

**Was ist ein "Fluid"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -1-

**Was sind die Bereiche "Hydrostatik",  
"Aerostatik", "Hydrodynamik",  
"Aerodynamik" und "Gasdynamik"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -2-

**Wie sind "Druck" und "Schubspannung"  
definiert?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -3-

**In welchen Einheiten wird der Druck  
gemessen?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -4-

**Wie lautet das Gesetz von Pascal?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -5-

**Welches sind die wichtigsten Arten von  
Druckmessgeräten?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -6-

**Was ist der Unterschied zwischen  
"Absolutdruck" und "Überdruck"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -7-

**Was bedeuten "Kompressibilität" und  
"Kompressionsmodul", und was sind ihre  
Einheiten?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -8-

**Hydrostatik** befasst sich mit ruhenden Flüssigkeiten. Ferner auch ruhende Gase, obwohl dafür "Aerostatik" der richtige Begriff wäre.

**Aerostatik** befasst sich mit ruhenden Gasen

**Hydrodynamik** befasst sich mit strömenden Flüssigkeiten

**Aerodynamik** befasst sich mit Umströmungen von Körpern in Abhängigkeit von deren Grösse, Form und Oberflächenbeschaffenheit. (z.B. Flügel eines Flugzeugs)

**Gasdynamik** befasst sich mit Strömungen, bei denen erhebliche Dichteänderungen des strömenden Mediums auftreten. (z.B. Explosion, schnelles Öffnen und Schliessen von Ventilen)

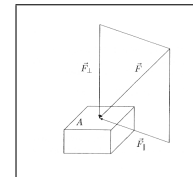
Unter dem Oberbegriff "Fluide" fasst man Flüssigkeiten und Gase zusammen. Ein wesentliches Merkmal der Fluide ist die Eigenschaft, dass im Ruhezustand keine Schubspannungen bestehen können. D.h. falls zwischen zwei benachbarten Schichten Schubspannungen auftreten, verschieben sich diese Schichten so lange gegeneinander, bis die Schubspannung verschwindet.

**offiziell:**

Pascal  $[Pa] = \frac{N}{m^2}$   
 Bar  $[Bar] = \frac{N}{cm^2} \quad 10^5 Pa$

**veraltet:**

Techn. Atm.  $[at] = \frac{kp}{cm^2} \quad 9.81 \cdot 10^4 Pa$   
 Phys. Atm.  $[atm] = 760mm \text{ Hg} \quad 101325 Pa$   
 Torr  $[Torr] = 1mm \text{ Hg} \quad \frac{1}{760} atm \approx 133 Pa$



Wenn ein Kraft  $\vec{F}$  auf eine Fläche  $A$  wirkt, wird die senkrechte Komponente bezogen auf die Flächeneinheit als Druck  $p$  und die waagrechte Komponentent als Schubspannung  $\tau$  bezeichnet.

$$p = \frac{F_{\perp}}{A}$$

$$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A}$$

**Deformationsmanometer:** Bourdonsche Röhre (Rohrfeder), Membranfederanometer, Wellrohrfederanometer

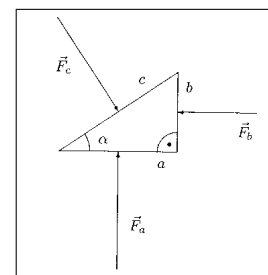
**Flüssigkeitsmanometer** (Flüssigkeitssäule)

**Kolbenmanometer** (frei beweglicher Kolben)

**Elektrische Manometer:** Widerstandsmanometer (Halbleiter), piezoelektrische Manometer, Deformationsmanometer mit Umwandlung in elektrisches Signal

**Reibungs- und Wärmeleitungsvakuummeter:** Im Gas schwingender Draht

**Ionisationsvakuummeter:** Penningvakuummeter (Glimmentladung)

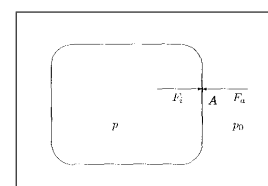


In einem Fluid ist der Druck auf ein kleines Flächenelement unabhängig von dessen Orientierung.

