

Physik des Fliegens

Wie erkläre ich den aerodynamischen Auftrieb?

Dr. Bernd Messnarz
Studiengangleiter Luftfahrt
FH JOANNEUM Graz



Bernd Messnarz

bernd.messnarz@fh-joanneum.at

- Studium Technische Physik, TU Graz
- Studiengangsleiter Luftfahrt/Bachelor
- Lehre
 - Angewandte Mathematik
 - Informatik und Programmieren
 - Physik
 - Flugmechanik, Regelungstechnik
- Forschung und Entwicklung
 - Flugsimulation und Flugregelung
 - Entwicklung von Regelungsverfahren für Drohnen

Physik des Fliegens - Inhalt

- Einleitung und Problemstellung
- Kräfte am Flugzeug
- Tragflächenprofil (Druckverteilung, Arten, Kräfte)
- Bernoulli'scher Ansatz
- Newton'scher Ansatz
- Eine „gute Erklärung“ des Auftriebs



<https://www.schule-und-familie.de/wissen-wieso-weshalb-warum/menschen-und-gesellschaft/warum-koennen-flugzeuge-fliegen.html?d>

Einleitung - Problemstellung

Warum fliegen Flugzeuge? Gibt es eine anschauliche Erklärung für den Auftrieb?

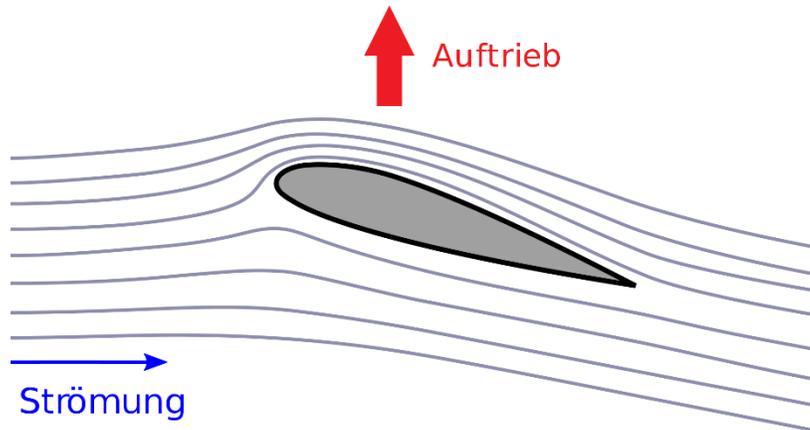


Wright Flyer 17.12.1903



Von Leo067 - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=108549781>

Airbus A350 14.06.2013



Von Foto: Michael Paetzold, Lizenz: Creative Commons by-sa-3.0 de, CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68323103>

Seit 120 Jahren werden Flugzeuge erfolgreich gebaut und sie fliegen.
Wie? – darüber scheiden sich bei heute die Geister.

Einleitung - Problemstellung

New York Times (Dezember 2003):

The New York Times

STAYING ALOFT; What Does Keep Them Up in there?

<https://www.nytimes.com/2003/12/09/news/staying-aloft-what-does-keep-them-up-there.html>

John D. Anderson jr., Kurator für Aerodynamik am National Air and Space Museum in Washington, D.C.:

Anderson betonte der »Times« gegenüber, es gebe »**keine knappe Antwort**« hinsichtlich des Ursprungs der als dynamischer Auftrieb bezeichneten Kraft. **Experten verträten unterschiedliche Ansichten**, manche sogar mit »**religiöser Inbrunst**«. Daran hat sich bis heute nichts geändert.

Ingenieurwissenschaftliche Sicht: Sehr gute **Beschreibung durch Gleichungen** möglich. Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen mittels **CFD Simulation** liefert befriedigende Resultate.

Physikalische Sichtweise: suchen nach einer anschaulichen Erklärung mittels einfacher Phänomene und Grundprinzipien, die ohne komplexe Mathematik auskommt.

Die Suche nach einer intuitiven Erklärung

- Wie können wir den **Auftrieb für Laien** befriedigend erklären, **ohne** dabei **mathematische Werkzeuge** zu verwenden und **physikalisch korrekt** zu sein?
- Wie können wir es den Kindern in der Schule im Physikunterricht erklären?
- Das wird kaum über die **Navier-Stokes-Gleichungen** möglich sein.

Continuity:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0$$

U-Momentum:
$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W U)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho F_x$$
$$+ 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right]$$

V-Momentum:
$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U V)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W V)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho F_y$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right]$$

W-Momentum:
$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W W)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho F_z$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial z} \right]$$

Kräfte am Flugzeug



Im Gleichgewicht (stationärer Reiseflug)

Auftrieb = Gewicht

Schub = Widerstand

Airbus A320

Maximales Abfluggewicht: 780 000 N (78 t), 195 Passagiere

Maximaler Schub: 236 000 N (24 t)

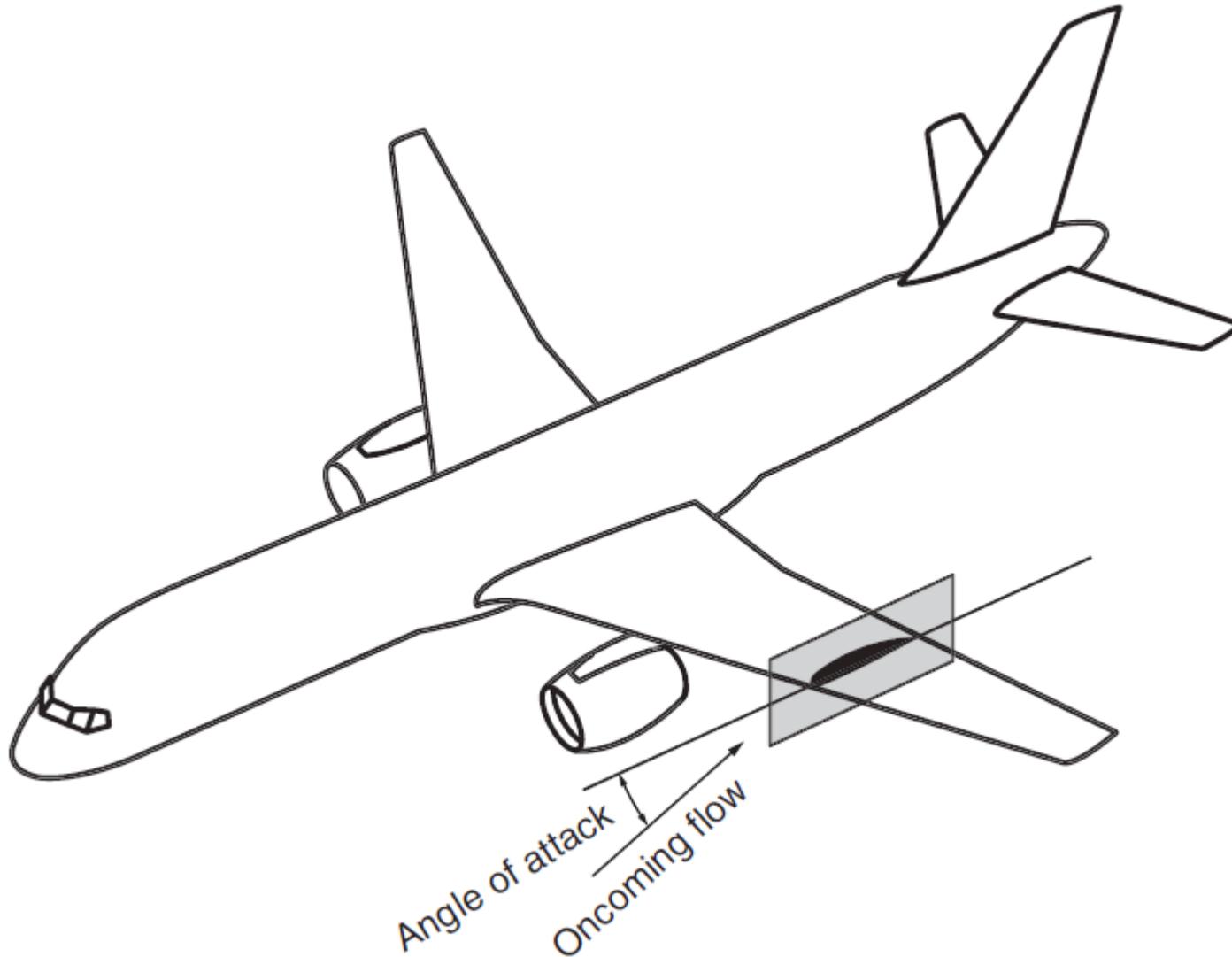
Reiseflug (900 km/h, 250 m/s): ca. 80 % Schub = 188 800 N, entspricht $188\,800 \times 250 = 47$ MW (64 000 PS)
330 PS / Passagier

