

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 ρ , 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

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

ρ ... Dichte

v ... Strömungsgeschwindigkeit

h ... Höhe

p ... Druck

A ... Strömungsquerschnitt

g ... Erdbeschleunigung

→ energetische Beziehungen zur Durchflussmessung nutzen

Wirkdruckverfahren

Das meistverwendete Verfahren

Drosselemente

Messen einer Druckdifferenz Δp

→ Volumendurchfluss q_V

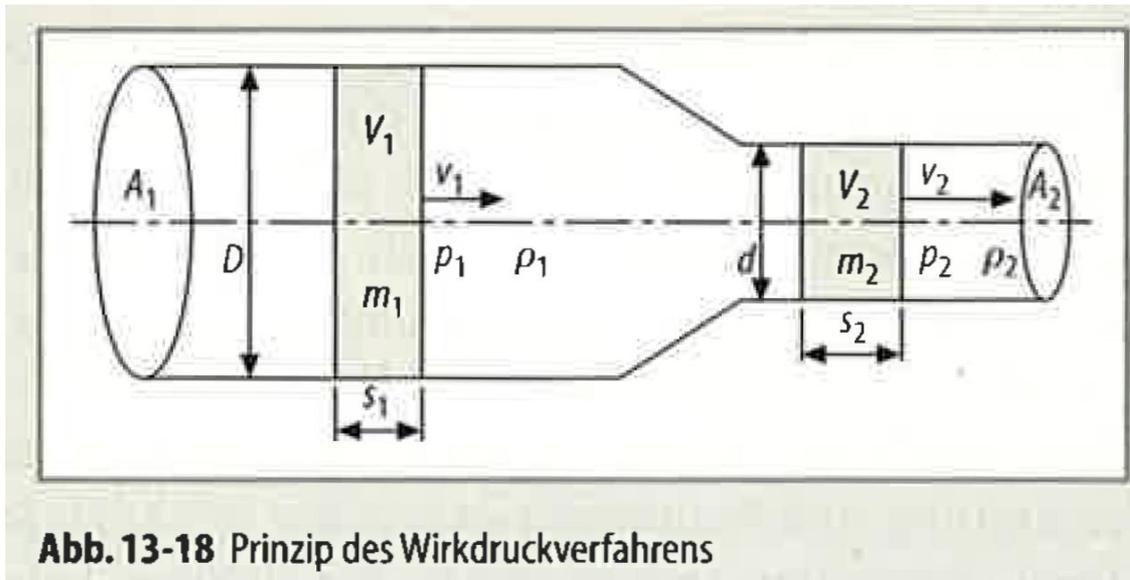


Abb. 13-18 Prinzip des Wirkdruckverfahrens

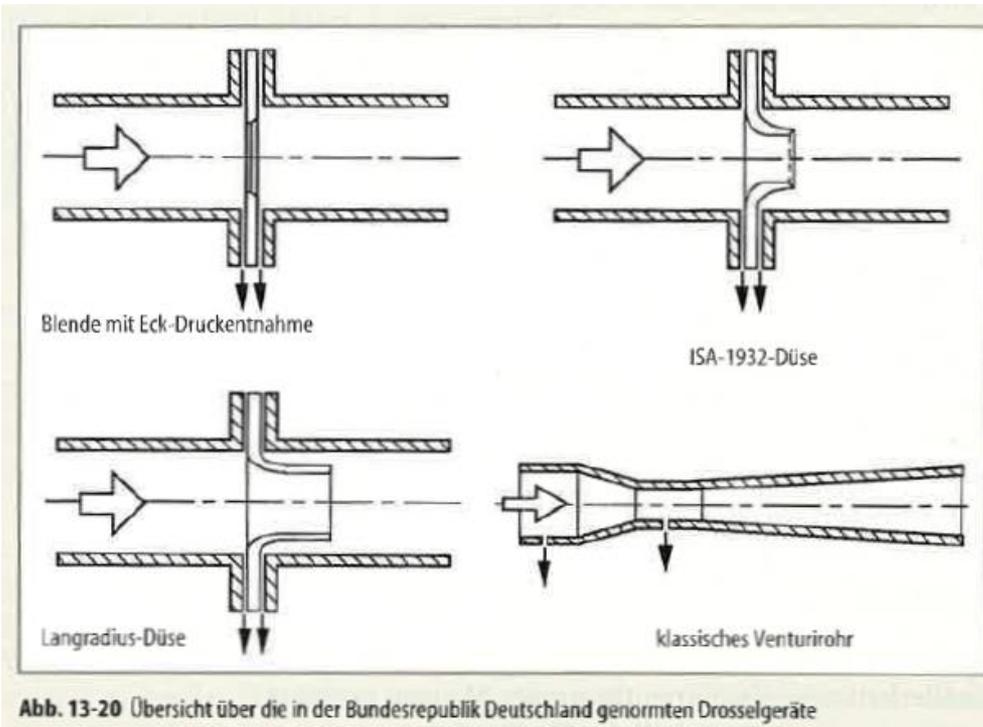
[Tränkler, Obermeier. Sensortechnik]

Konstante, abhängig vom Aufbau des Drosselements

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

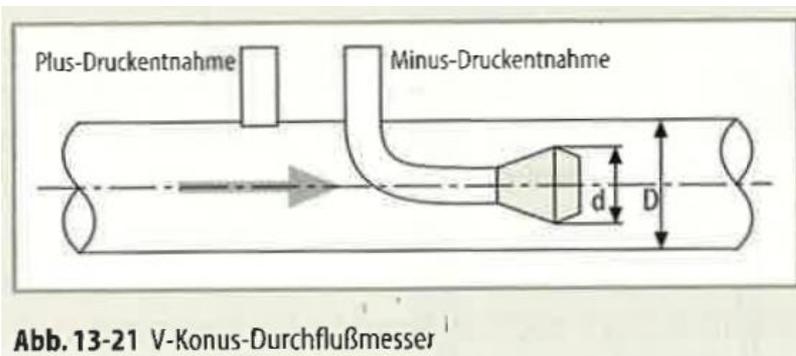
→ **Druckverminderung!**

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

$$V = \Delta V z$$

- ΔV ... Messkammerinhalt
- z ... Anzahl der Füllungen

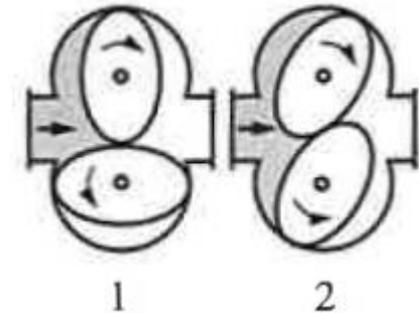


Bild 3.34 Wirkungsweise des Ovalradzählers

[Hoffmann, TB der MT]

