

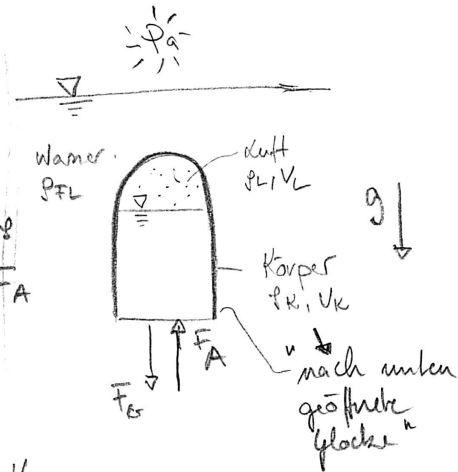
Fragenkatalog

1. Hydrostatik

Aufgabe: 1

Erklären Sie bitte kurz das Funktionsprinzip des kartesischen Tauchers.
Ergänzen Sie Ihre Ausführungen bitte mit Hilfe einer Skizze. Welche Kräfte wirken auf einen voll getauchten Körper?

- ▷ Der Körper, sowie die eingeschlossene Luft erzeugen eine Gewichtskraft: $F_G = (\rho_L V_L + \rho_K + V_K) \cdot g$
- ▷ Der kartesische Taucher erfährt eine Auftriebskraft:
 $F_A = \rho_{Fe} (V_L + V_K) g$, wobei V_L abhängig von der Tiefe und sich ändernden Außendruck p_a ist
- ▷ Beim schwebenden Körper gilt Kräftegleichgewicht: $F_G = F_A$ (ansonsten aufsteigend oder absinkend)

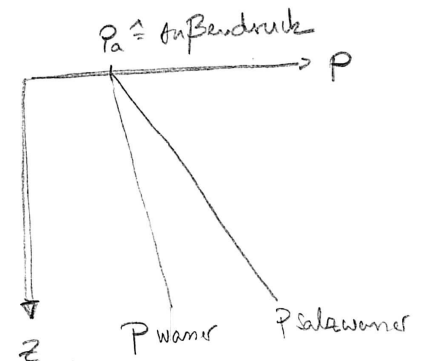


Zusatzinfos: isotherme Zustandsänderung: $p \cdot V = \text{const.}$
 ↳ Manerhaltung der eingeschl. Luft: $p_L \cdot V_L = p_{L,0} \cdot V_{L,0}$

Aufgabe: 2

Skizzieren Sie bitte vergleichend die Druckverläufe $p(z)$ von Trinkwasser und Salzwasser (beide in Ruhe) in einem Diagramm und begründen Sie die gezeichneten Verläufe.

- ▷ Der Druckverlauf wird durch die hydrostatische Druckgleichung beschrieben: $p(z) = p_a + \rho_{fl} g \cdot z$
- ▷ Wegen $\rho_{\text{Salzwasser}} > \rho_{\text{Wasser}}$ nimmt der Druck im Salzwasser im Abhängigkeits von der Höhe schneller zu



Aufgabe: 3

Wie ist der Druck allgemein definiert? Nennen Sie bitte zwei Einheiten und ihre Umrechnung. Begründen und skizzieren Sie bitte den Druckverlauf in einer ruhenden Flüssigkeit mit konstanter Dichte über die Tiefe.

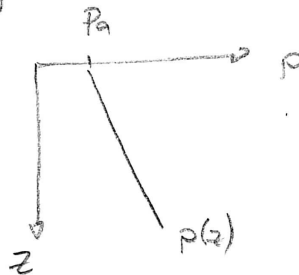
$$p = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad || \quad [p] = \frac{N}{m^2} = Pa \text{ (Pascal)}$$

$$[p] = 1 \text{ bar} = 10^5 Pa$$

Hydrostatische Druckgleichung:

$$p(z) = p_a + \rho \cdot g \cdot z$$

↑
Außendruck



Aufgabe: 4

Zwei gleichgroße Eimer sind randvoll mit Wasser gefüllt. In einem Eimer schwimmt ein Holzklotz. Welcher Eimer ist schwerer?

Bitte begründen Sie ihre Aussage.

Wie berechnet sich die Auftriebskraft eines voll getauchten Körpers?

Da beide Körper die gleiche Wasserhöhe haben, sind beide Eimer auch gleich schwer. Der Holzklotz verdrängt soviel Wasser, wie er selbst wiegt und fängt somit ein zusätz. Gewicht zu.

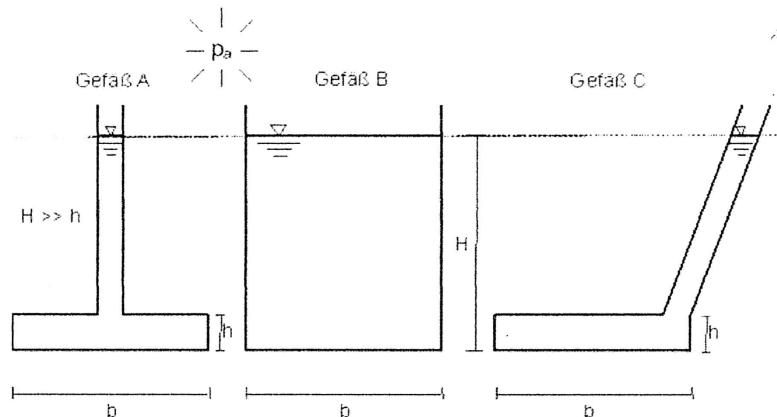
Dichte der Flüssigkeit

$$\text{Auftriebskraft: } F_A = \rho_{FL} \cdot V_K \cdot g$$

↑
Volumen des getauchten Körpers

Aufgabe: 5

In welchem Gefäß herrscht die größte Bodendruckkraft bei gleicher quadratischer Grundfläche (alle drei Gefäße sind mit Wasser gefüllt)? Begründen Sie Ihre Aussage.



→ Aufgrund der Konstanz des Fluid-Blockvolumens ist die Bodendruckkraft bei gleicher Bodenfläche gleich groß. (Hydrostatisches Paradoxon)

Aufgabe: 6

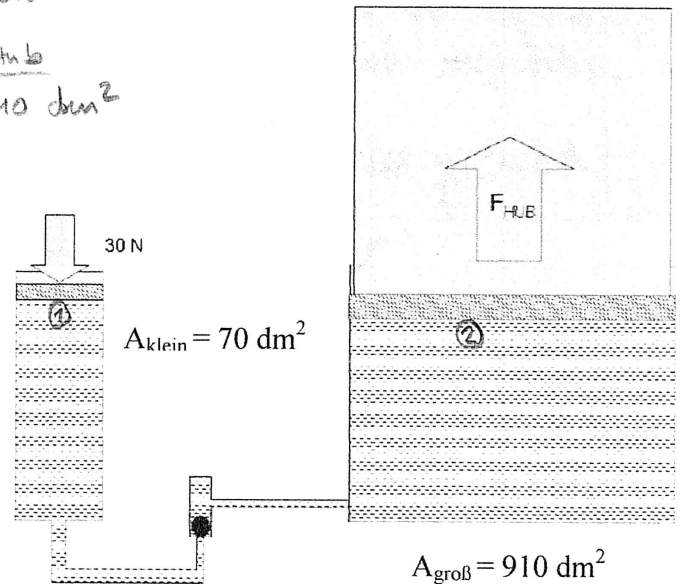
Am skizzierten System wird eine Kraft von 30 N auf den kleineren Kolben aufgebracht.

Wie groß ist die Hubkraft F_{HUB} am großen Kolben?

▷ Druck an Stelle 1 und 2 gleich:

$$P_1 = P_2 \Leftrightarrow \frac{30 \text{ N}}{70 \text{ dm}^2} = \frac{F_{HUB}}{910 \text{ dm}^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{F_{HUB} = \frac{910}{70} \cdot 30 \text{ N}} \\ = \boxed{390 \text{ N}}$$



Aufgabe: 7

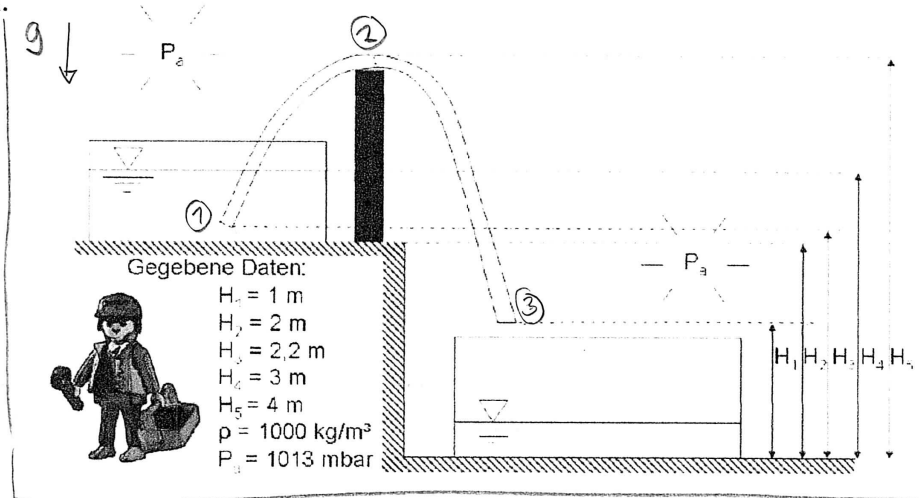
Bob der Baumeister hat folgende Aufgabe zu lösen.

Er soll das obere, mit Wasser gefüllte, Becken entleeren und das Wasser ins untere Becken umfüllen. Als Hilfsmittel hat er lediglich einen Schlauch. Er möchte dazu das Wasser ansaugen. Welchen Druck muss er bei gegebenen Daten am unteren Schlauchende erzeugen, um das Wasser von oben, über die Mauer hinweg, in das untere Becken zu fördern?

Hinweis: Der Einfluss der eingeschlossenen Luft sowie die Reibung sind zu vernachlässigen.

▷ Für den Ansaugvorgang gilt, dass sich zwischen Stelle 2 und 3 Luft befindet und der Druck an beiden Stellen gleich ist $\Rightarrow P_{Saug} = P_2$

▷ Bis das Wasser den Punkt 2 überschreitet, kann näherungsweise von einer statischen Betrachtung ausgegangen werden:



$$P_1 = P_a + \rho \cdot g \cdot (H_4 - H_3)$$

$$P_2 = P_1 - \rho \cdot g \cdot (H_5 - H_3) = P_a + \rho \cdot g \cdot (H_4 - H_5)$$

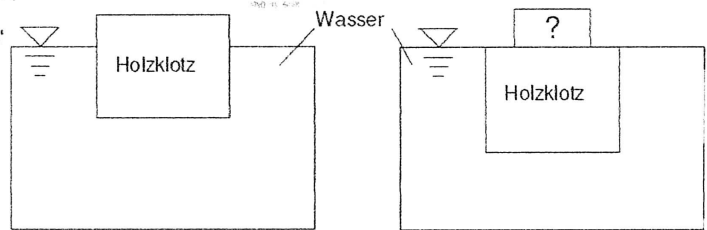
$$\Rightarrow 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} + 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (3 - 4) \text{ m} = 0,91 \text{ bar} = P_{Saug}$$

Aufgabe: 8

Ein Holzklötz mit einem Volumen von 1 dm^3 wiegt 800 g und schwimmt in Wasser (Skizze links). Mit welchem Gewicht muss der Holzklötz beschwert werden, damit er im Schwebезustand vollständig unter die Wasseroberfläche taucht?

Das Gesamtgewicht muss dem Gewicht des verdrängten Wassers entsprechen:

$$\rho_{\text{FL}} \cdot 1 \text{ dm}^3 = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,001 \text{ m}^3 = 1 \text{ kg}$$



↳ Der Holzklötz muss mit einem zusätzlichen Gewicht von 200 g beschwert werden.

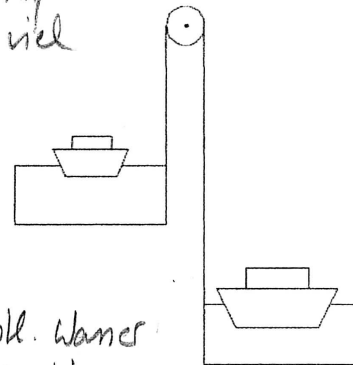
Aufgabe: 9

Die Skizze zeigt das Funktionsprinzip eines Schiffshebewerks. Der obere und der untere Trog fassen das gleiche Volumen bei gleichem Wasserstand. Es sollen zwei Schiffe mit unterschiedlichem Gewicht gehoben bzw. gesenkt werden. Muss mehr Kraft aufgewendet werden, um größere Schiffe zu heben? Begründen Sie bitte Ihre Antwort.

Nein, Durch die unterschiedl. Gewichtskraft der Schiffe wird unterschiedlich viel Wasser verdrängt.

Da die Troge aber den gleichen Wasserstand haben, haben sie auch die gleiche Masse (verdrängtes Wasservolumen + restl. Wasser ist konstant)

entspricht Gewichtskraft des Schiffes



Aufgabe: 10

Mit welcher Formel können Sie bei einer Bergwanderung den Luftdruck bestimmen? Nehmen Sie an, dass es sich um ein barometrisches Fluid handelt und dass die Temperatur konstant bleibt. Berechnen Sie den in einer Höhe von 1500 m über NN herrschenden Luftdruck.

- Spezifische Gaskonstante $R_{\text{Luft}} = 287,04 \text{ Nmkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Konstante Temperatur $T = 15^\circ\text{C}$
- Umgebungsdruck auf NN $p_0 = 1013 \text{ mbar}$

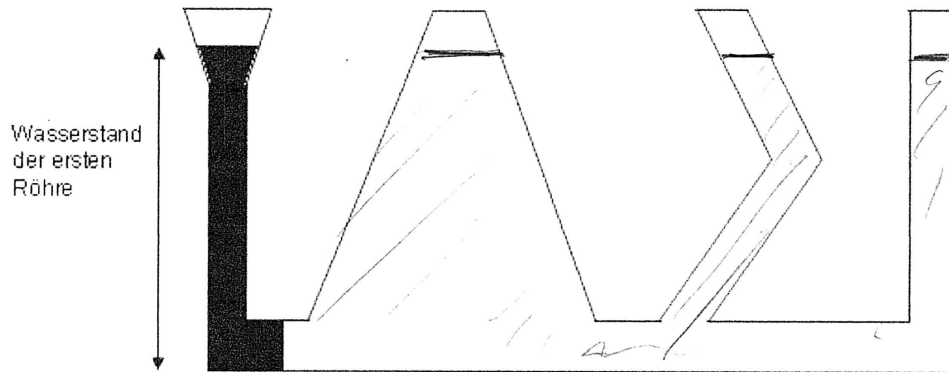
↳ mit Hilfe der barometrischen Höhenformel: $p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{g \cdot h}{R \cdot T}\right)$

$$p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \exp\left(-\frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1500 \text{ m}}{287,04 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (273,15 + 15 \text{ K})}\right)$$

$$= 0,8479 \cdot 10^5 \text{ Pa} = \underline{847,9 \text{ mbar}}$$

Aufgabe: 11

Zeichnen Sie den Wasserspiegel in den verbleibenden drei Teilgefäßen ein.
Bitte begründen Sie kurz Ihre Antwort!

