

Márton BALCZÓ PhD

balczo.marton@gpk.bme.hu

Technische und Wirtschaftswissenschaftliche

Universität Budapest

Fakultät für Maschinenbau

Lehrstuhl für Strömungslehre

STRÖMUNGSLEHRE

Labormessungen: Einführung



Unter Mitarbeit von:

Dr. Balczó Márton

Dr. Benedek Tamás

Dániel István

Dr. Istók Balázs

Nagy László

Dr. Sente Viktor



1. **Semesterverlauf, Anforderungen, Administratives**
2. **Grundlagen – Messfehler – Fehlerrechnung**
3. **Druckmessungen**
4. **Messung der Strömungsgeschwindigkeit**
5. **Volumenstrom-Messung**



- **Klausur** über die Messungen - 5.Woche, Wiederholklausur – 6.Woche (positives Ergebnis ist nötig zum Anfang der Messungen)
- Messungen in 4-köpfigen Gruppen
- **Messprotokoll** bis Ende der Woche nach der Messungswoche (bis Sonntag, 24h) fällig.
- Konsultation vor und nach der Abgabe möglich.
- einmalige Korrektur des Protokolls nach der Abgabe möglich
- **Vortrag über die Messung** am Ende.

Kalender

Labor 1: Instrumenten, Methoden,

Labor 2 : Fehlerabschätzung,

Labor 3 : Laborklausur, Messstände

Labor 4 : Messung A

Labor 5 : Abgabe Messung A, Messung B

Labor 6 : Abgabe Messung B, Konsultation zur Präsentation.

Labor 7 : Präsentation



Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

- **Klausur** über die Messungen - 5.Woche, Wiederholklausur – 6.Woche (positives Ergebnis ist nötig zum Anfang der Messungen)
- 4 Aufgaben:
 - Maßeinheitenwechsel
 - Theoretische Frage
 - 2 Rechenaufgaben
- Bestanden ab 50%
- Klausurergebnis in das Endergebnis nicht eingerechnet
- Musterklausur erreichbar unter www.ara.bme.hu/lab

Mérőcsoport beosztás:				Mérés száma:	Feladat	
1	A	Sofia Coppola	ABC123	(az A jelű méréseken mérésvezető)	13	D
	A	Pedro Almodovar	EFG456	(az A jelű méréseken mérésvezető)		
	B	Quentin Tarantino	JKL891	(a B jelű méréseken mérésvezető)	5	A
	B	Cathryn Bigelow	891GRE	(a B jelű méréseken mérésvezető)		



Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

- Beschreibungen unter www.ara.bme.hu/lab studieren, lernen.
 - Ziel der Messung
 - Welche Mengen müssen gemessen, bzw. berechnet werden?
 - Notwendige Formel verstehen und lernen.
- Erhaltene Messaufgabe kennenlernen (A, B, C, usw.)
- Messplan auf A4-Blätter erstellen :
 - Teilnehmer | Messaufgabe | Formel | leere Tabelle für die angewendeten Messinstrumente | leere Tabellen für die Messdaten | Unterschriftenfeld des Messaufseher auf jeder Seite
- 1 Stk. A4-Millimeterpapier pro Messgruppe zur Messung mitnehmen



Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

Dauer 90 Minuten | Verantwortliche Leiter: Messung A: Gruppenmitglieder 1 & 2; Messung B: Gruppenmitglieder 3 & 4.

Ablauf

1. Mündliche Fragen des Messaufsehers beantworten
2. Messstand nach Instruktionen des Aufsehers vorbereiten
3. Nach Erlaubnis die Anlage starten, Messungen durchführen
4. Umgebungsvariablen vor und nach der Messung ablesen
5. Messtand, Messkörper fotografieren und alle Abmessungen protokollieren.
6. Verwendete Digitalmanometer zu einem Betz-Manometer kalibrieren
7. das Diagramm eines gemessenen oder berechneten Variable in einem Diagramm auf Millimeterpapier erstellen.

Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

- Titelseite und Muster erreichbar unter www.ara.bme.hu/lab

- Max 8. Seiten, PDF Format

Beinhaltet : A fedlapon az ellenőrző kódot | Kurzbeschreibung der Ziele der Messung | Beschreibung der Messaufgabe | Daten, Abmessungen, Zeichnungen des Prüfstandes und der gemessenen Objekte/Körper | Typ, Seriennummer der Messinstrumente | Angewandte Gleichungen, Zusammenhänge

Gemessene Daten tabellarisch | Fehlerrechnung | Diagramme mit Fehlerbalken | Schriftliche Bewertung der Messergebnisse | Literaturquellen | Ghandgescriebenees Messprotokoll gescannt in dr Beilage

- Gescannte Manuskript als Beilage einbinden
- Berechnungstabelle in Originalformat (.xls o.ä.) in gemeinsamen .zip-Datei komprimieren.

Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

- Berechnungskontrolle unter www.ara.bme.hu/lab

* Beszívóelemen mért nyomásesés (3. térfogatáram):	300	[Pa]
* Mérőperemen mért nyomásesés (1. térfogatáram):	400	[Pa]
* Mérőperemen mért nyomásesés (2. térfogatáram):	500	[Pa]
* Mérőperemen mért nyomásesés (3. térfogatáram):	600	[Pa]

Származtatott mérési adatok

Hőmérséklet:	kihagy	[K]
* Levegő sűrűsége:	1.18	[kg/m ³]
* Levegő kinematikai viszkozitása:	1.507e-5	[m ² /s]

Elfogadva!

Elfogadva!

Kalibráció (1. térfogatáram)

Mérőperem átfolyási tényező, C (1. lépés):	0.6	[-]
Térfogatáram (1. lépés szerint):	kihagy	[m ³ /s]
Sebeség (1. lépés szerint):	kihagy	[m/s]
* Reynolds-szám (1. lépés szerint):	30e3	[-]
Mérőperem átfolyási tényező, C (2. lépés):	kihagy	[-]
* Mérőperem átfolyási tényező, C (végleges):	0.65	[-]
* Térfogatáram (végleges):	0.025	[m ³ /s]
* Beáramlási tényező:	1.8	[-]

Elfogadva!

Pontatlan számítási eredmény!

Elfogadva!

Pontatlan számítási eredmény!

Pontatlan számítási eredmény!

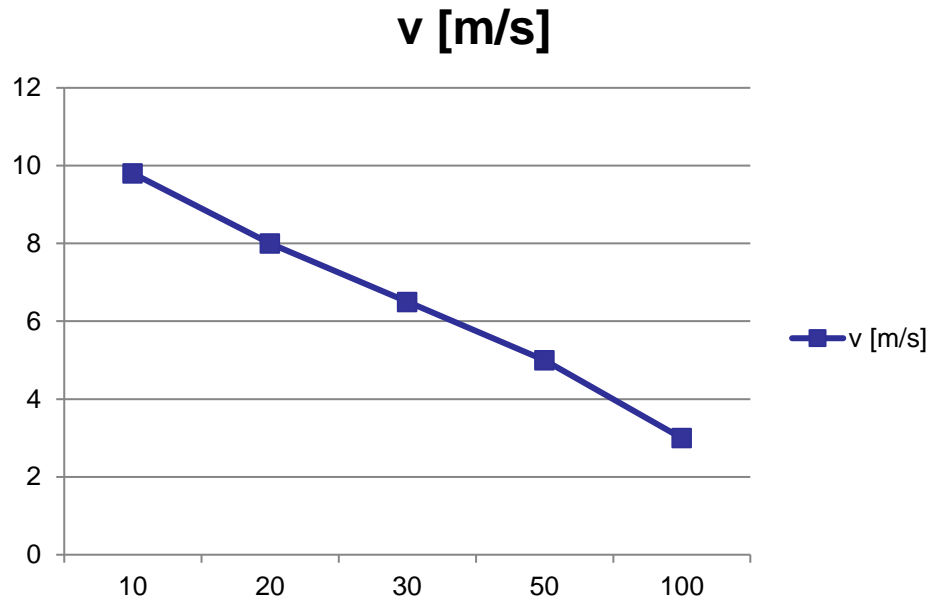
Kalibráció (2. térfogatáram)

Mérőperem átfolyási tényező, C (1. lépés):	0.6	[-]
Térfogatáram (1. lépés szerint):	kihagy	[m ³ /s]
Sebeség (1. lépés szerint):	kihagy	[m/s]
* Reynolds-szám (1. lépés szerint):	31e3	[-]

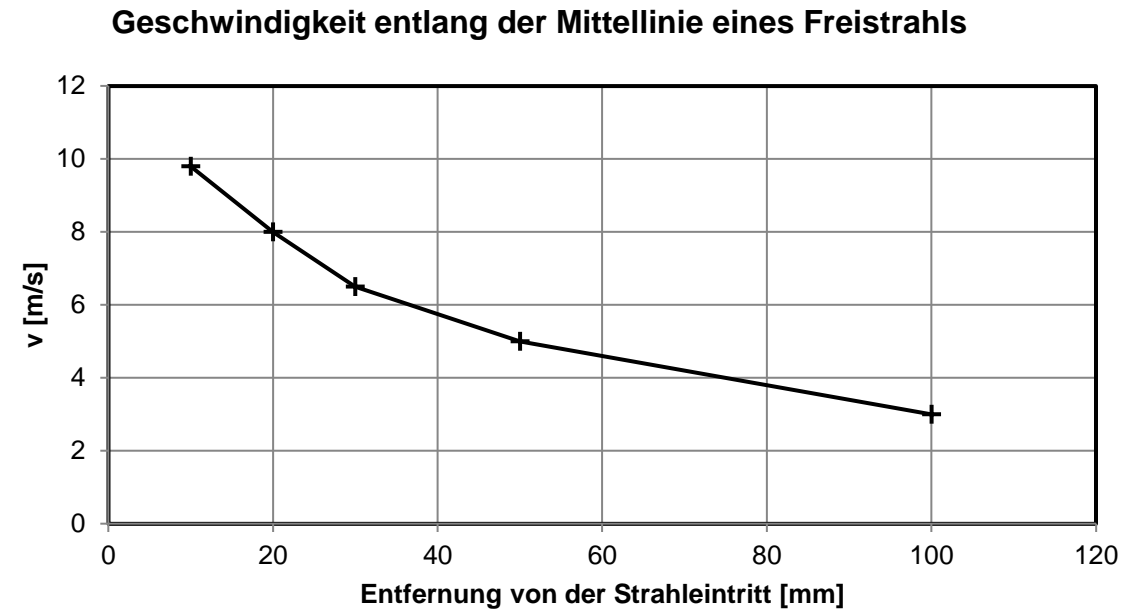
Elfogadva!

Elfogadva!

- Graue Felder: nicht unbedingt auszufüllen.
- (Ausfüllen hilft bei der Fehlersuche)



Falsch
(Zahlen an der X-Achse nur als Beschriftung)



Korrekt
Zahlen an der X-Achse als numerische Werte aufgetragen

Warum farbig,
wenn nur eine
einzige Kurve?

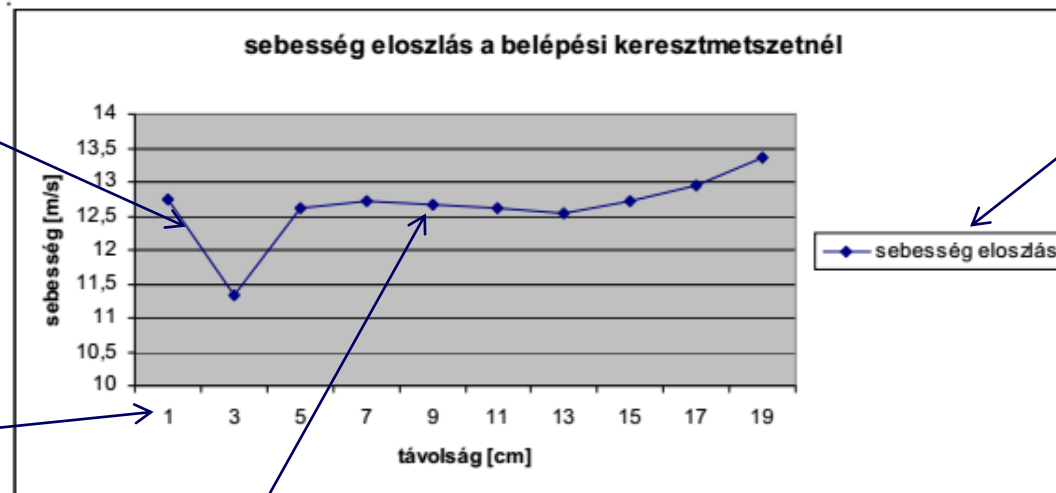
Grauer
Hintergrund
überflüssig,
störend.

Falsche
Diagrammtyp

Kein Fehlerbalken

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

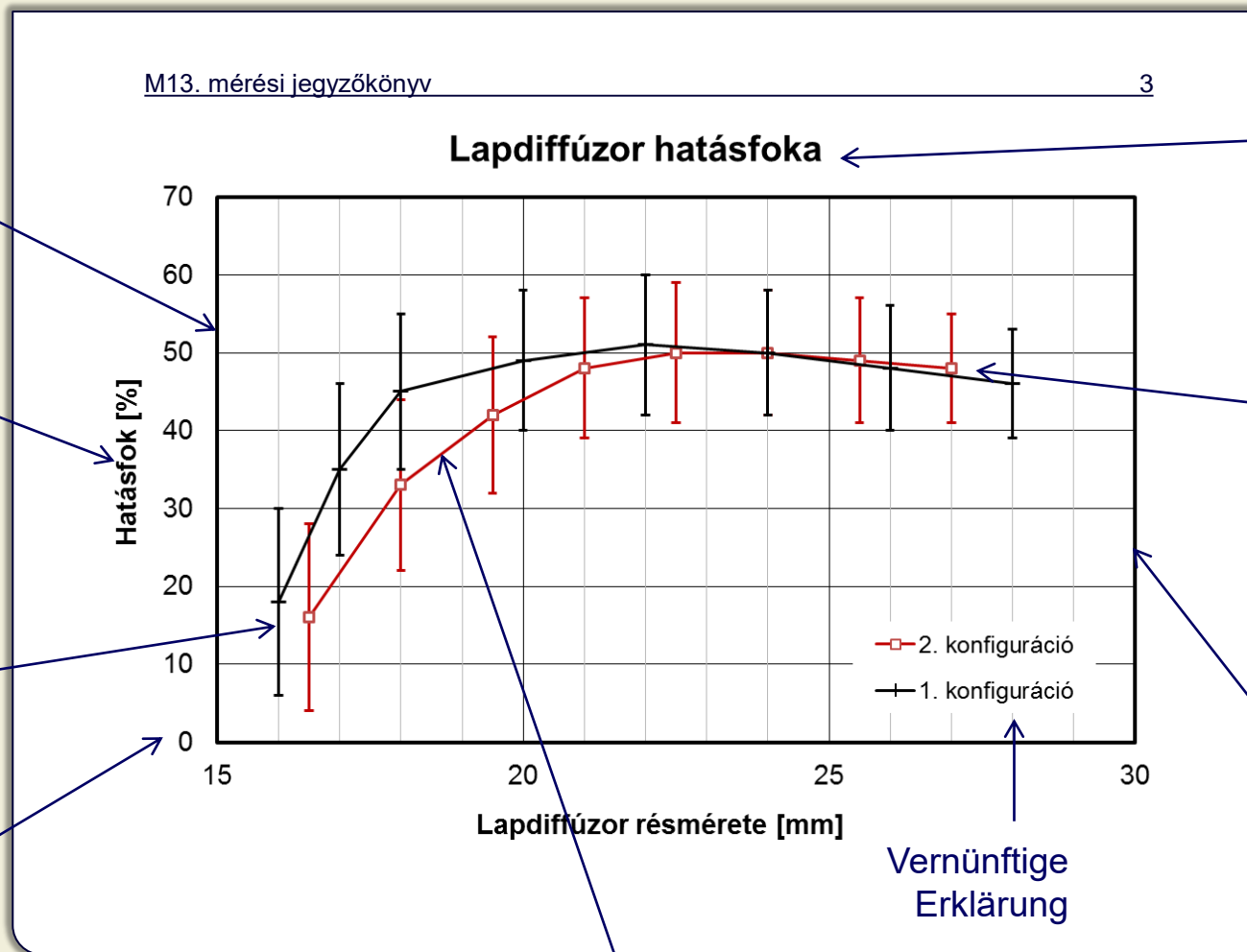
Áramlástan Tanszék®



Mindkét helyen számoltunk átlagsebességet is a $v = \frac{\sum v_i}{n}$ képlet segítségével, ahol $n=10$. Ez alapján a kilépésnél 10,997 m/s, a belépésnél pedig 12,626 m/s az átlag sebesség.