Mit Messflügeln

$$q_V = c f$$

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

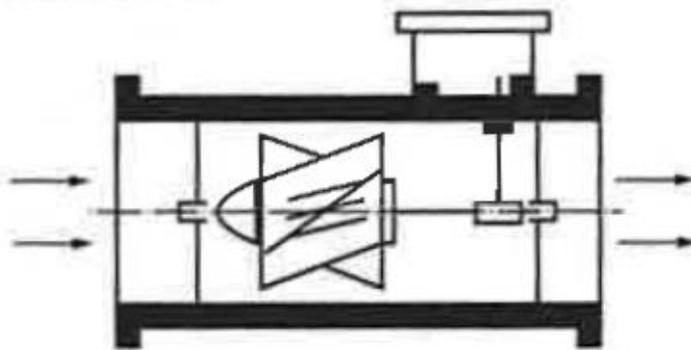


Bild 3.35 Zähler mit Axialflügel

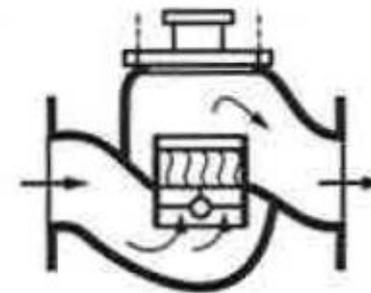


Bild 3.36 Zähler mit Senkrechtflügel

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

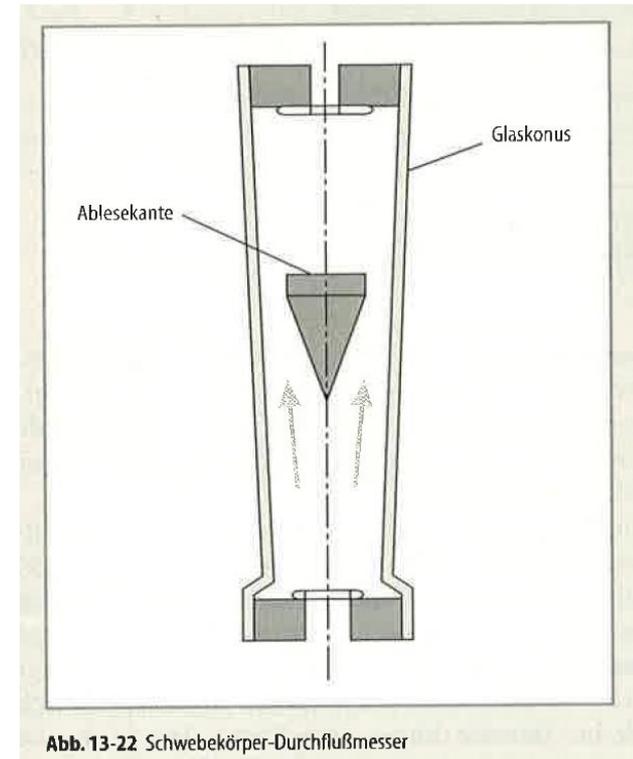


Abb. 13-22 Schwebekörper-Durchflußmesser

[Tränkler, Obermeier. Sensortechnik]

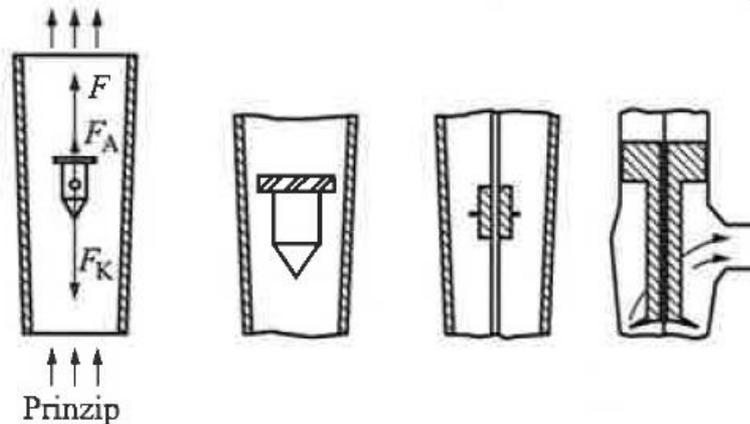
Schwebekörper-Durchflussmessung (2)