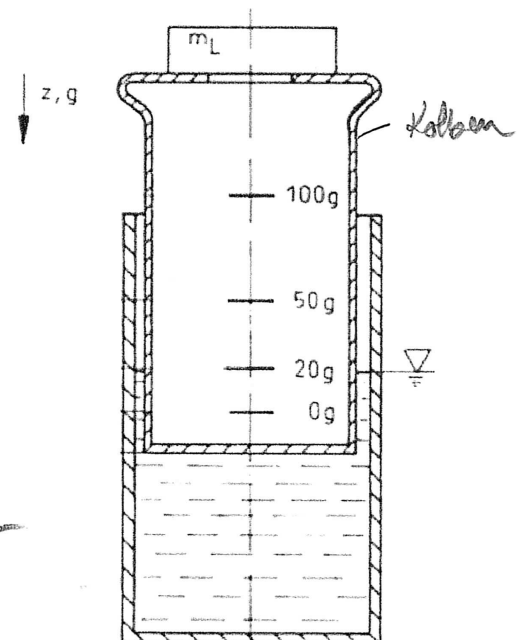


- ▷ Voraussetzung: die Röhren sind nach oben offen
- ▷ Somit ergibt sich ein gleicher Wasserspiegel bei allen Röhren. (Prinzip des kommunizierenden Röhren)

Aufgabe: 12

Bitte erläutern Sie das Funktionsprinzip der Briefwaage (Stichpunkte)!

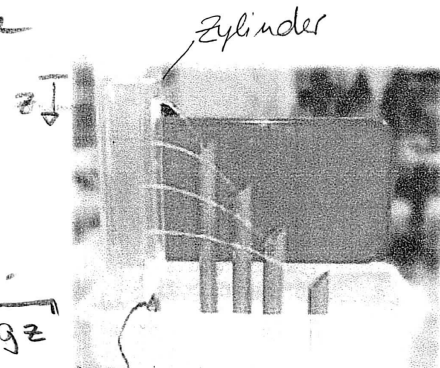
- ▷ Masse des Briefs (m_L) vergrößert die Gewichtskraft (Kolben + Brief)
- ▷ Somit taucht der Kolben tiefer ins Wasser ein (es wird mehr Wasservolumen verdrängt)
- ▷ Der Kolben wird durch die Auftriebskraft des Wassers und der Gewichtskraft im Gleichgewicht gehalten.
- ▷ Gewicht kann (durch entsprechende Eichung) an der Skala und dem Wasserstand abgelesen werden



Aufgabe: 13

Beschreiben Sie bitte den im Bild dargestellten Versuch. Was soll mittels des Versuchs verdeutlicht werden? Bitte geben Sie die dazugehörige Formel an.

- ▷ In einem Zylinder befinden sich 4 seitliche Öffnungen.
- ▷ Der Wasserdruck ist abhängig von der Füllhöhe: $p(z) = p_a + \rho_F \cdot g \cdot z$
- ▷ an der untersten Öffnung ist der Druck am größten und somit ist die Austrittsgeschw. des Wassers am höchsten $\rightarrow v = \sqrt{2gz}$
- ▷ der Druck nimmt mit zunehmender Höhe ab



Aufgabe: 14

In einem Experiment versinkt ein Hühnerei in einem mit Wasser befüllten Glas. Was passiert, wenn Salz in dem Wasser aufgelöst wird (Massenanteil Salz 30%) und das Ei erneut hineingegeben wird? Bitte begründen Sie ihre Antwort.

- ▷ Wenn das Salz im Wasser gelöst wird, kann es dazu kommen, dass das Ei im Wasser schwimmt oder an der Wasseroberfläche schwimmt.
- ▷ Grund: durch die höhere Dichte des Salzwassers gegenüber "normalen" Wasser erhöht sich die Auftriebskraft im Fluid.

(Formel: $F_A = \rho_{Fe} \cdot V_{verdrängt} \cdot g$)

2. Kinematik der Fluide

Aufgabe: 1

Nennen Sie bitte ein Bauteil, in dem eine Strömung konvektiv beschleunigt wird und geben Sie außerdem die dazugehörige Formel an.

- ▷ Bauteil: Düse (Konfuser)
- ▷ für die konvektive Beschleunigung gilt:

$$(\underline{v} \cdot \nabla) \underline{v} = v_x \frac{d\underline{v}}{dx} + v_y \frac{d\underline{v}}{dy} + v_z \frac{d\underline{v}}{dz}$$

Aufgabe: 2

Beschreiben Sie bitte die Begriffe Bahnlinie, Stromlinie und Streichlinie.

Bahnlinie: Eine \sim zeichnet den Pfad eines einzelnen Partikels in einem Strömungsfeld nach. (Vergleichsbild eines Teilchens im Fluss)

Stromlinie: \sim sind die Kurven im Geschwindigkeitsfeld einer Strömung, deren Tangentenrichtung mit den Richtungen der Geschwindigkeitsvektoren übereinstimmen. (Kurzzeitfoto mehrerer Teilchen)

Streichlinie: Eine \sim zeichnet den Pfad mehrerer Partikel nach, die nacheinander an derselben Position eines Strömungsfeldes losgelassen werden.

Aufgabe: 3 (Absolutsystem: Stromlinie \neq Bahnlinie)
Relativsystem: Stromlinie = Bahnlinie \rightarrow da relativ zum Teilchen \int)

Bitte nennen Sie die zwei klassischen Darstellungen im Koordinatensystem (x, y, z), derer man sich zur Beschreibung der Bewegung eines Fluids bedient und geben Sie bitte den wesentlichen Unterschied an.

1. Lagrange - Darstellung: teilchenfeste Betrachtung
2. Euler - Darstellung: raumfeste Betrachtung

Aufgabe: 4

Aus welchen Beschleunigungen setzt sich die substantielle Beschleunigung zusammen? Geben Sie bitte jeweils die Formel an und erläutern Sie deren Bedeutung.

$$\underbrace{\frac{d\mathbf{v}}{dt}}_{\text{substant. Be.}} = \underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{lokale Be.}} + \underbrace{(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{konvektive Besch.}}$$

▫ lokal: Beschleunigung durch zeitl. Änderung

▫ konvektiv: Beschleunigung durch räumlich veränderliche Kontur (z.B. Düse) oder Dichtewert

Aufgabe: 5

Was stellt die Kontinuitätsgleichung dar und durch welchen Ansatz lässt sie sich herleiten?

▫ Ansatz: Massenerhaltung (am Volumenelement dV)

Formel eigentlich nicht gefragt

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \rightarrow \text{instationäre Strömung} \\ \rightarrow \text{kompressible Fluide} \end{array}$$

▫ Die Kontinuitätsgleichung stellt den Satz von der Erhaltung der Masse dar.

3. Stromfadentheorie reibungsfreier Fluide

Aufgabe: 1

Wie ist ein Stromfaden definiert (verbale Beschreibung)?

Können sich Druck und Geschwindigkeit längs eines Stromfadens ändern?

- ▷ Der Stromfaden stellt eine verkleinerte Stromröhre dar, sodass in jedem Querschnitt die strömungsphysikal. Größen v, p, T, ρ, ν konstant sind.
- ▷ Längs eines Stromfadens können sich Druck und Geschw. ändern.

Aufgabe: 2

Auf welche physikalischen Grundgesetze lassen sich die Bernoulli- bzw. die Kontinuitätsgleichung zurückführen?

- ▷ Bernoulli-Gleichung: Energieerhaltung
- ▷ Kontinuitätsgleichung: Massenerhaltung

Aufgabe: 3

In einem Windkanalexperiment treten in der Luftströmung um den Körper sehr niedrige Drücke auf. Ist der Versuchsstand kavitationsgefährdet? Bitte begründen Sie Ihre Antwort.

- ▷ Damit Kavitation auftreten kann, muss das Strömungsmedium vom flüssigen in den gasförmigen Zustand (und umgekehrt) übergehen.
- ▷ Da dies bei Luftströmung nicht der Fall ist, ist der Versuchsstand auch nicht kavitationsgefährdet.

Aufgabe: 4

Legen Sie bitte die Austrittsquerschnittsfläche der Düse einer Belüftungsanlage aus. Die Austrittsgeschwindigkeit soll 20 m/s, der Massenstrom 1,2 kg/s und die Dichte der Luft 1,25 kg/m³ betragen.

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \Rightarrow A = \frac{\dot{m}}{v \cdot \rho} = \frac{1,2 \text{ kg/s}}{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \boxed{0,048 \text{ m}^2}$$

Aufgabe: 5

Wie ist Kavitation definiert? Erklären Sie bitte den Vorgang der Kavitation am Beispiel des Fallrohres. Welche schädlichen Auswirkungen hat Kavitation? In welchen Maschinen oder Anlagen kann Kavitation auftreten (2 Beispiele)?

Definition: Kavitation ist die Bildung und Auflösung von dampfgefüllten Hohlräumen (Dampfblasen) in Flüssigkeiten

→ ist nhe nächste Seite!

Aufgabe: 6

Nennen Sie die allgemeine Kontinuitätsgleichung für den Stromfaden (Formel).

$$\rho_1 \cdot A_1 v_1 = \rho_2 \cdot A_2 v_2 + \underbrace{\int_{s_1}^{s_2} \frac{d(\rho \cdot A)}{dt} ds}_{\text{instationärer Anteil}}$$

Aufgabe: 7

Wie ist die Stromröhre definiert? Was gilt für den Massenstrom?

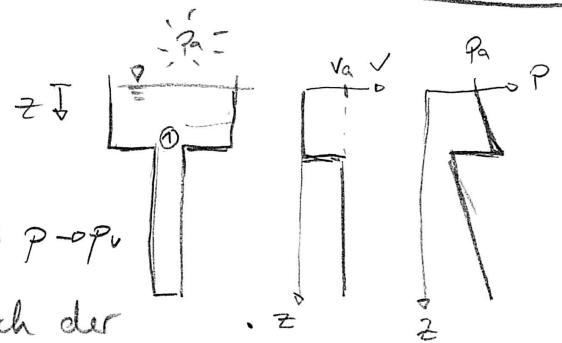
- ▷ Die \sim stellt das Fluid innerhalb des Mantels von Streichlinien dar, die durch die Randpunkte einer beliebig großen ortsfesten Fläche verlaufen.
- ▷ Der Massenstrom durch die Stromröhre ist konstant, da kein Fluid den Mantel durchdringen kann.

nicht Stromlinien!

Ergänzung zu Aufgabe 5 (Kavitation)

▷ Vorgang am Bsp. Fallrohr:

1. an der Stelle ① führt die "plötzliche" Geschwindigkeitszunahme zu einer starken Druckminderung \rightarrow Erreichen des Dampfdrucks $p = p_v$
 - ↳ Dampfbildung in Blasenform
2. Mit zunehmender Wassertiefe erhöht sich der Druck wieder: $p > p_v$
 - ↳ schlagartige Kondensation des Dampfes
 - ↳ es entstehen Microjets, die vorzugsweise in Richtung der Strömungsberandung zeigen (Druckspitzen von 1000 bar und mehr)



▷ Answirbelungen der Kavitation

- ▷ Materialzerstörung durch Erosion (mechanisch) und Korrosion (chemisch aufgrund des Durchschlagens der Gasschicht und tiefes Eindringen von Sauerstoff aus gelöster Luft)

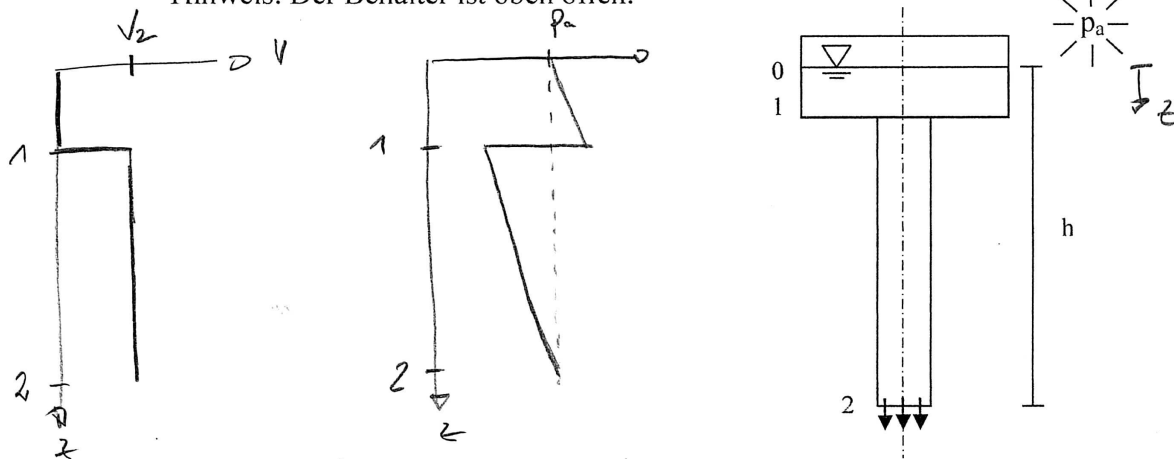
▷ Bsp für Maschinen & Anlagen

- ▷ Hydraulische Strömungsmaschinen (Kreiselmaschinen, Wasserturbinen, hydrodyn. Getriebe, Schiffspropeller)
- ▷ Kolbenmaschinen (Einspritzmaschinen)
- ▷ Armaturen ("singender" Wasserhahn)

Aufgabe: 8

Skizzieren Sie bitte den Druck- und Geschwindigkeitsverlauf eines Fallrohres entlang der Mittellinie. Welche Stelle ist kavitationsgefährdet? Bitte begründen Sie Ihre Aussage. Wie groß ist die Geschwindigkeit an der Stelle 2?

