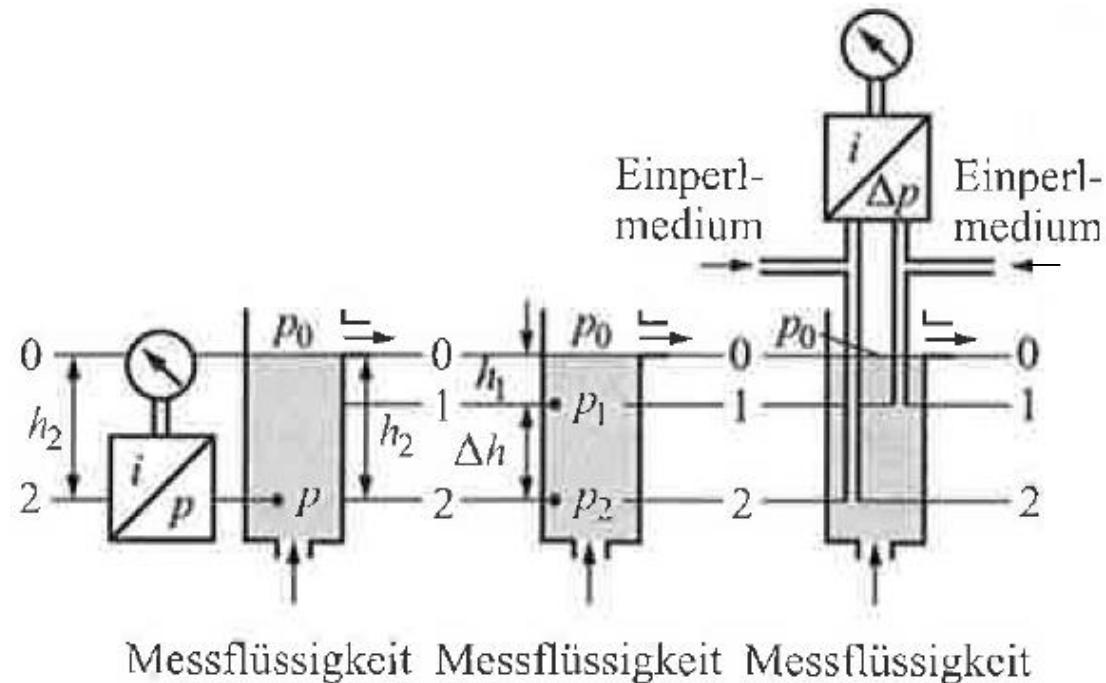
Hydrostatischer Druck  $p = gh\rho$  ist abhängig von  $\rho$

Dichtemessung  $\rightarrow$  Druck(differenz)messung

Direkt

Einperlverfahren

- Gas wird eingeblasen
- Robust, wenig anfällig gegen Verschmutzung



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.57 Hydrostatische Dichtemessung

$$\rho = \frac{p_2 - p_0}{g \cdot h_2}$$

$$\rho = \frac{p_2 - p_1}{g(h_2 - h_1)}$$

# Radiometrische Dichtemessung von Flüssigkeiten

Strahlungsintensität einer Quelle  $I_0$

Exponentielle Abschwächung beim Durchgang durch eine Flüssigkeit:

$$I = I_0 \exp(-\mu' \cdot \rho \cdot d)$$

$\mu'$  ... Massenabsorptionskoeffizient  
 $d$  ... Schichtdicke

Berührungsfrei

Gammastrahler

# Dichtemessung von Gasen

## Diverse Varianten zur Wäge- und Auftriebsmethode

- Kolben bekannten Volumens evakuieren+wiegen, mit Gas füllen + wiegen  
→ **Wägemethode!**, diskret
- Lux'sche Gaswaage: Auftrieb einer luftgefüllten Kugel im Messgas  
→ **Auftriebsmethode!**, kontinuierlich

Ausströmverfahren (Volumendurchfluss-, Zeitmessung)

Schwingungsmethoden ( $f$ -Änderung bei Dichteänderung)

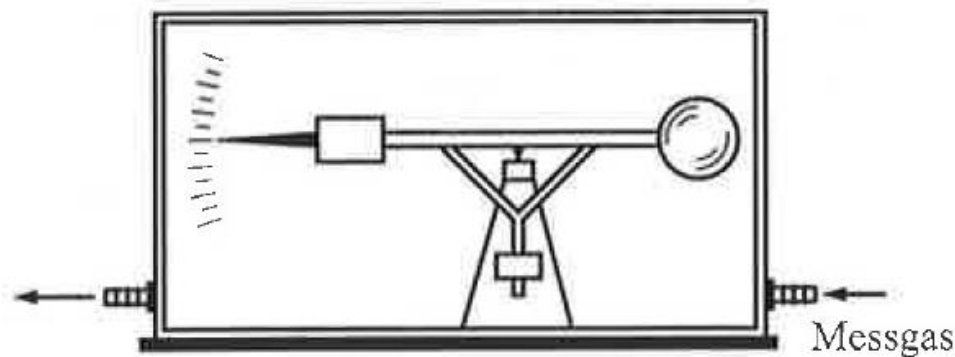


Bild 3,58 Lux'sche Gaswaage

[Hoffmann, TB der MT]



# Viskosität

## Zähigkeit, innere Reibung

Dynamische Zähigkeit:  $[\eta] = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Kinematische Zähigkeit  $\nu = \eta / \rho$

### Viskosität abhängig von

- Druck (geringfügig)
- Temperatur (stark!)
- Schergefälle (je nach Flüssigkeit)
- Dauer der Scherbeanspruchung

zusätzliches  
(optionales)  
Material

- Prozessmesstechnik
- Physikalische Effekte
- Partikelmesstechnik

# Viskosimeter

Kapillar- (Druckdifferenz)

Rotations- (Drehmoment)

Verschiebung zweier Zylinder (Absinkzeit)

Kugelfall- (Fallzeit)

Schwebekörper- (formabhängige Gleichgewichtslagen)

Schwingungs- (Dämpfung)

Rheometer: ähnlich, aber mehr Funktionen als Viskosimeter

zusätzliches  
(optionales)  
Material

- Prozessmesstechnik
- Physikalische Effekte
- Partikelmesstechnik

# Messtechnik 2 – Übersicht

Grundlagen ✓

Geometrische und mechanische Größen ✓

Optische Größen  
Messen aus Bildern



Schwerpunktthema ✓

Temperatur ✓

Druck ✓

Durchfluss, Füllstand, Dichte, Viskosität ✓

Akustische Größen

Ionisierende Strahlung