Zeichenerklärung überflüssig,
und nimmt zu viel Platz

Äußere Rahmen
überflüssig



Rahmen: 1.5-2 pt,
Gitter: 0.5 pt.

Benennung
der Achse mit
[Maßeinheit]

Schriftgröße
gut lesbar

Fehlerbalken
dargestellt

Y-Achse ab 0
(nicht autoskaliert)

Punkte mit geraden Kurven verbunden
(Diese sind nicht unbedingt nötig, und indizieren die Zusammengehörigkeit dieser Punkte, und nicht die Interpolation zwischen den Meßwerten.)

Diagrammtitel
(nicht unbedingt nötig,
Abbildungsunterschriften kann das
ersetzen)

Kurven mit minimalen Anzahl
von kontrastreichen Farben

Vernünftige
Erklärung

Das Diagramm ist nicht
zu klein, nutzt die
Seitenbreite gut aus.



Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

- **8-Minuten Vortrag (+ 2 Min: Fragen) mit:**
 - Motivation, Ziele der Messung
 - Vorstellung der Messaufgabe und des Prüfstandes
 - Messergebnisse und deren Auswertung in Diagrammen
 - Schlussfolgerungen
 - Verbesserungsvorschläge für die Zukunft

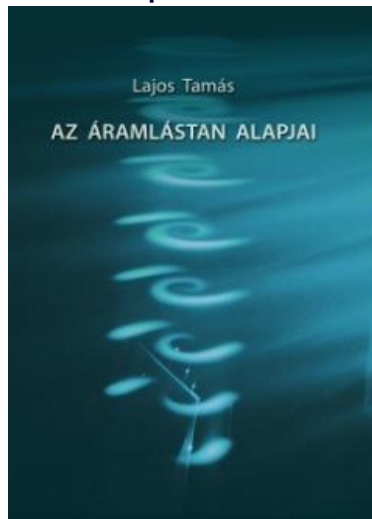
- Webseite des Lehrstuhls: www.ara.bme.hu
- Kommunikation mit dem Lehrstuhl: www.edu.gpk.bme.hu
(Klausurergebnisse, Eindsand Messprotokoll & Präsentation, ...)
- Messungen: www.ara.bme.hu/lab

Empfohlene Literatur

(in ungarisch)

Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai. 2009, und spätere Ausgaben

Kapitel 6 : Strömungsmessungen



In der Laborklausur

- 4 Aufgaben:
 - Maßeinheitenwechsel
 - Theoretische Frage
 - 2 Rechenaufgaben
- Bestanden ab 50%
- Musterklausur erreichbar a honlapon számszerű megoldásokkal



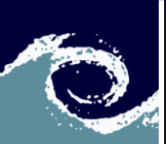


- Messung von p (Δp), \underline{v} (Größe, Richtung), T , q_V , F , Längen, Zeit, Drehzahl x_i
- Ziel der Messung: andere Variablen zu berechnen: Widerstandkoeffizient, Wirkungsgrad, Leistung usw. R_i



Eigenschaften eines Messinstrumentes

- Messbereich $x_{min} \div x_{max}$ $0 - 1000 Pa$



Falschinterpretation von Messwerte (aus der Serie „Tschernobyl“)

Dyatlov : Was sagt das Dosimeter??

Akimov : 3.6 Röntgen. Aber das ist der Höchstwert des Geräts....

Dyatlov : 3.6 - Nicht gut, nicht dramatisch.

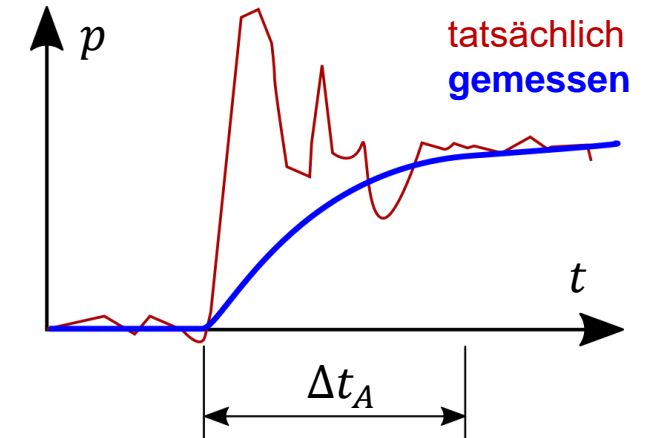


- Messung von p (Δp), \underline{v} (Größe, Richtung), T , q_V , F , Längen, Zeit, Drehzahl x_i
- Ziel der Messung: andere Variablen zu berechnen: Widerstandskoeffizient, Wirkungsgrad, Leistung usw. R_i



Eigenschaften eines Messinstrumentes

- Messbereich $x_{min} \div x_{max}$ $0 - 1000 Pa$
- Messunsicherheit* δx $\pm 2 Pa$
- Zeitliche Auflösung (Reaktionszeit) Δt_A $0.5 s$
-



Fehlerfortpflanzung

Unsicherheit der gemessenen Variable(n) δx_i ►

Unsicherheit der resultierenden Variable(n) δR_i

(Fehlerrechnung erforderlich)

* umgangssprachlich: Messfehler



Meßwert x [Dimension]

Absoluter Fehler δx [Dimension]

mit $\delta x = |x_M - x_0|$ (x_0 : das wahre, aber unbekannte Wert)

Relativer Fehler $\frac{\delta x}{x}$ [-] oder [%]

Fehlerarten

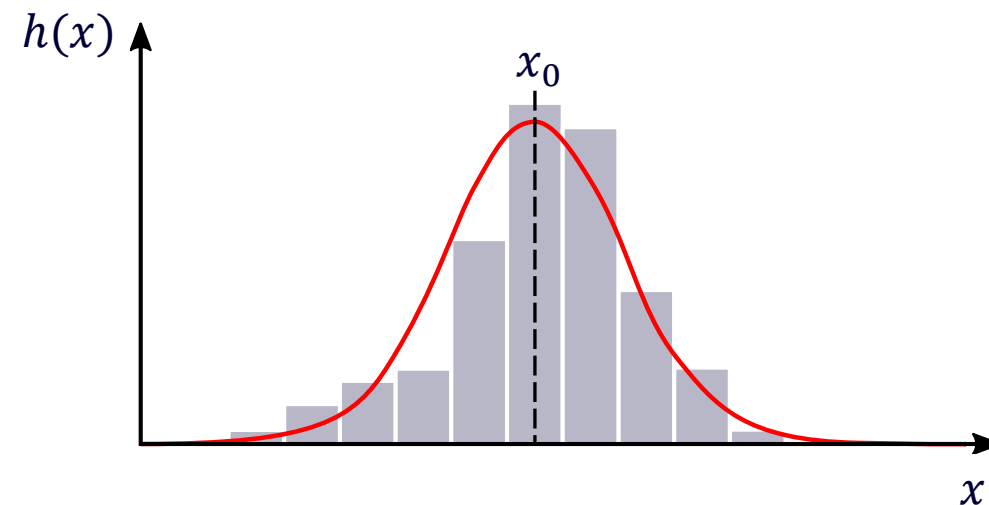
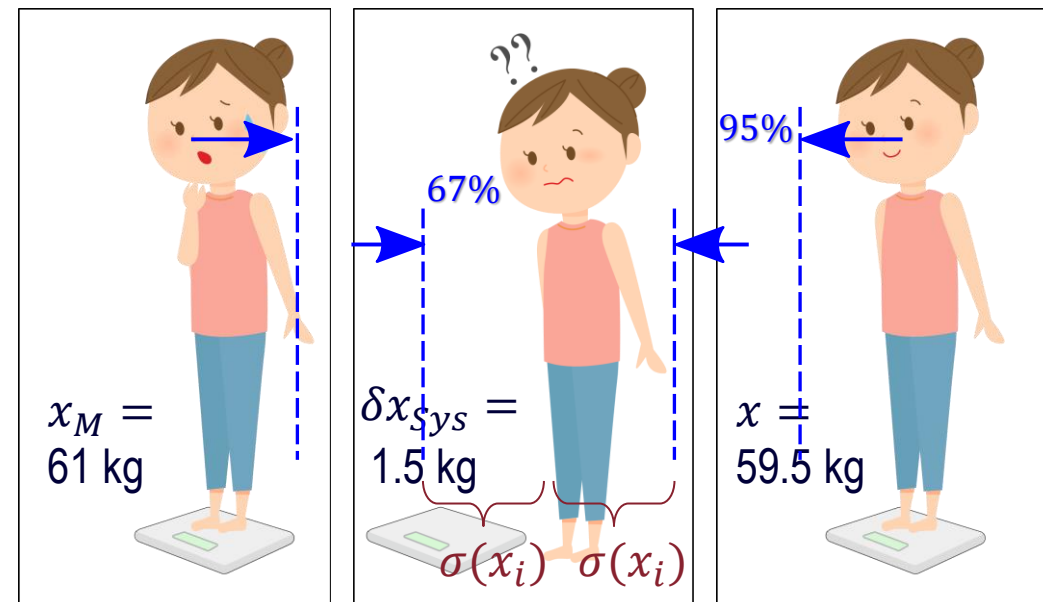
- **Systematisch:** tritt immer in gleiche Richtung und Maß auf
 - ▶ kann mit einer separaten Messung korrigiert werden:

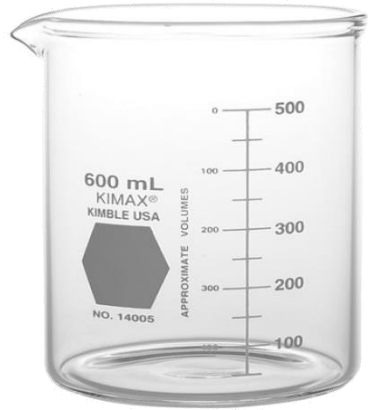
$$x = x_M - \delta x_{sys}$$

- **Stochastisch:** Richtung und Größe zufällig

▶ bei Wiederholung der Messungen:

- Verteilung oft Gaußsche
- $\sigma(x)$ – standard Fehlergrenze mit 67% Konfidenz
- $2 \cdot \sigma(x)$ – **erweiterte** Fehlergrenze mit 95% Konfidenz





$$\delta V = ? \quad V = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot h \quad x_i = (D, h); R = V$$

Gemessen

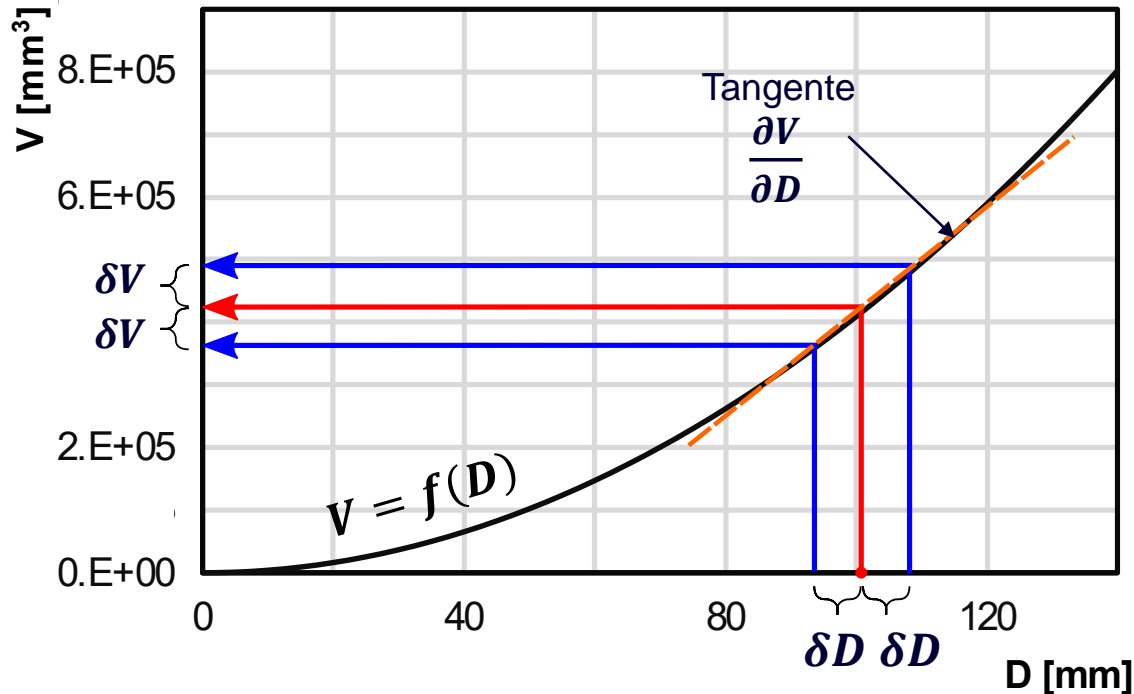
$$D = 99.8 \text{ mm} \quad \text{mit Schieblehre} \quad \delta D = 0.1 \text{ mm}$$

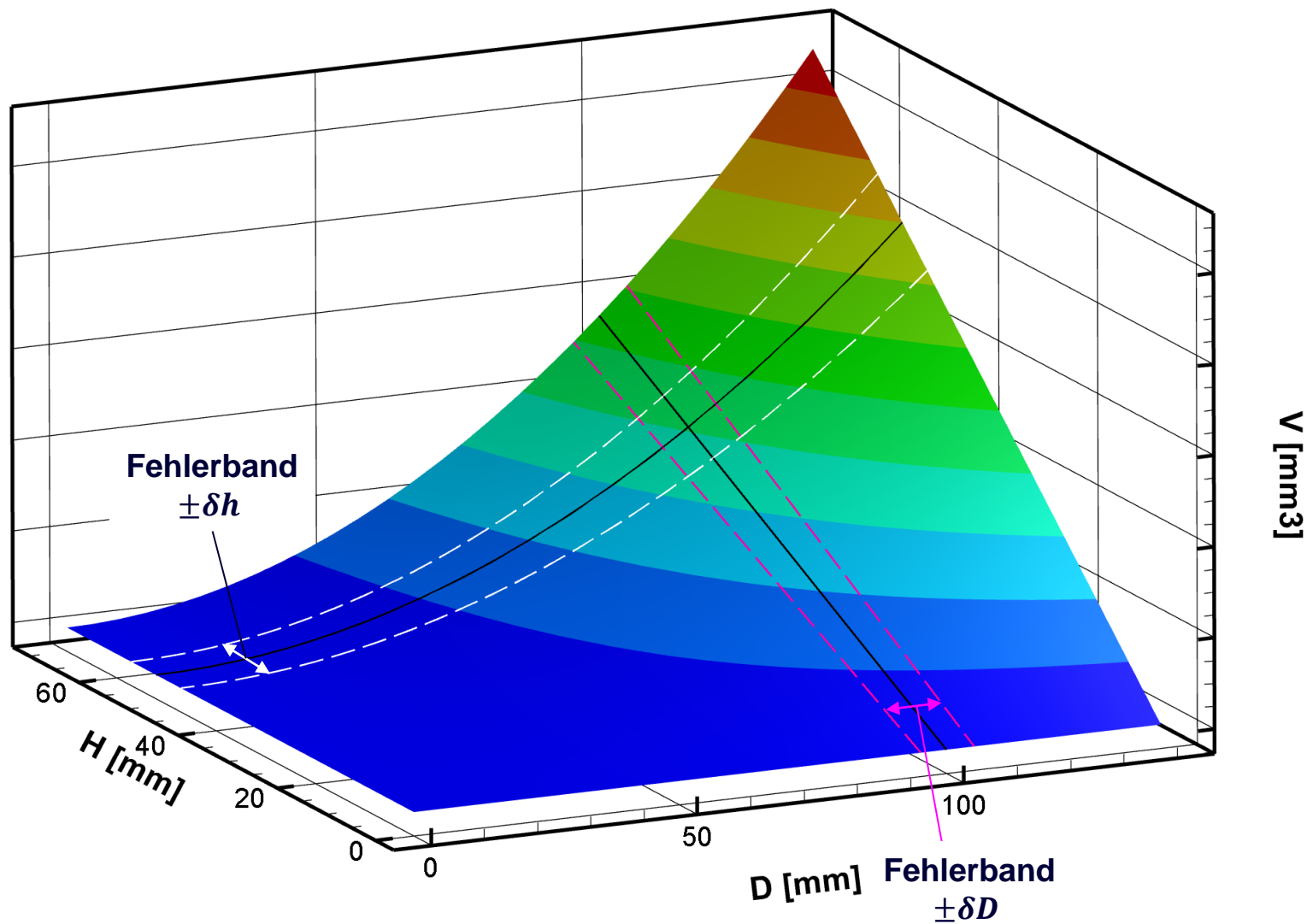
$$h = 52 \text{ mm} \quad \text{Ablesen der Skale} \quad \delta h = \pm 1 \text{ mm}$$

$$\delta V \Big|_D = \frac{\partial V}{\partial D} \cdot \delta D$$

$$= \frac{2D\pi h}{4} \cdot 0.1 \text{ mm} = 814.8 \text{ mm}^3$$

a. Eine Variable: Einfluß von δD auf δV





b. andere Variable: Einfluß von δh auf δV

$$\delta V \Big|_h = \frac{\partial V}{\partial h} \cdot \delta h$$

$$= \frac{D^2 \pi}{4} \cdot 1 \text{ mm} = 7822.6 \text{ mm}^3$$



c. Summieren der Fehler

$$\delta V = \sqrt{\delta V|_D^2 + \delta V|_h^2}$$

Warum nicht einfach addieren?