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

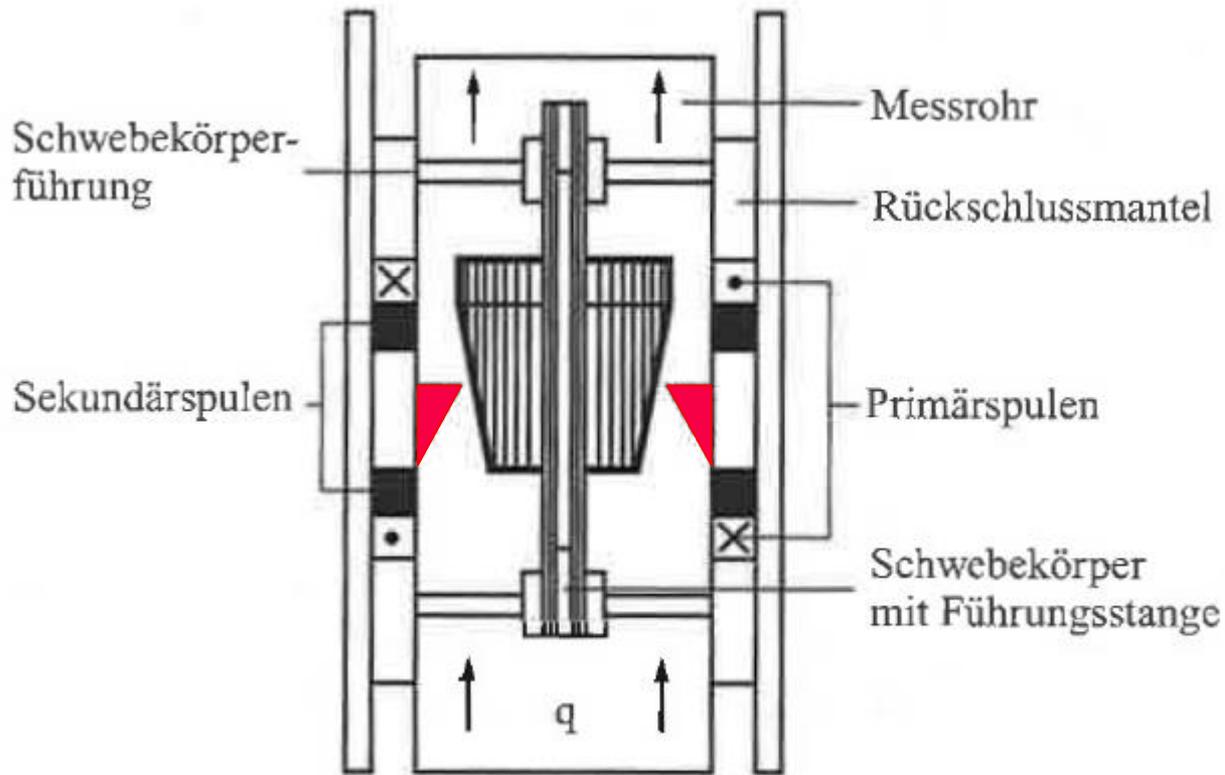
$$q_V = \frac{CA(h)}{\sqrt{p}}$$



[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

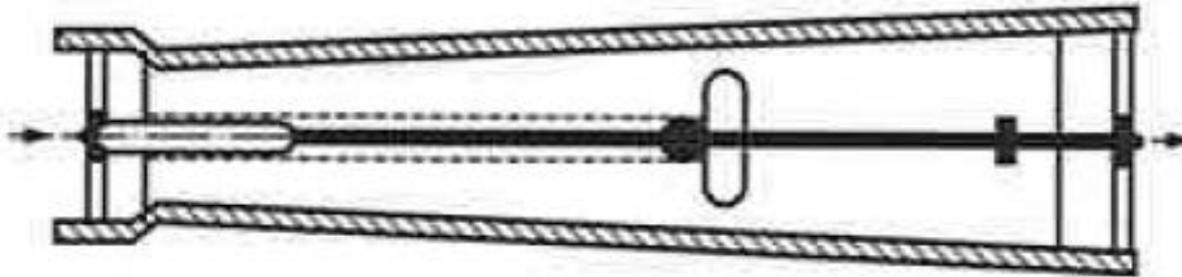
- Einbau muss senkrecht erfolgen
- nichtlinearer Messeffekt

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, ρ, ν , Viskosität

breiter Einsatz!

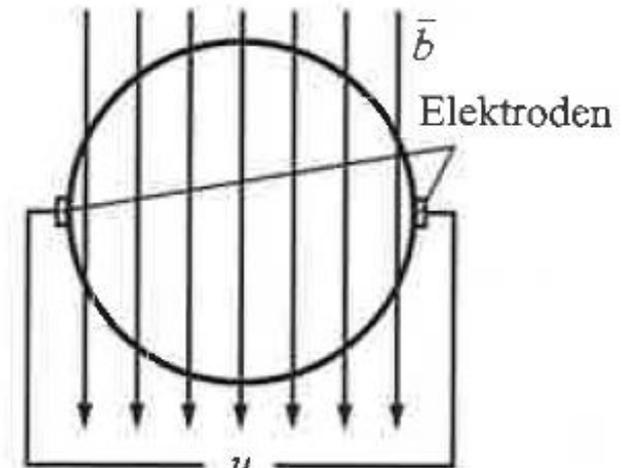


Bild 3.40 Magnetisch-induktive Durchflussmessung

[Hoffmann, TB der MT]

Wirbelstrasse

Prallkörper in die Strömung einbringen

Frequenz der Wirbelablösung \propto Strömungsgeschwindigkeit

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

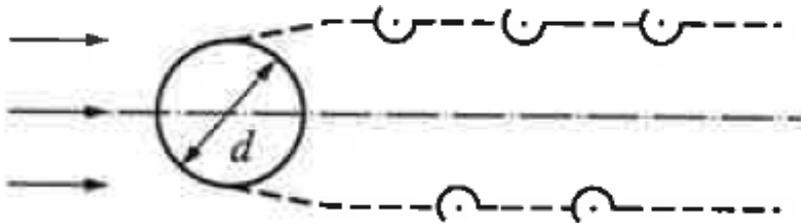


Bild 3.41 Wirbelbildung durch einen in der Strömung befindlichen Körper

- + 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 Δt von Det.1 zu Det.2
- Kreuzkorrelation

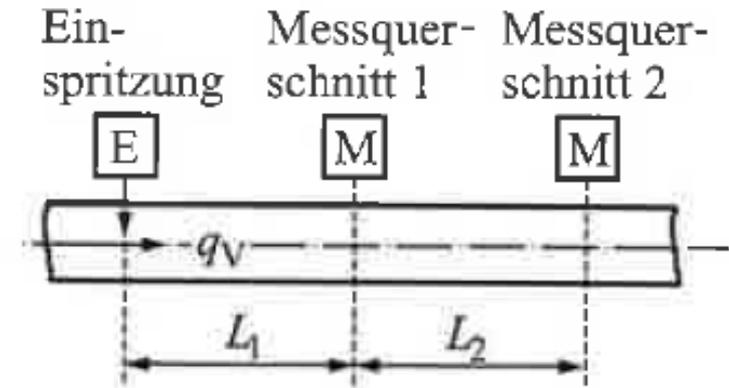


Bild 3.44 Prinzip des Laufzeitverfahrens

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

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

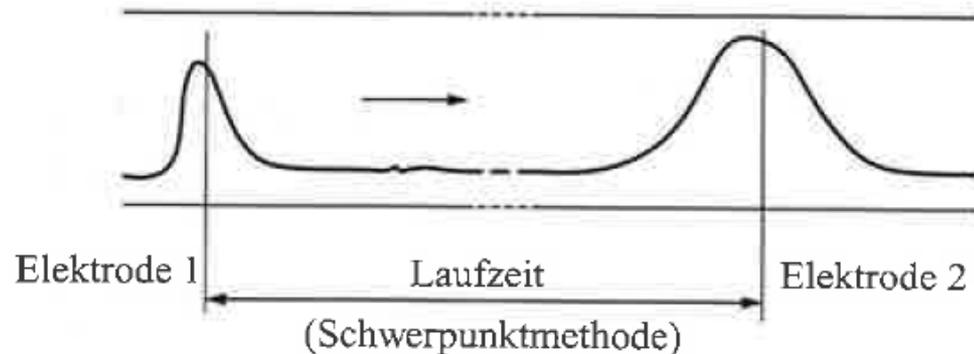
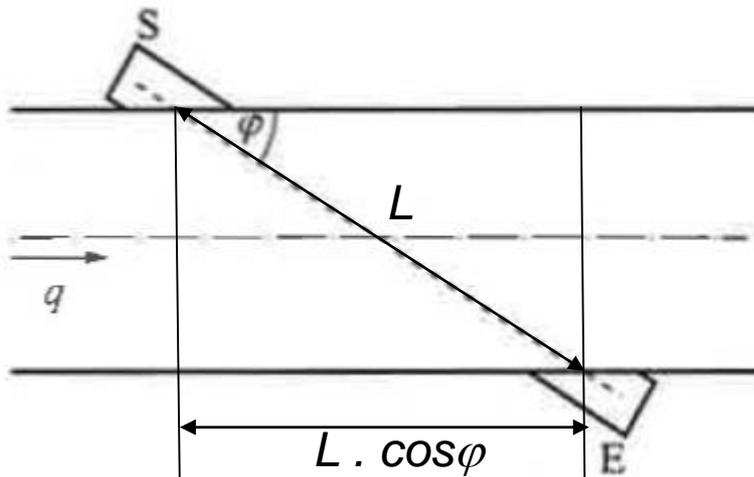


Bild 3.43 Salzlösungsverfahren nach van Allen

[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* !