Eurofighter (23 t)

Maximaler Schub: 180 000 N (18 t)

Überschall Mach 2 (2300 km/h, 640 m/s): 100 % Schub, entspricht $180\,000 \times 640 = 115$ MW (156 000 PS)

Einflussparameter für den Auftrieb



- Geometrische Form des Profils
- Flügelfläche
- Fluggeschwindigkeit
- Anstellwinkel
- Dichte

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

Verschiedene Profilformen

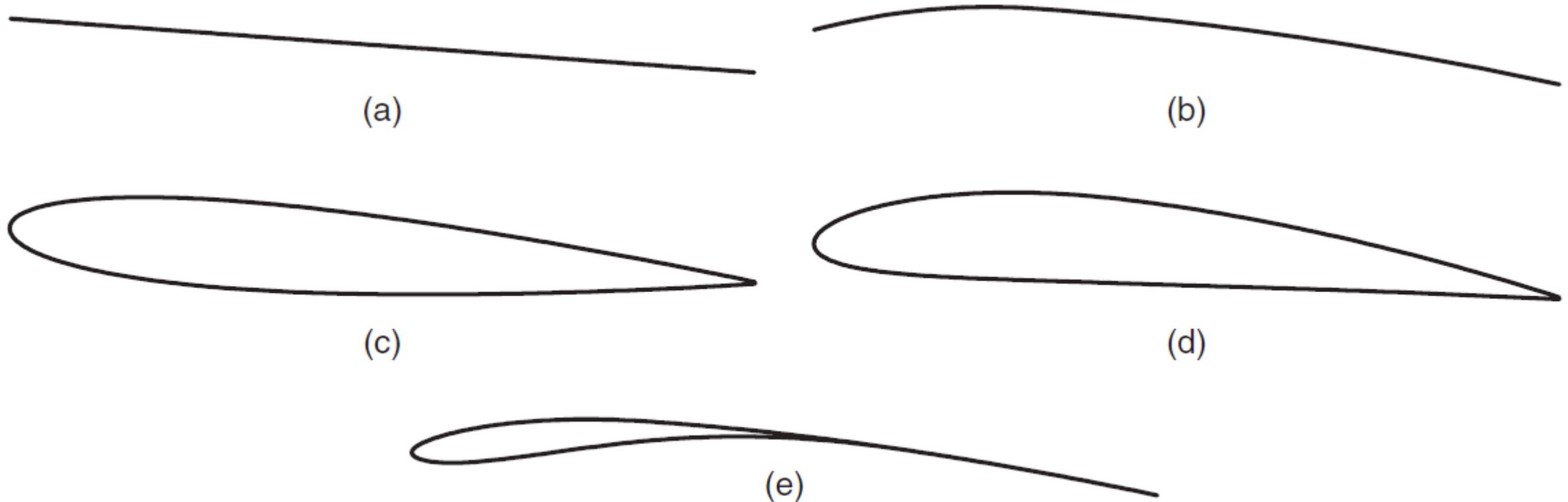
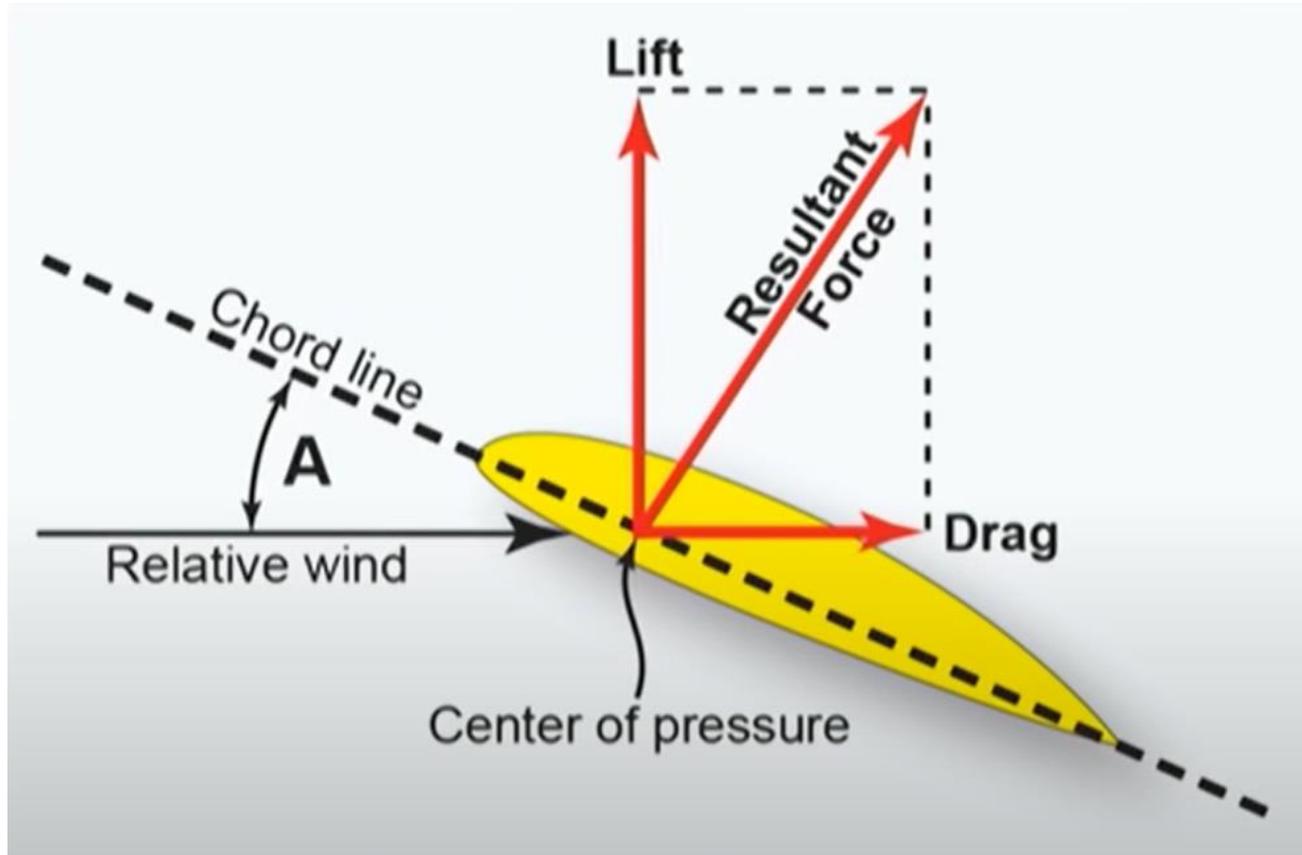


Figure 7.3.8 Types of airfoil shapes. (a) Flat plate. (b) Curved (cambered) plate. (c) Symmetrical streamlined shape. (d) Cambered streamlined shape. (e) Bird's wing

Kräfte am Profil – Auftrieb und Widerstand



- Zerlegung der **resultierenden Luftkraft** in **Auftrieb** und **Widerstand**.
- Auftrieb **senkrecht zur Anströmrichtung** bzw. Fluggeschwindigkeit.
- Resultierende Luftkraft greift im Druckpunkt (center of pressure).
- Zwei Anteile: Anstellung und Wölbung des Profils