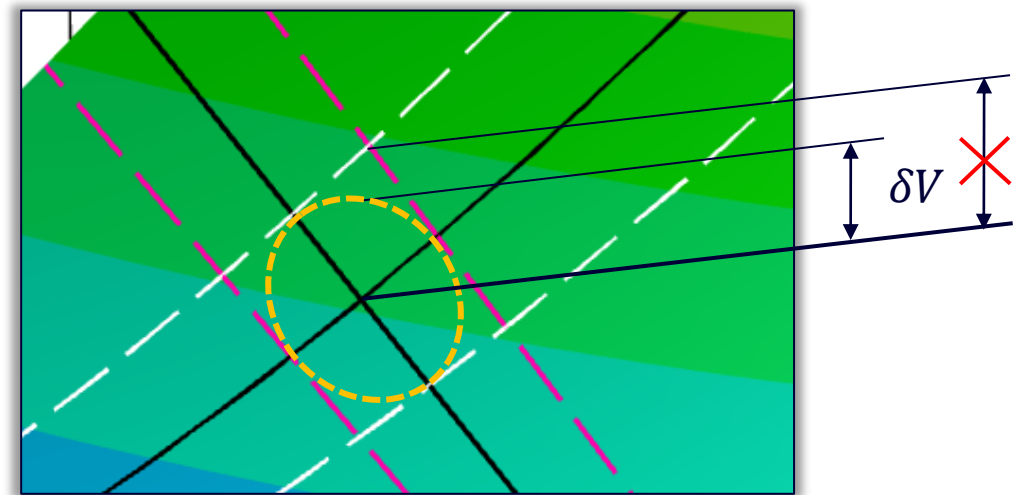
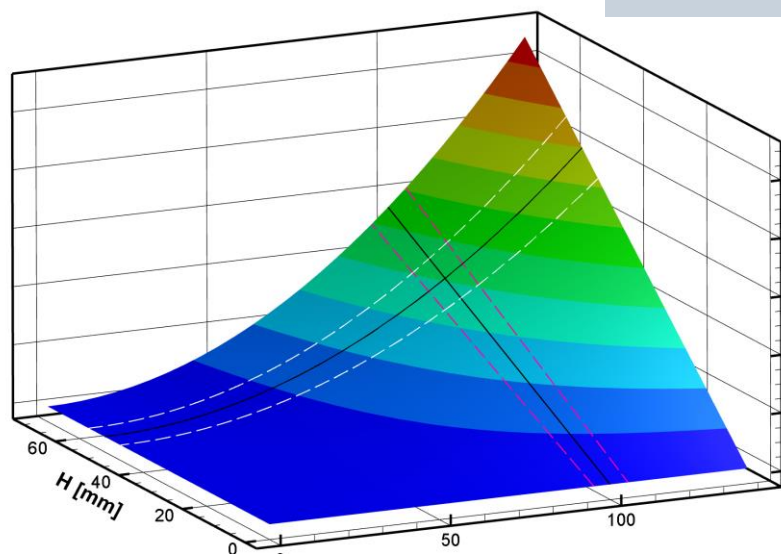
Die einzelnen Fehlerquellen sind stochastisch, treten in unterschiedlicher Richtung auf

$$\delta V < \delta V|_D + \delta V|_h$$

Allgemein: $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R(X_i)}{\partial X_i} \cdot \delta X_i \right)^2}$$

Gaußscher Fehlerfortpflanzungsformel



$$\delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D} \cdot \delta D \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \cdot \delta h \right)^2} = 7864 \text{ mm}^3$$



d. Angabe

$$V = V \pm \delta V$$

$$V = 406\,775 \pm 7864 \text{ mm}^3$$

e. Rundungen, Dezimalstellen

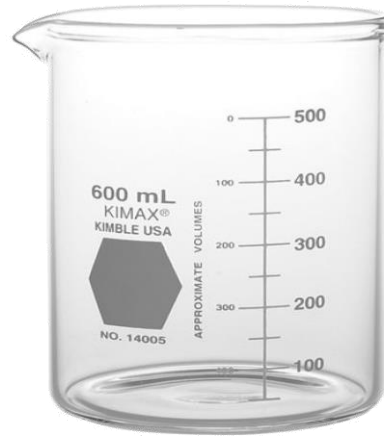
$$V[l] = 0.406\,775 \pm 0.007\,864 [l]$$



Unsichere Dezimalstellen!

$$V + \delta V = 0.414\,639$$

$$V - \delta V = 0.398\,911$$



Zusammenfassung:

1. Messunsicherheit auf zwei signifikanten Stellen runden
2. Messwert auf die gleichen Stellen runden

$$V = 0.4068 \pm 0.0078 \text{ l}$$

(resultiert in 2... max. 3 unsicheren Dezimalstellen im Ergebnisangabe.)

DRUCKMESSUNGEN



- Dient auch zur Messung weiterer strömungsmechanische Variablen: v , q_V , F

Die Messung ...

... des Absolutdruckes: selten (Ausnahme: Umgebungsdruck)

... eines Druckunterschiedes: zwischen zwei Punkten in der Strömung, oder

... des Überdrucks: Druck wird zu einem Referenzdruck verglichen

(Referenz : atmosphärischer Druck, statischer Druck im System)

vorzustellende Instrumente :

- U-Rohrmanometer und Varianten:

Messprinzip: Ausweichung einer Flüssigkeitssäule

- Digitalmanometer

Messprinzip: Deformation einer Membrane

- U-Rohrmanometer
- "umgekehrtes" U-Rohrmanometer
- Betz-Manometer
- Schrägrohrmanometer
- Mikromanometer mit gekrümmten Rohr



- Reibungsfrei

$$\left[p_i + \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \rho \cdot U_i \right]_1^2 = 0$$

- Reibungsbehaftet

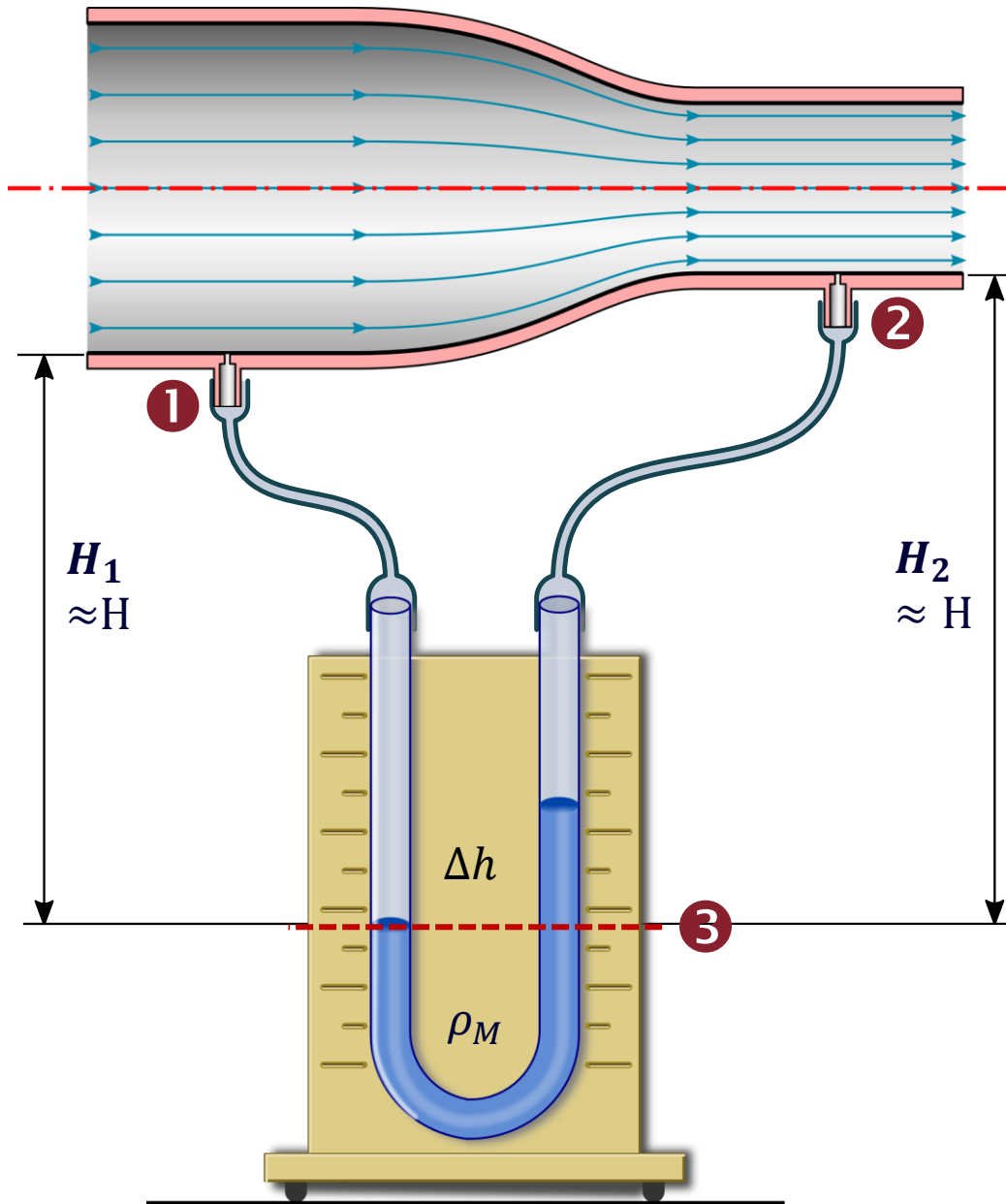
$$\left[p_i + \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \rho \cdot U_i \right]_1^2 = \Delta p'$$

p – statischer Druck (wirkt auf die Kanaloberfläche)

$\frac{\rho}{2} \cdot v^2$ – dynamischer Druck
quadratisch proportional zu v

$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2$ – Gesamtdruck / Totaldruck
(Druck des angehalteten Mediums)

$\rho \cdot U$ – hydrostatischer Druck



Mit der Grundgl. der Hydrostatik (Annahme: $H_1 \approx H_2 = H$):

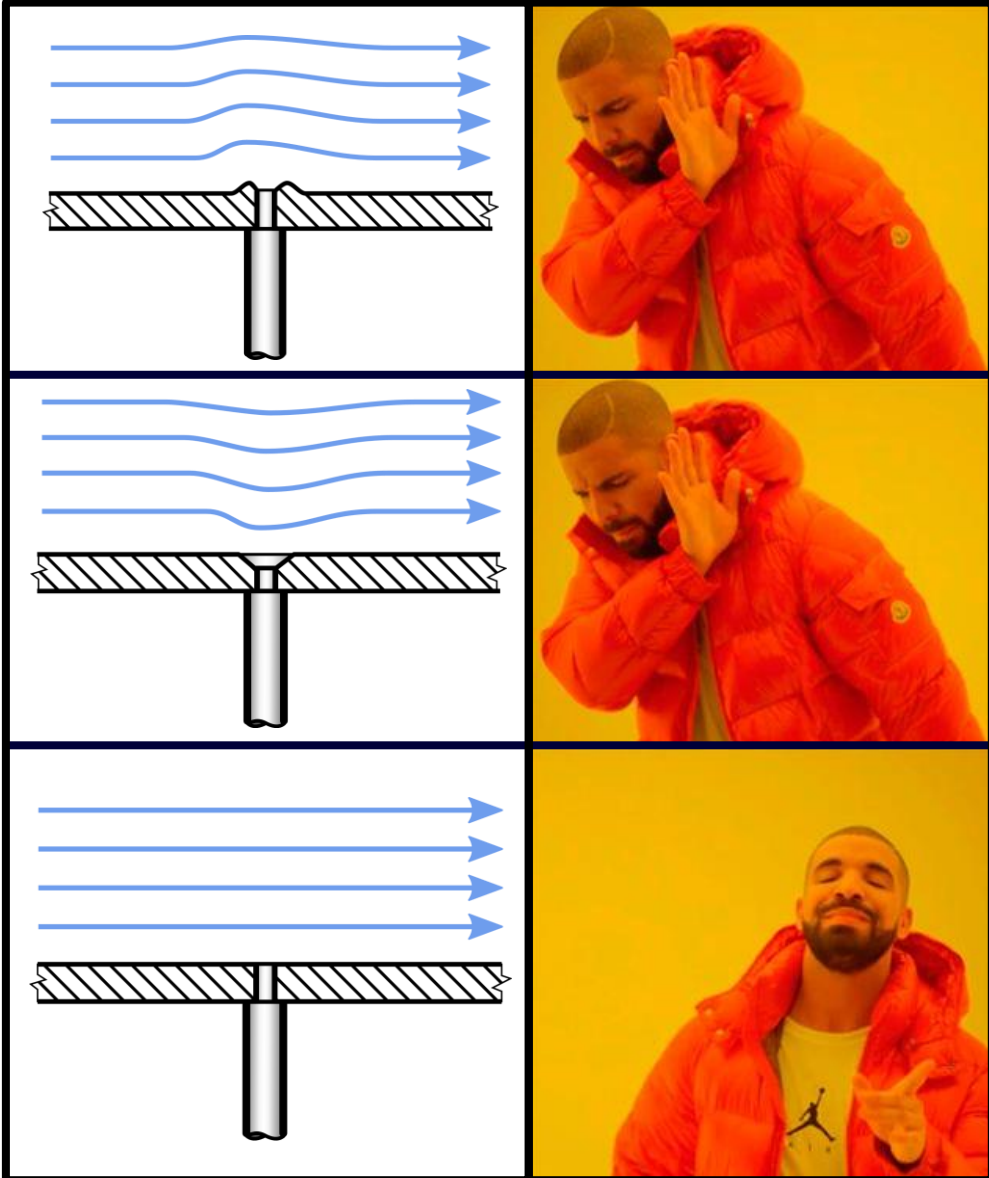
$$p_1 + \rho_{Str} \cdot g \cdot H = p_2 + \rho_{Str} \cdot g \cdot (H - \Delta h) + \rho_M \cdot g \cdot \Delta h$$