Annahme: Konstante Füllhöhe des Behälters
Hinweis: Der Behälter ist oben offen.

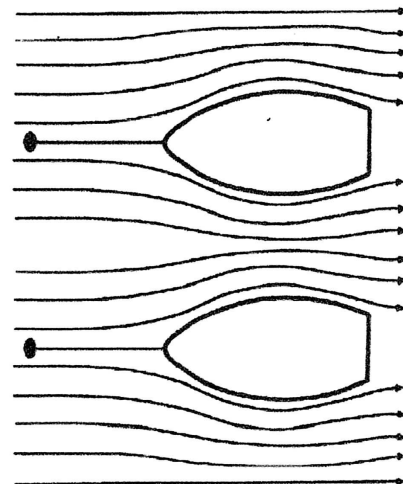


- ▷ Die Stelle 1 ist kavitationsgefährdet, da dort der Druck am niedrigsten ist.
- ▷ Die Geschw. an Stelle 2 ergibt sich nach Torricelli zu $v_2 = \sqrt{2gh}$

Aufgabe: 9

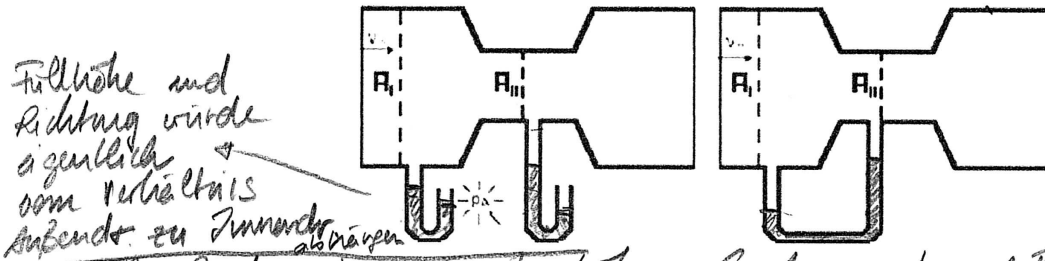
Zwei Boote ankern nebeneinander in starker Strömung. Werden sich die Boote zueinander hin bewegen oder werden sie durch die starke Strömung auseinander gedrückt? Bitte begründen Sie Ihre Antwort.

- ▷ Durch den verkleinerten Querschnitt, nimmt zwischen den Booten die Strömungsgeschw. zu und der Druck ab
- ▷ Der Druck zwischen den Booten ist geringer als der Druck zu den Außenseiten
- ↳ somit bewegen sich die Boote zueinander hin



Aufgabe: 10

Die 3 U-Rohr-Manometer sind mit Wasser gefüllt und befinden sich zur Druckmessung an zwei verschiedenen mit Luft durchströmten Venturiröhren. Zeichnen Sie bitte den Wasserstand in den U-Rohr-Manometern ein. Begründen Sie bitte Ihre Antwort!



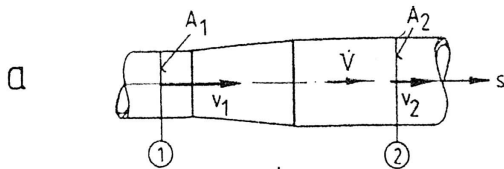
Füllhöhe und Richtung würde eigentlich vom Verhältnis abhängt zu Innendruck an diesen Stellen

Größt in bei A_{II} aber größer

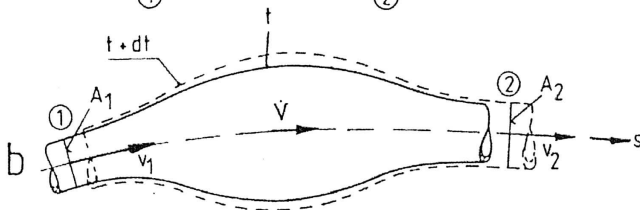
- ▷ Der Druck nimmt mit höherer Geschw. ab. (Bernoulli)
- ▷ Bei Verkleinerung des Querschnitts nimmt die Geschw. zu (Kont.)
- ↳ somit ist der Druck bei A_{II} kleiner als bei A_I

Aufgabe: 11

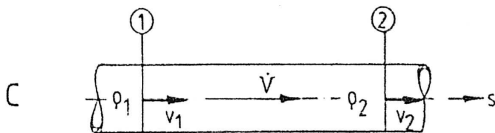
Bitte geben Sie die allgemeine Kontinuitätsgleichung für den Stromfaden an und stellen Sie zusätzlich die jeweils angepassten Kontinuitätsgleichungen für die drei skizzierten Sonderfälle auf. Welche Annahmen bezüglich Dichte ρ , Geschwindigkeit v und Querschnittsfläche A werden jeweils getroffen?



Inkompressible Strömung $\rho = \text{const.}$
 $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$
 $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$



Pulsierende, inkompressible Strömung $\rho = \text{const.}$
 $\frac{\partial A}{\partial t} \neq 0$
 $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 + \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial A}{\partial t} ds$



Kompressible, instationäre $\rho \neq \text{const.}$
 $A = \text{const.}$
 $\rho_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot v_2 + \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} ds$

▷ allg. Kontinuit. für Stromfaden

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 + \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial (\rho \cdot A)}{\partial t} \cdot ds$$

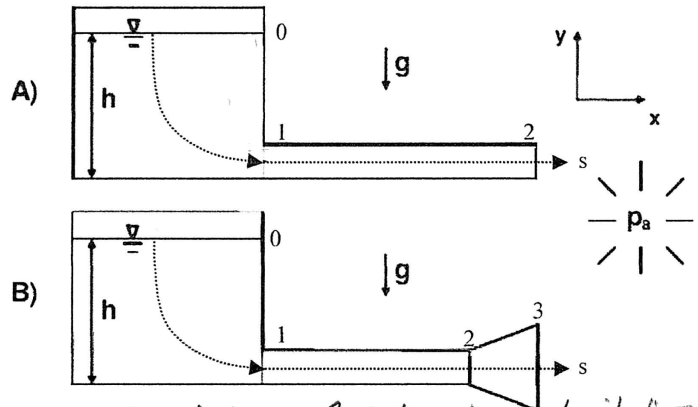
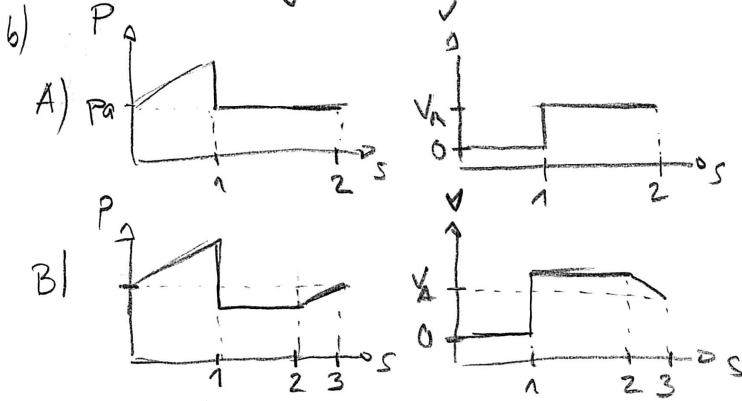
Aufgabe: 12

Die Skizze zeigt zwei Systeme (reibungsfreie, stationäre Durchströmung mit konstantem Wasserspiegel) mit horizontalem zylindrischen Ausfluss (Fall A) und horizontalem Ausfluss mit Diffusor (Fall B)

- Wie hoch ist die Ausflussgeschwindigkeit in den Fällen A und B?
- Skizzieren Sie bitte in beiden Fällen qualitativ die Druck- und Geschwindigkeitsverläufe in Richtung des Stromfadens (s).
- In welchem System tritt eher Kavitation auf? Begründen Sie Ihre Antwort

a) Da h gleich für A und B gilt:

$$v_A = \sqrt{2gh}$$



c) Im System B tritt eher Kavitation auf, da P_a unterschritten wird

Aufgabe: 13

In welchen Bereichen (1, 2, 3, 4 oder 5) der Venturidüse herrscht

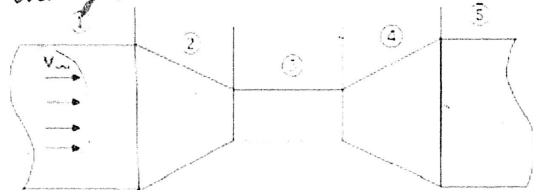
- der höchste Druck?
- die höchste Geschwindigkeit?

Bitte begründen Sie Ihre Aussage!

Annahme: stationäre Strömung, inkompressibles Fluid, reibungsfrei, Durchmesser Stelle 1 = Durchmesser Stelle 5

Würde sich etwas verändern, wenn die Strömung nicht reibungsfrei wäre?

- a) ① + ⑤ } Bernoulli: $v \uparrow : p \downarrow$ } \Rightarrow somit ist bei größeren Querschnitt auch der Druck größer
- b) ③ } Konti: $v \uparrow : A \downarrow$ } \Rightarrow die Geschw. ist beim kleineren Querschnitt größer



↳ wenn die Strömung nicht reibungsfrei wäre, kommt es zu einem Druckverlust und der höchste Druck tritt nur an Stelle ① auf.

Aufgabe: 14

Leiten Sie bitte aus der Bernoulli-Gleichung für den Stromfaden (reibungsfrei) die Ausflussgeschwindigkeit nach Torricelli her. Geben Sie bitte alle getroffenen Annahmen an!

Bernoulli - Gl. für den Stromfaden:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_1} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_2} + g \cdot z_2 + \int_{s_1}^{s_2} \frac{dv}{dt} ds$$

$v_1 = 0$: Wasseroberfläche konstant

$\rho_1 = \rho_2$: inkompressibles Fluid

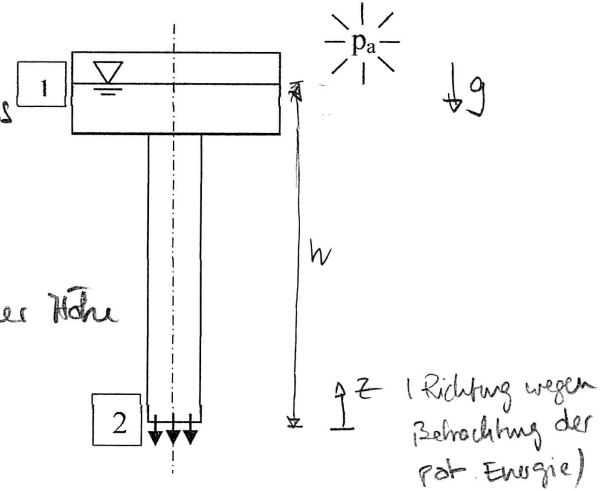
$P_1 = P_2 = P_a$: Außendruck unabhängig von der Höhe

$\frac{dv}{dt} = 0$: stationäre Strömung

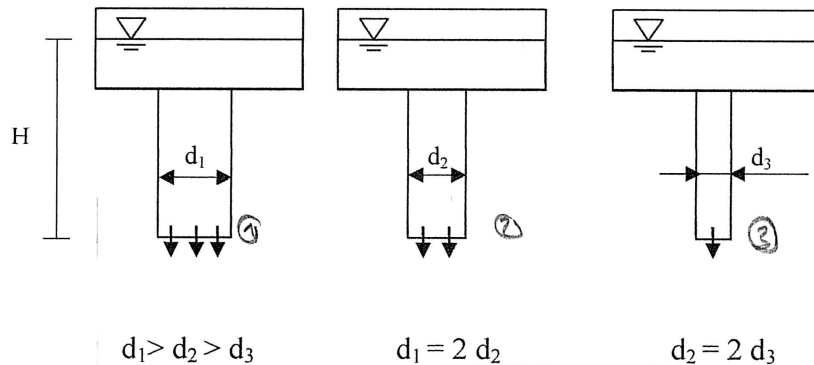
▷ einsetzen & umformen:

$$g \cdot \underbrace{z_1}_{=h} = \frac{v_2^2}{2} + g \cdot \underbrace{z_2}_{=0} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2gh}$$

Aufgabe: 15



Welches der drei abgebildeten Fallrohre hat bei reibungsfreier Betrachtung die höchste Ausflussgeschwindigkeit? Wie unterscheiden sich die Volumenströme? Begründen Sie ihre Überlegungen (Formeln)!



$$Q = v_A \cdot A$$

Ausfließgeschw.

▷ In allen 3 Fällen die gleiche Austrittsgeschw. → Torricelli: $v_A = \sqrt{2gH}$

▷ $Q = v_A \cdot A$

$Q_1 > Q_2 > Q_3$

da Durchmesser mit Quadrat einfließt ergibt sich jeweils eine Reduzierung um ein Viertel:

$$Q_2 = \frac{1}{4} Q_1$$

$$Q_3 = \frac{1}{4} Q_2 = \frac{1}{16} Q_1$$

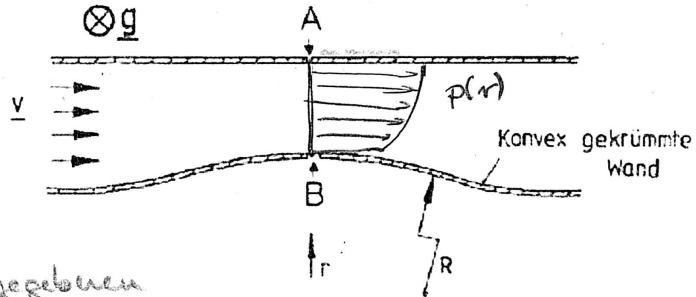
Aufgabe: 16

Bitte zeichnen Sie den Druckverlauf zwischen den Stellen A und B für das Rohr mit konvex gekrümmter Wand ein. Geben Sie die Gleichung an, welche die Druckverteilung zwischen den Stellen A und B beschreibt! Wie heißt diese Gleichung?

radiale Druckgleichung:

$$\frac{v^2}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dr} + g \frac{dz}{dr}$$

= 0 für den gegebenen Fall, da sich z nach r nicht ändert (\Rightarrow Richtung g)



Aufgabe: 17

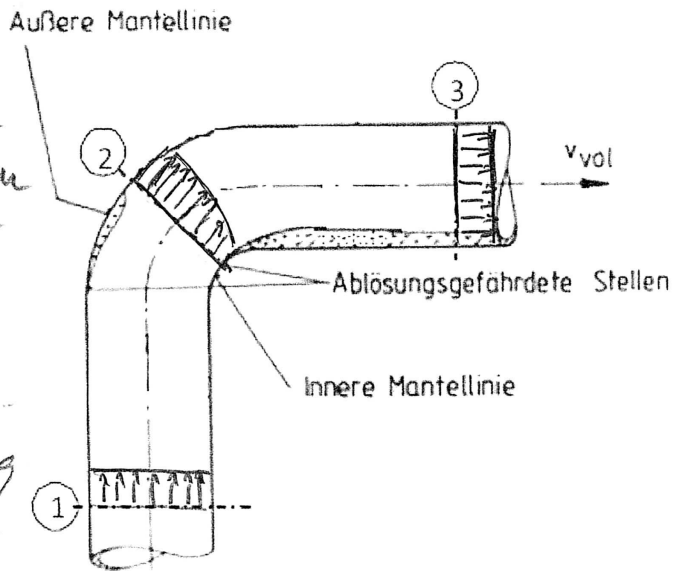
Zeichnen Sie bitte den Druckverlauf über den Rohrkrümmter an die Stellen 1, 2 und 3 ein. Bitte erklären Sie ausführlich, wie die dargestellten Ablösungen entstehen.