**Kompressibilität:**  $\kappa$  ist die Proportionalitätskonstante zwischen Druckerhöhung und Volumenabnahme.

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} [Pa^{-1}]$$

**Kompressionsmodul:** Reziprokwert von  $\kappa$ .



Massgebend für die Wandbeanspruchung ist nicht der absolute Druck, sondern der Überdruck  $\Delta p = p - p_0$ .

Beispiel: Autoreifen muss den richtigen Überdruck haben, um die vorgesehenen Abrolleigenschaften vorzuweisen.

**Was ist eine "ideale Flüssigkeit"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -9-

**Was ist ein "barotropes Fluid"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -10-

**Wie lautet das Gesetz von Boyle-Mariotte, und unter welchen Voraussetzungen gilt es?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -11-

**Was ist der "Schweredruck"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -12-

**Was sind "kommunizierende Gefäße"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -13-

**Wie funktionieren Flüssigkeitsmanometer und Saugheber?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -14-

**Wie lautet die barometrische Höhenformel für eine isotherme Atmosphäre?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -15-

**Wie kommt der statische Auftrieb zustande, und wie lautet das Archimedische Prinzip?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -16-

Wenn die Dichte eines Fluids zwar nicht konstant, aber **allein** eine Funktion des Druckes ist, d.h.  $\rho = \rho(p)$ , wird das Fluid als **barotrop** bezeichnet.

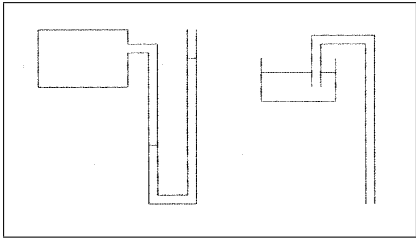
Eine ideale Flüssigkeit ist reibungsfrei und inkompressibel.

Das Fluid sei von der Dichte  $\rho$   
 Die Wassertiefe an der Stelle der Druckmessung sei  $h$   
 Dann gilt:

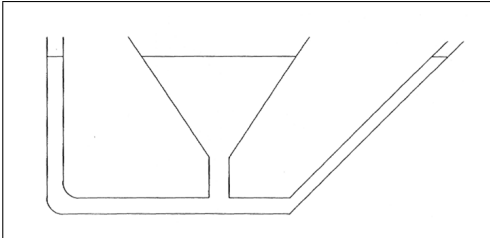
$$p_h = \rho gh$$

$$pV = \textit{konstant}$$

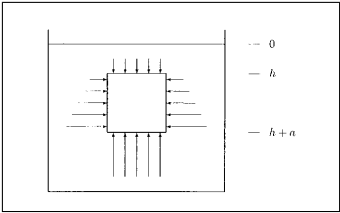
Gilt für ein ideales Gas bei konstanter Temperatur.



**Flüssigkeitsbarometer:** Überdruck im geschlossenen Gefäß  
**Saugheber:** Ausnützen des "Hydrostatischen Paradoxon".



**Hydrostatisches Paradoxon** egal wie die verschiedenen Gefäße beschaffen sind, der Wasserspiegel ist bei allen genau gleich hoch.



Wird ein Körper in ein Fluid eingetaucht, so bewirken die höhenabhängigen Druckkräfte eine resultierende Kraft, die senkrecht nach oben gerichtet ist.

**Archimedisches Prinzip:** Der Auftrieb eines in ein Fluid eingetauchten Körpers ist gleich dem Gewicht des von ihm verdrängten Fluids.