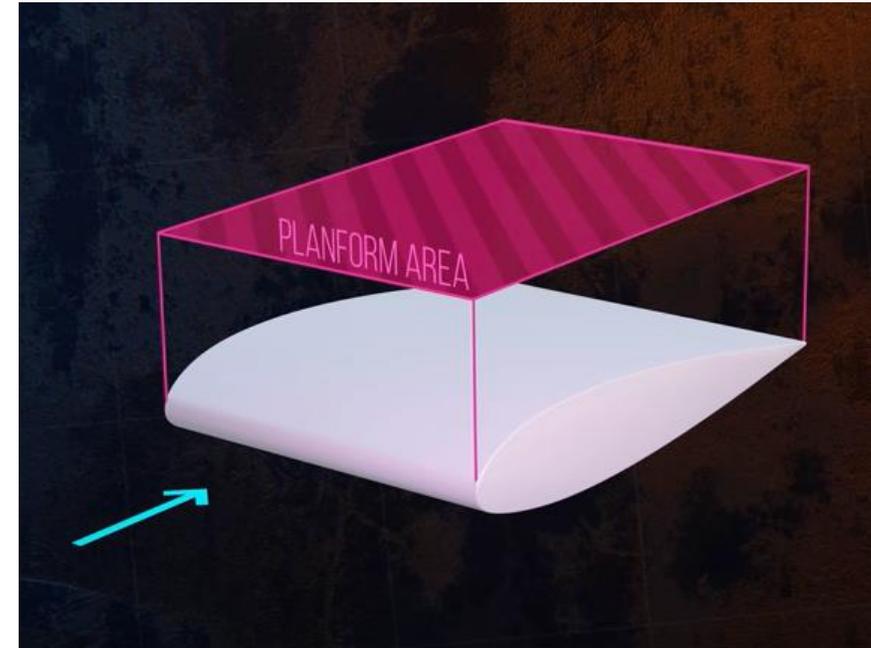
Formel für Auftrieb

$$F_A = c_A \frac{\rho V^2}{2} A$$

c_A Auftriebsbeiwert, dimensionslos

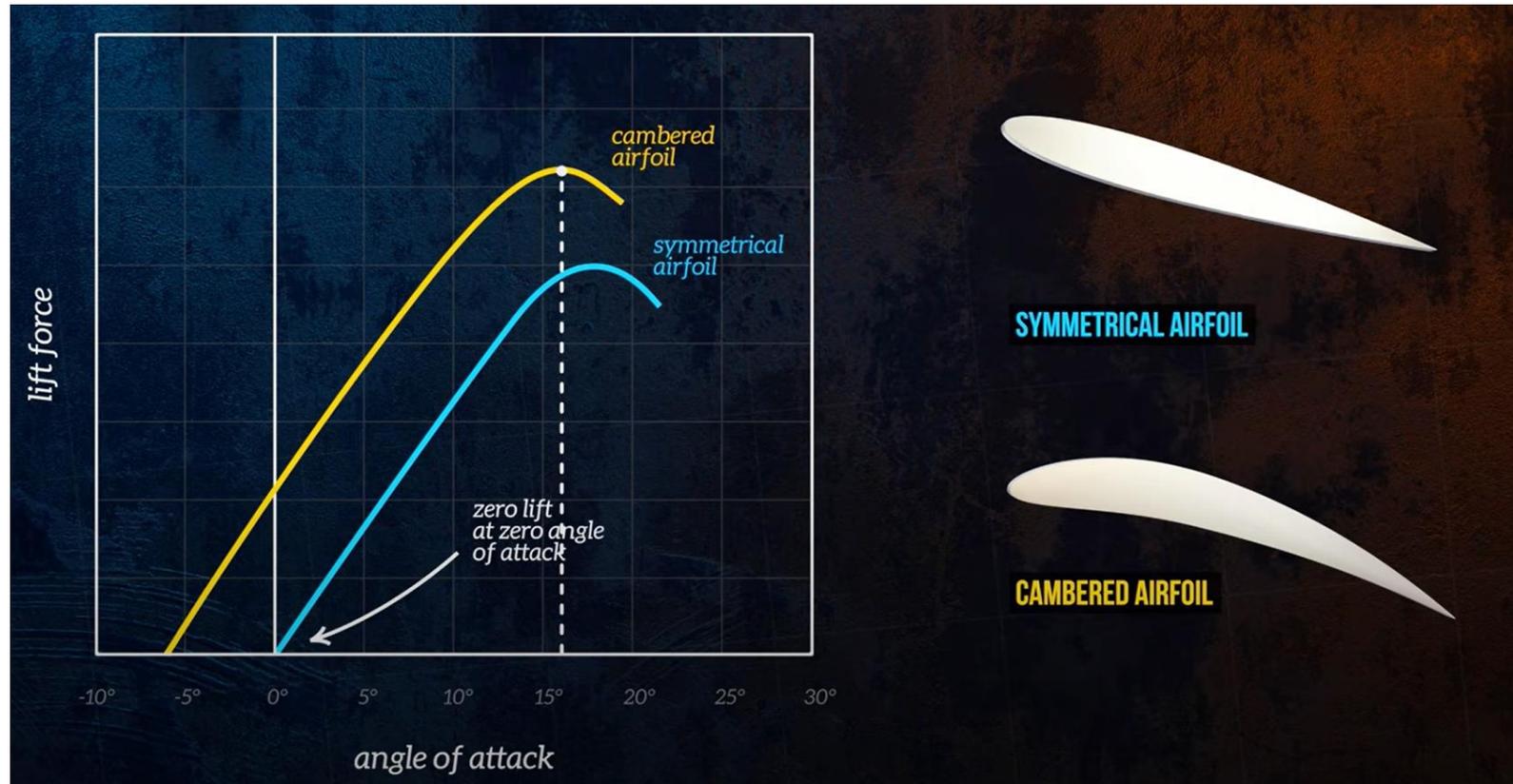
$\frac{\rho V^2}{2}$ dynamischer Druck

A Flügelreferenzfläche (nicht Projektionsfläche wie sonst)



https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU

Auftriebsbeiwert



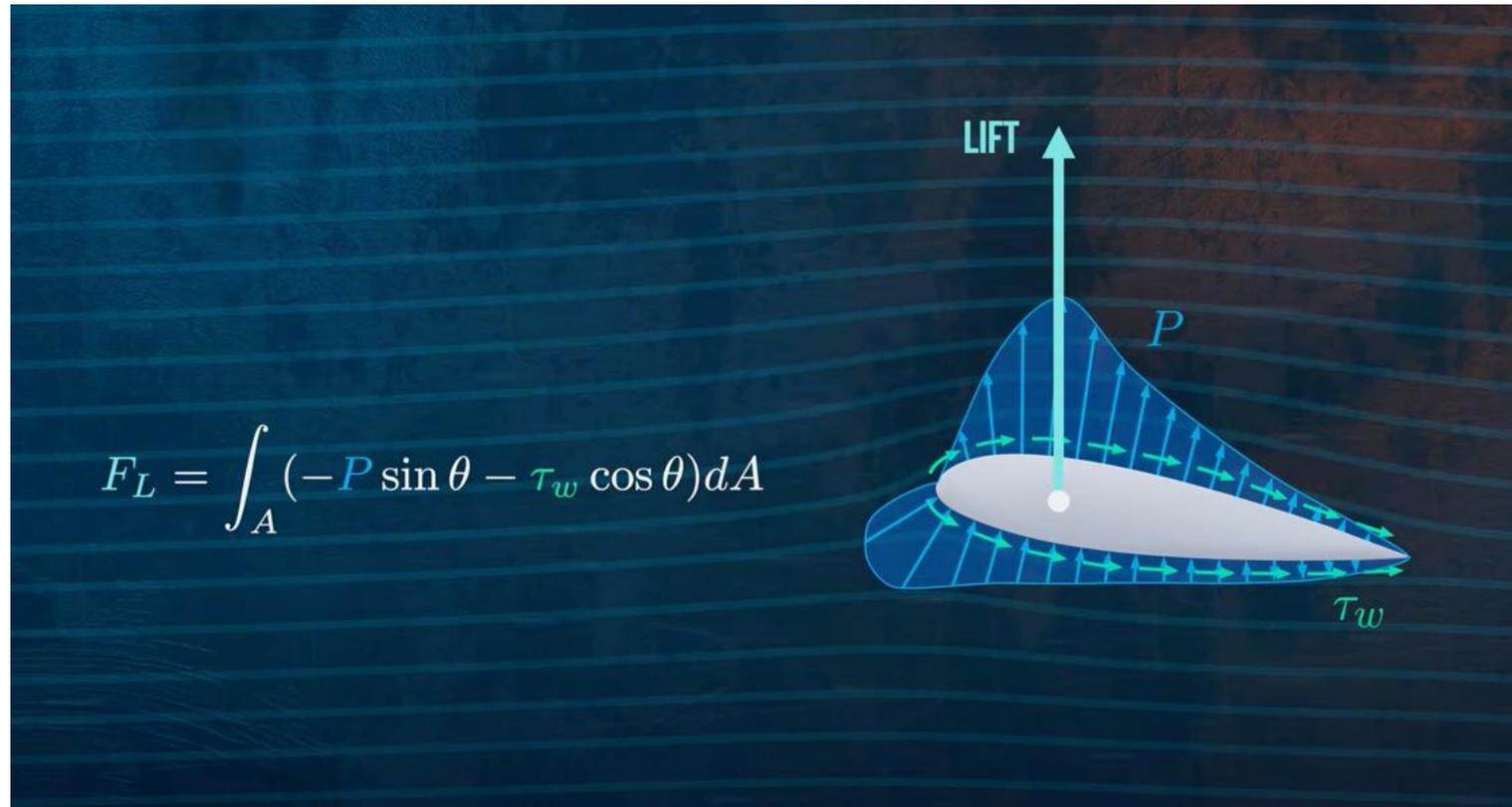
https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU