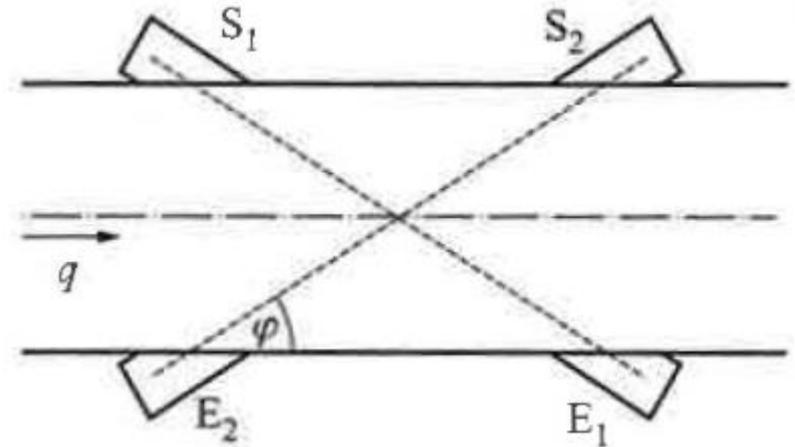


Bild 3.46 Bestimmung der Laufzeit in und entgegen der Strömungsrichtung

[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

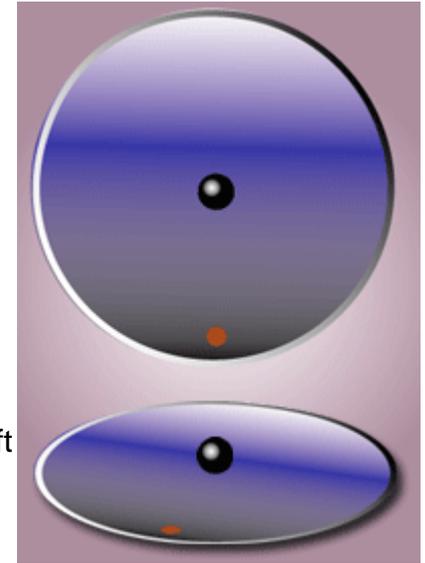
Physikal. Effekt:

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

Nichtlinear beschleunigte Masse

→ Torsion des Messrohres

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

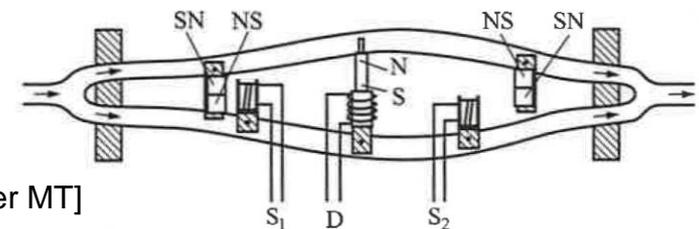


U-förmige Schleifen

(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

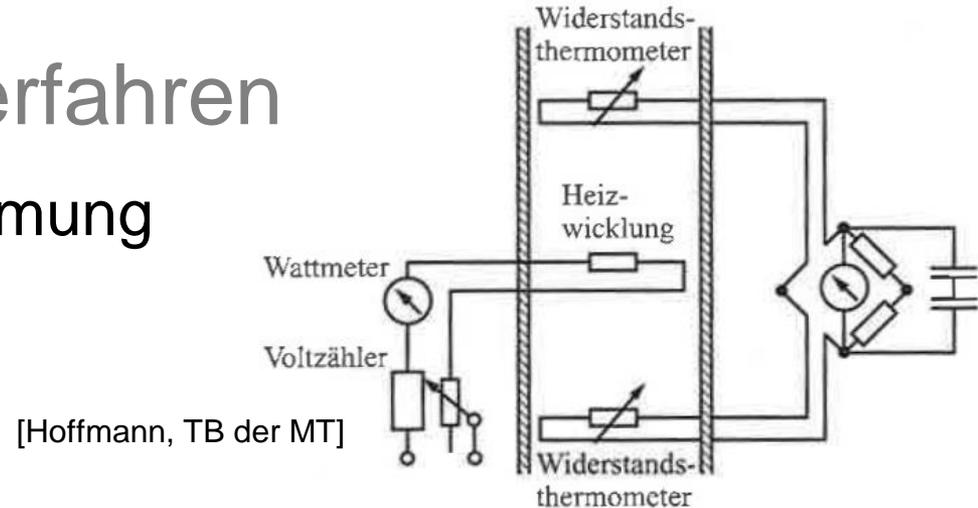


Bild 3.50 Durchflussmesser nach dem Aufheizverfahren (Thomas-Messer)

Doppler Verfahren

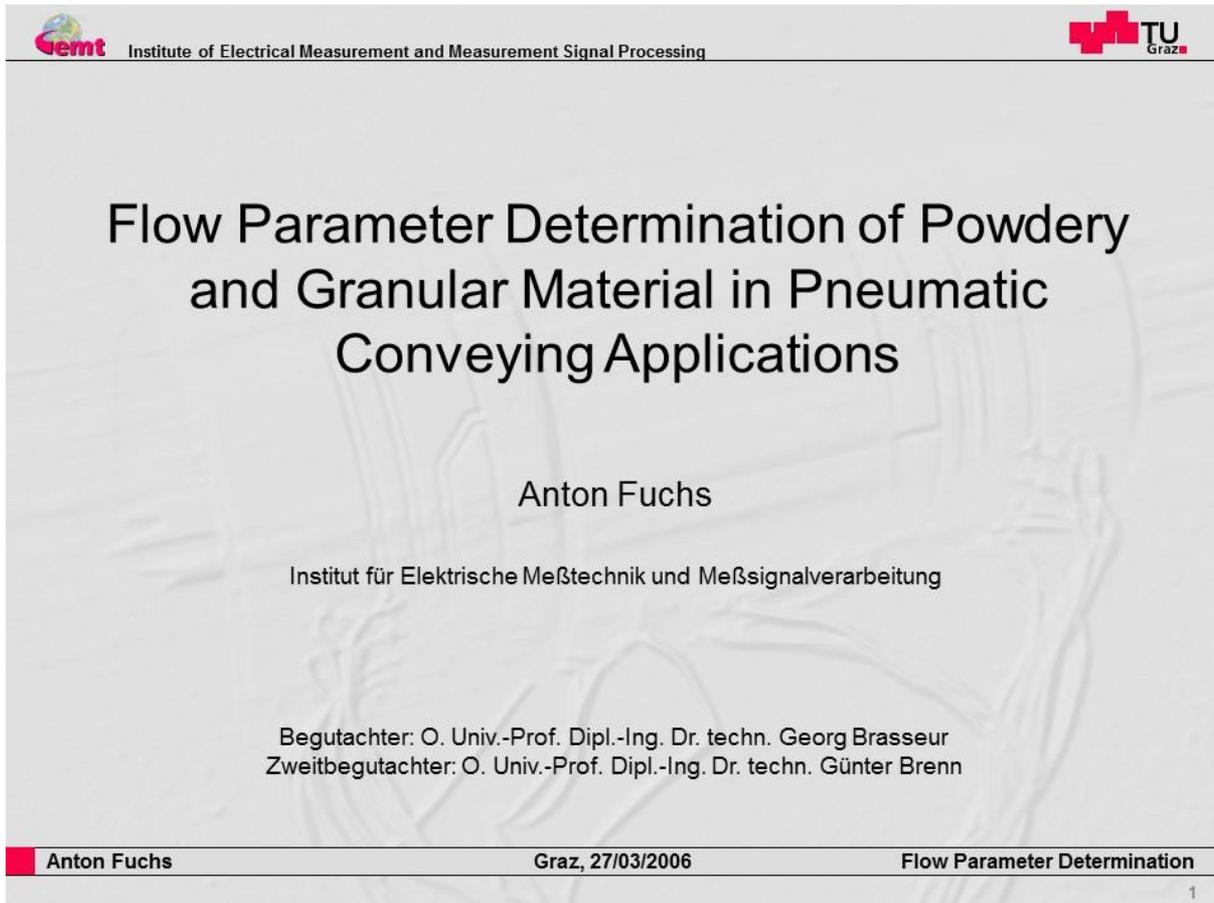
Ultraschall oder Laser-Doppler-Anemometrie