Gleichung des U-Rohrmanometers:

$$p_1 - p_2 = (\rho_M - \rho_{Str}) \cdot g \cdot \Delta h$$

Beobachtungen

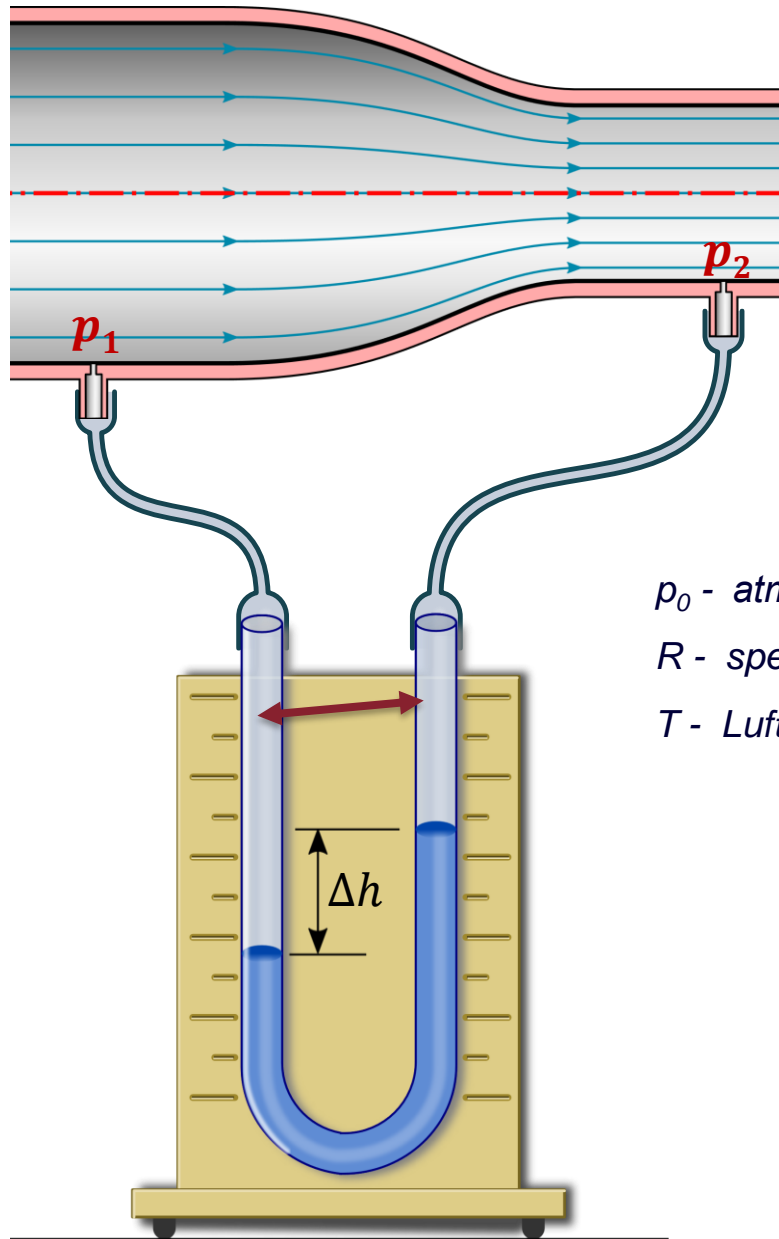
- $\Delta p = f(\Delta h)$
- $\Delta p \neq f(H)$
- Gilt nicht, wenn $H_1 \neq H_2$



Euler-Gl. in natürlichem Koordinatensystem, Normalrichtung :

$$\frac{v^2}{R} = g_n - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = g_n - \frac{v^2}{R}$$
$$\Rightarrow \frac{\partial p}{\partial n} \sim \frac{1}{R}$$

- Bei gekrümmten Stromlinien: Druckgradient in Querrichtung!
- Bei parallelen, geraden Stromlinien: $R = \infty$
 - ▶ $\partial p / \partial n$ nur von \underline{g} abhängig



Gleichung des Manometers

$$\Delta p = (\rho_M - \rho_{Str}) \cdot g \cdot \Delta h$$

Messflüssigkeit: $\rho_{Hg} \approx 13600 \frac{kg}{m^3}$, $\rho_{Wasser} \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$, $\rho_{Alkohol} = 830 \frac{kg}{m^3}$

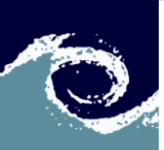
Strömungsmedium: $\rho_{Luft} = \frac{p_0}{R \cdot T} = 1,19 \frac{kg}{m^3}$

Wenn $\rho_{Str} \ll \rho_M$: $p_1 - p_2 = \rho_M \cdot g \cdot \Delta h$

p_0 - atmosphärischen Druck [Pa] $\sim 10^5 Pa$

R - spezifischen Gaskonstante der Luft 287[J/kg/K]

T - Lufttemperatur [K] $\sim 293K = 20^\circ C$



Ein Beispiel

Messwert:

$$\Delta h = 10\text{mm}$$

Ablesegenauigkeit (absoluter Fehler):

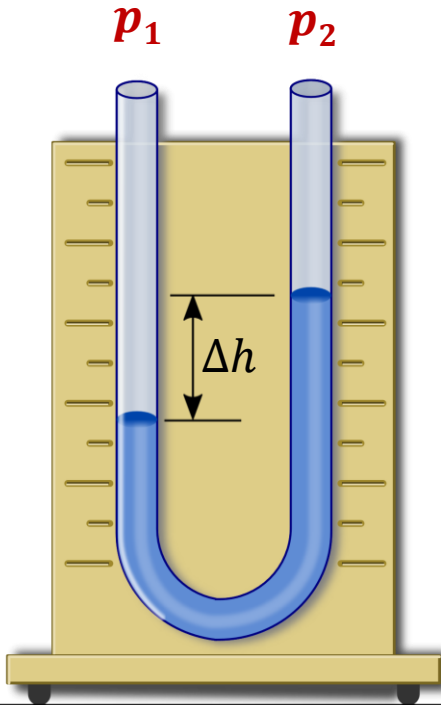
$$\delta(\Delta h) = \pm 1\text{mm}$$

Richtige Schreibweise mit dem Fehler:

$$\Delta h = 10\text{mm} \pm 1\text{mm}$$

Relativer Fehler:

$$\frac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{1\text{mm}}{10\text{mm}} = 10\%$$



Nachteile:

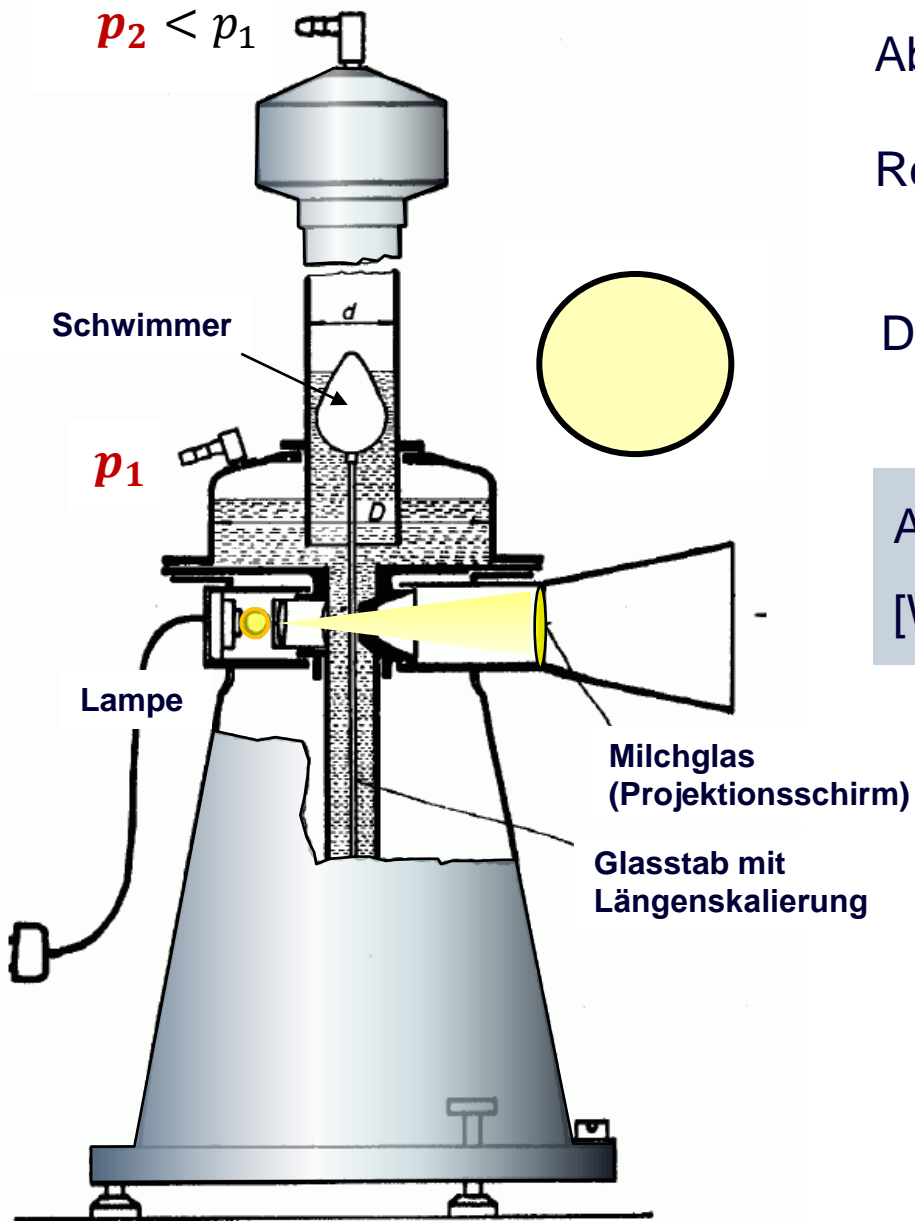
- Ablesefehler geht zweimal in die Rechnung ein
- Messfehler: 10-20 Pa

Vorteile:

- Einfach, robust, zuverlässig
- Keine Kalibrierung nötig



$$p_2 < p_1$$



Ablesefehler $\sim 0,1\text{mm}$: Messwert mit abs. Fehler:

$$\Delta h = 10\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$$

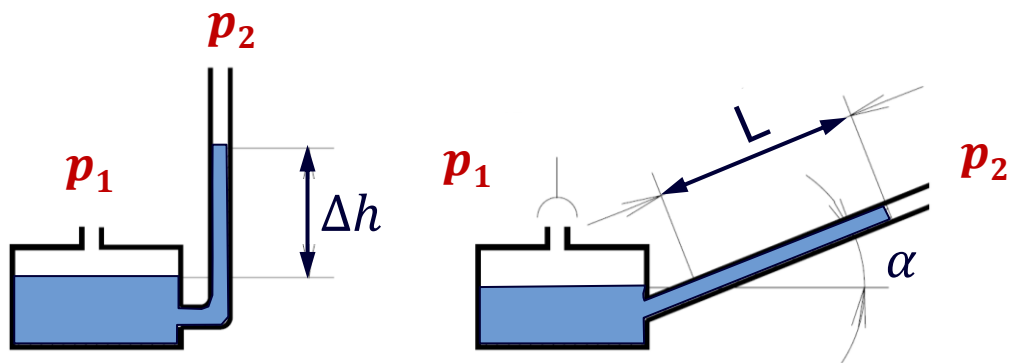
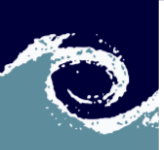
Relativer Fehler:

$$\frac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{0,1\text{mm}}{10\text{mm}} = 0,01 = 1\%$$

Der Fehler wird mit **optisch verbesserten Ablesung** gesenkt!

Anzeige: in [mm]
[W.S.mm]





$$\Delta p = (\rho_M - \rho_{Str}) \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{mit} \quad \Delta h = L \cdot \sin \alpha$$

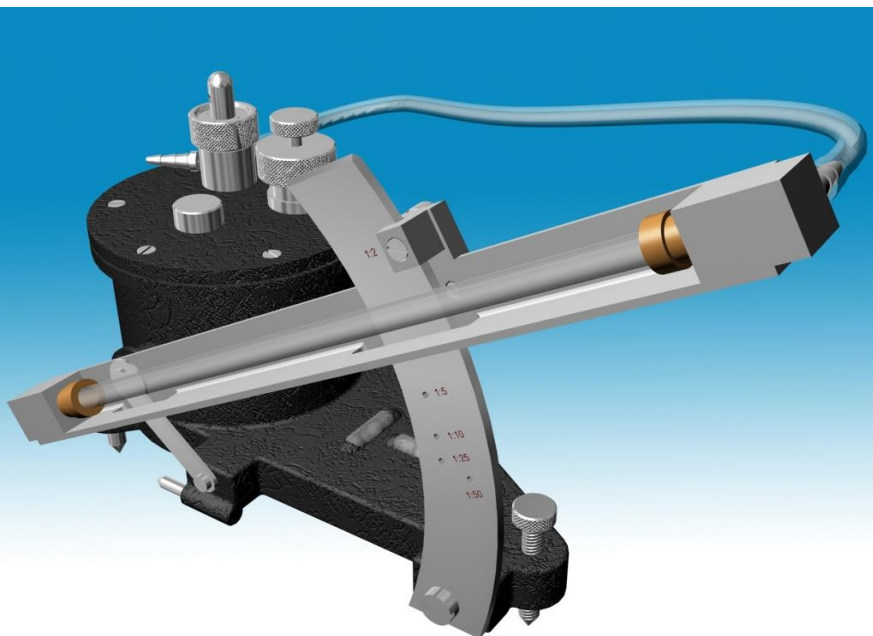
$$\Delta p = \rho_M \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$$

Ablesefehler:

$$dL \approx \pm 1 \text{ mm},$$

Relativer Fehler bei $\alpha = 30^\circ$:
$$\frac{\delta L}{L} = \frac{\delta L}{\frac{\Delta h}{\sin \alpha}} = \frac{1 \text{ mm}}{\frac{10 \text{ mm}}{\sin 30^\circ}} = 0,05 = 5\%$$