- Für kleine Anstellwinkel bis ca. 15° linear.
- Nullauftrieb bei nicht symmetrischen Profil vorhanden.
- Leitwerke und viele Kunstflugzeuge haben i.A. symmetrische Profile
- Bei größer werdenden Anstellwinkel kommt es zum gefährlichen Strömungsabriss (Stall).

$$c_A = c_{A,0} + c_{A,\alpha} \alpha$$

$c_{A,\alpha}$... Auftriebsanstieg

Luftkraft – Integration der Druckverteilung



$$F_L = \int_A (-P \sin \theta - \tau_w \cos \theta) dA$$

https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU

- **Druck** (normal auf Oberfläche) und **Wandschubspannungen** (Reibung, parallel zur Oberfläche)
- **resultierende Luftkraft** durch Integration

Gibt es wirklich eine Saugkraft?

- Kraftübertragung über Stöße der Teilchen (Impulsübertrag), äußert sich makroskopisch als Druck.
- **Auftrieb:** Druck an der **Unterseite muss größer als der Druck auf der Oberseite** sein.
- Der Druck an der Oberseite ist natürlich **immer positiv**.
- Darstellung in (a) verwirrend, da eine Saugkraft suggeriert wird, ist andererseits aber anschaulich

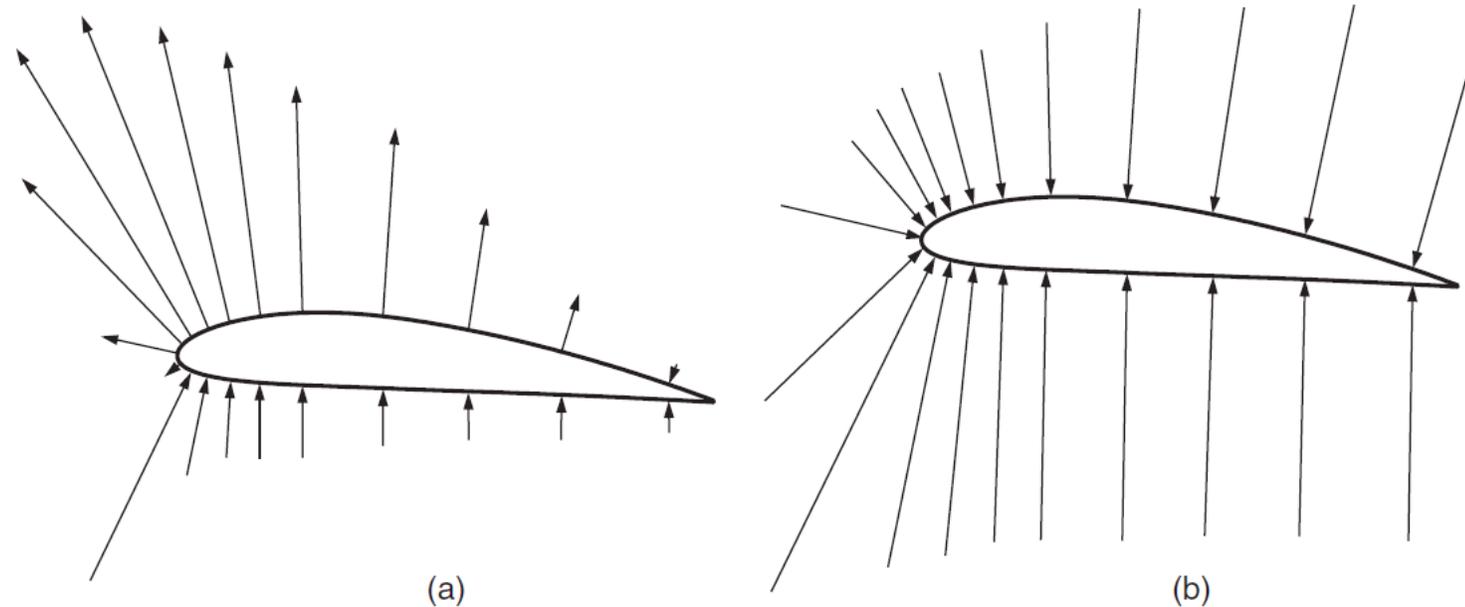
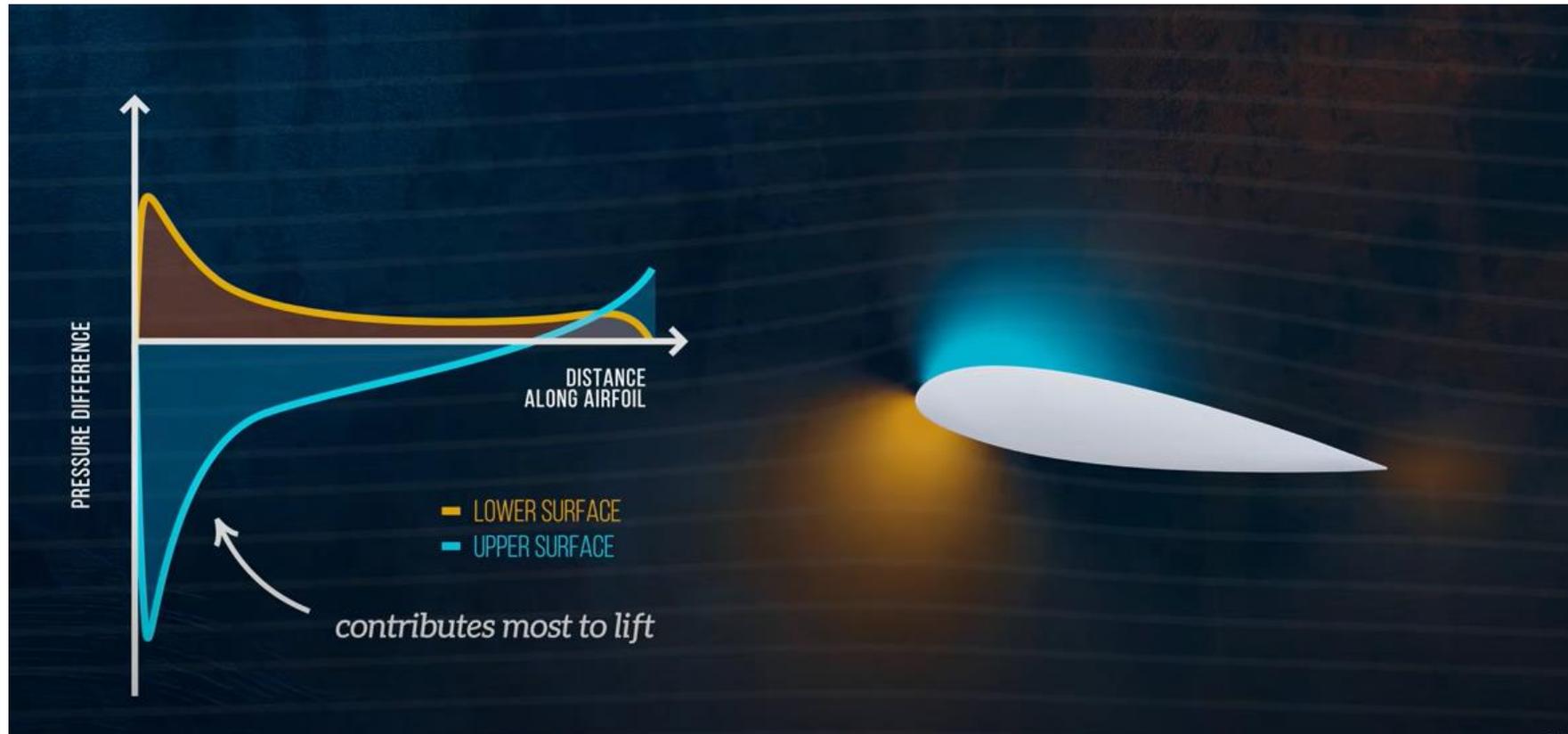