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]

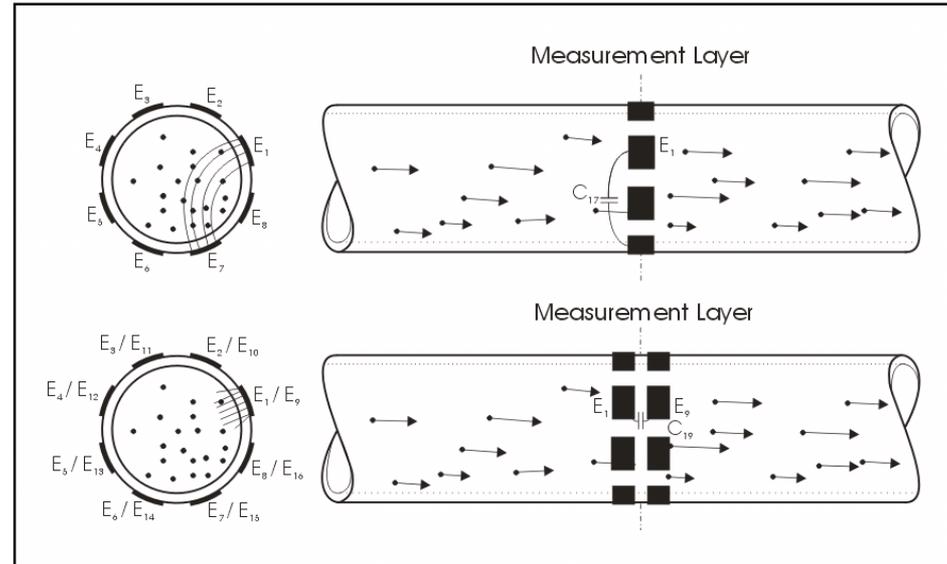
Sensor Anforderungen



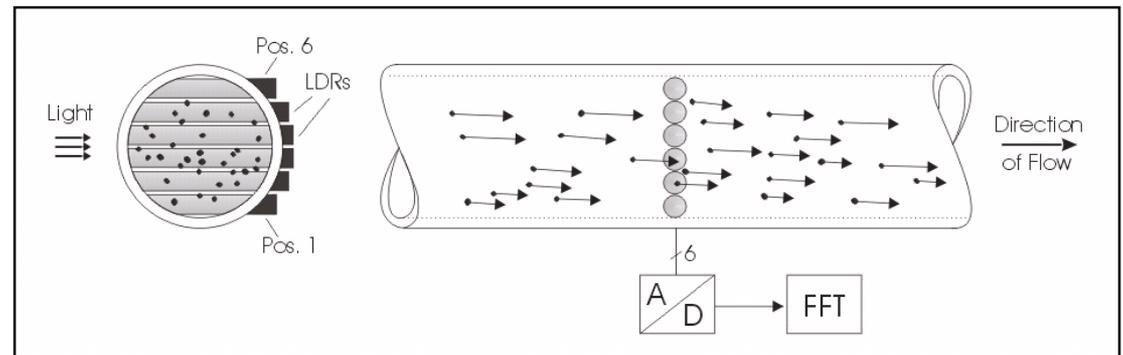
Nicht-invasives Messprinzip zwingend!!

Sensoren mit Räumlicher Filterung

kapazitive Sensoren:

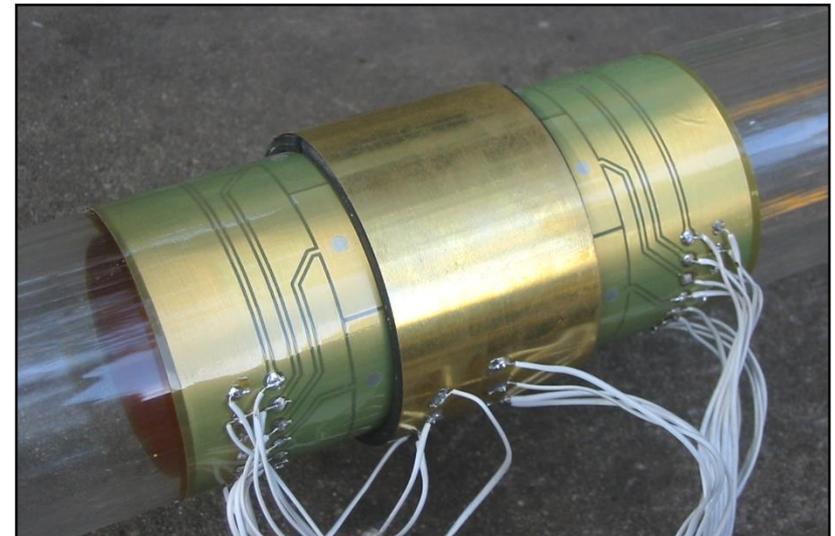
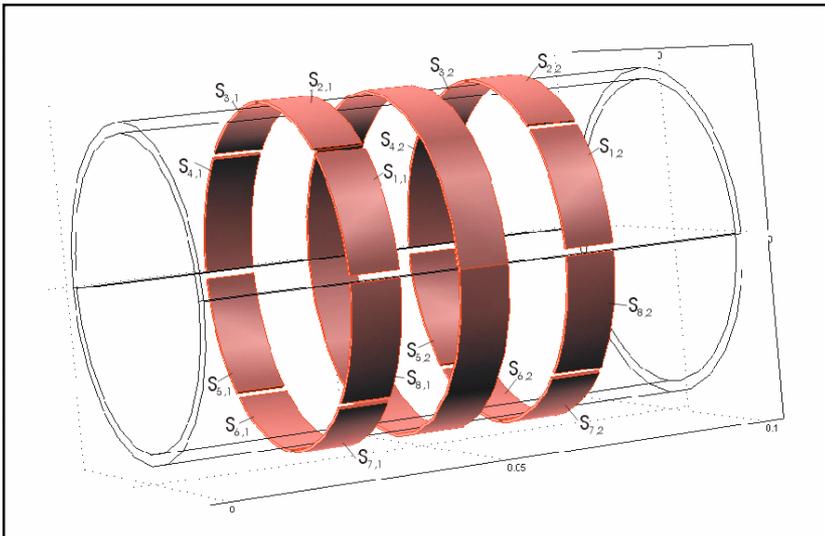


optischer Sensor:



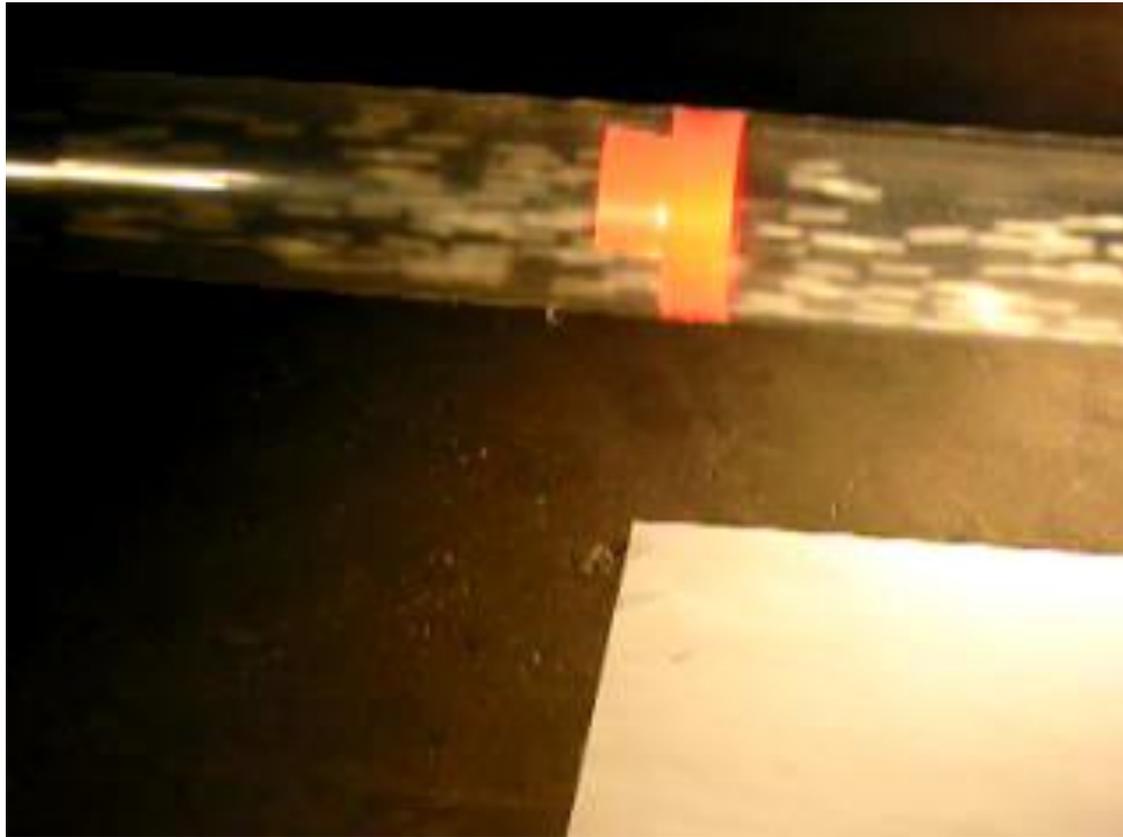
Kreuzkorrelations Sensoren - Kapazität

- Zwei Ringe von Sendesegmenten
- Gemeinsamer Empfängerring



Pneumatische Förderung – Beispiele

Granulat, „dünnere“ 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

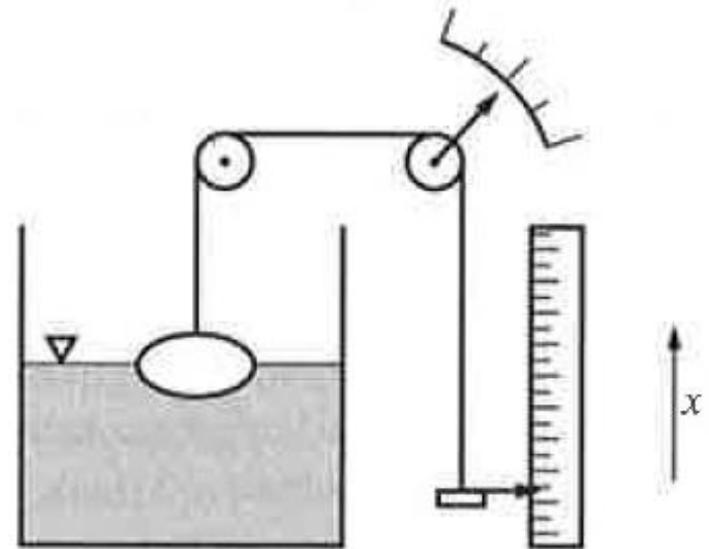
Schwimmer und Tastplatten

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:

- ϵ_r bekannt und konstant
- Elektrisch nicht leitende Fluide

Parallelschaltung

- C_1 (eingetaucht), C_2 (Luft)

Platten

- Behälterwand + Platte
- Eingetauchter Plattenkondensator

Zylinderkondensator

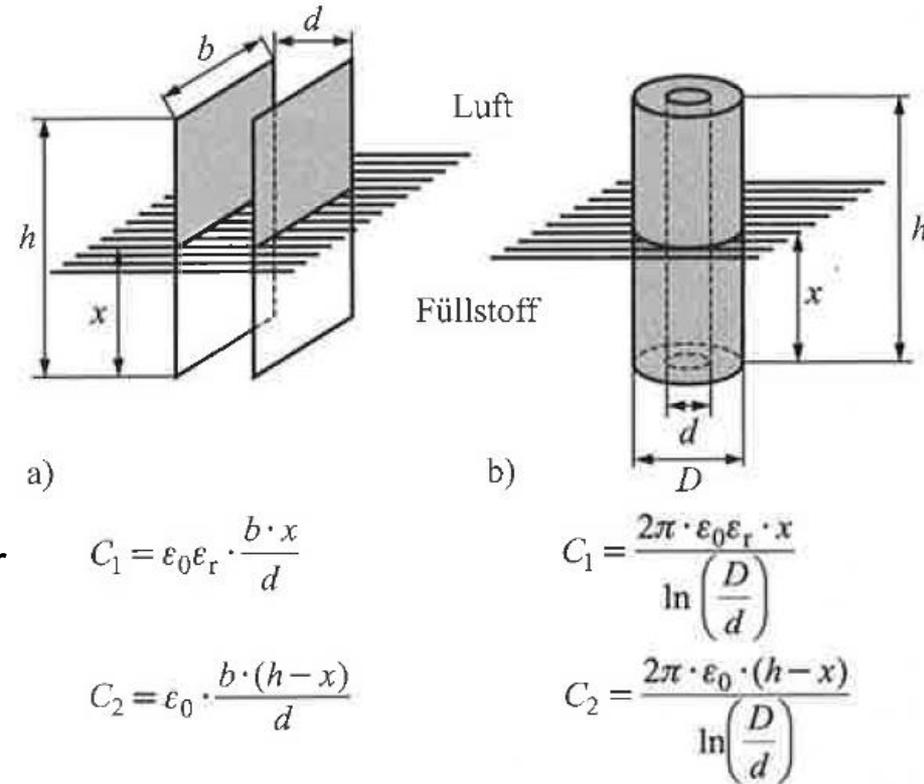


Bild 3.52 Füllstandsmessung mit
a) Plattenkondensator, b) Zylinderkondensator

[Hoffmann, TB der MT]