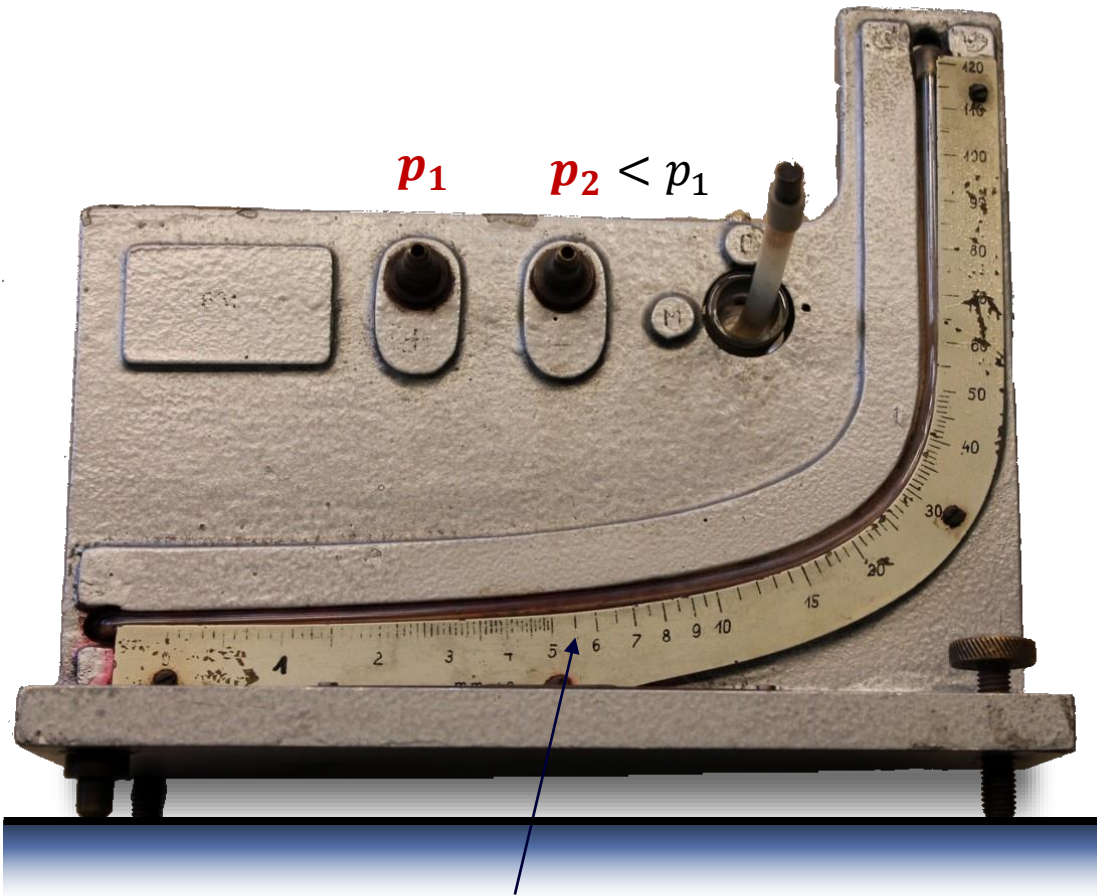
- Der Fehler sinkt mit dem **Anstellwinkel** α ab
- Messbereich (Δh_{max}) ändert sich mit α



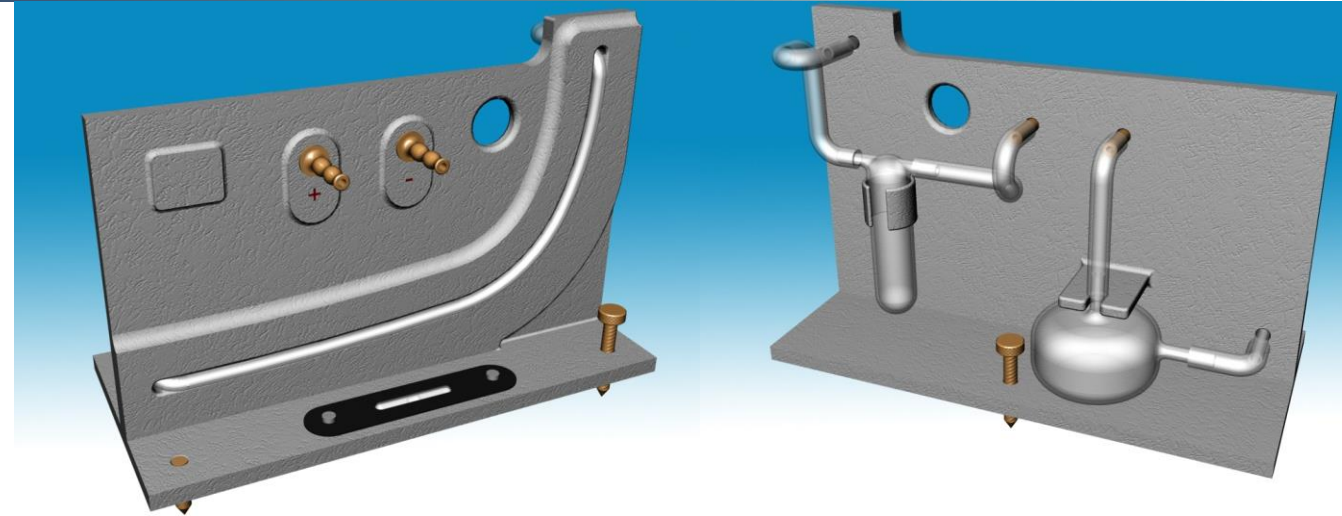
DRUCKMESSUNG MIKROMANOIMETER MIT GEKRÜMMTEN ROHR

31

41



Skalenteilung in Höhen-mm



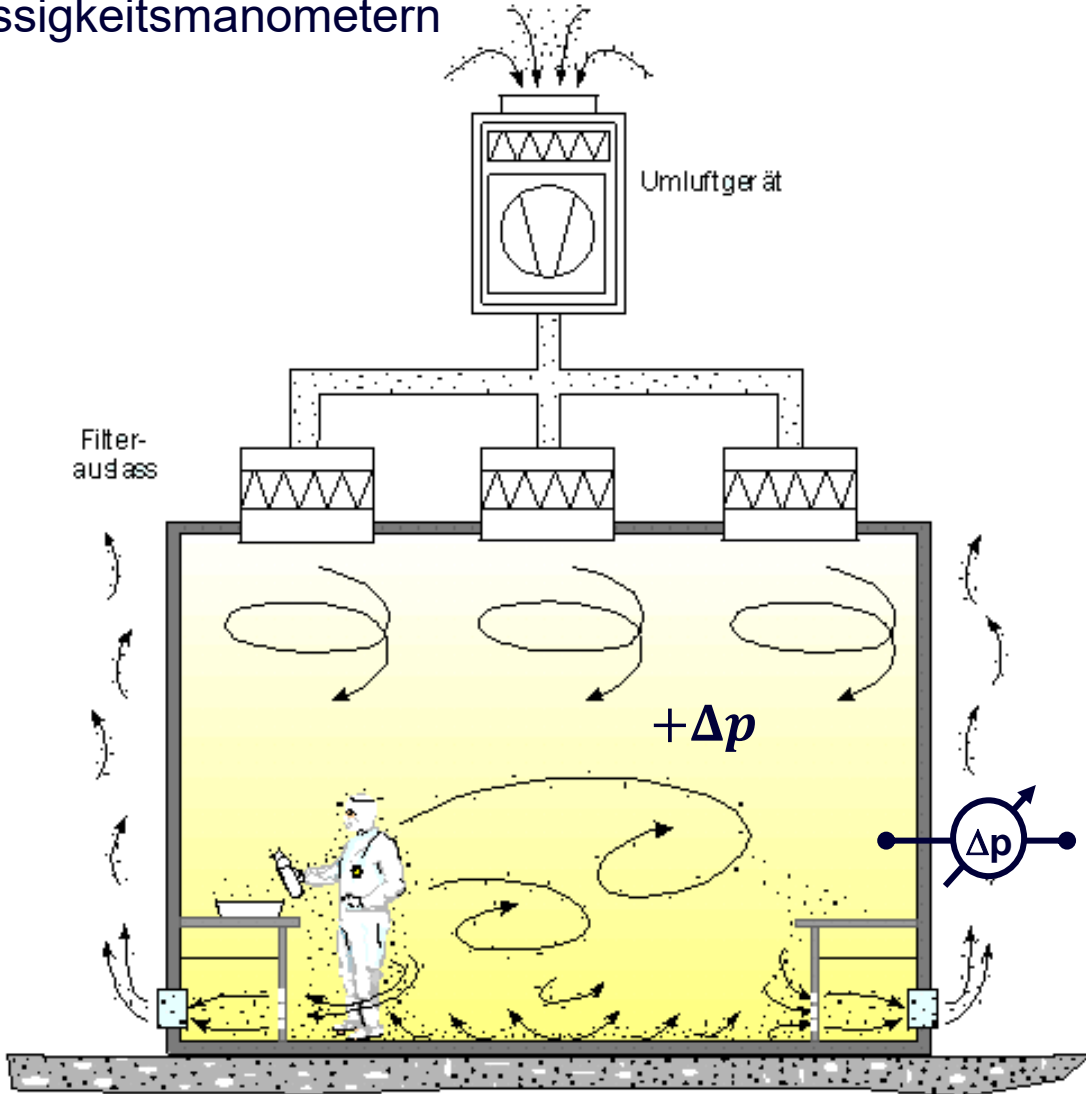
Relativer Fehler im ganzen Messbereich etwa konstant!

WO WERDEN HEUTE FLÜSSIGKEITSMANOMETER EINGESETZT?

Reinräume : Um das Eindringen von Staub, Bakterien usw. zu vermeiden

► Überdruck von 5 - 50 Pa im Raum ► Einfache Beobachtung mit

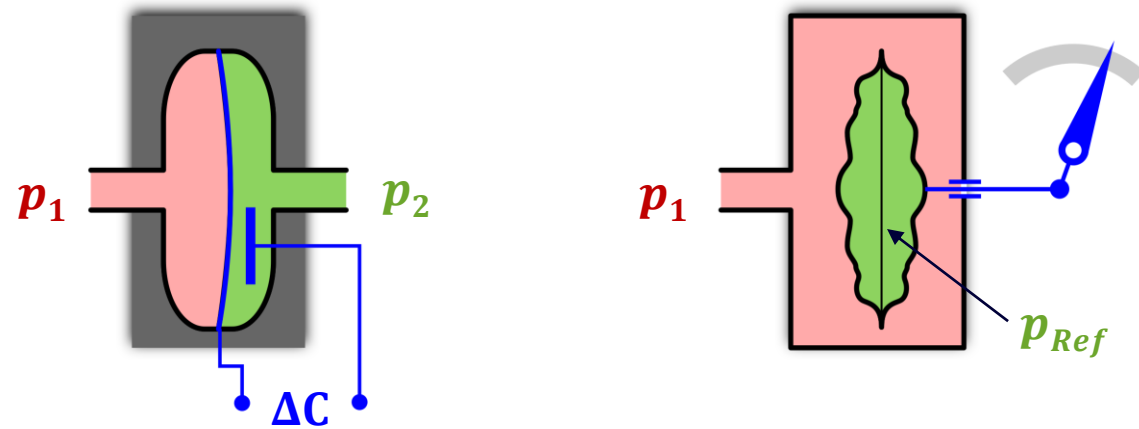
Flüssigkeitsmanometern





DRUCKMESSUNG

PRINZIP: VERFORMUNG EINER MEMBRANE ODER EINER DOSE



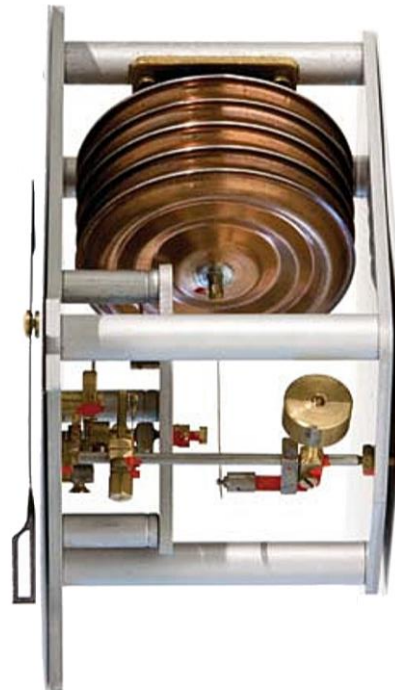
Druckänderung Δp ► Ausdehnung ΔL ►

- Mechanisch: Zeiger oder Schreiber wird getätigt
- Elektrisch: Änderung der Kapazität, des Widerstands
- Spannung U [V] oder Digitalausgang / -anzeige

**Aneroidbarometer
im Labor**



Fischer 103
900-1060 hPa
0.7 hPa



Typ:
Messbereich:
Messunsicherheit:

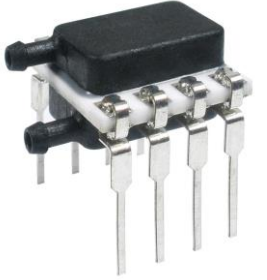
DIGITALMANOMETER EMB-001

- Zur Differenzdruckmessung
- Entwickelt am Lehrstuhl für Strömungslehre
- Mit zwei Honeywell Drucksensoren

Messbereich: $\Delta p = \pm 1250 Pa$

Messunsicherheit: $\delta \Delta p = 2 Pa$

Zeitliche Auflösung: $< 10 ms$



Ein/Aus

Druckdifferenz auf
0 Pa setzen

Sensor I/II
wechseln

Originalkalibrierung laden:
(RECALL): „0“ danach „STR Nr“

Mittelungszeit
wechseln (1/3/15s)

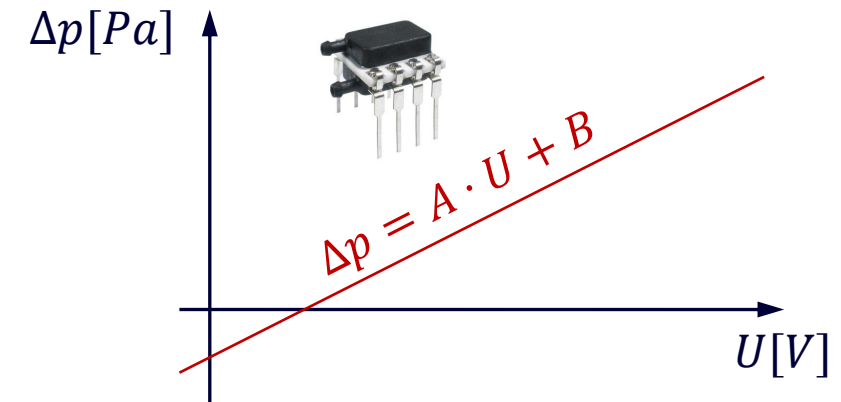




- Ziel: **Bestimmung / Überprüfung** des Zusammenhangs
 $\Delta p = f(U), f(\Delta L)$ oder $f(\text{angezeigter Wert})$
- Referenzinstrument: ein kalibrierter Manometer, mit 5-10-fach kleinerer Messunsicherheit (z. B. Ein Betz-Mikromanometer)

Schritte:

1. Beide Manometer an eine gemeinsame Druckleitung mit Pumpe anschließen
 2. Verschiedene Drücke im Messbereich einstellen
 3. Werte ablesen
 4. Werte $\Delta p = f(U), f(\Delta L)$ oder $f(\text{angezeigter Wert})$ in X-Y-Diagramm darstellen
 5. Regressionskurve anpassen
- **Gleichung der Kurve erhalten**





Beispiel

Kalibriert wird: ein EMB-001, Kanal 1

Referenz: Betz-Mikromanometer

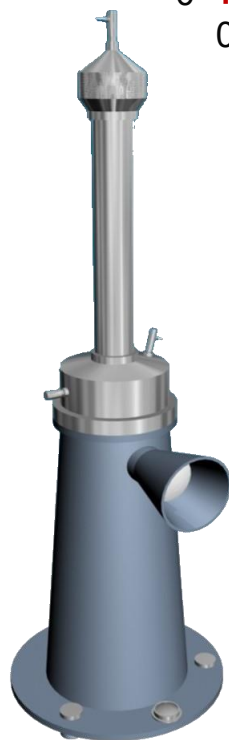
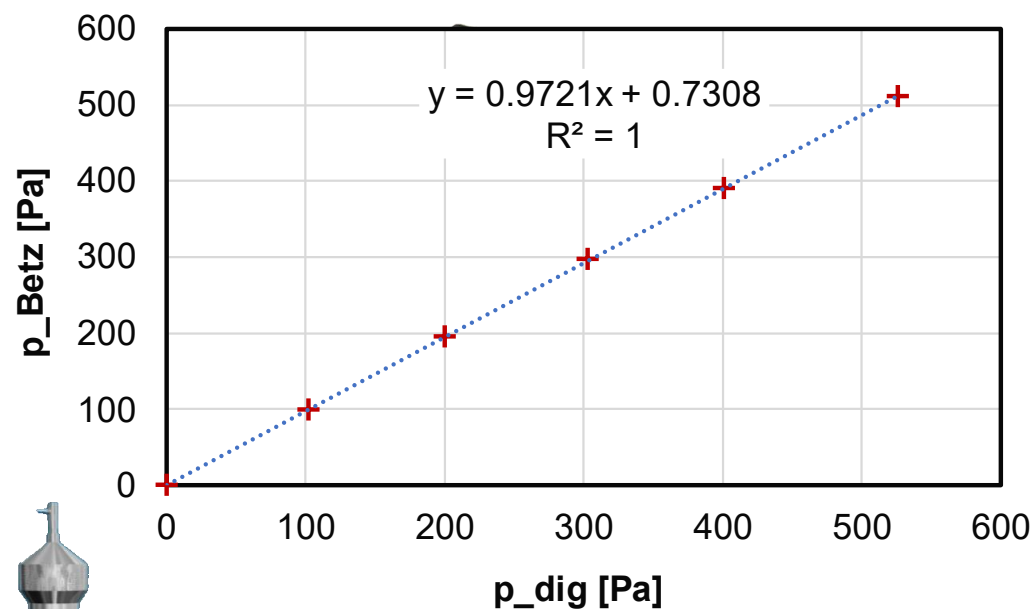
Gesucht: $\Delta p [Pa] = f(\text{angezeigter Wert } [Pa])$