Figure 7.3.3 Airfoil pressure distributions represented graphically as vectors. (a) Arrows proportional to the pressure difference $p - p_\infty$. (b) Arrows proportional to the absolute pressure

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

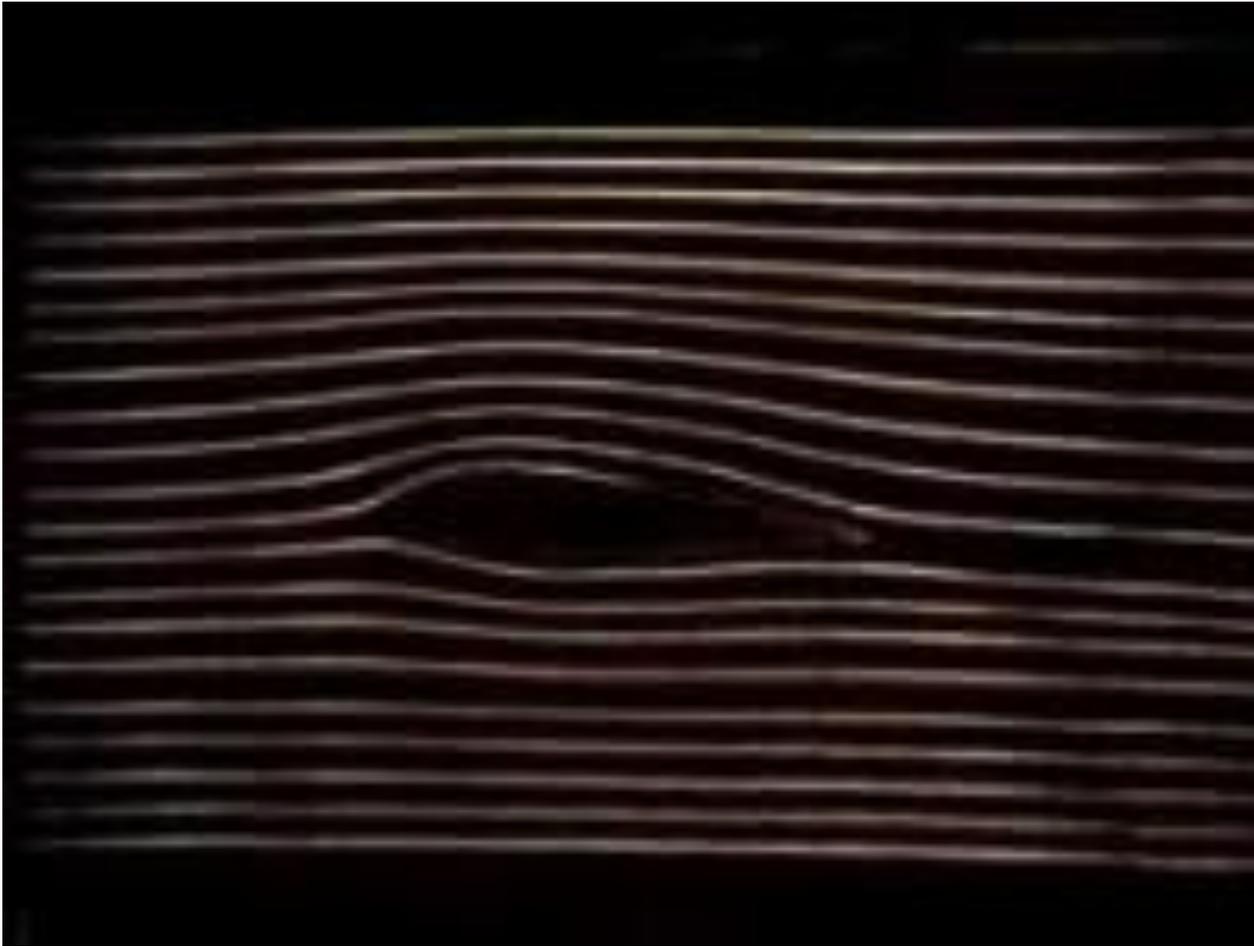
Alternative Darstellung der Druckverteilung am Profil



https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU

- Druckverlauf: dargestellt ist die Differenz zum Umgebungsdruck: $p - p_\infty$
- **Profiloberseite hat größeren Beitrag als Unterseite**

Strömungsabriss -Stall



<https://youtu.be/6UlsArvbTeo?t=51>

- Bei größer werdenden Anstellwinkel kommt es zum gefährlichen Strömungsabriss (Stall).
- Ablösung: Strömung muss gegen „Druckgradienten anlaufen“ und reißt dann ab.

Wie groß muss der Druckunterschied im Mittel sein?

Beispiel A320

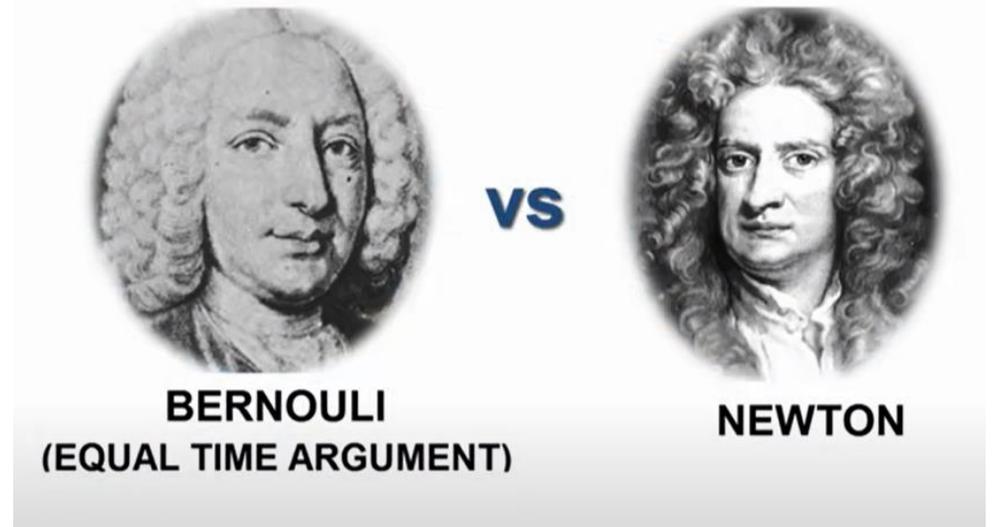
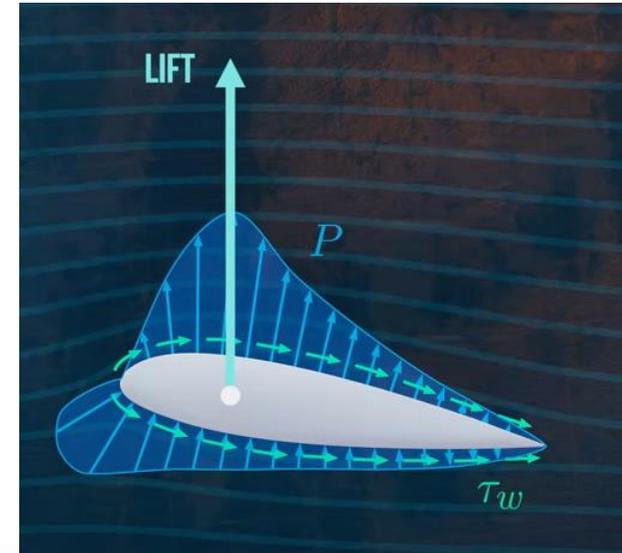
- MTOM: 78 t
- Flügelfläche: 122 m²
- Kraft pro m²: 6272 N/m²
(typische mittlere Flächenbelastung 300 bis 800 kg/m²)
- entspricht also 6272 Pa bzw. **63 hPa**
- **Wettergeschehen**: Hochdruck 1040 hPa, Tiefdruck 950 hPa, Differenz **90 hPa**