Kapazitiv (2)

Leitende Fluide:

- Sonde mit dielektrischer Isolierschicht (ϵ_{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, ϵ_r beliebig, auch bei inhomogenen Flüssigkeiten

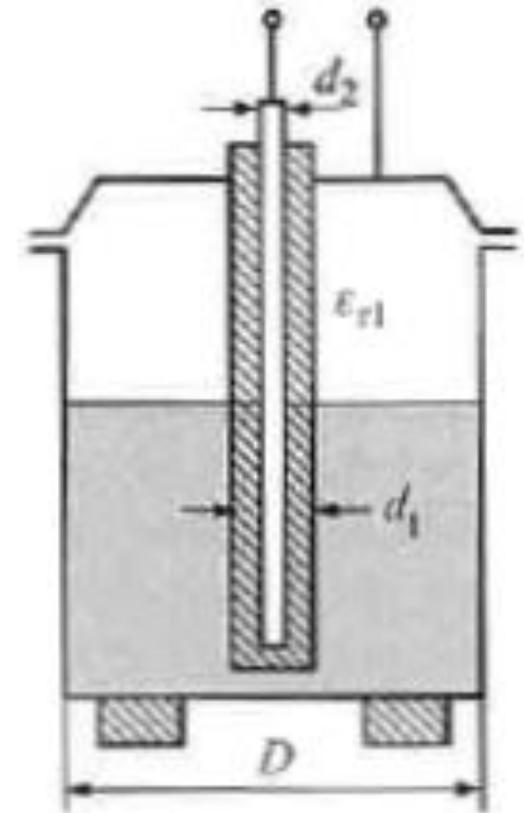


Bild 3.53 Kapazitive Füllstandsmessung bei leitenden Flüssigkeiten

[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

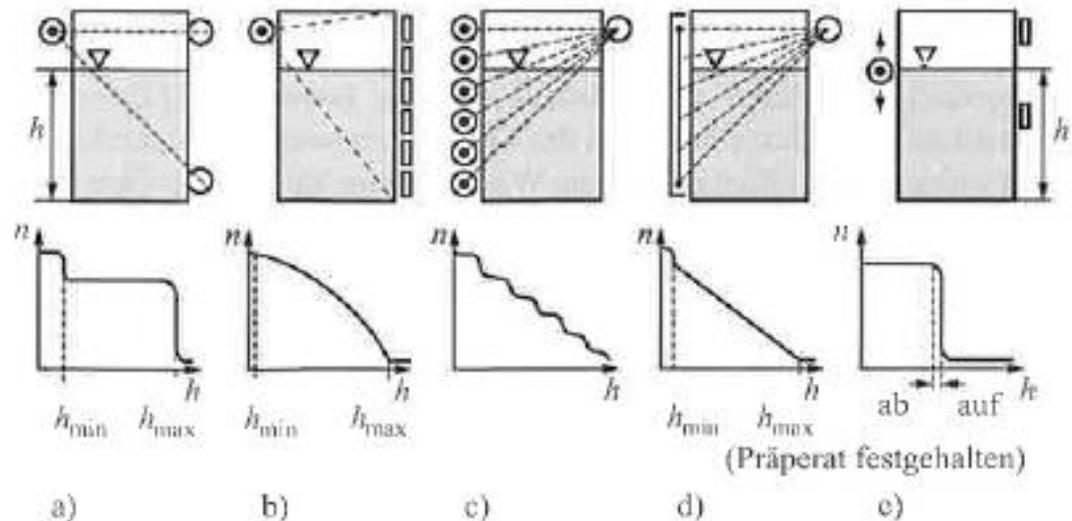
Gammastrahler → Behälter → Abschwächung → Detektor

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, ...

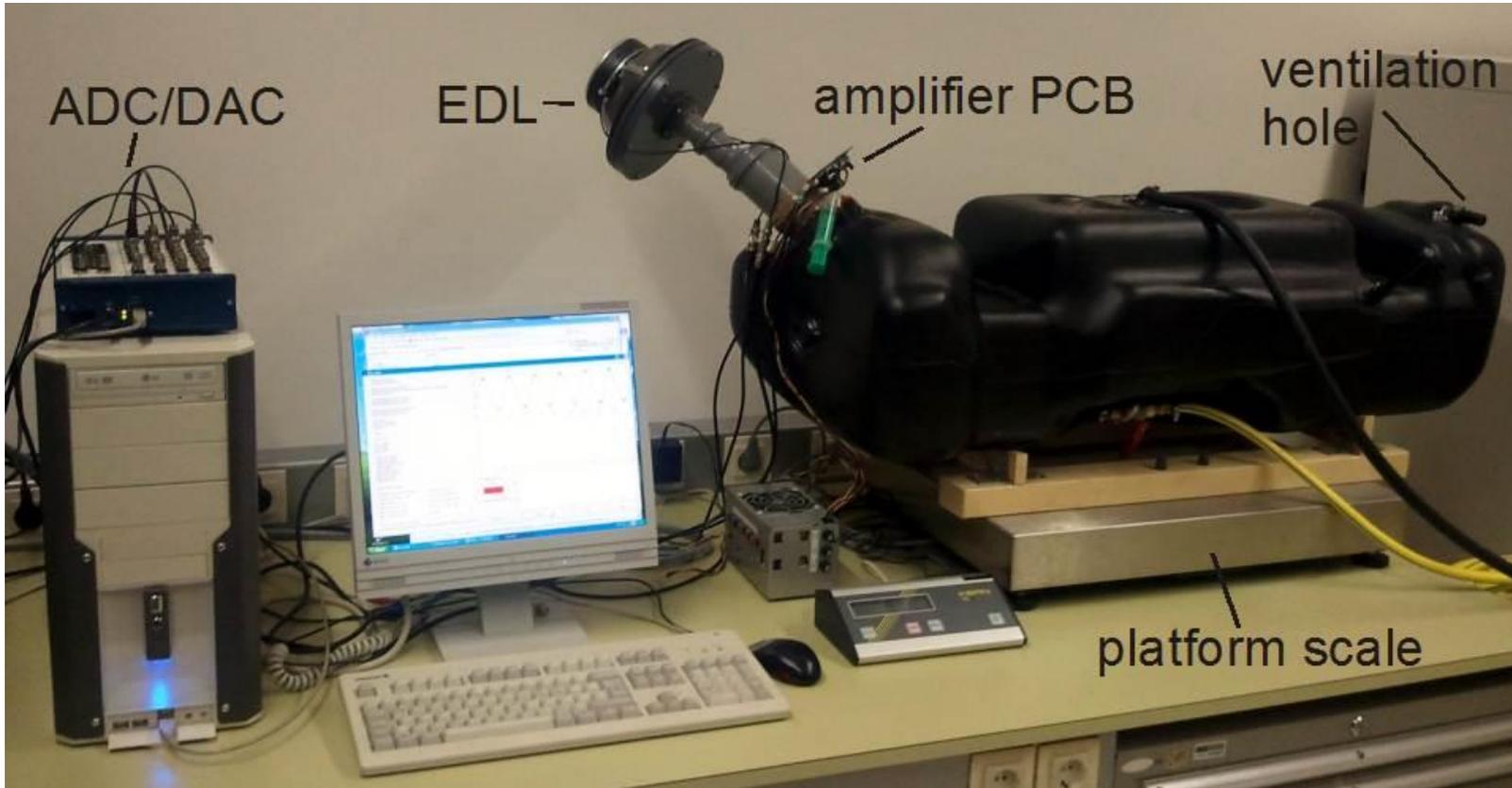
Grenzstand mit Schwinggabel

- 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 ρ
- Zustandsbezogene Dichte ρ_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 ρ_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)

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

- ρ_1 ... Flüssigkeit, ρ_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.