Messwerte:

$p_{dig} [Pa]$	$p_{Betz} [WSmm]$	$p_{Betz} [Pa]$
0	0.0	0.0
102	10.2	99.8
200	20.0	195.6
303	30.3	296.4
401	40.0	390.8
526	52.3	511.1

Ergebnis:

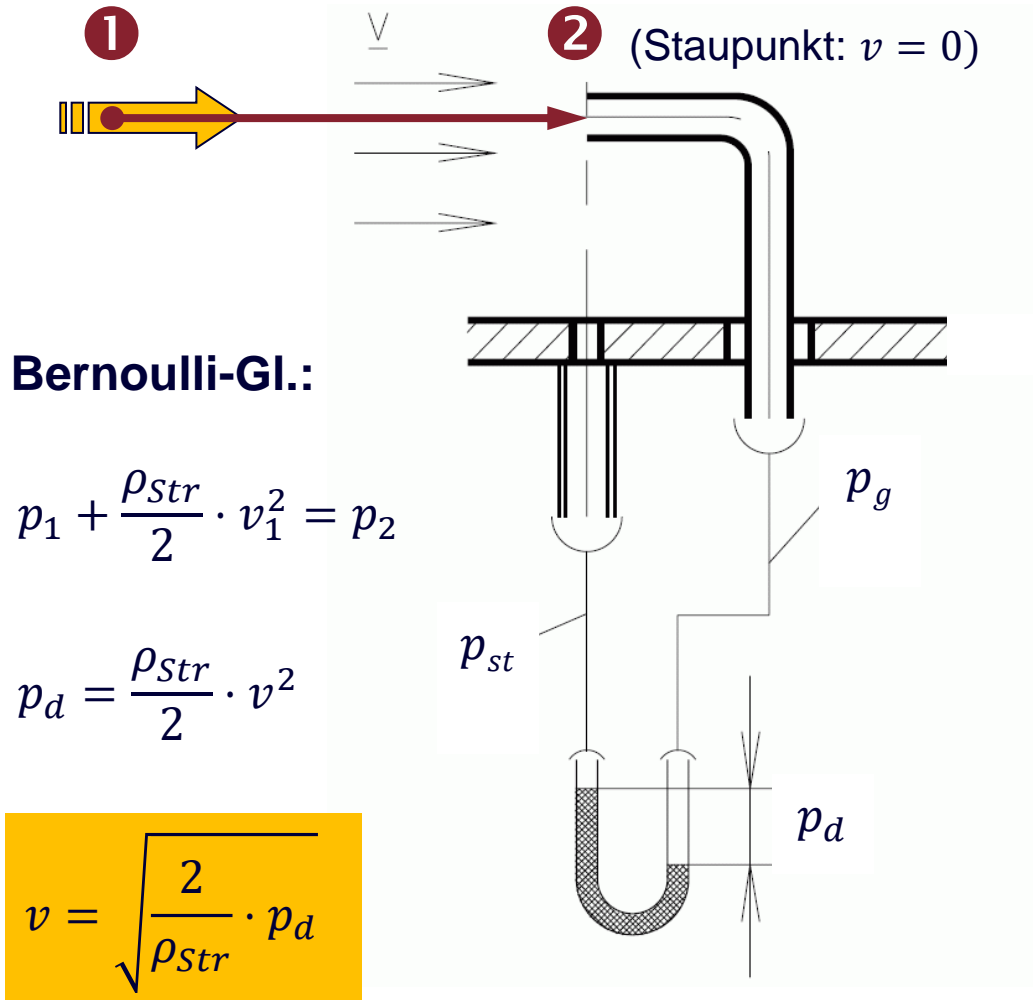
$$\Delta p [Pa] = 0.9721 \cdot \Delta p_{dig} [Pa] + 0.7308$$



Umgebungs-
parameter:

$t_0 [^{\circ}C]$	25
$T_0 [K]$	298.15
$\rho_v [kg/m^3]$	997.1
$g [N/kg]$	9.81

STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT UND VOLUMENSTROM



$p_2 = p_g$ Druck der angehaltenen Strömung (Gesamtdruck)

$p_1 = p_{st}$ Druck auf einer, mit der Strömung parallel stehenden Oberfläche (statischer Druck der ungestörten Strömung)

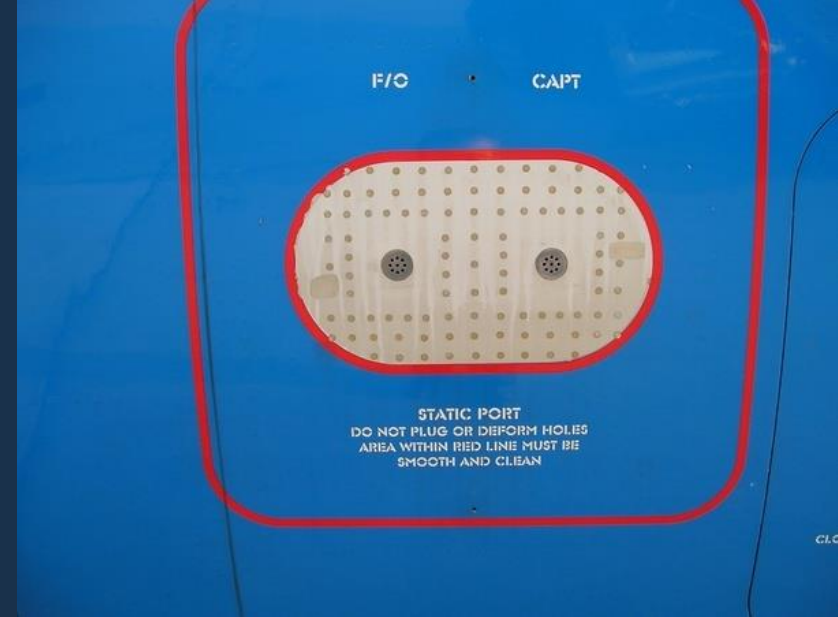
$p_d = p_g - p_{st}$: der dynamische Druck der ungestörten Strömung



Pitot-Rohr:

Auch heute das primäre Instrument zur Messung der Fluggeschwindigkeit!

Separate statische Druckbohrungen am Rumpfuntersite zur Bestimmung des statischen Druckes p_{st}



Katastrophe des Fluges Air France 447 (2011): Vereisung der Pitot-Röhre

In Free Fall

The last minutes of flight AF 447 from Rio de Janeiro to Paris



2.09 am GMT
The Airbus A330 has been flying through a storm front at an altitude of 10,700 meters (35,100 feet) for more than half an hour.

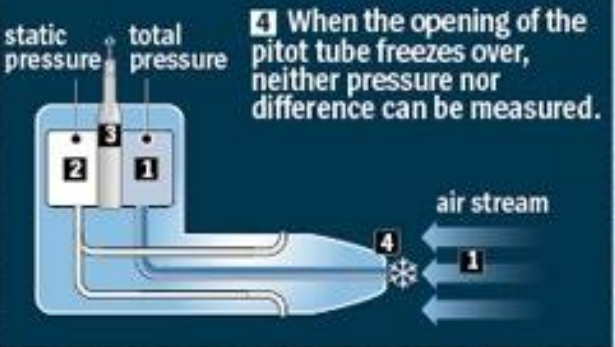
2.10 am
Ice crystals from the clouds block the pitot probes underneath the cockpit. The airspeed display stops working. Several warning signals appear on the control screens in the cockpit. The autopilot and the automatic throttle stop working. The flight computer switches to emergency control (a mode known as Alternate Law 2).

2.11 am
The pilots lose control of the aircraft. It is possible that a so-called deep stall occurred at this point.



Functionality of the Pitot Tube

- 1 The speed of the aircraft determines the pressure of the air stream in contact with the pitot tube. A sensor measures the total pressure.
- 2 The air pressure around the pitot tube (known as the static pressure) is also measured.
- 3 The difference between the total pressure and the static pressure is used to calculate the airplane's speed. The speed is shown on a display in the cockpit.



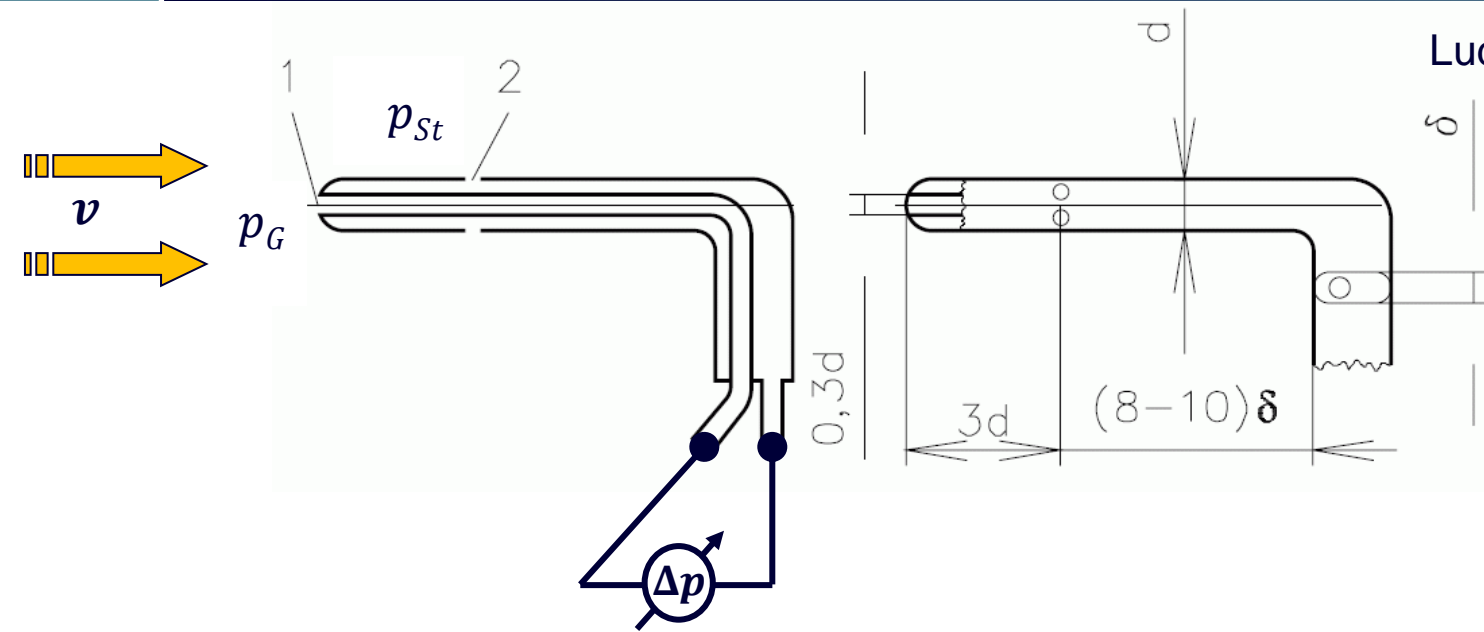
2.12 am
The out-of-control aircraft hurtles toward the ocean surface at an estimated speed of descent of 2,500 meters per minute.

2.13 am
The pilots are believed to have desperately tried to restart the flight computer in an attempt to regain control of the airplane.

2.14 am
The ground proximity warning system alerts the pilots when the aircraft descends below 600 meters above the ocean surface. Acoustic warnings sound in the cockpit: "Terrain! Terrain! Pull up! Pull up!"

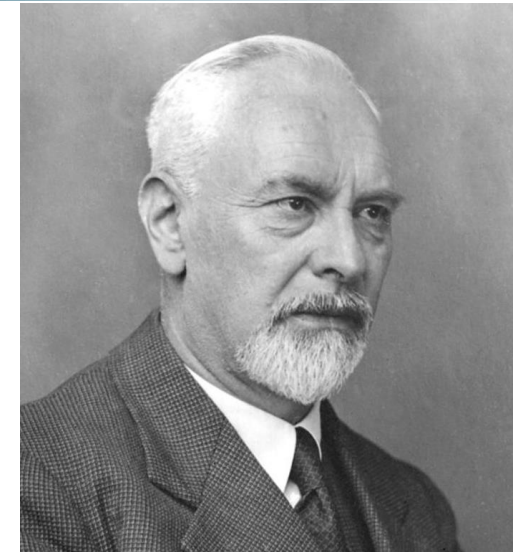
Impact
The plane, which is still intact, hits the ocean surface with a force equivalent to 36 times the force of gravity and with its nose raised by only five degrees. The vertical stabilizer becomes detached and flies forward.





Ludwig von Prandtl (1875-1953),
deutscher Aerodynamiker*.

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_{Str}} \cdot p_d}$$



- Geometrie genau spezifiziert
- Gut, wenn p_{St} variabel, oder keine Wand vorhanden
- Mißt nur $|\underline{v}|$ (Betrag aber keine Richtung)
- Anströmungswinkel: max. $\pm 15\%$
- Greift in die Strömung ein
- Nicht geeignet für sehr kleine Geschwindigkeiten

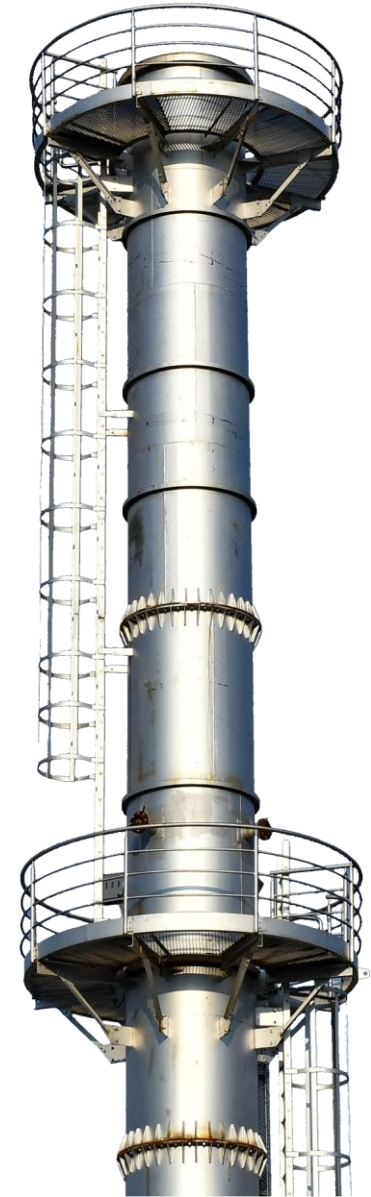
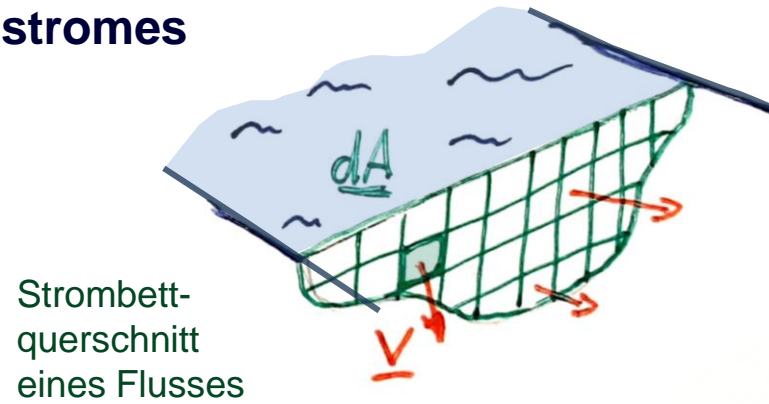
* Doktorvater von Theodore von Kármán in Göttingen