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0}{p_0} gh}$$

- $p$  Druck in der Höhe  $h$
- $p_0$  Druck in der Höhe 0
- $\rho_0$  Dichte in der Höhe 0
- $h$  Höhe

**Wie ist ein "Aräometer"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -17-

**Worauf beruhen Oberflächenspannungen und Grenzflächenspannungen?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -18-

**Was ist der Unterschied zwischen Benetzung und Nichtbenetzung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -19-

**Was ist "Kapillarität"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -20-

**Was ist der Unterschied zwischen "Stromlinien" und "Bahnlinien"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -21-

**Was sind "Stromröhren" und "Stromfäden"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -22-

**Was ist eine "ideale Strömung", und wie sieht ihr Geschwindigkeitsprofil aus?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -23-

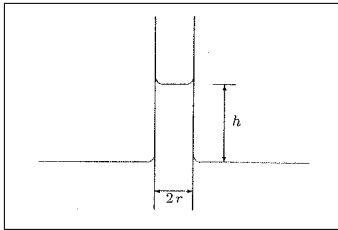
**Wie lautet die Kontinuitätsgleichung für eine inkompressible stationäre Strömung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -24-

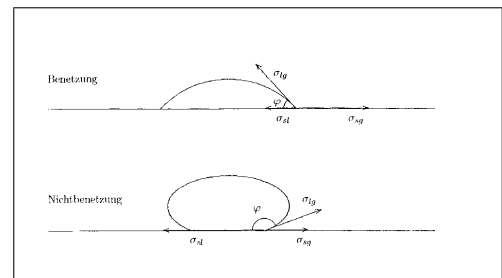
**Oberflächenspannungen:** Im Innern einer Flüssigkeit haben die Moleküle im Mittel den gegenseitigen Abstand, für den die potentielle Energie minimal ist und in dem keine Kraft wirkt. An der Oberfläche der Flüssigkeit ist dagegen der mittlere Abstand der Moleküle etwas grösser, weil ständig einzelne Moleküle auf Grund ihrer thermischen Energie die Anziehungskraft der benachbarten Moleküle überwinden können und die Flüssigkeitsoberfläche verlassen. Der grössere Mittlere Abstand zwischen den Molekülen an der Flüssigkeitsoberfläche bewirkt eine parallel zur Oberfläche gerichtete anziehende Kraft zwischen den Molekülen.

**Grenzflächenspannung:** Verallgemeinerung der Oberflächenspannung (Festkörper/Flüssigkeit, Festkörper/Gas, Flüssigkeit/Gas)

Das **Aräometer** (Senkwaage) dient zum Bestimmen der Dichte von Flüssigkeiten. Ein schlanker, stabförmiger Hohlkörper aus Glas, der am unteren Ende mit Blei beschwert ist, taucht in einer Flüssigkeit je nach ihrer Dichte unterschiedlich tief ein. Der Flüssigkeitsspiegel zeigt an einer entsprechend geeichten Skala direkt die Dichte der Flüssigkeit an.



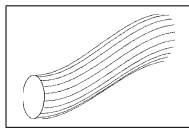
Besonders in engen Röhren und Spalten zeigt sich die Kapillarwirkung. Bei Benetzung steigt die Flüssigkeit im Röhren, bei Nichtbenetzung wird sie unter das umgebende Niveau gedrückt.



Der Winkel  $\varphi$  wird Kontaktwinkel genannt.

**Benetzung:**  $\varphi < 90^\circ$

**Nichtbenetzung:**  $\varphi > 90^\circ$



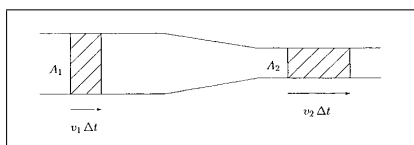
Eine **Stromröhre** besteht aus Stromlinien, die durch die Punkte einer geschlossenen Kurve gehen und zusammen eine röhrenförmige Fläche bilden

Ein **Stromfaden** ist eine Stromröhre mit verschwindend kleinem Querschnitt

**Bahnlinien** sind die Bahnkurven, die von den einzelnen Fluidteilchen durchlaufen werden.

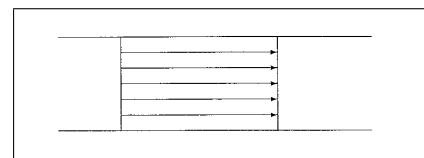
**Stromlinien** sind die Integrallinien über die Geschwindigkeitsvektoren von mehreren Teilchen.