- Oberhalb der Tragfläche Schlechtwetter
- Unterhalb Schönwetter



Druckverteilung: Erklärungsmodelle

- Dass es für eine Auftriebskraft eine asymmetrische Druckverteilung benötigt ist klar.
- Aber wie kommt es nun zu dieser?
- (anschauliche) Erklärung der Druckverteilung ist bis heute auch unter Experten ein umstrittenes Thema.
- Prominenteste Erklärungsmodelle: **Bernoulli** oder **Newton**
- Viele falsche Modelle im Umlauf.



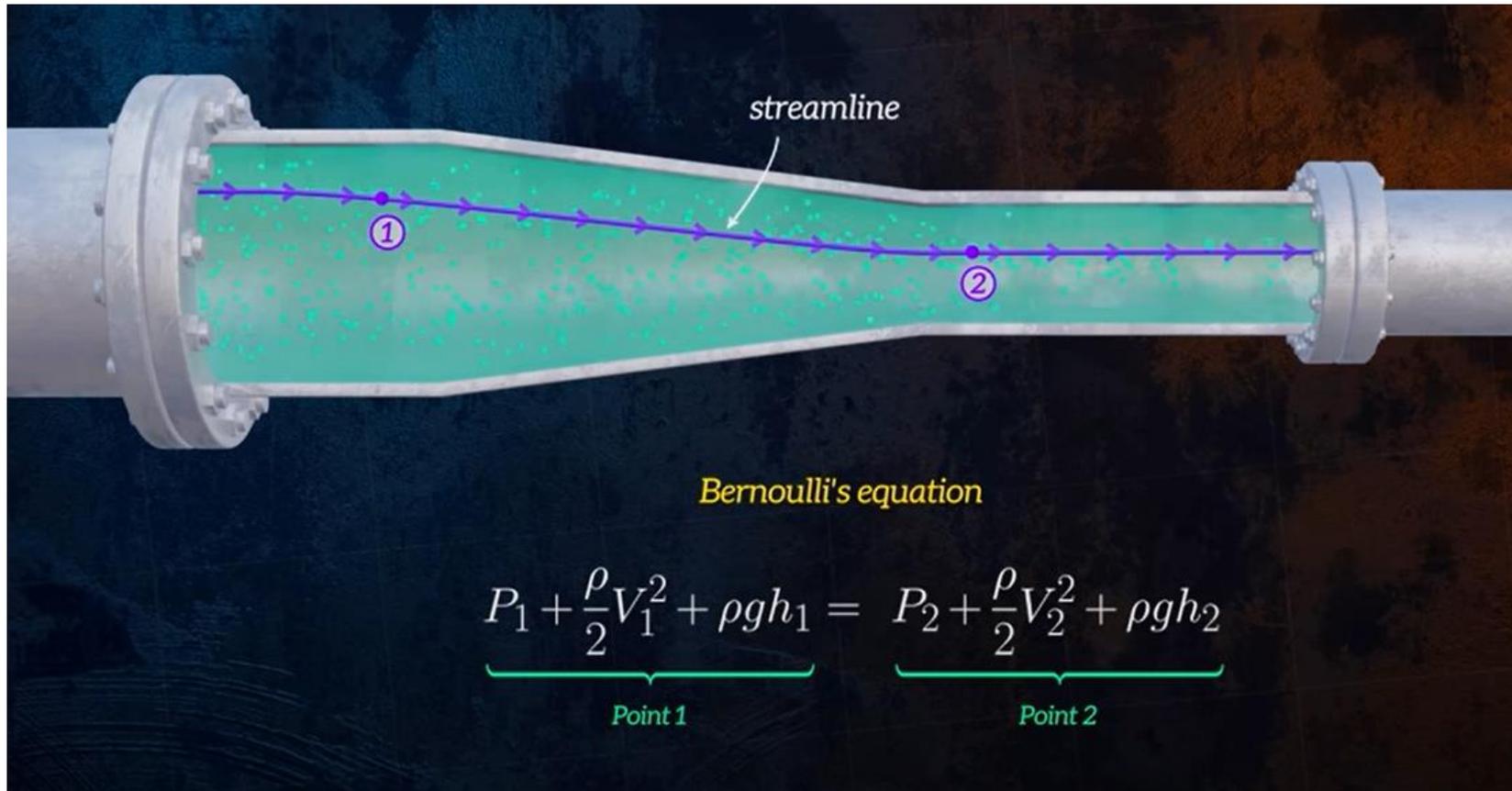
Bernoulli'sche Ansätze

- Equal Transit Time Theorie
- Venturi-Effekt, Tube Pinching

Bernoulligleichung

Herleitung:

1. **Kontinuitätsgleichung**, Annahme Fluid ist inkompressibel, bei Luft bis MACH 0.3 gut erfüllt
2. **Energieerhaltung**: Reibungsfrei, keine Viskosität, außerhalb der Grenzschicht gute Näherung



Daniel Bernoulli
(1700-1792)

Bernoulligleichung Versuche

Achtung: Bernoulligleichung **gilt nur entlang einer Stromlinie**

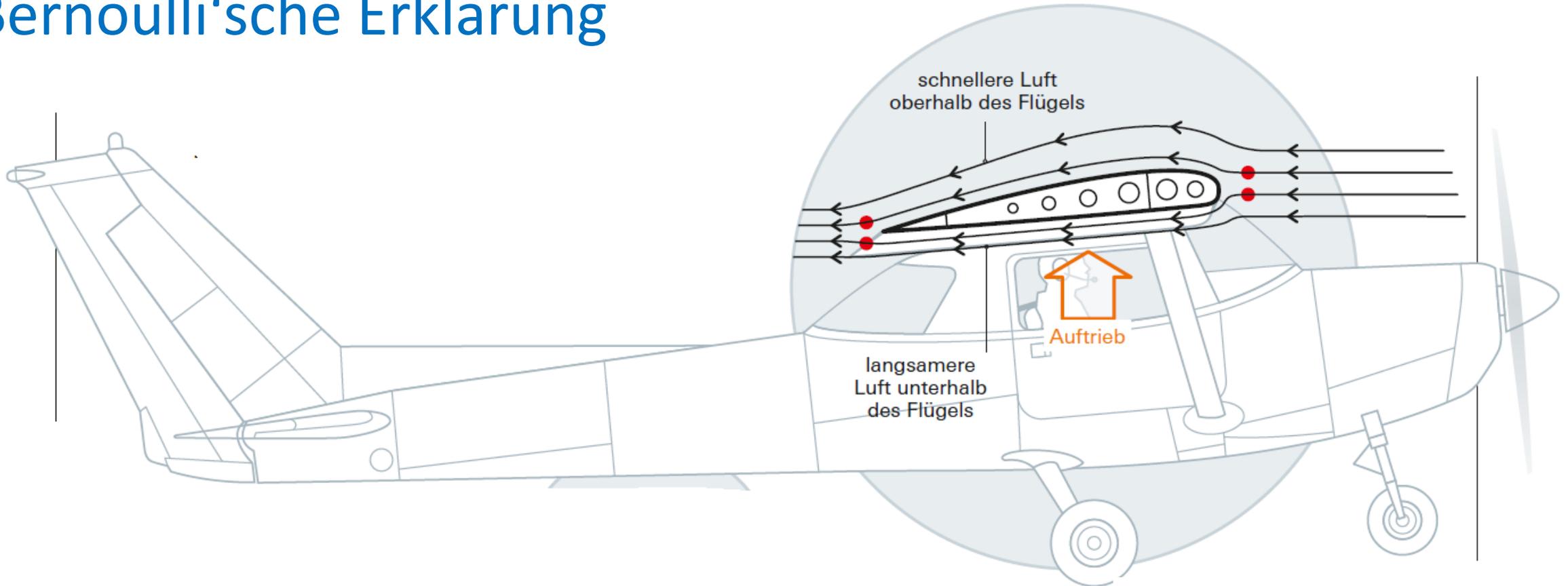
Versuch: Papier anblasen (falsch)