Definition des Volumenstromes

$$q_v = \int_A dq_v = \int_A \underline{v} \cdot \underline{dA}$$



1. Auf *Geschwindigkeitsmessung* basierende Methoden

- Für Nicht-Kreisquerschnitte auch möglich
- Für Kreisquerschnitte in Normen festgelegt
 - 10-Punkt Methode
 - 6-Punkt Methode

2. Wirkdruck-Verfahren (*Querschnittsverengungen*)

- Venturi-Rohr
- Durchflussmessblende
- Saugmessblende
- Messtrichter

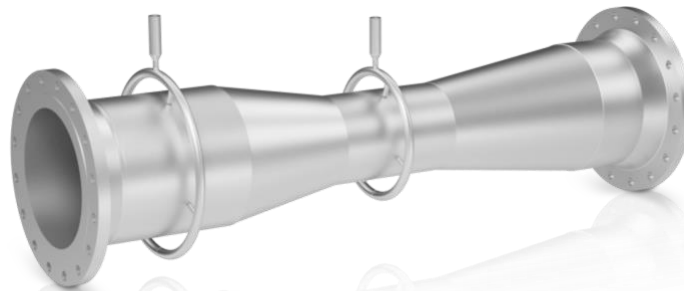
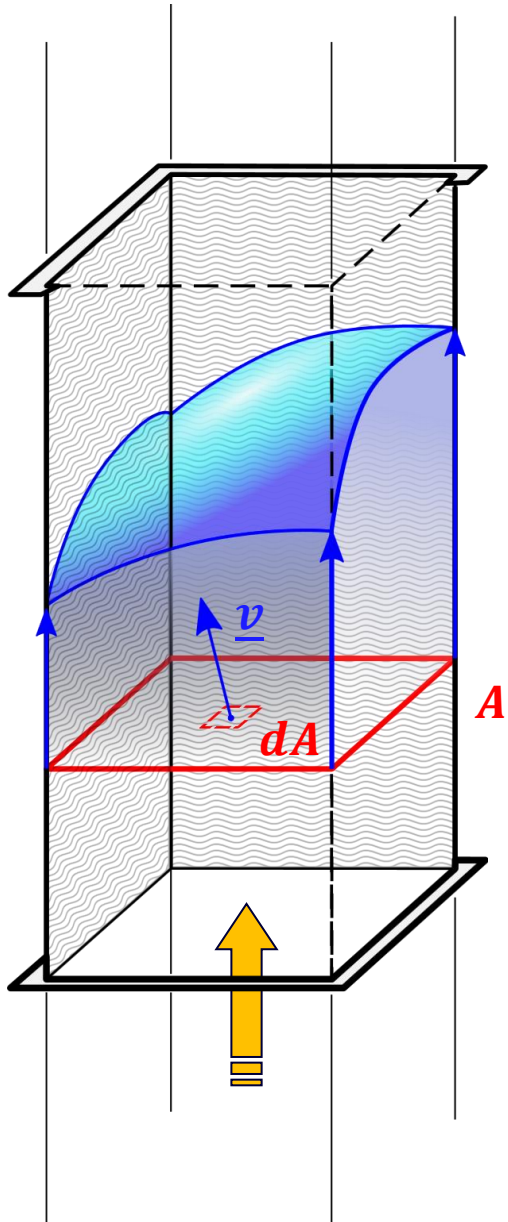
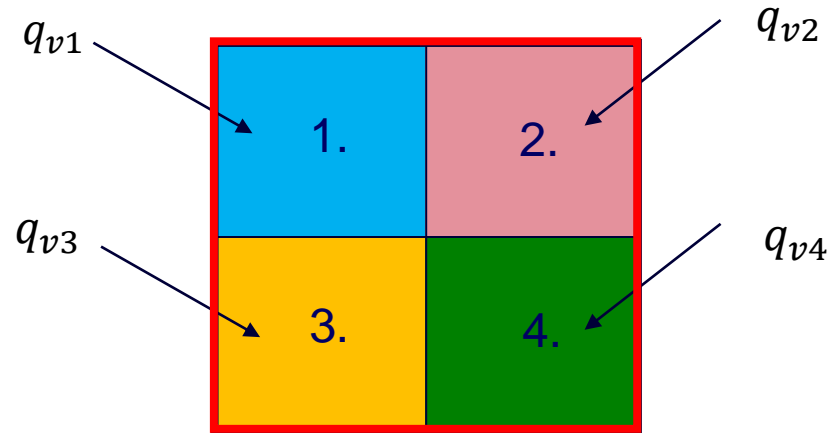


Bild: KROHNE Gruppe



$q_v = ?$ (Strömung stationär)



$$q_v = \int_A \underline{v} \cdot \underline{dA} \approx \sum_{i=1}^n v_{m,i} \cdot \Delta A_i$$

(wenn $\underline{v}_i \parallel \underline{\Delta A}_i$)

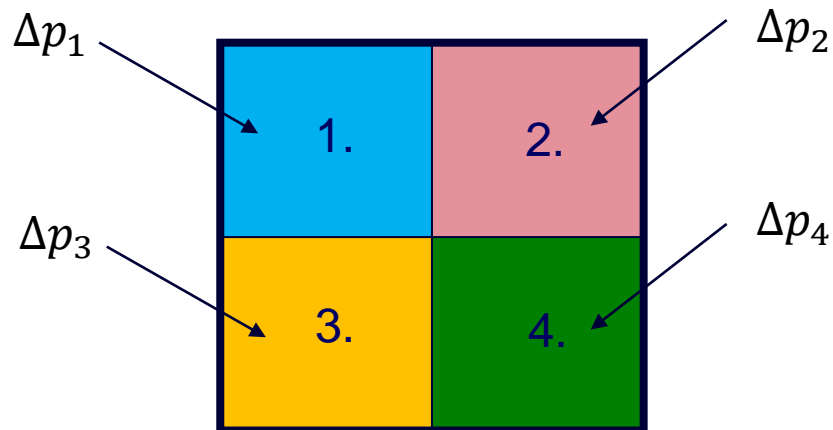
Weitere Bedingung:

$$\Delta A_1 = \Delta A_2 = \Delta A_i = \frac{A}{n}$$

$$q_v = \Delta A_i \cdot \sum_{i=1}^n v_{m,i} = \frac{A}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_{m,i} = A \cdot \bar{v}$$



Bei der Volumenstrom-Messung mit dem Prandtl-Rohr beachten:



$$v_i = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_i} \Rightarrow q_V$$

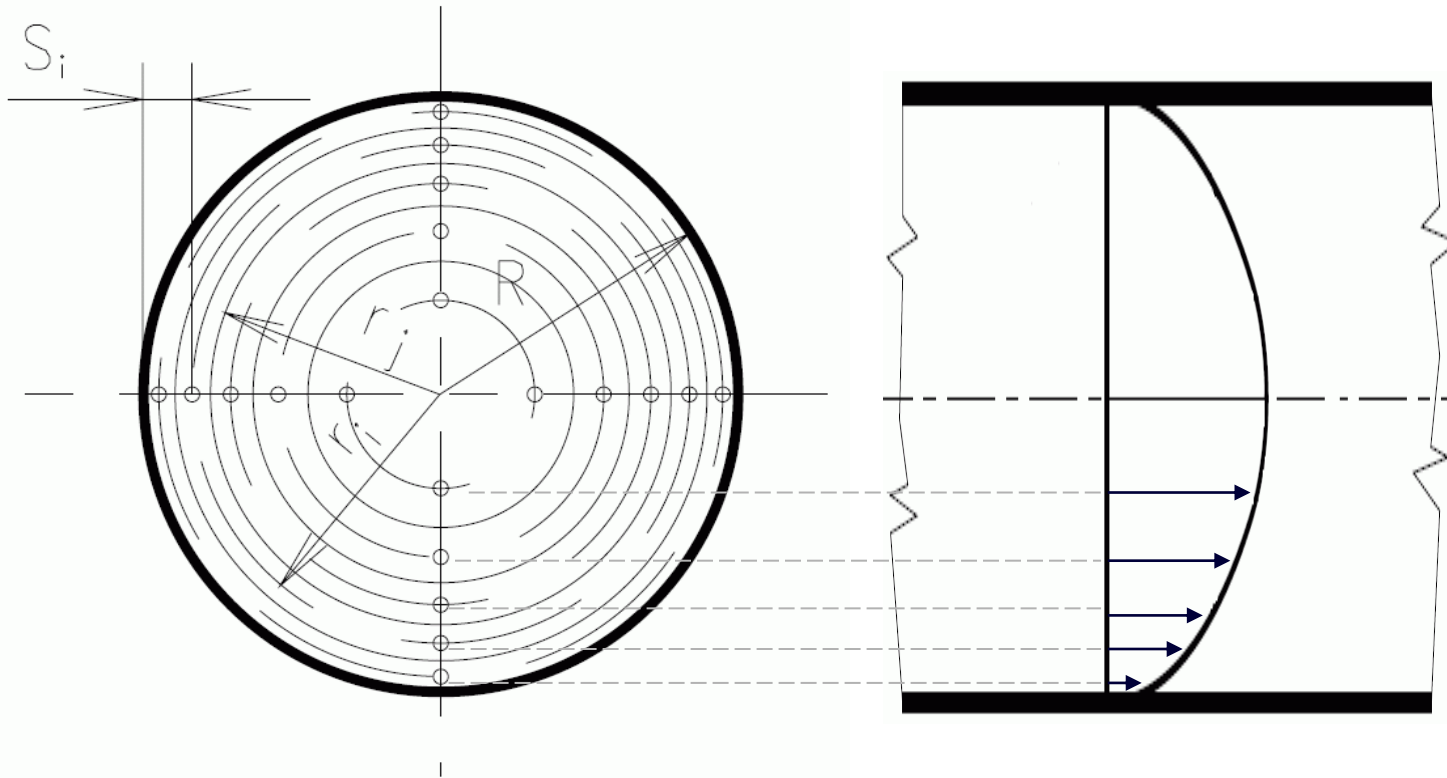
~~$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4}{4}}$$~~

FALSCH

Mittelwert der Wurzeln \neq Wurzel aus dem Mittelwert !

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_1} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_2} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_3} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_4}}{4}$$

RICHTIG



- Voraussetzung: stationäre Strömung
- Brauchbar für paraboloidförmigen (10P-Methode) und für turbulente Geschwindigkeitsverteilung (6P-Methode)

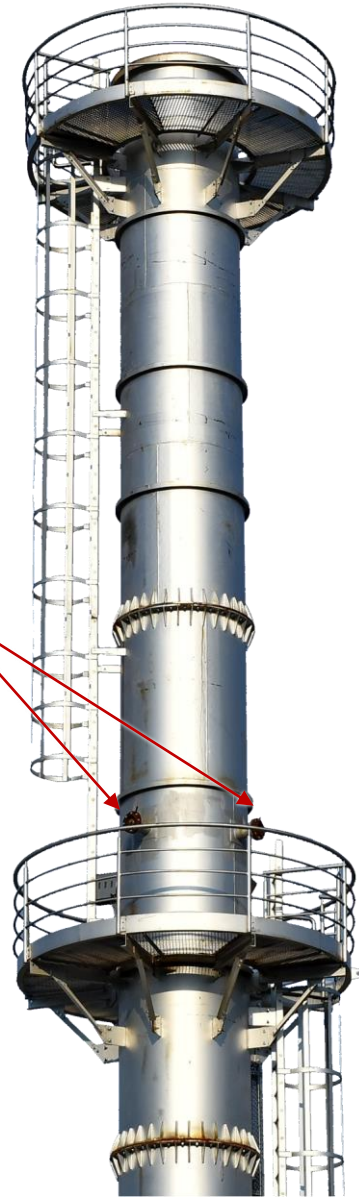
Berechnung

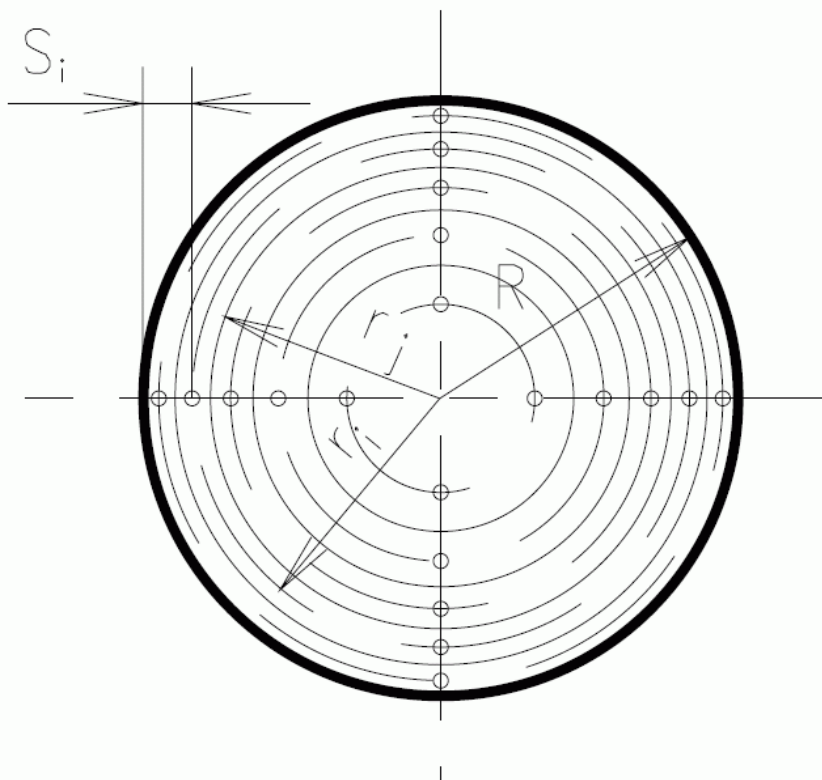
Teilquerschnitte müssen die gleiche Größe haben:

$$A_1 = A_2 = \dots = A_{10}$$

$$q_v = A \cdot \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_{10}}{10}$$

**Öffnungen für
Volumenstrom-
messung**





Volumenstrombestimmung anhand Geschwindigkeitsmessungen

Vorteile:

- Betriebszustand des Systems wird nicht geändert
- Optimal zur Einzelmessung
- Einfach, leicht verwirklichtbar