Bei stationärer Strömung fallen Bahnlinien und Stromlinien zusammen.



$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Gilt für **ideale** Flüssigkeit



Die Geschwindigkeiten in allen Punkten einer Querschnittsfläche sind gleich gross. Das bedeutet, dass eine ideale Strömung nur durch eine ideale Flüssigkeit (inkompressibel, keine innere Reibung) zustande kommen könnte.

Diese Näherung kann für Gase verwendet werden, falls die Strömungsgeschwindigkeit klein verglichen mit der Schallgeschwindigkeit ist.

**Wie lautet die Bernoulli-Gleichung und unter welchen Voraussetzungen gilt sie?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -25-

**Nennen Sie Phänomene und Anwendungen, die auf dem Bernoulli-Effekt beruhen.**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -26-

**Was bedeuten "Zirkulation" und "Vortizität", und was ist der Zusammenhang zwischen diesen beiden Grössen?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -27-

**Was ist eine Potentialströmung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -28-

**Wie lautet der Thomsonsche Wirbelsatz, und unter welchen Voraussetzungen gilt er?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -29-

**Wie lauten die Wirbelsätze von Helmholtz, und unter welchen Voraussetzungen gelten sie?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -30-

**Was folgt aus dem ersten Helmholtzschen Satz?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -31-

**Was ist "innere Reibung"?**

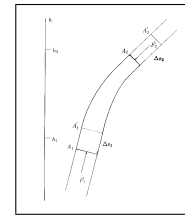
PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -32-

**Messen von Strömungsgeschwindigkeiten:** Venturirohr, Pitotrohr, Pradtlrohr

**Unterdruck an Stellen hoher Strömungsgeschwindigkeit:**

Schiffsentlüfter, Zerstäuber, Farbspritzpistole, Bunsenbrenner, Wasserstrahlpumpe, Dampfstrahlpumpe, Tragflügel bei Flugzeugen, Höhlen von Prärieindianern

**Sturm:** Hausdächer werden bei starkem Sturm nicht eingedrückt, sondern durch die Sogwirkung abgehoben.



$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{konstant}$$

$p$ : statischer Druck  
 $\frac{\rho v^2}{2}$ : dynamischer Druck  
 $\rho gh$ : wird oft als Schweredruck bezeichnet (was nicht ganz korrekt ist, da dieser Term in der Bernoulli-Gleichung zunimmt und der Schweredruck nimmt mit der Höhe ab)

Gilt für ideale Flüssigkeit in einer stationären Strömung längs einer Stromlinie.

Eine Strömung, in der die Zirkulation überall null ist. (wird als rotationsfrei oder wirbelfrei bezeichnet)

**Zirkulation:** Kurvenintegral der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  über eine geschlossene Kurve

$$\Gamma = \oint \vec{v} d\vec{s}$$

**Vortizität:** Rotation der Geschwindigkeit (Wirbelung oder Wirbelvektor). Es lässt sich zeigen, dass  $\vec{\omega}$  gleich der lokalen Winkelgeschwindigkeit der Strömung ist.

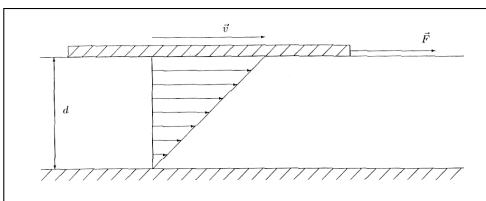
$$\vec{\omega} = \text{rot} \vec{v}$$

**Zusammenhang:**  $\oint_C \vec{v} d\vec{s} = \int_A \text{rot} \vec{v} \vec{n} dA$

- Die Zirkulation einer Wirbelröhre ist längs dieser Röhre konstant.
  - Eine Wirbelröhre besteht immer aus denselben Fluidteilchen.
  - Die Zirkulation einer Wirbelröhre bleibt zeitlich konstant.
- Gilt für ein reibungsfreies, barotropes Fluid, auf das nur konservative Kräfte (z.B. Schwerkraft) wirken.