Das ist eine
Demonstration für den
Coandaeffekt und nicht
der Bernoulligleichung !

<https://youtu.be/BWvGE238DdE>

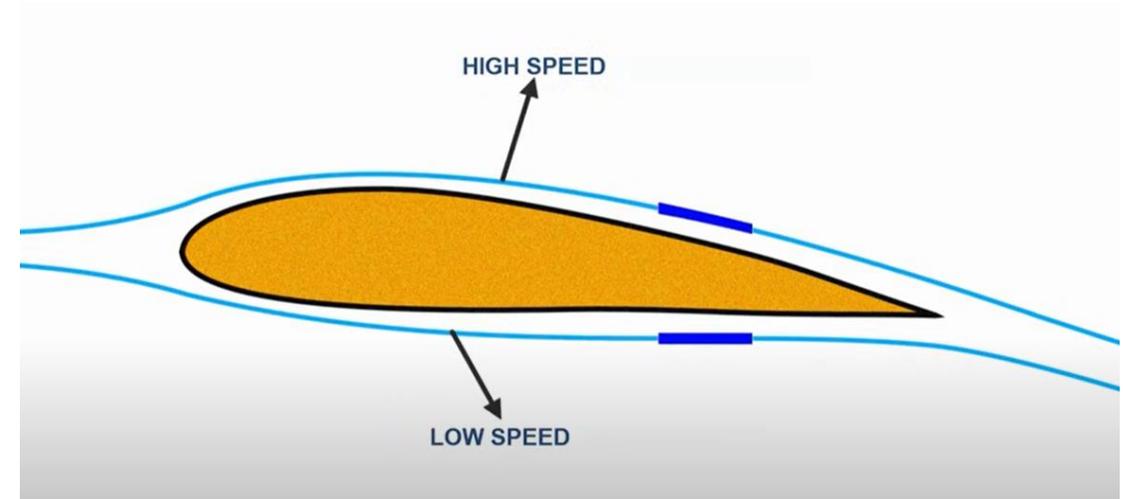
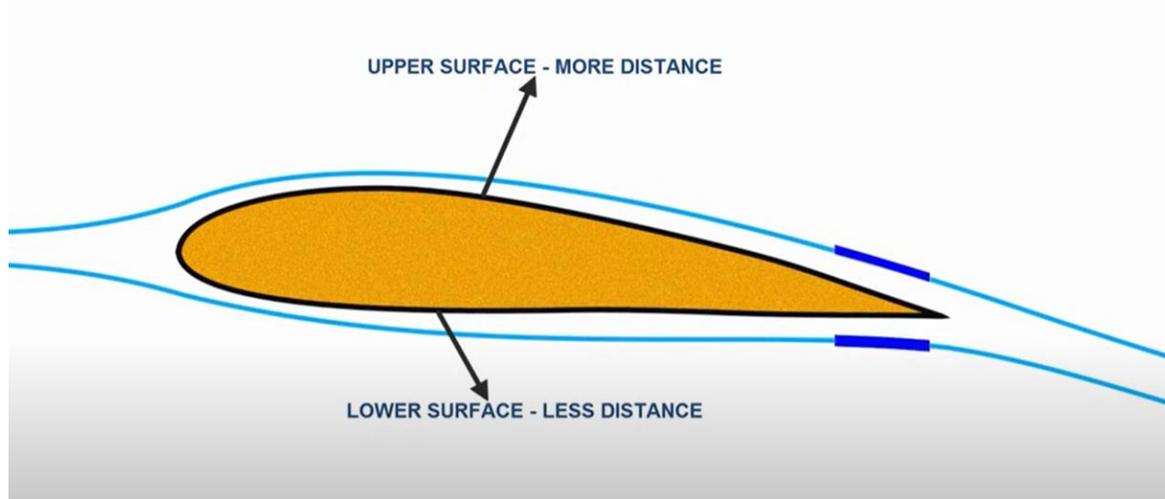
Bernoulli'sche Erklärung



Spektrum der Wissenschaft 5.20

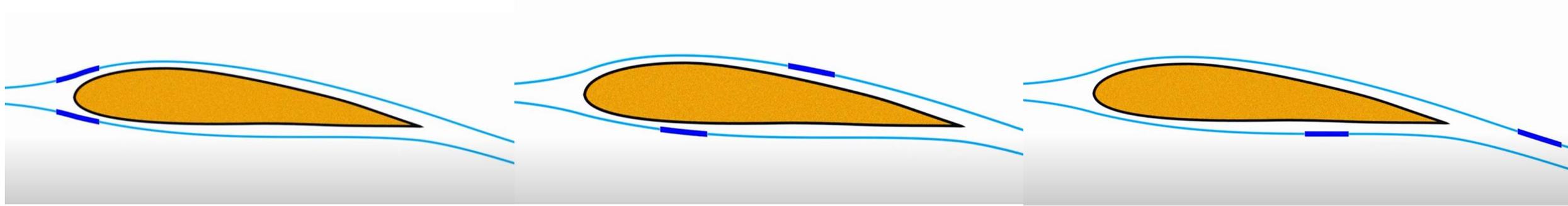
Wegen des **gekrümmten Profils** einer Tragfläche ist die Luft **an der Oberseite schneller** als an der Unterseite und hat daher einen **geringeren Druck**.

„Equal-Transit-Time“ Theorie **FALSCH**



- Stromlinien trennen sich am Profil.
- Teilchen müssen an **der Oberseite einen längeren Weg gehen** und müssen daher **schneller** sein, wenn sie sich an der Hinterkante wieder treffen.
- Bernoulli: auf Grund der größeren Geschwindigkeit an der Oberseite ist der Druck geringer als an der Unterseite und es entsteht ein Auftrieb.

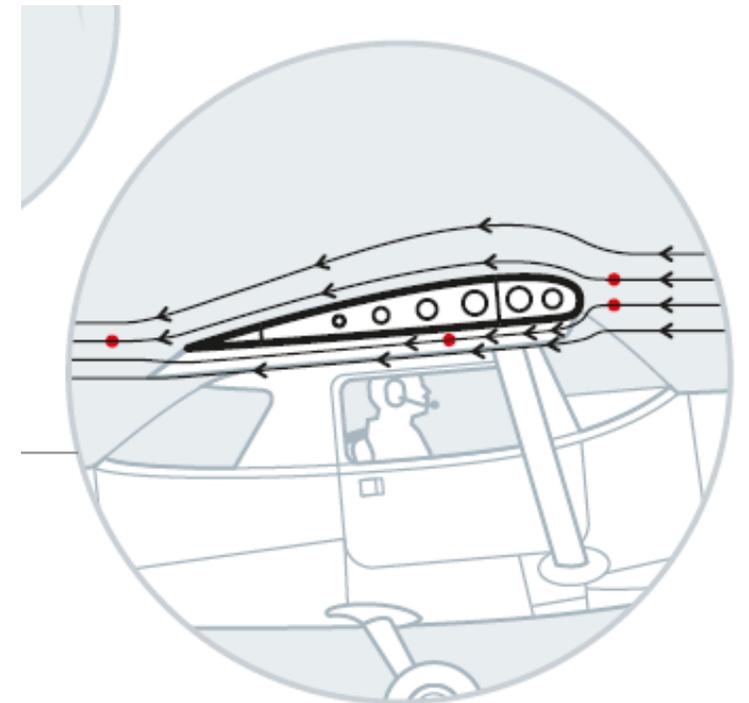
„Equal-Transit-Time“ Theorie **FALSCH**



ABER: warum sollten sich die Teilchen hinten wieder treffen? Es gibt dafür kein physikalisches Gesetz.