Die Ablösung entsteht, weil wir in Strömungsrichtung einen pos. Druckgradienten an den ablösungsgefährdeten Stellen haben

Somit ergibt sich eine Geschwindigkeitsreduzierung (nach Bernoulli?)

Die kinetische Energie der Strömung reicht dort nicht mehr aus, um den Druckanstieg zu überwinden

\rightarrow die Teilchen in Wandnähe haben dort deshalb die umgekehrte Strömungsrichtung wie die Hauptströmung und drängen die Hauptströmung von der Wand ab



Aufgabe: 18

Wo sammeln sich nach dem Umrühren eines mit einigen Teeblättern versehenen Tees die Teeblätter (am Rand oder in der Mitte des Bodens)?

Mit welcher Formel lässt sich dies begründen?

Zeichnen und erklären Sie bitte das Phänomen mit Hilfe von drei Skizzen.

- Die Teeblätter sammeln sich in der Mitte des Bodens.
- Das Phänomen lässt sich mit der rad. Druckgleichung beschreiben:

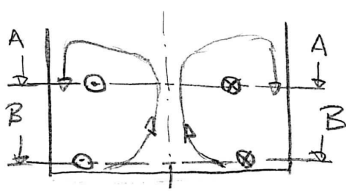
$$p_r = \rho \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + g \frac{dz}{dr}$$

p_r da, sehr klein

konst. + horiz. Ebenen

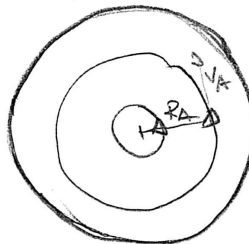
Seitenansicht

Stromlinien der Sekundärströmung



Horizontale Schnittebene A-A

Kreisförmige Stromlinie



Horizontale SE B-B

Spiral-förmige Stromlinien



$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr}$ für alle Schnittbenen gleich

Halbheit am Boden: $v_{\text{Boden}} = 0$

$v_B < v_A$

$\Rightarrow R_B < R_A$

4. Impuls- und Drallsatz

Aufgabe: 1

Warum kann man mit einem zusammengequetschten Wasserschlauch weiter spritzen als mit einem offenen? Begründen Sie bitte mit geeigneten Formeln.

kontinuitätsgleichung: $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \Rightarrow v_2 = \frac{A_1}{A_2} \cdot v_1$

hat aber eigentlich nichts mit Impuls- und Drallsatz zu tun

mit $A_2 < A_1$ folgt $v_2 > v_1$

\Rightarrow durch höhere Austrittsgeschwindigkeit spritzt das Wasser auch weiter

Aufgabe: 2

Wie ist der Impuls für den Stromfaden definiert? Bitte benennen Sie die Variablen.

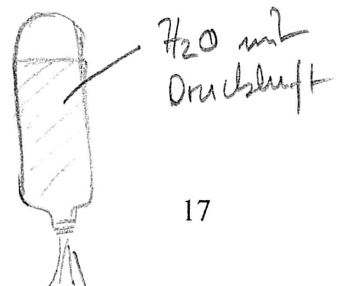
$$\underline{I} = \int_{s_1(t)}^{s_2(t)} \rho(s,t) \cdot A(s,t) \cdot \underline{v}(s,t) ds$$

Stück des Stromfadens
ds
ichte *Querschnitt* *Strömungsgeschwindigkeit*

Aufgabe: 3

Erklären Sie bitte das Funktionsprinzip der Wasserrakete! Unterstützen Sie ihre Erklärung bitte mit einer Skizze!

- Die Flasche ist mit Wasser & Druckluft gefüllt (Energiespeicher)
- Nach öffnen der Flasche strömt das Wasser durch den starken Überdruck nach unten aus
- Durch Ausstoß von Masse (Wasser) wird eine Schubkraft erzeugt, die die Wasserflasche beschleunigt



Alternativ: beim Öffnen d. Verschlusses: Druckausgleich \rightarrow expandiert die Luft \rightarrow Wasser wird beschleunigt \rightarrow Achse = Raketenbeschleunigung \rightarrow Rakete wird beschleunigt

Aufgabe: 4

Wie lautet die allgemeine Gleichung für die Reaktionswandkraft bei verzweigtem Ein- u. Austritt (instationärer Fall)? Bitte benennen Sie die einzelnen Kräfte.

Annahme: mit Außendruck p_a | Ansonsten ist $p_a = 0$

$$\underline{R}_{\text{MW}} = \underbrace{\underline{F}_G}_{\text{①}} + \underbrace{\sum_i \{ \underbrace{\dot{m}_1 \underline{v}_1}_{\text{②}} + \underbrace{(p_1 - p_a) A_1}_{\text{③}} \}}_{\text{i - Eingänge}} \underline{e}_1 + \underbrace{\sum_k \{ \underbrace{\dot{m}_k \underline{v}_k}_{\text{②}} + \underbrace{(p_k - p_a) A_k}_{\text{③}} \}}_{\text{k - Ausgänge}} \underline{e}_k - \underbrace{\int_{S_1}^{S_2} \frac{d(\underline{m} \underline{e})}{dt} ds}_{\text{④}}$$

Aufgabe: 5 ② = Impuls kraft | ④ instationärer Impuls kraftanteil

Bitte erklären Sie in Stichpunkten das Funktionsprinzip des Raketenautos.
Welche Wirkung hat hierbei die Kompressibilität des Gases?

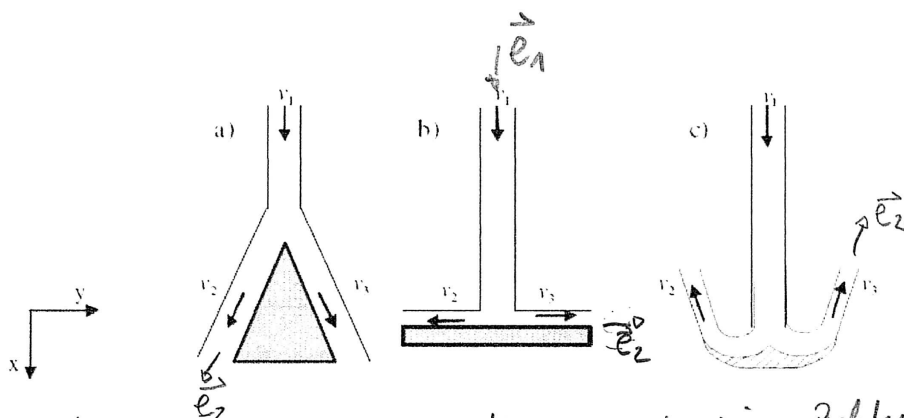
↳ siehe Aufgabe 3
↳ durch die Kompressibilität kann mehr Energie im Volumen gespeichert werden

Aufgabe: 6

Ein Freistrahл trifft auf 3 verschiedene Geometrien und wird, wie in den Abbildungen a) - c) gezeigt, umgelenkt. Kennzeichnen Sie bitte den Fall bei dem:

- 1) die kleinste → a)
- 2) die größte → c)

Reaktionswandkraft in x-Richtung auftritt und begründen Sie bitte kurz ihre Aussage.



↳ Für die Berechnung der Reaktionswandkraft ist die Richtung der Strömung für die Ein- und Auslässe relevant
↳ umso mehr \underline{e}_2 in die entgegengesetzte Richtung von \underline{e}_1 zeigt, umso größer wird Reaktionswandkraft sein

5. Gasdynamik

Aufgabe: 1

Wie ist die Bernoulligleichung für die Gasdynamik definiert?

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2}$$

// $\kappa = \frac{c_p}{c_v} \hat{=} \text{Isentropenexponent}$

Voraussetzung: stationär, reibungsfrei, ideales Gas, adiabates System, Druckwellen, kompressibles Fluid, Machzahl $< 0,4$

mit $a = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$
 Aufgabe: 2 $\frac{a_1^2}{\kappa-1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{a_2^2}{\kappa-1} + \frac{v_2^2}{2}$

Bei welchen Strömungsgeschwindigkeiten treten Dopplereffekte auf? Nennen Sie bitte zwei Beispiele für das Auftreten des Dopplereffekts.

- Bei Strömungsgeschw. unterhalb der Schallgeschw. treten Doppler-Effekte auf.
- Beispiele: 1. Tonhöhenunterschied beim vorbeifahrenden Krankenwagen
2. Geschwindigkeitsmessung von Autos

Aufgabe: 3

Nennen sie bitte vier Größen, die die Schallgeschwindigkeit eines Fluids beeinflussen. Nennen Sie bitte die Größenordnung der Schallgeschwindigkeit folgender Stoffe:

- a) Luft $\sim 340 \frac{m}{s}$
- b) Wasser $\sim 1400 \frac{m}{s}$
- c) Stahl $\sim 5100 \frac{m}{s}$

Abhängigkeit von: ρ Dichte, p Druck, T Temperatur, κ Isentropenexponent

$$a(T) = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

$R \hat{=} \text{spezielle Gaskonstante}$

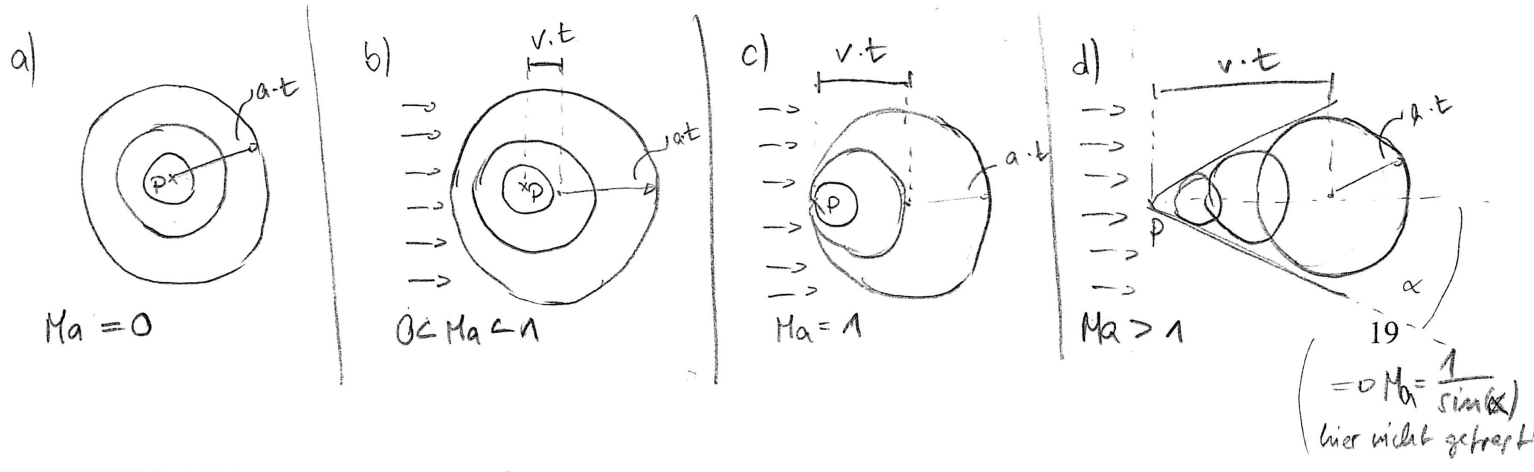
Aufgabe: 4

Charakterisieren Sie die Strömungsgeschwindigkeitsbereiche (a-d) mit Hilfe der Machzahl und skizzieren Sie dementsprechend die zugehörige Schallausbreitung, ausgehend von einer Störquelle:

- a) Ruhefall
- b) Unterschall-Strömung
- c) schallnahe Strömung
- d) Überschall-Strömung

\hookrightarrow ortsfeste Störquelle P

$a \hat{=} \text{Schallgeschw.}$
 $v \hat{=} \text{Strömungsgeschw.}$



Aufgabe: 5

Wozu wird eine Lavaldüse verwendet? Bitte nennen Sie zwei technische Anwendungen.

- ▷ zum Erreichen von Überschallströmungen
- ▷ Bsp: Raketenstartdüse
- ▷ Laval-Turbine

Aufgabe: 6

Was beschreibt die Machzahl? Ordnen Sie bitte qualitativ den folgenden Strömungszuständen Machzahlen zu!

- a) Ruhendes Gas $Ma = 0$
- b) Überschallströmung $Ma > 1$

▷ Die Machzahl beschreibt das Verhältnis aus Strömungs- und Schallgeschwindigkeit: $Ma = \frac{v}{a}$ (dimensionslos)

Aufgabe: 7

Mithilfe welcher Bauelemente lassen sich eine:

- a) Unterschallströmung \rightarrow Düse (Konvergenz)
- b) Überschallströmung \rightarrow Diffusor

beschleunigen?

Wie lässt sich dieser Sachverhalt begründen?

Begründung: Flächen - Geschwindigkeits - Beziehung:

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dv}{v} \quad \left. \begin{array}{l} Ma < 1: A \downarrow v \uparrow \\ Ma > 1: A \uparrow v \uparrow \end{array} \right\}$$

Aufgabe: 8

Bitte geben Sie qualitativ die Veränderungen der Größen Machzahl Ma , Druck p und Temperatur T bei einem Verdichtungsstoß eines kompressiblen Fluids an. Welche Ruhegröße bleibt über den Verdichtungsstoß konstant?