**Die Zirkulation längs einer geschlossenen, materiellen Kurve in einem reibungsfreien, barotropen Fluid, auf das nur konservative Massenkräfte wirken, bleibt zeitlich konstant.** Gilt für ein reibungsfreies, barotropes Fluid, auf das nur konservative Kräfte (z.B. Schwerkraft) wirken.

Eine materielle Kurve ist eine Kurve, die stets durch die gleichen Fluidteilchen gebildet wird. Sie ist nicht ortsfest, sondern "schwimmt mit der Strömung mit".



In einem Fluid bewirken die Kräfte zwischen den Molekülen, dass bremsende Kräfte auftreten. Um die Platten parallel zueinander zu verschieben, ist die Kraft  $\vec{F}$  erforderlich. Sie ist proportional zur Geschwindigkeit und umgekehrt proportional zur Schichtdicke  $d$ .

- Die Zirkulation einer Wirbelröhre ist längs dieser Röhre konstant.
- Eine Wirbelröhre kann nirgends innerhalb des Fluids beginnen oder enden. Sie kann somit nur an einer Randfläche des Fluids (z.B. Gefäßwand oder Flüssigkeitsoberfläche) beginnen.



**Wie lautet das Newtonsche Reibungsgesetz?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -33-

**Welche Arten von Zähigkeit werden unterschieden, und was sind ihre Einheiten?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -34-

**Wie lautet die Kontinuitätsgleichung für kompressible Medien?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -35-

**Was ist eine "materielle Ableitung"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -36-

**Was ist eine "laminare Strömung" und wie sieht ihr Geschwindigkeitsprofil aus?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -37-

**Was ist eine "turbulente Strömung" und wie sieht ihr Geschwindigkeitsprofil aus?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -38-

**Was ist die "Reynolds-Zahl"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -39-

**Was bedeutet die kritische Reynoldszahl?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -40-

dynamische Zähigkeit

Die Proportionalitätskonstante  $\eta$  ist eine Stoffkonstante.

$$[\eta] = \frac{kg}{ms} = \frac{Ns}{m^2} = Pa \cdot s$$

kinematische Zähigkeit

$\nu$  wurde eingeführt für  $\frac{\eta}{\rho}$ , weil dieser Ausdruck oft auftritt.

$$[\nu] = \frac{m^2}{s}$$

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

$\tau$  = innere Reibungskraft

$\eta$  = Stoffkonstante

$v$  = Relativgeschwindigkeit

$z$  = Abstand der Berührungsflächen

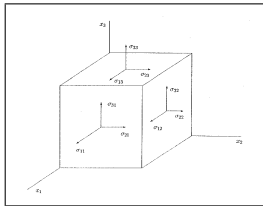
$$[\tau] = N$$

$$[\eta] = \frac{kg}{ms} = \frac{Ns}{m^2} = Pa \cdot s$$

$$[v] = ms^{-1}$$

$$[z] = m$$

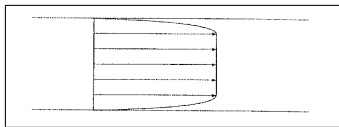
Die Proportionalitätskonstante  $\eta$  ist eine Stoffkonstante: die (dynamische) **Viskosität** oder (dynamische) **Zähigkeit**.