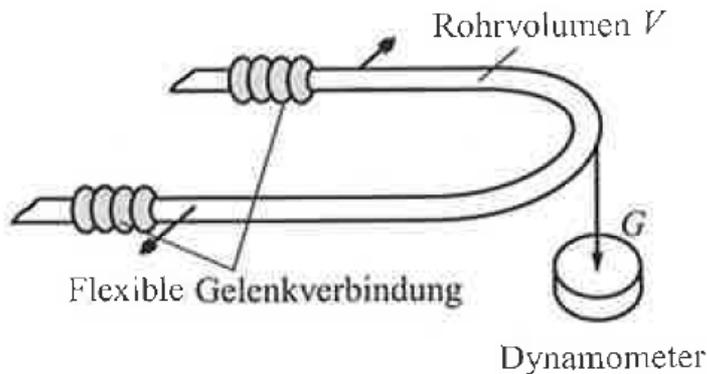


Bild 3.55 Kontinuierliche Dichtemessung nach Wägemethode

[Hoffmann, TB der MT]

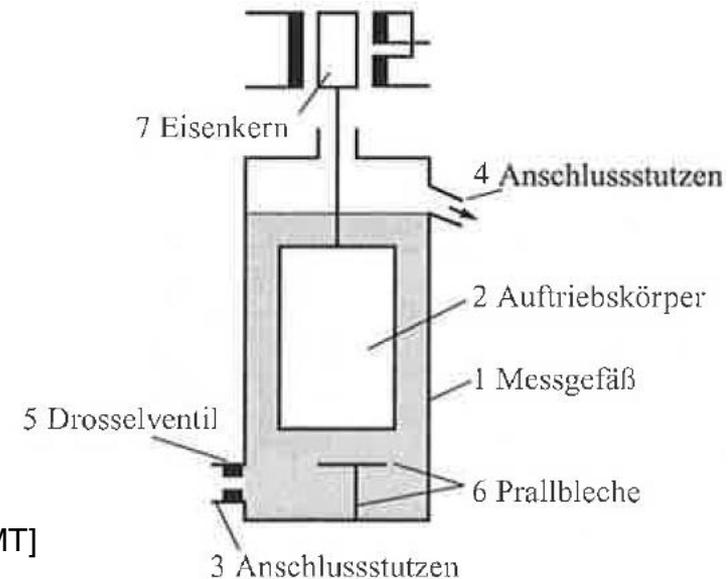
Auftriebsmethode für Flüssigkeiten

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

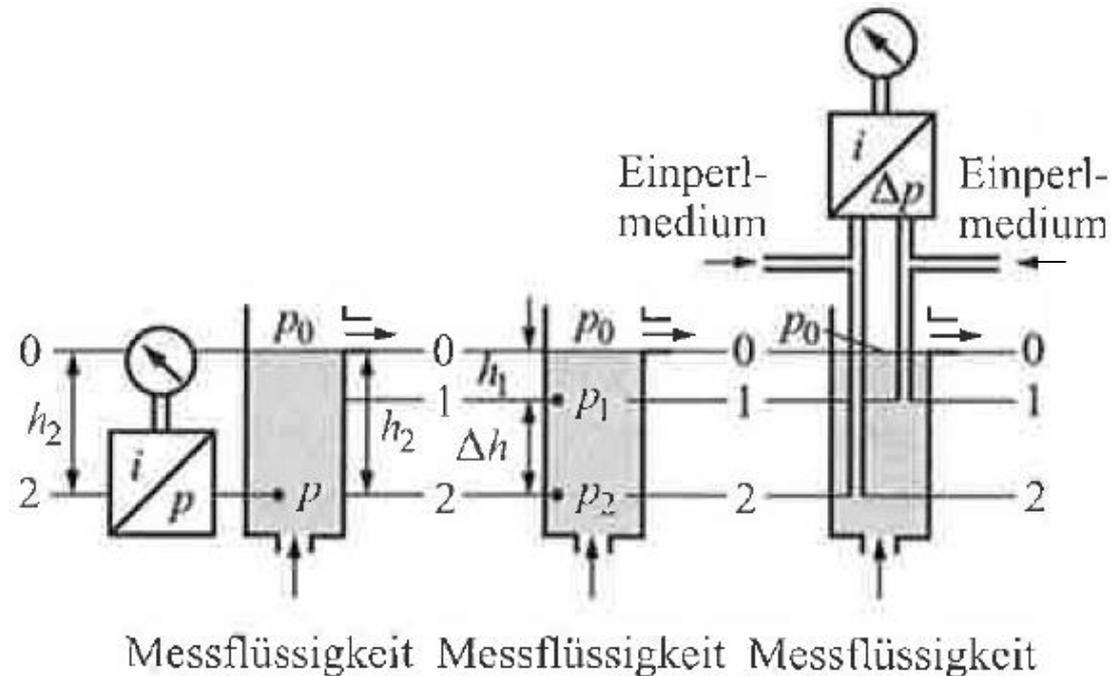
Hydrostatischer Druck $p = gh\rho$ ist abhängig von ρ

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:

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

μ' ... 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)

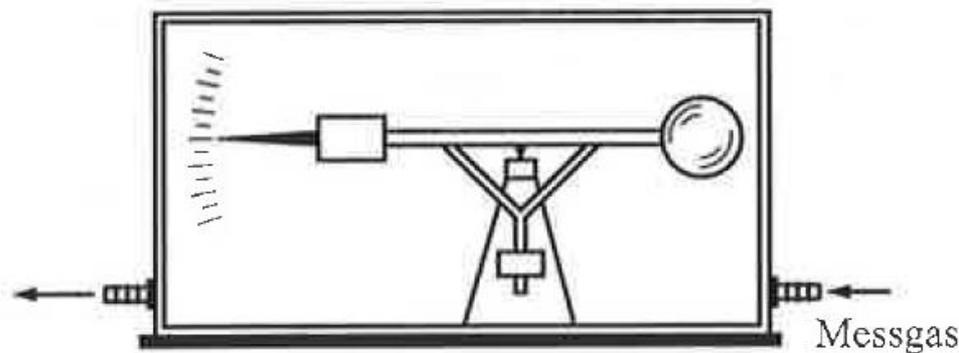


Bild 3,58 Lux'sche Gaswaage

[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