- ▷ Druck und Temp. sind hinter dem Verdichtungsstoß höher
- ▷ Machzahl ist hinter dem Verdichtungsstoß kleiner
- ▷ Die Ruhetemperatur bleibt konstant

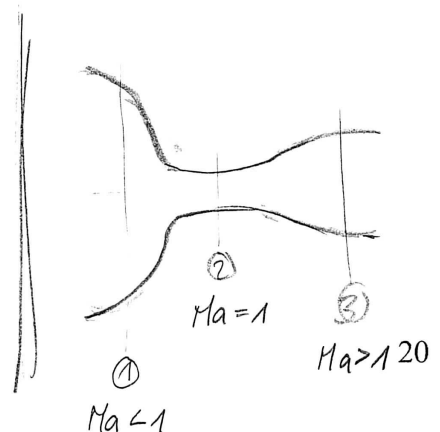
$$\left. \begin{array}{l} p \uparrow \\ T \uparrow \\ Ma \downarrow \\ T_{\text{Ruhe}} = \text{const} \end{array} \right\}$$

Aufgabe: 9

Bitte skizzieren Sie eine Lavaldüse und geben Sie zu jedem Bereich qualitativ die Machzahl im Auslegungsfall an. Was passiert, wenn das kritische Druckverhältnis nicht erreicht wird? Bitte geben Sie das kritische Druckverhältnis an. (Zahlenwert!)

- ▷ Wenn das kritische Druckverhältnis nicht erreicht wird, kommt es zu einer Unterschallströmung (unterkritische durchströmte Konfiguration)

$$\frac{p^*}{p_0} = 0,528$$



Aufgabe: 10

Wozu wird eine Lavaldüse verwendet? Bitte nennen Sie zwei technische Anwendungen.

↳ siehe Aufgabe 5

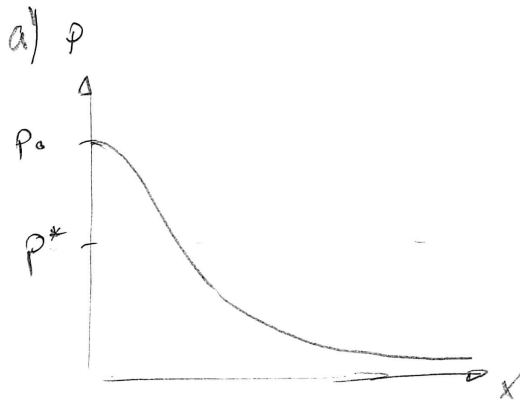
Aufgabe: 11

Bitte skizzieren Sie die Druckverläufe über die Länge x einer Lavaldüse in ein Diagramm. Beginnen Sie bitte, ausgehend vom Totaldruck p_0 für:

- a) Eine kritisch durchströmte Konfiguration im Auslegungsfall
- b) Eine unterkritisch durchströmte Konfiguration

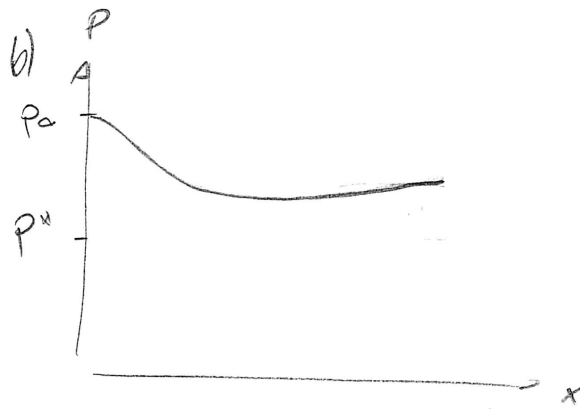
Wie wird das Bauteil für b) auch genannt?

Bitte geben Sie zudem das kritische Druckverhältnis p/p_0 zahlenmäßig an.



p^* = kritischer Druck

↳ kritisches Druckverhältnis: $\frac{p^*}{p_0} = 0,528$



↳ in dem Fall heißt das Bauteil Venturi-Rohr

6. Navier-Stokes-Bewegungsgleichung

Aufgabe: 1

Leiten Sie bitte aus der Navier-Stokes-Gleichung die Euler-Grundgleichung der Hydrostatik her.

Welche Annahmen müssen Sie treffen?

NST-Gleichung: $\underbrace{\frac{d\vec{v}}{dt}}_{=0} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \underbrace{\nu \Delta \vec{v}}_{=0} = \vec{f} = \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \cdot p$ Euler-Grundgl. der Hydrostatik

Annahmen: ($\rho = \text{const}$, $\nu = \text{const}$, Newton-Fluid,) ruhendes Fluid: $v = 0$
↳ nicht nötig

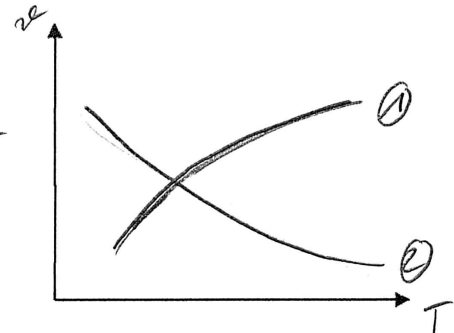
beschränkt das Druckfeld eines ruhenden Fluides

Aufgabe: 2

Wie ist der Newton-Schubspannungsansatz definiert? Bitte benennen Sie die einzelnen Terme. Stellen Sie bitte die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität für Gase und Flüssigkeiten grafisch dar und begründen Sie den Verlauf mittels der beteiligten dominanten Kräfte.

Newton - Schubspannungsgesetz: $\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}$

Schubspannung dyn. Viskosität $\frac{dv_x}{dy} \equiv$ Geschwindigkeitsableitung

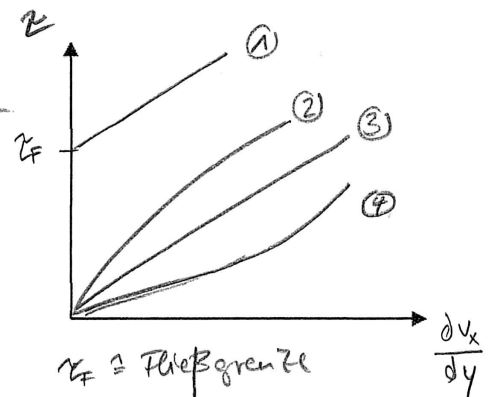


- ① Gase & Dämpfe: $T \uparrow$, Impulsbrutt \uparrow (Impulsausbreitungskraft), $\nu \uparrow$
- ② Flüssigkeiten: $T \uparrow$, Kohäsionskraft \downarrow , $\nu \downarrow$

Aufgabe: 3

Nennen Sie bitte vier Gruppen, in die sich rein zähe Fluide einteilen lassen und geben Sie bitte je ein Beispiel. Stellen Sie bitte außerdem die dazugehörigen Verläufe der Schubspannung über den Geschwindigkeitsquergradienten dar!

- ① BINGHAM-Fluide | Bsp. Zahnpasta
- ② Strukturscherverflüssigende Fluide | Bsp. Flüssigbuntschub
- ③ NEWTON-Fluide | Bsp. Wasser
- ④ Dilatante - Fluide | Bsp. nasser Sand



Aufgabe: 4

Wie lautet die Navier-Stokes-Gleichung? Bitte benennen Sie die beteiligten Kräfte und ordnen Sie diese den einzelnen Gliedern der Gleichung zu.

$$\frac{dV}{dt} = \underbrace{\frac{1}{\rho}}_{\text{Trägheitskräfte}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p}_{\text{Druckkräfte}} + \underbrace{\nu \Delta V}_{\text{Reibungskräfte}}$$

Aufgabe: 5

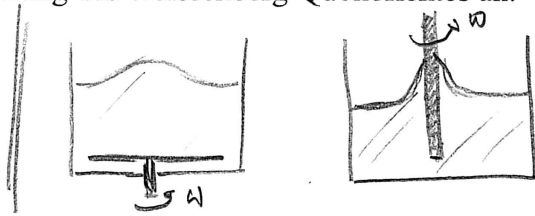
Auf welchem Ansatz basiert die Herleitung der Navier-Stokes-Bewegungsgleichung?

▷ Herleitung über Kräftegleichgewicht am infinitesimalen Massenelement unter Berücksichtigung des Newton-Schubspannungsansatz.

Aufgabe: 6

Was ist der Weissenberg-Quelleffekt? Fertigen Sie bitte zwei Skizzen mit unterschiedlichen Methoden zur Darstellung des Weissenberg-Quelleffektes an.

Das Phänomen der Oberflächenaufwölbung
rund um rotierende Teile in
viskoelastischen Nicht-Newton-Fluiden



Aufgabe: 7

Nennen Sie bitte zwei Methoden zur Messung der Viskosität.

- ▷ Kugel-fall viskosimeter
- ▷ Rotations viskosimeter

7. Potentialströmungen

Aufgabe: 1

Wie lauten die Cauchy-Riemann-Differentialgleichungen?

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad | \quad v_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = - \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Aufgabe: 2

Bitte geben Sie die Formel für die LAPLACE-Gleichung an! Was stellt diese für Potentialströmungen dar? Welcher Vorteil resultiert aus der LAPLACE-Gleichung für Potentialströmungen?

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

▷ stellt die Kontinuitätsgleichung für räumlich instationäre Potentialströmungen dar

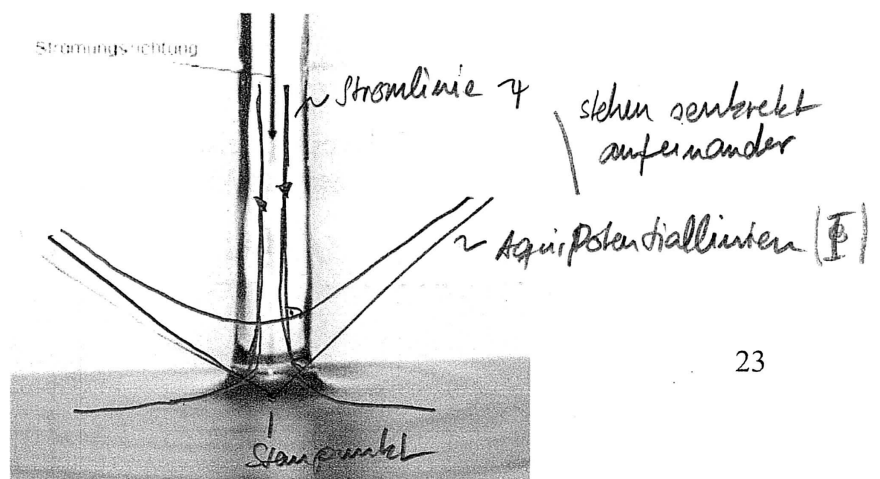
Vorteil:

Zusammensetzung einzelner Strömungen zu einer resultierenden Strömung.

Aufgabe: 3

In dem untenstehenden Bild trifft ein Wasserstrahl auf eine Platte. Bitte zeichnen Sie in das Bild die Strom- sowie die Äquipotentiallinien ein und beschriften Sie diese.

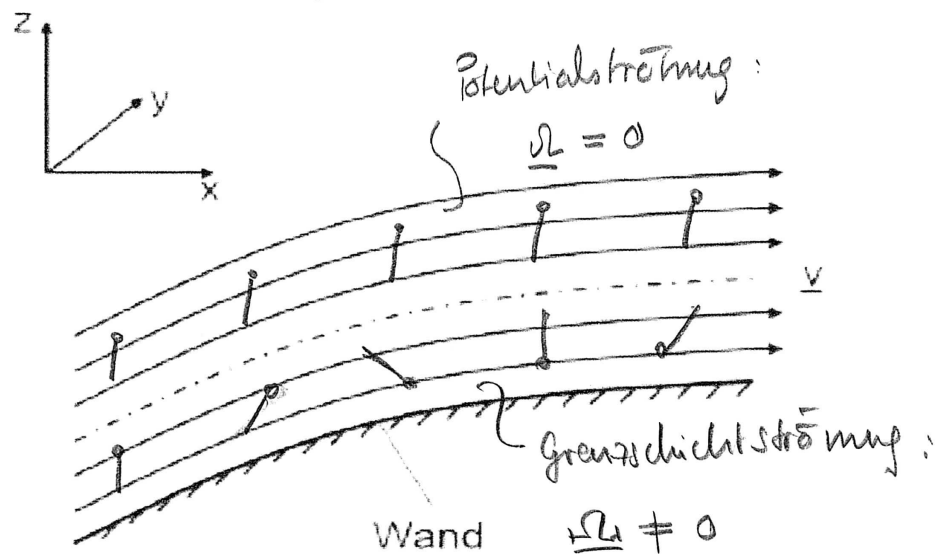
↳ ebene
Staupunktströmung



Aufgabe: 4

Bitte zeichnen Sie in das Bild die Bewegung der Fluidteilchen anhand von Strichhölzern ein. Die strichpunktierte Linie kennzeichnet hierbei den Übergang von wandnaher Strömung zur Außenströmung. Was gilt für die Wirbelstärkevektoren im wandnahen Bereich und was im Außenbereich?

▷ Wirbelstärkevektor: $\underline{\Omega} = \text{rot } \underline{v}$



▷ Wirbelsatz von Thomson: → Satz von der zeitlichen Wirbelerhaltung
 → $\frac{d\Gamma}{dt} = 0$ | Voraussetzung: äußere Kräfte konserv., inkompressibles und reibungsfreies Fluid

▷ Wirbelsatz von Helmholtz: → Satz der räumlichen Wirbelerhaltung
 → $\Gamma_1 = \Gamma_2$

8. Wirbelströmungen

Aufgabe: 1

Bitte nennen Sie drei Wirbelsätze. Geben Sie bitte jeweils die entsprechende Formel an. Was sagen die Wirbelsätze grundsätzlich aus?

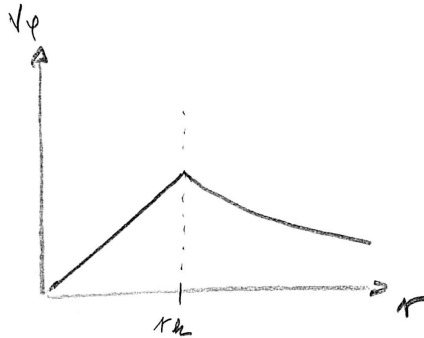
▷ Wirbelsatz von BIOT-SAVART: → Satz der Wirbelinduktion

→
$$\underline{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\underline{s} \times \underline{r}}{r^3}$$

alternativ:

$$\underline{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_{(s)} \frac{d\underline{s} \times \underline{r}}{r^3}$$

(analog zur magnetischen Induktion)



Aufgabe: 2

In welche zwei Strömungsgebiete lässt sich ein Rankine-Wirbel unterteilen? Bitte skizzieren Sie die Geschwindigkeitsverteilung eines Rankine-Wirbels. Was gilt im äußeren Bereich für den Wirbelstärkevektor?