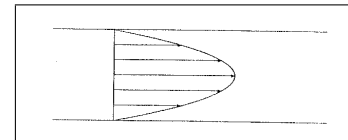
Die zeitliche Ableitung  $\frac{d}{dt}$  in  $\frac{d}{dt} \int \rho v_i dV = \int \rho v_i dV + \int \sigma_{ij} n_j dA$  ist eine sogenannte **materielle Ableitung**. Eine physikalische Grösse  $G$  eines kleinen Fluidvolumens ändert sich, weil sich diese Grösse an einem bestimmten Ort zeitlich ändert und weil das Volumen sich mit der Strömung bewegt. Es gilt daher:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\delta G}{\delta t} + v_i \delta_j G$$

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + div(\rho \vec{v}) = 0$$



Bei Überschreiten einer gewissen kritischen Geschwindigkeit kann eine anfänglich laminare Strömung turbulent werden. Der eigentlichen Strömungsbewegung überlagern sich überall regellose und ständig wechselnde Zusatzbewegungen. Der Versuch, einen "Stromfaden" mit Farbe zu markieren, scheitert: Die Farbe verteilt sich in kurzer Zeit gleichmässig über den ganzen Strömungsquerschnitt.



Eine Strömung, in der die einzelnen Fluidteilchen sich in geordneten, nebeneinander gleitenden Schichten bewegen, wird als laminar bezeichnet. typisches Beispiel: Cuette-Strömung

$Re < Re_k \Rightarrow$  laminare Strömung  
 $Re > Re_k \Rightarrow$  turbulente Strömung

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{v L}{\nu}$$

$L$  Körper-charakteristische Linearabmessung (in der Regel Durchmesser oder Radius)  $[L] = m$

$\rho$  Dichte des strömenden Mediums  $[\rho] = \frac{kg}{m^3}$   
 $v$  Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium  $[v] = \frac{m}{s}$

$\eta$  dynamische Viskosität  $[\eta] = \frac{kg}{m \cdot s}$

$\nu$  kinematische Viskosität  $[\nu] = \frac{m^2}{s}$

Bsp: Bei der Rohrströmung wird für  $L$  der Durchmesser  $d$  eingesetzt. Damit wird die kritische Reynolds-Zahl für die Rohrströmung  $Re_k = 2320$ . Unter technischen Bedingungen wird die Strömung auf jeden Fall bei Reynolds-Zahlen knapp **oberhalb von 2320 turbulent** werden.

**Wie gross ist der Strömungswiderstand einer Kugel in einer laminaren Strömung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -41-

**Wie lauten die Zusammenhänge zwischen Durchflussmenge und Druckgefälle bei einer Rohrströmung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -42-

**Was ist der Druckwiderstand?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -43-

**Wie lautet die erweiterte Bernoulli-Gleichung?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -44-

**Wie entsteht der dynamische Auftrieb?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -45-

**Was ist der "Magnus-Effekt"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -46-

**Was sind "Anfahrwirbel" und "Wirbelschleppen", und wodurch werden sie verursacht?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -47-

**Was ist der "induzierte Widerstand"?**

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -48-

Hagen-Poiseuille:  $\dot{V} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \eta l}$

$V$	Volumen der Flüssigkeit, das in der Zeit $t$ das Rohr durchströmt	$[V] = m^3$
$\Delta p$	Druckgefälle	$[\Delta p] = Pa$
$R$	Radius des Rohres	$[R] = m$
$t$	Dauer des Flusses	$[t] = s$
$l$	Länge des Rohres	$[l] = m$
$\eta$	dynamische Viskosität	$[\eta] = Pa \cdot s$

**Das Wichtigste:** Durchflussmenge ist proportional zum Druckgefälle und zu  $R^4$  ( $\rightarrow$  Geschwindigkeitsprofil), umgekehrt proportional zur Viskosität ( $\rightarrow$  Honig) und zur Länge des Rohrstücks.