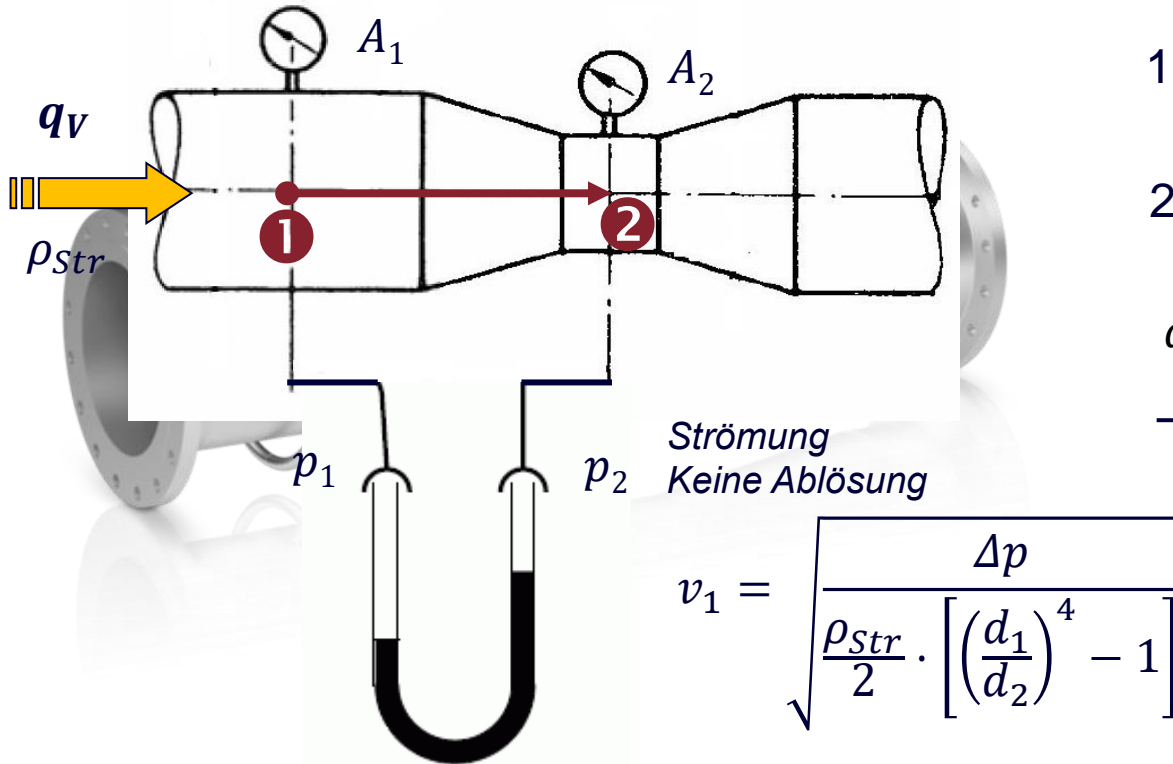
Nachteile:

- während der Messung stationäre Strömung nötig
- Messung dauert lange, z.B.:
10 Punkte x 1.5 min = 15 min.
- Messfehler kann höher sein

Methode in Norm festgelegt:

Messpunkte aus dem Norm (**MSZ 21853/2**):

$S_i/D = 0.026, 0.082, 0.146, 0.226, 0.342,$
 $0.658, 0.774, 0.854, 0.918, 0.974$



$$1) \text{ Bernoulli-Gl.: } p_1 + \rho_{Str} \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho_{Str} \frac{v_2^2}{2}$$

2) Konti-Gl. bei niedrigen Druckveränderungen ($\rho = konst.$):

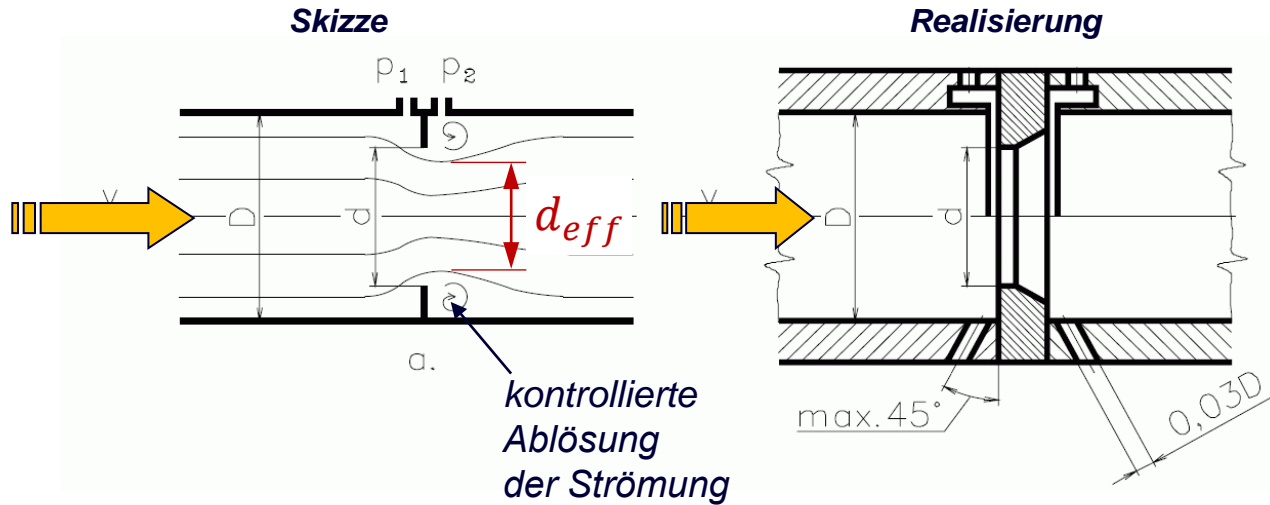
$$q_v \left[\frac{m^3}{s} \right] = v \cdot A = konst \quad q_v = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{\Delta p}{\frac{\rho_{Str}}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]}}$$

$$q_v = \frac{d_1^2 \pi}{4} \cdot v_1$$

- Niedrige Strömungsverluste
- Misst kontinuierlich
- Misst auch instationäre Strömungen
- Ändert den Betriebszustand des Systems
- Muss eingebaut werden
- Lange gerade Rohrstrecke davor und danach
- Teure Konstruktion

Durchflussmessblende : „eine vereinfachte Venturi-Rohr“



$$q_v = \underbrace{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{mp}^2 \cdot \pi}{4}}_{= A_{eff}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}}_{\sim v}$$

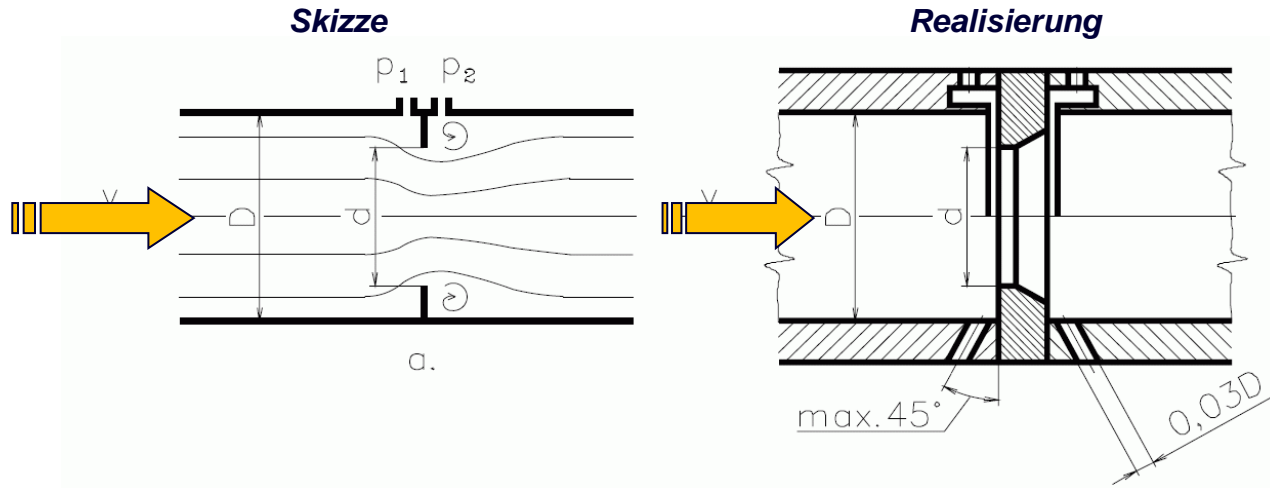
- Durchflußzahl: $\alpha = \frac{A_{eff}}{A_{geom}} = f(Re, d/D)$; $\alpha \approx 0.7$
- Expansionszahl ε : Einfluss der Kompressibilität
 - für inkompressible Medien $\varepsilon = 1$

($\Delta p_{mp} > 5000Pa$, und p_1 nahe atmosphärisch)

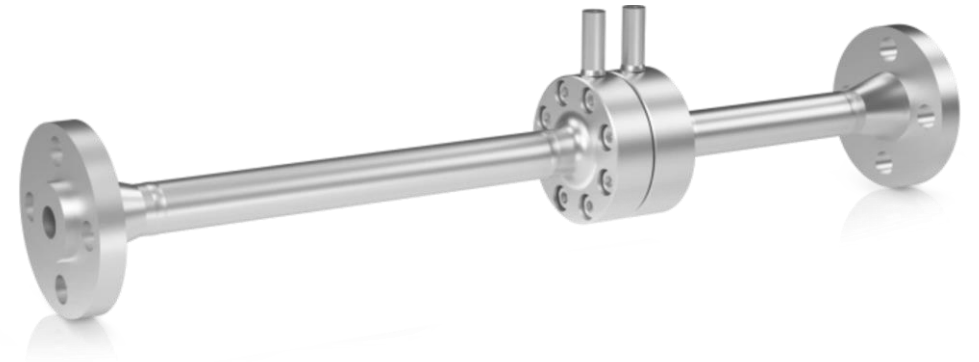
Genaue Berechnung von α, ε in Normen definiert!



Durchflussmessblende : „eine vereinfachte Venturi-Rohr“



$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{mp}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}$$



Vor-und Nachteile wie beim Venturi-Rohr, aber:

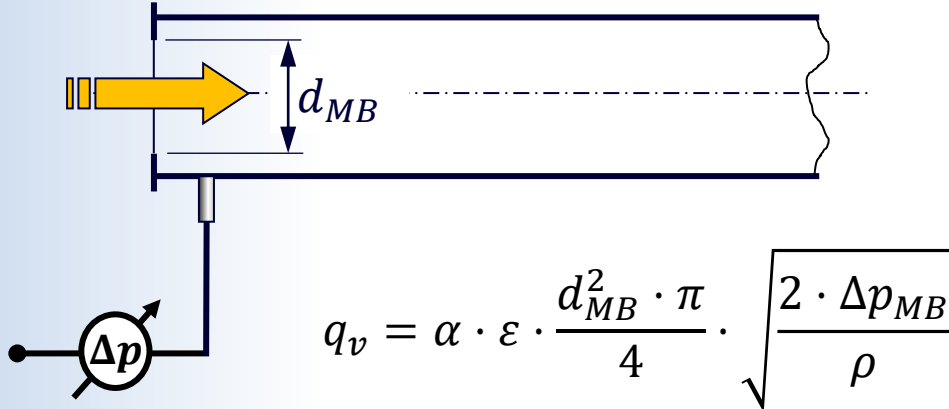
- ☑ Einfachere Bauform, kürzer, billiger
- ☑ In Normen festgelegt ► sehr genau
- ☒ Höherer Druckverlust

Druckentnahme:

- Ringspalt (oben)
- Ringleitung (Mehrere Druckbohrungen verbunden)

p_0

$\underline{v} = 0$



$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{MB}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{MB}}{\rho}}$$

$$\alpha = 0.6$$

Ansaugmessblende

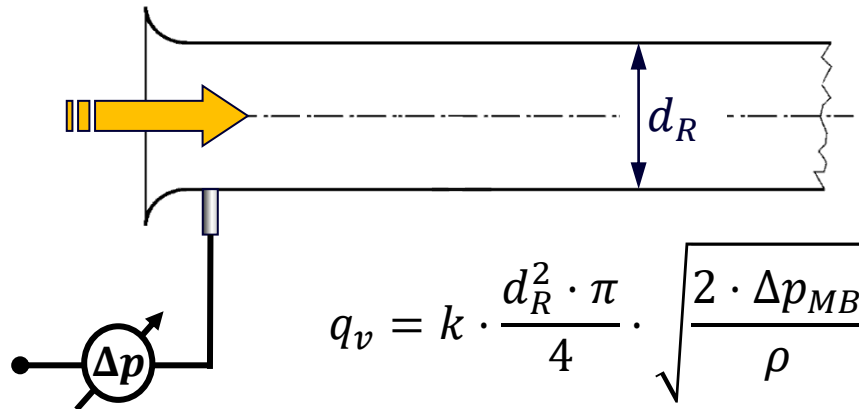
- Saugt aus dem Freien

Ausblasmessblende

- bläst in das Freie

Saugrohr mit Abrundung

- Saugt aus dem Freien
- Praktisch keine Verluste
- Teurer herzustellen



$$q_v = k \cdot \frac{d_R^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{MB}}{\rho}}$$

$$k \approx 1$$

(angegeben oder mit Kalibrierung bestimmt)



Aspekt	Wirkdruckverfahren	Geschwindigkeits-Messverfahren
Eingriff ins System	Verluste ► Betriebszustand ändert sich - muss in das System eingeplant werden	Vernachlässigbar klein (Wandbohrungen für die Messsonde)
Messung instationären Vorgänge	möglich	nicht möglich
Vorschriften	Normiert (Geometrie, Einbau)	Mäßig (Richtlinien)
Kosten	Hoch (Planung, Einbau, Betrieb)	Gering
Messgenauigkeit	Hoch (Messunsicherheit in Norm garantiert) – rechtlich akzeptiert	Mäßig (Messunsicherheit nicht garantiert)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Laborklausur

Vor der Messung

Messung

Messprotokoll

Messungsvortrag

Dynamischer Druck gemessen mit Prandtl-Rohr:

$$p_d = 486,2 \text{ Pa}$$

Umweltparametern:

$$p_0 = 1010 \text{ hPa} \quad ; \quad T = 22^\circ \text{C} \quad (293 \text{ K});$$

Spez. Gaskonstante des Luftes

$$R = 287 \text{ J/kg/K}$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_{lev}} \cdot \Delta p_d}$$

$$\rho_{lev} = \frac{p_0}{R \cdot T}$$

$$v = 28,45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{lev} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v = f(T, p_0, \Delta p_d, \text{Konstante})$$

Messvariablen mit Messfehler belastet (X_i):

Ablesefehler des atm. Druckes $dp_0 = 100 \text{ Pa}$

Messfehler der Temperaturmessung, $dT = 1 \text{ K}$

Messfehler der Druckmessung (EMB-001) $d(Dp_i) = 2 \text{ Pa}$

Aspekt	Wirkdruckverfahren	Geschwindigkeits-Messverfahren
Eingriff ins System	Verluste ► Betriebszustand ändert sich - muss in das System eingeplant werden	Vernachlässigbar klein (Wandbohrungen für die Messsonde)
Messung instationären Vorgänge	möglich	nicht möglich
Vorschriften	Normiert (Geometrie, Einbau,)	Mäßig
Kosten	Hoch (Planung, Einbau, Betrieb)	Gering
Messgenauigkeit	Hoch (Messunsicherheit in Norm garantiert) – rechtlich akzeptiert	Mäßig (Messunsicherheit nicht garantiert)

- Az abszolút hiba (mérési bizonytalanság): az a tartomány, amin belül a mért adat 95% valószínűséggel található (2σ).
- Megadása, ha a mért adat X :
- A mért eredmények helyes megadása ebben az esetben:
- A relatív hiba:
- Származtatott mennyiség (R) esetén a hiba továbbterjed, ekkor a következő összefüggést használjuk:

$$R = R(X)$$

$$\delta R = \frac{\partial R(X)}{\partial X} \cdot \delta X$$

$b = d_{mp}/D$	Durchmesser Verhältnis,
$d_{mp}[m]$	Durchmesser der Bohrung
$D [m]$	Durchmesser der Rohrleitung
$Re_D = vD/\nu$	Reynolds-Zahl
$v [m/s]$	Durchschnittsgeschwindigkeit in der Rohrleitung
$\nu [m^2/s]$	kinematische Viskosität
$\Delta p_{mp} [Pa]$	Druckunterschied gemessen an der Messblende
ε	Kompressibilitätsfaktor ($\varepsilon = \varepsilon(b, t, k) \sim 1$ wenn $\Delta p_{mp} > 5000 Pa$, und p_1 nahe atmosphärisch)
α	Durchflusszahl, $\alpha = \alpha(b, Re_D)$ (in Norm definiert!)
k	Isentropische Exponente



Falschinterpretation von Messwerte (aus der Serie „Tschernobyl“)

Dyatlov : Was sagt das Dosimeter??

Akimov : 3.6 Röntgen. Aber das ist der Höchstwert des Geräts....

Dyatlov : 3.6 - Nicht gut, nicht dramatisch.