- ▷ Rankine-Wirbel lassen sich in Kern- und Außenströmung unterteilen.
- ▷ Im äußeren Bereich gilt: $\underline{\sigma} = 0$

Aufgabe: 3

Geben Sie bitte die allgemeine Definition einer Wirbelröhre an. Was ist ein Wirbelfaden und was gilt in diesem?

Wirbelröhre: Eine \sim stellt analog zur Stromröhre das Fluid innerhalb des Mantels von Wirbellinien dar, die durch die Randpunkte einer beliebig großen ortsfesten Fläche A verlaufen.

Wirbelfaden: Der \sim ist das Fluid einer so weit im Querschnitt verkleinerten Wirbelröhre, dass in jedem Querschnitt die relevanten strömungsphysikal. Größen als nahezu konstant angesehen werden können.

Aufgabe: 4

Bitte geben Sie die Formel für den Wirbelsatz von Thomson an. Was sagt der Wirbelsatz von Thomson aus? Welche Voraussetzungen müssen für diesen Wirbelsatz gelten? Was lässt sich aus den Voraussetzungen für die Realität schließen?

↳ Satz von der zeitlichen Wirbelerhaltung: $\frac{d\Gamma}{dt} = 0$

- ▷ Voraussetzungen:
 - äußere Kräfte konservativ
 - inkompressibles und reibungsfreies Fluid

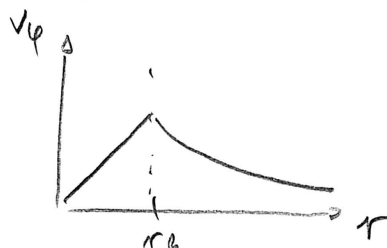
◦ Ohne Viskosität der Fluide müsste die reale Umgebung im einen Wirbelchaos untergehen \rightarrow sorgt für Abblinzeln der Wirbel

Aufgabe: 5

Mit welchem mathematischen Modell eines Wirbels lässt sich das dargestellte Strömungsphänomen vereinfacht beschreiben?

Skizzieren Sie schematisch den Verlauf der Geschwindigkeit über den Radius des

\Rightarrow mit dem Modell des Rankine-Wirbels:



$r < r_k$: Kernbereich
 $r > r_k$: Außenbereich

Wirbels!

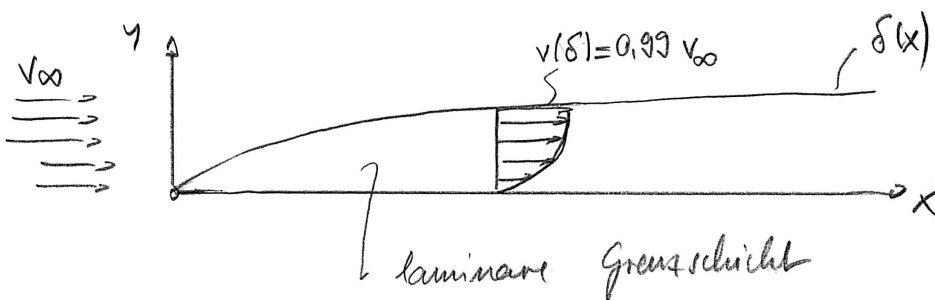


Quelle Bild:
URL: http://www.nasa.gov/images/content/201875main_ARMD_Vortex_xltn.jpg(25.3.13)
- eigene Bearbeitung

9. Grenzschichtströmungen

Aufgabe: 1

Skizzieren Sie bitte die laminare Grenzschicht an einer ebenen, unendlich dünner, längs angeströmter Platte, inklusive eines Geschwindigkeitsprofils. Wie lauten die Randbedingungen für die Grenzschicht?



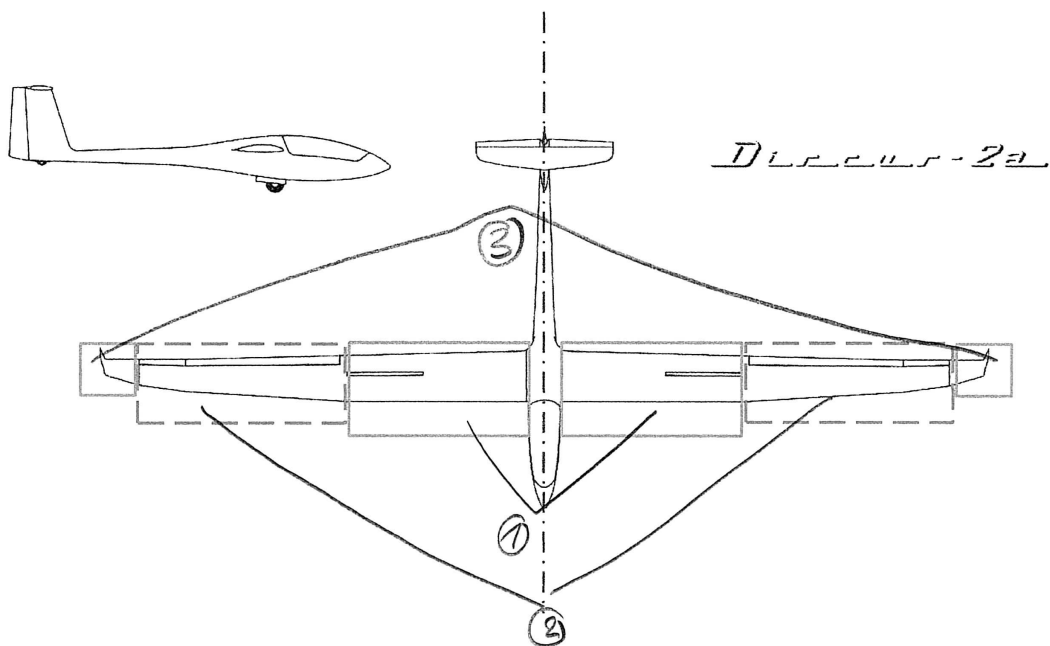
» Randbedingungen für die Grenzschicht:

$$v_x(0) = 0 \frac{m}{s}$$

$$v_x(\delta) = 0,99 \cdot v_\infty$$

Aufgabe: 2

An Laminarprofilen von Hochleistungssegelflugzeugen werden üblicherweise Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung getroffen. Benennen Sie die verschiedenen Arten der Grenzschichtbeeinflussung anhand der unterschiedlich gekennzeichneten Bereiche in der Draufsicht. Begründen Sie die lokale Sinnhaftigkeit der genannten Grenzschichtbeeinflussungen anhand ihrer Wirkungsweise am Tragflügel und nennen Sie für jede Art der Grenzschichtbeeinflussung je eine für ein Laminarprofil übliche Maßnahme.

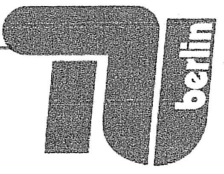
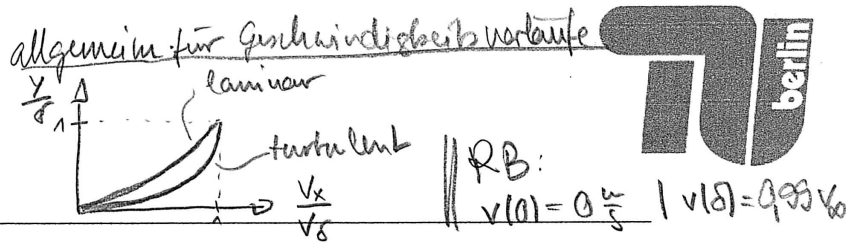


①+③ — Erhaltung der lam. Grenzschichtströmung

- ▷ Strömung soll möglichst lang laminar bleiben, dadurch ergeben sich geringere Reibungsverluste
- ▷ Maßnahme: Ausblasen von hochenergieiger Luft in die lam. Grenzschicht (tangential zum Profil)

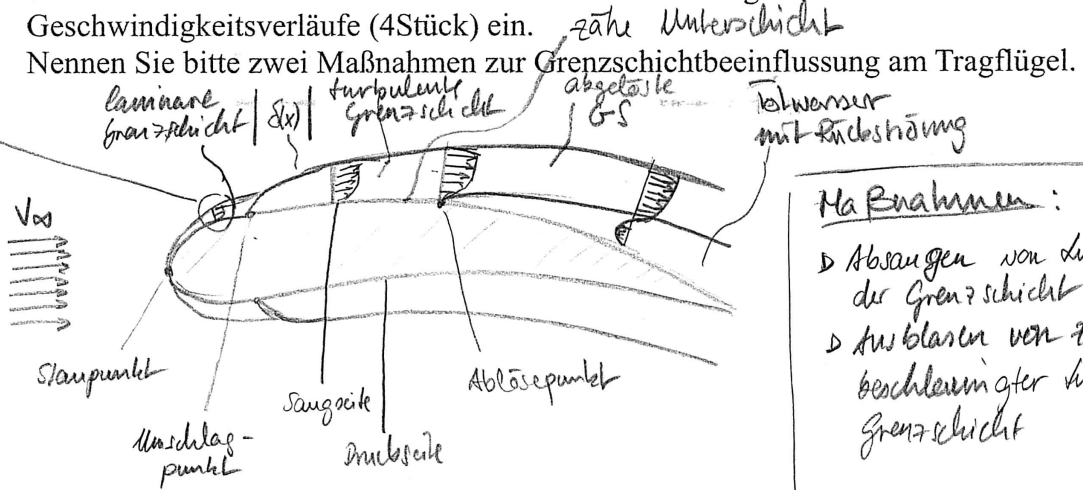
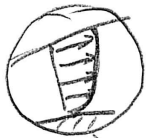
② — Ausbildung einer turbulenten Grenzschichtströmung

- ▷ durch das längere Anliegen der Strömung ergibt sich eine höhere Ruderwirksamkeit
- ▷ Maßnahme: Zick-Zack-Band



Aufgabe: 3

Skizzieren Sie bitte den Grenzschichtverlauf eines umströmten Tragflügelprofils (mit Ablösung) und beschriften Sie dieses bitte vollständig einschließlich der charakteristischer Punkte. Zeichnen Sie bitte auch die signifikanten Geschwindigkeitsverläufe (4 Stück) ein.



Aufgabe: 4

Wie lautet die 1. Prandtl'sche Grenzschichtgleichung? Was ergibt sich aus der 1. Prandtl'schen Grenzschichtgleichung für die Messung des statischen Druckes?

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

=> der Druck ist für eine Stelle $x = \text{const}$ in der ebenen Grenzschicht konstant

=> somit kann die Messung des statischen Druckes mit einer Druckmessbohrung an der Wand erfolgen.

Aufgabe: 5

Der Tragflügel eines Flugzeugs wird mit einer ungestörten Geschwindigkeit angeströmt. Berechnen Sie bitte die Grenzschichtdicke bei der Tiefe L. Schätzen Sie bitte die Impuls- und die Verdrängungsdicke mit Hilfe der empirischen Formeln ab. Der Tragflügel kann als ebene Platte angesehen werden.

Gegeben:

$$v_\infty = 25 \frac{m}{s}$$

$$L = 15 \text{ cm}$$

$$\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

▷ bestimmen der Reynolds-Zahl für die Grenzschicht:

$$Re_x = \frac{v_\infty x}{\nu} \Rightarrow Re_L = \frac{v_\infty L}{\nu} = \frac{25 \frac{m}{s} \cdot 0,15 \text{ m}}{15,1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 2,483 \cdot 10^5$$

▷ berechnen der Grenzschichtdicke (laminar):

$$\delta(x) = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \Rightarrow \delta(L) = \frac{5 \cdot 0,15 \text{ m}}{\sqrt{2,483 \cdot 10^5}} = 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

▷ Impulsverlustdicke:

$$\delta_2(L) \approx \frac{\delta(L)}{9} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

▷ Verdrängungsdicke

$$\delta_1(L) \approx \frac{\delta(L)}{3} = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Verdrängungsdicke = ist ein Maß für die Ablenkung des Blenialstroms in ein nach außen aufgrund der langsamer strömenden realen Grenzschichtmassen.

Aufgabe: 6

Eine ebene Platte wird von Luft umströmt. Dabei bildet sich wandnah eine Grenzschicht aus

- 1) Wie kommt es zu einer Grenzschichtausbildung?

In unmittelbarer Nähe der Platte haften die Fluidteilchen an der Plattenoberfläche. Somit kommt es zu einer Geschwindigkeitsverteilung und damit Grenzschichtbildung.

- 2) Geben Sie die Geschwindigkeitsrandbedingungen in der Grenzschicht an.

$$v(y=0) = 0 \frac{m}{s}$$

$$v(y=\delta) = 0,99 v_{\infty}$$

- 3) Berechnen Sie bitte die Grenzschichtdicke am Ende der Platte.

Gegeben:

$$v_{\infty} = 12 \frac{m}{s}$$

$$L = 0,2 \text{ m}$$

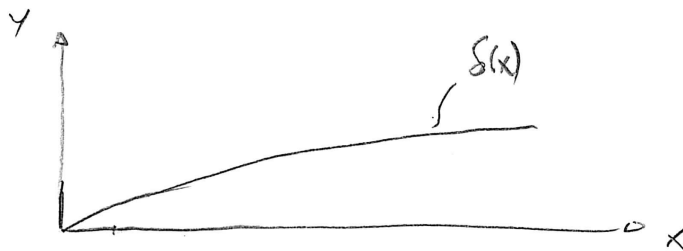
$$\nu = 1,49 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$Re_L = \frac{v_{\infty} \cdot L}{\nu} = \frac{12 \frac{m}{s} \cdot 0,2 \text{ m}}{1,49 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 1,61 \cdot 10^5$$

↳ für die laminare Grenzschichtdicke gilt:

$$\delta(L) = \frac{5 \cdot 0,2 \text{ m}}{\sqrt{Re_L}} = 2,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- 4) Skizzieren Sie bitte die laminare Grenzschicht an einer ebenen Platte.