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

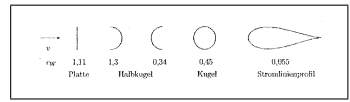
$F_R$	zu überwindende Reibungskraft	$[F_R] = N$
$v$	Relativgeschwindigkeit zwischen Kugel und Medium	$[v] = \frac{m}{s}$
$R$	Radius der Kugel	$[R] = m$
$\eta$	dynamische Viskosität	$[\eta] = \frac{kg}{m \cdot s} = \frac{Ns}{m^2}$

$$p_1 + \alpha_1 \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \alpha_2 \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta p_V$$

$\Delta p_V$  ist der Druckverlust zwischen Punkt 1 und Punkt 2.

Da bei Strömungsablösung die Strömung turbulent wird, lässt sich der Druckwiderstand nicht rein theoretisch berechnen. Mit der empirisch bestimmten Widerstandszahl  $c_w$  ergibt sich für den Druckwiderstand  $F_D = c_w \frac{\rho v^2}{2} A$

$F_D$	Druckwiderstand	$[F_D] = N$
$c_w$	Widerstandszahl (empirisch)	$[c_w] = \text{keine}$
$\rho$	Dichte des strömenden Mediums	$[\rho] = \frac{kg}{m^3}$
$v$	Relativgeschw. zw. Körper und Medium	$[v] = \frac{m}{s}$
$A$	grösster der Strömung entgegenstehender Körperquerschnitt (Charakteristische Fläche)	$[A] = m^2$



Bei einem sich in einer Strömung befindender, drehender Zylinder tritt eine Kraft auf. Dies wird *Magnus-Effekt* genannt. Er wird mit grossem Erfolg beim Tennis-, Tischtennis-, Fussball- und Golfspiel benützt, um die Flugbahn der Bälle zu beeinflussen.

Angeströmter Zylinder  $\rightarrow$  Potentialströmung

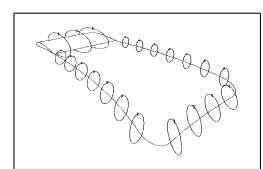
rotierender Zylinder  $\rightarrow$  Potentialwirbel

rotierender angeströmter Zylinder  $\rightarrow$  Strömungsüberlagerung, Auftrieb

Da die rotierenden Luftmassen der Wirbelschleppen kinetische Energie enthalten, muss während dem Verlängern der Wirbelschleppen durch die Fortbewegung des Flügels Arbeit geleistet werden. Deshalb wirkt auf den Tragflügel ein zusätzlicher Widerstand, der um ein Mehrfaches grösser sein kann als der eigentliche Druckwiderstand des Profils. Dieser zusätzliche Widerstand wird als induzierter Widerstand genannt.

$$F_w = c_w \frac{\rho v^2}{2} A_T$$

Um den Tragflügel bildet sich ein Wirbel. Da nach dem ersten Helmholtz'schen Wirbelsatz die Wirbellinien im Fluid weder beginnen noch enden können, müssen sich die Wirbellinien des Tragflügels schliessen. In dem Moment, da der Tragflügel in Bewegung gesetzt wird, löst sich an der Hinterkante ein Wirbel ab, der im entgegengesetzten Sinn dreht wie der Wirbel um den Flügel. Zwischen diesem **Anfahrwirbel** und dem Tragflächenwirbel bilden die Wirbellinien an beiden Enden des Tragflügels die sogenannten **Luftwirbelschleppen**.



Was ist ein "Anstellwinkel"?

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -49-

Was ist die "Gleitzahl"?

PHYSIK, MECHANIK DER FLUIDE -50-

Gleitzahl =  $\tan\varphi = \frac{c_w}{c_A}$  (meistens  $\ll 1$ )  
( $\frac{c_A}{c_w}$  wird oft ebenfalls als Gleitzahl bezeichnet.)  
Der Gleitwinkel wird offenbar minimal, wenn das Verhältnis  $\frac{c_w}{c_A}$  minimal ist.

Der Anstellwinkel ist der Winkel zwischen der Anströmrichtung und der Profelsehne (bei konvexen Profilen) bzw. der Tangenten an die Profilunterseite (bei konkaven Profilen).