Aufgabe: 7

Geben Sie bitte die Grenzschichtdicke einer laminaren und einer turbulenten Grenzschichtströmung in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl an!

$$\delta_{\text{lamin.}}(x) = \frac{5 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad \left| \quad \delta_{\text{turb.}}(x) = \frac{k(x) \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad \right| \quad k(x) \hat{=} \text{empirischer Faktor}$$

Aufgabe: 8

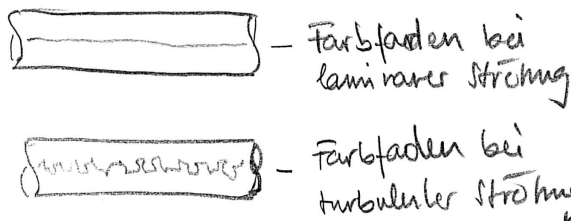
Bitte definieren Sie die reale Grenzschichtdicke und nennen Sie zwei weitere Grenzschichtdicken.

- ▷ die reale δ -Dicke beschreibt, den Strömungsbereich am Wandprofil, in der sich die Strömungsgeschw. bis auf 99% der Außenströmung angepasst hat
- ▷ Impulsverlust dicke, Verdrängungsdicke

10. Turbulente Strömungen inkompressibler Fluide

Aufgabe: 1

Skizzieren Sie bitte die zwei Fälle des Reynolds Farbfadenversuchs.
Was beschreibt die kritische Reynoldszahl? Das Verhältnis welcher Kräfte wird durch die Reynoldszahl wiedergegeben? Wie lautet der Zahlenwert für die kritische Reynoldszahl bei Rohrströmungen?



- ▷ Die kritische Reynoldszahl beschreibt den Übergang von einer laminaren zu einer turbul. Strömung.
- ▷ Die Reynoldszahl beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Zähkräften
- ▷ krit. Re für Rohrström.: $Re_{krit} = 2320$

Aufgabe: 2

Bitte bestimmen Sie den Turbulenzgrad eines Windkanals bei den gegebenen Werten.

Wie groß ist der Turbulenzgrad bei isotroper Turbulenz (ausgehend von der x - Komponente)?

Gegebene Werte:

$$\bar{v} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Definition Turbulenzgrad:

$$T_M = \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2}}{3}}$$

$$T_M = \frac{1}{20 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \sqrt{\frac{150 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 2 \cdot 75 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{3}} = 0,15$$

▷ für isotrope Turbulenz gilt:

$$\overline{v_x'^2} = 150 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad \overline{v_y'^2} = 75 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad \overline{v_z'^2} = 75 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\overline{v_x'^2} = \overline{v_y'^2} = \overline{v_z'^2}$$

$$T_{M,iso} = \frac{1}{20 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \sqrt{\frac{3 \cdot 150 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{3}} = 0,61$$

Aufgabe: 3

Nennen Sie bitte die zwei Anteile, in die sich Geschwindigkeit und Druck einer turbulenten Strömung zerlegen lassen.

1. stationärer zeitlicher Mittelwert
2. im Detail instationärer Schwabungswert

Aufgabe: 4

$$p(x, y, z, t) = \bar{p}(x, y, z) + p'(x, y, z, t)$$

Wie lassen sich Turbulenzgrade in Windkanälen reduzieren?

- ▷ unter Verwendung finnischer Siebe und Düsen

11. Strömung inkompressibler Fluide in Rohrleitungen

Aufgabe: 1

Tragen Sie bitte den Druckverlust über den Volumenstrom einer geraden Rohrleitung mit konstantem Durchmesser auf. Es handelt sich um eine laminare Rohrströmung! Begründen Sie bitte den Verlauf des Graphen unter Verwendung von Formeln und vereinfachen Sie so weit wie möglich.

▷ Druckverlust in einer geraden Rohrstrecke bei laminarer Rohrströmung:

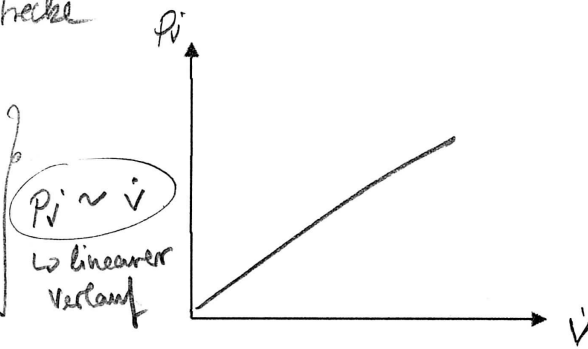
Woher kommen die Formeln her?

$$\frac{\Delta P_j}{\rho} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_{vol}^2}{2} = \frac{64L \cdot v}{D^2 \cdot 2A} \dot{V}$$

$$\lambda_{laminar} = \frac{64}{Re}$$

$$Re = \frac{D \cdot v_{vol}}{\nu}$$

$$v_{vol} = \frac{\dot{V}}{A}$$



Aufgabe: 2

Wie wird in der Bernoulli-Gleichung die Reibung berücksichtigt?

▷ durch ein Druckverlustglied auf der Austrittsseite

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g z_2 + \frac{\Delta P_j}{\rho}$$

Aufgabe: 3

Bitte geben Sie die Formel für den Druckverlust in einem Rohrleitungssystem, bestehend aus geraden Rohrleitungen und Einbauteilen, an. Wie vereinfacht sich die Gleichung für den Druckverlust, wenn man von einer laminaren Strömung ausgeht?

Druckverlust in einer geraden Rohrstrecke } $\frac{\Delta P_j}{\rho} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_{vol}^2}{2} = \frac{64L}{Re} \frac{L}{D} \frac{v_{vol}^2}{2}$

$\lambda = \frac{64}{Re}$

Einbauteil - Druckverlust } $\frac{\Delta P_j}{\rho} = \sum_k \xi_k \frac{v_k^2}{2}$

Aufgabe: 4

Was wird unter hydraulisch glatt verstanden und was beschreibt die Konstanzgrenze im Moody-Diagramm?

Abgabe der Zählschicht

- ▷ Hydraulisch glatt: ~ bedeutet, dass ein weiteres Erhöhen der Oberflächenrauheit (durch polieren) in Röhren zu keinem geringeren Widerstandsbeiwert führt ($Re < 5$)
- ▷ Konstanzgrenze: Ab dieser Grenze ist der Reibungsbeiwert λ aus dem Moody Diagramm konstant und unabhängig von der Reynoldszahl

Aufgabe: 5

Warum werden viele Messungen an Tragflügelmodellen in Wasserkanälen anstatt in Windkanälen durchgeführt? Welche Vorteile ergeben sich, begründen Sie bitte mit einer geeigneten Formel.

$$Re_x = \frac{v \cdot x}{\nu}$$

- ▷ Da die dyn. Viskosität ν von Luft größer ist, als die von Wasser, benötigt man bei Wasser deutlich kleinere Strömungsgeschwindigkeiten um gewünschte Reynoldszahlen zu erreichen.

Aufgabe: 6

Beeinflusst die Wandrauigkeit den Druckverlust einer laminaren Rohrströmung? Wie verhält sich der Druckverlust in einer durchströmten Pipeline, wenn der Volumenstrom verdoppelt wird (die Strömung bleibt laminar)? Begründen Sie bitte Ihre Antworten mit Formeln (vereinfachen soweit es geht).

- ▷ Die Wandrauigkeit einer laminaren Strömung beeinflusst nicht den Druckverlust, da bei der laminaren Rohrströmung $\lambda = \frac{64}{Re}$ ist und somit λ unabhängig von der Rauigkeit ist: $\frac{\Delta P_j}{\rho} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_{vol}^2}{2}$
- ▷ Bei doppeltem Volumenstrom verdoppelt sich auch der Druckverlust (linearer Zusammenhang):

$$\frac{\Delta P_j}{\rho} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_{vol}^2}{2} = \frac{64}{Re} \frac{v_{vol}^2}{2} = \frac{64 L}{v_{vol} \cdot D^2} \cdot \frac{v_{vol}^2}{2} = \frac{64 L v}{A D^2} \dot{V}$$

$$Re = \frac{v_{vol} \cdot D}{\nu}$$

$$v = v_{vol} = \frac{\dot{V}}{A}$$

Aufgabe: 7

Begründen Sie bitte, warum ein höherer Druckverlust für eine Einlaufströmung aus einem Behälter in eine Rohrleitung berücksichtigt werden muss. Wie lang ist die Einlaufstrecke bis zum Erreichen der jeweiligen Strömungsform? Schätzen Sie die Größenordnung der zusätzlichen Druckverluste für laminare und turbulente Strömungsformen ab.

- ▷ Die Wandschubspannungen sind für die Einlaufströmung nach dem Newton-Schubspannungssatz größer als bei laminarer Rohrströmung. Damit sind die Druckverluste in der Einlaufströmung höher als in der ausgebildeten Strömung

▷ Einlaufstrecke:

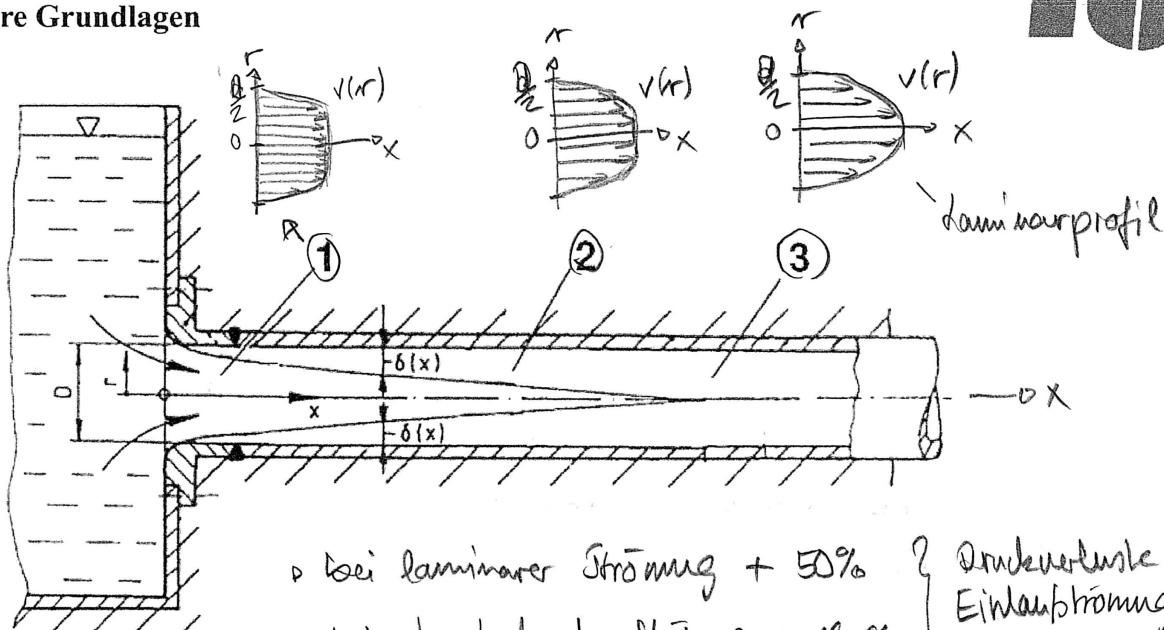
lam. Rohrströmung: $x_{Einlauf} = (0,03 \dots 0,06) Re \cdot d$

turbol. Rohrströmung: $x_{Einlauf} = 50 \dots 100 \cdot d$

▷ Bei lam. Rohrströmung liegen die Druckverluste in der Einlaufströmung bis zu (50%) höher als bei gleichlanger ausgebildeter lam. Strömung, bei turbulenter bis zu (10%)

Aufgabe: 8

Skizzieren Sie bitte die Geschwindigkeitsprofile 1, 2, 3 einer Einlaufströmung. Vergleichen Sie bitte qualitativ die Verluste von Einlaufströmung und ausgebildeter laminarer bzw. ausgebildeter turbulenter Strömung.



▷ bei laminarer Strömung + 50%
▷ bei turbulente Strömung + 10% } Druckverluste bei Einlaufströmung

Aufgabe: 9

Wie wird die Reibung in der Bernoulli-Gleichung beachtet?
Berechnen Sie den Druckverlust in einem Rohr mit den gegebenen Werten.

- $d_{Rohr} = 3,39 \cdot 10^{-3} m$
- $v_{vol} = 10 m/s$
- $L_{Rohr} = 6 m$
- $\frac{R_z}{d_{Rohr}} = 2 \cdot 10^{-3}$
- $\nu = 1,13 \cdot 10^{-6} m^2/s$
- $\rho = 1000 kg/m^3$

▷ Beachtung durch ein Druckverlustglied auf der Auslaufseite: $\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + \frac{\Delta P_j}{\rho}$

$$Re = \frac{v_{vol} \cdot d_{Rohr}}{\nu} = \frac{10 \frac{m}{s} \cdot 3,39 \cdot 10^{-3} m}{1,13 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 3 \cdot 10^4 > 2320 \Rightarrow \text{turbulente Rohrströmung}$$

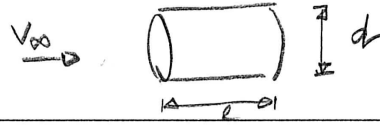
=> aus dem Moody-Diagramm lässt sich ein Reibungskoeffizient von $\lambda = 0,028$ ablesen

$$\Delta P_j = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{L_{Rohr}}{d_{Rohr}} \cdot \frac{v_{vol}^2}{2} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,028 \cdot \frac{6 m}{3,39 \cdot 10^{-3} m} \cdot \frac{(10 \frac{m}{s})^2}{2}$$

$$= 2,478 \cdot 10^6 Pa$$

$$\frac{N}{A} = \frac{5,9 \cdot 10^5}{57,4 m^2}$$

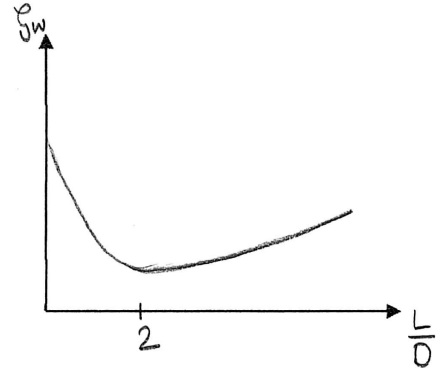
12. Umströmung von Körpern



Aufgabe: 1

Ein Kreiszyylinder wird längsumströmt. Bitte stellen Sie den Verlauf des Widerstandskoeffizienten in Abhängigkeit des Verhältnisses von Länge L zu Durchmesser D (L/D) dar. Bei welchem Verhältnis L/D wird der Widerstandskoeffizient minimal? Bitte begründen Sie Ihre Antwort.

- ▷ Minimum bei $\frac{L}{D} = 2$
- ▷ Bei diesem Verhältnis bildet das Totwasser die, auf den Strömungswiderstand bezogene, optimale Form aus.



Aufgabe: 2

Welche Kugel hat bei gleicher Anströmgeschwindigkeit den geringeren Widerstandsbeiwert?

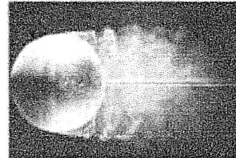
Begründen Sie bitte Ihre Antwort.

Was unterstützt der "Stolperdraht" (weiß gestrichelt im Bild B)?

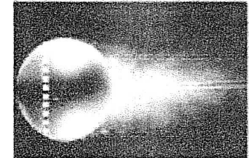
- ▷ Kugel B hat den geringeren Widerstandsbeiwert.

↳ Begründung: Der Ablossepunkt befindet sich weiter stromabwärts aufgrund der turbulenteren Austauschbewegung und zeigt einen höheren Druck als im laminaren Fall

Kugelumströmung A)



Kugelumströmung B)



Er dient zum Erzeugen eines Umschlages in eine turbulente Grenzschicht

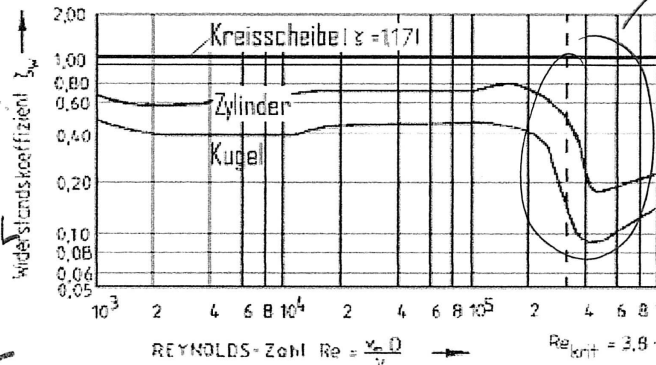
↳ Druckrückgewinn
↳ niedriger c_{D0} -Wert

Aufgabe: 3

Warum ist der Widerstandskoeffizient einer senkrecht angeströmten Scheibe ab einer $Re > 10^3$ praktisch konstant?

Begründen Sie bitte vergleichend die Verläufe des Widerstandskoeffizienten in Abhängigkeit von der Re für die Kreisscheibe, einen querangeströmten Zylinder und eine Kugel.

- ▷ Da die Kreisscheibe eine definierte Abrisskante besitzt, ist der Widerstandsbeiwert ab $Re > 10^3$ nahezu unabhängig von der Re -Zahl.
- ▷ Die Kugel hat einen kleineren c_{D0} -Wert als der querangeströmte Zylinder, da dieser ein ^{beispielsweise} v-förmiges Ausweichen der Strömung ermöglicht



Geschwindigkeit ist so groß, dass es aufgrund der Trägheitskräfte nicht zu dem starken seitlichen Aufhellen des Unterdruckgebietes kommt

Aufgabe: 4

Kugel

Zwei identische Tischtennisbälle werden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angeströmt (Medium: Luft). Berechnen Sie bitte die jeweilige Widerstandskraft und vergleichen Sie die Tischtennisbälle in Bezug auf den Widerstandsbeiwert und die berechnete Widerstandskraft.

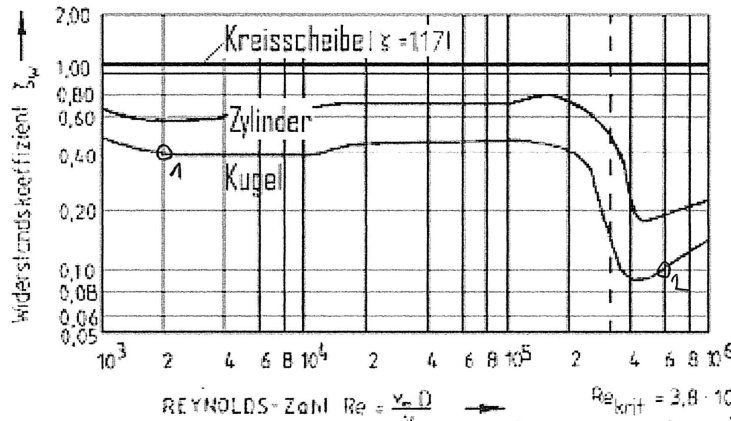
$$F_w = \rho_w \frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A = \frac{\rho}{4} D^2$$

Ball 1:

Ball 2:

$D_1 = 0,1 \text{ m}$
 $Re = 2 \cdot 10^3 \rightarrow \rho_w = 0,40$
 $v_\infty = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $\rho = 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 $\Rightarrow F_{w1} = 1,679 \text{ N}$

$D_2 = 0,1 \text{ m}$
 $Re = 6 \cdot 10^5 \rightarrow \rho_w = 0,10$
 $v_\infty = 91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $\rho = 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 $\Rightarrow F_{w2} = 3,863 \text{ N}$



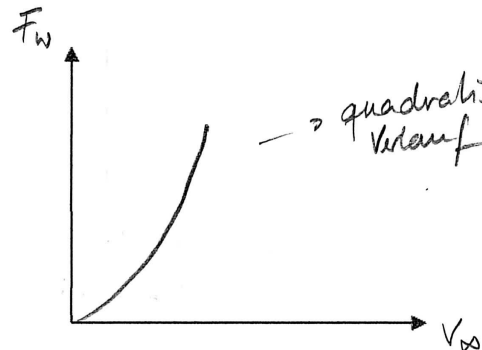
-> mit zunehmender Widerstandsbeiwert nimmt die Widerstandskraft in den berechneten Fällen zu

Aufgabe: 5

Tragen Sie bitte die Widerstandskraft eines Körpers über die Anströmgeschwindigkeit (bei konstanten übrigen Parametern) auf und begründen Sie bitte den Verlauf des Graphen mit Hilfe einer Formel.

$$F_w = \rho_w \frac{\rho}{2} v_\infty^2 \cdot A$$

$$F_w \sim v_\infty^2$$

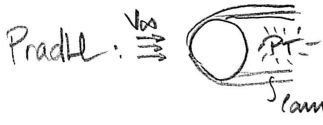


Aufgabe: 6

Widerstandskraft: $F_w = \zeta_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A$

*Gehen Sie dabei auf die Reynoldszahl ein.

Erläutern Sie bitte, wie sich die Diskrepanz zwischen dem von Eiffel und dem von Prandtl gemessenen Kugelwiderstandsbeiwert erklärt.* Unterstützen Sie ihre Erläuterungen bitte jeweils mit einer Skizze. Geben Sie bitte außerdem die verschiedenen Widerstandskoeffizienten und die Definitionsgleichung der Widerstandskraft an.



p_r relativ klein $\Rightarrow \zeta_w \approx 0,4$
 $Re < Re_{kritisch}$



p_r relativ groß $\Rightarrow \zeta_w \approx 0,1$
 $Re > Re_{kritisch}$

Die Grenzschichtstrukturen bei Prandtl (vorwiegend lam. GS) und Eiffel (vorw. turbul. GS) waren unterschiedlich.
Es kommt bei turbul. GS zu einer turbulenten Austauschbewegung und einem Druckrückgewinn \rightarrow kleinerer ζ_w -Wert

Aufgabe: 7

Wieso hat ein Golfball Dellen auf der Oberfläche? Was bewirken diese?

- Die Dellen erzeugen Verwirbelungen und bewirken somit ein Umschlagen in eine turbulente Grenzschicht.
- Somit ergibt sich ein geringerer Strömungswiderstand.

Aufgabe: 8

Wie setzt sich der Strömungswiderstand zusammen?

$$F_w = \underbrace{F_{w,p}}_{\text{Druckwiderstand}} + \underbrace{F_{w,r}}_{\text{Reibungswiderstand}}$$

Aufgabe: 9

Vergleichen Sie bitte die Widerstandskoeffizienten von einem endlich langen und einem unendlich langen ($L/d \rightarrow \infty$) quer angeströmten Zylinder. Welcher besitzt den größten Widerstand und wieso?

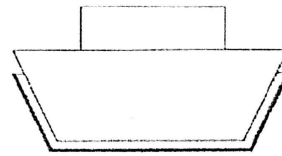
- Bei einem unendlich langen quer angeströmten Zylinder ergibt sich der größte Widerstands Koeffizient ζ_w , da für die Strömung keine Möglichkeit der seitlichen Ausweichung besteht.
- Der Widerstand würde bei gleicher Anströmungsgeschw. von ζ_w und A abhängen. Bei gleichem d und $L/d \rightarrow \infty$ würde auch A gegen unendlich gehen. Somit wäre auch für den unendlich langen Zylinder der Widerstand maximal?

\hookrightarrow wirklich das gefragt?

Aufgabe: 10

Das Schiff im Trog eines Schiffhebewerks füllt beinahe den kompletten Trog aus. Es verbleibt nur wenig Wasser zwischen der Trogwand und dem Schiff. Begründen Sie, ob das Schiff in so wenigem Wasser trotzdem schwimmen kann.

Wenn die Auftriebskraft, also die Gewichtskraft des verdrängten Wassers, so groß ist wie die Gewichtskraft* des Schiffes, dann würde das Schiff selbst in dem wenigen Wasser schwimmen können.



äußere Form nicht relevant

* des Schiffes

Solange das Schiff den Trogboden nicht berührt, schwimmt es.

Aufgabe: 6

Welche Analogie herrscht zwischen Volumenstrom und Zirkulation (Wirbelfluss)?

$$\dot{V} = \int_A \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} \quad (\text{Volumenstrom})$$

$$\Gamma = \int_A \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} \quad (\text{Zirkulation [Wirbelfluss]})$$
$$= \int_A \text{rot } \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}$$

Theoriefrage

Die Anzeige des Höhenmessers in einem Segelflugzeug richtet sich nach dem herrschenden Atmosphärendruck. Am Flugtag wird der Höhenmesser am Boden manuell auf 0 Meter eingestellt und über Nacht nicht mehr verstellt. Am Folgetag zeigt der Höhenmesser am Boden 10 Meter an. Wie hat sich demzufolge der Luftdruck (qualitativ) zum Vortag verändert? Bitte begründen Sie ihre Aussage (Formel).

↳ der Luftdruck hat sich reduziert

↳ barometrische Höhenformel: $p = p_a e^{-\frac{g \cdot h}{R \cdot T}}$

↳ Druck sinkt mit steigender Höhe, bzw. bei "gleichbleibender" Höhe hat sich p_a oder T verändert.

▷ Wie unterscheiden sich lam. und turbulente Grenzschicht bezogen auf den Reibungswiderstand?

▷ Lösung: $F_{R,turb} > F_{R,lam.}$

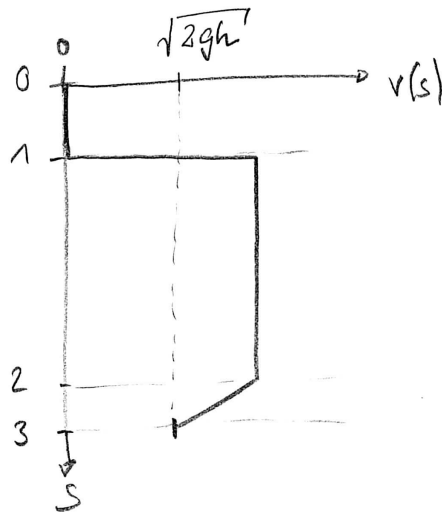
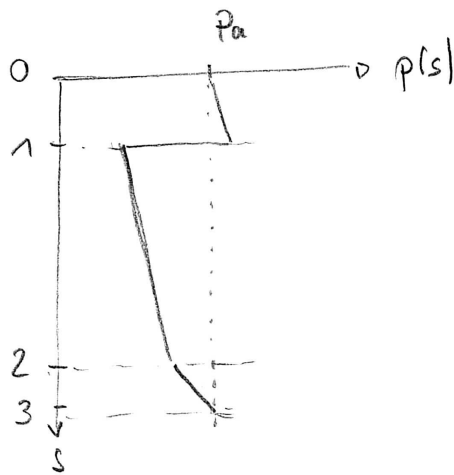
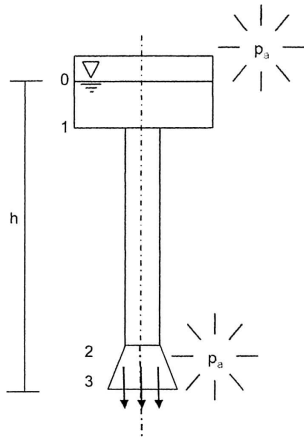
14

Aufgabe: 14

Punkte: 5

Skizzieren Sie bitte den Druck- und Geschwindigkeitsverlauf eines Fallrohres entlang der Mittellinie. Welche Stelle ist kavitationsgefährdet? Bitte begründen Sie Ihre Aussage. Wie groß ist die Geschwindigkeit an der Stelle 2?

Annahme: Konstante Füllhöhe des Behälters
Hinweis: Der Behälter ist oben offen



⇒ Toricelli an Stelle 3:

$$v_3 = \sqrt{2gh}$$

⇒ Kontinuitätsgleichung:

$$v_2 \cdot A_2 = v_3 \cdot A_3$$

$$\Rightarrow v_2 = v_3 \frac{A_3}{A_2} = \sqrt{2gh} \frac{A_3}{A_2}$$

▷ kritische Stelle bei 1, da "extremster" Druckabfall

▷ Was besagt die 2. Brundtge'sche Grenzschichtgleichung?

$$\hookrightarrow \frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad \Rightarrow \text{Die Masse der Grenzschicht bleibt erhalten.}$$

▷ Worin unterscheiden sich die Bernoulli-Gleichung für den Stromfaden und die Bernoulli-Gleichung für die Potentialströmung?

↳ Erstere gilt nur für den Stromfaden bzw. letzteres gilt im gesamten Strömungsfeld.

▷ Wie ändert sich der Volumenstrom in einem Fallrohr beim Einsatz eines Diffusors am Ausstritt im Vergleich zu einem geraden Rohr?

↳ Volumenstrom wird größer

$$\hookrightarrow Q = \dot{V} = v_A \cdot A \quad , \quad \text{nach Torricelli ist } v_A \text{ in beiden Fällen gleich, } A \text{ beim Diffusor aber größer}$$

▷ bei Untersuchungen bzgl. Kavitation:

$$\hookrightarrow \text{Dampfdruck bei } 20^\circ\text{C: } p_D = 0,023 \text{ bar} \\ = 2,3 \text{ kPa}$$