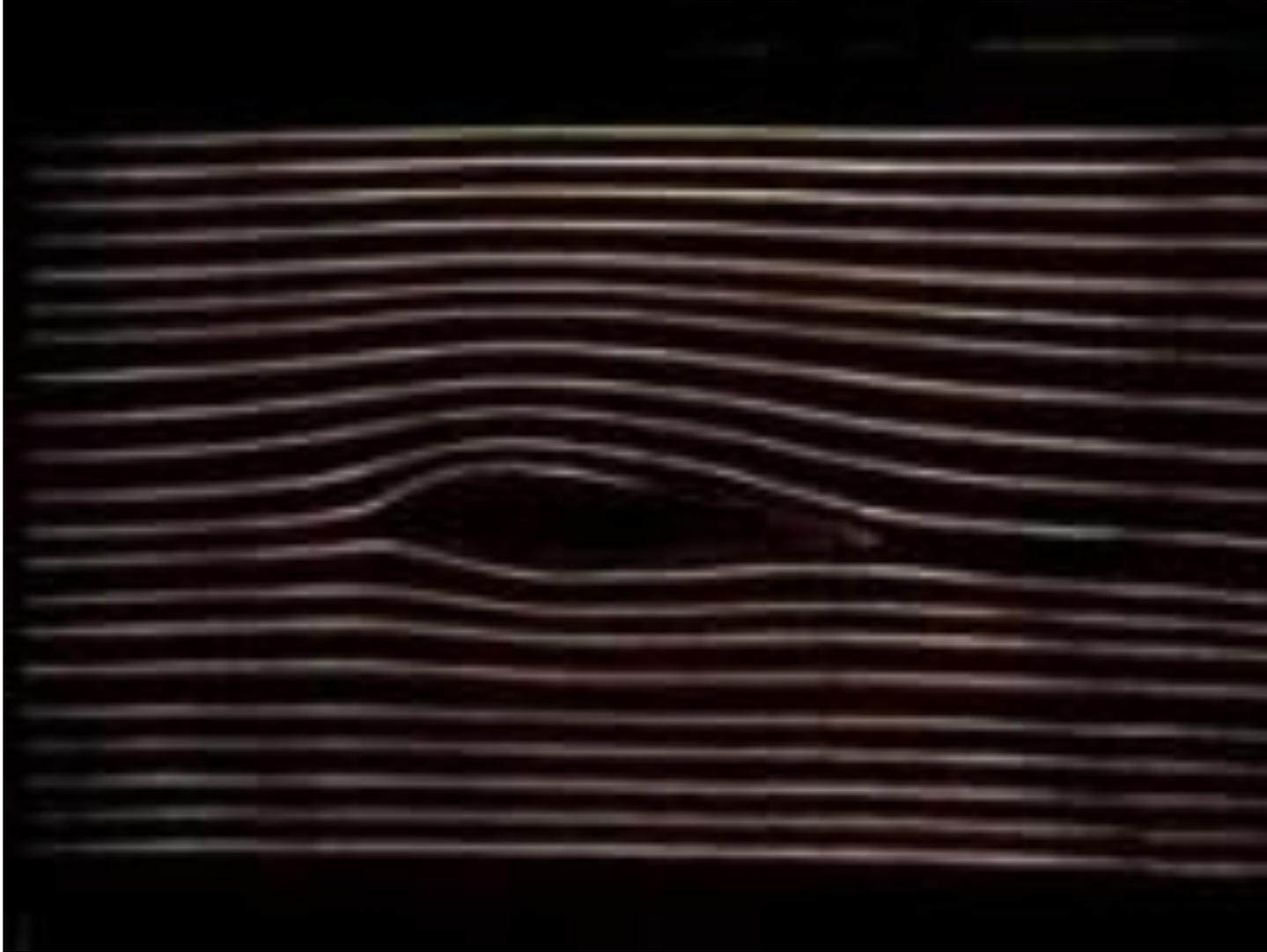
Tatsächlich sind die **oberen Teilchen** sogar **noch schneller** und **früher** als die unteren an!

Außerdem: Der Auftrieb würde mit der Equal-Transit-Time-Theorie unterschätzt.



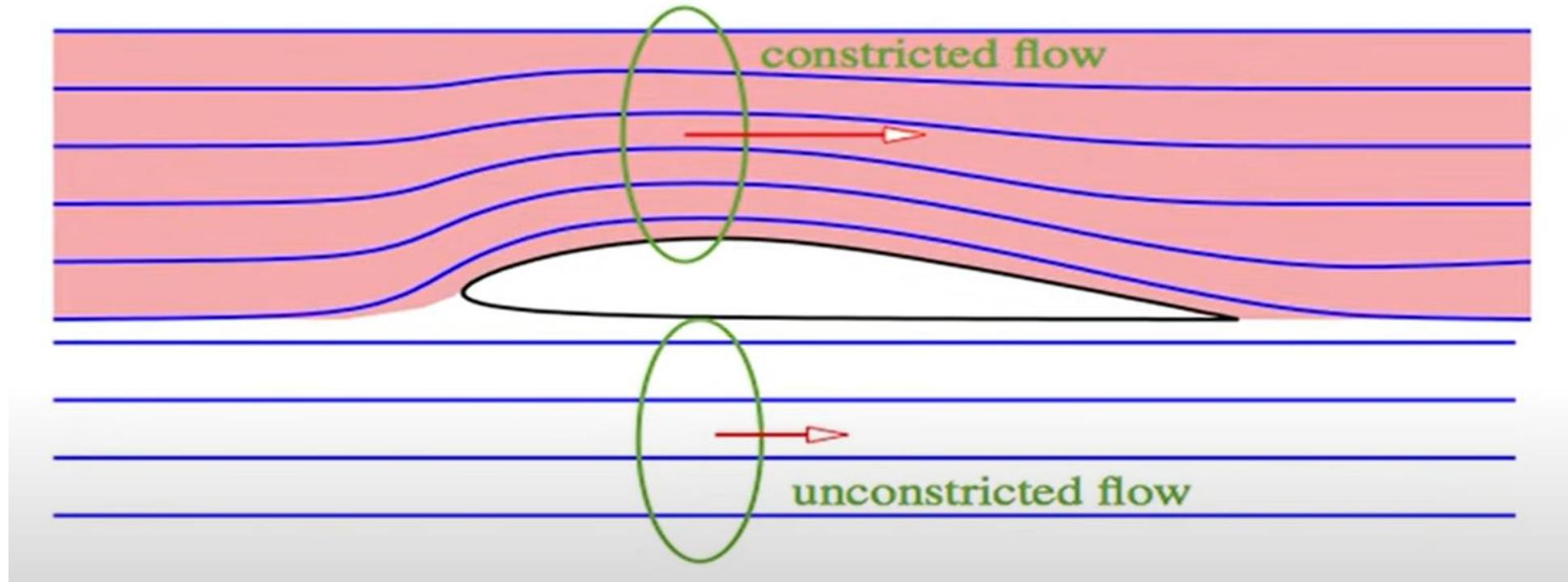
Spektrum der Wissenschaft 5.20

„Equal-Transit-Time“ Theorie **FALSCH**



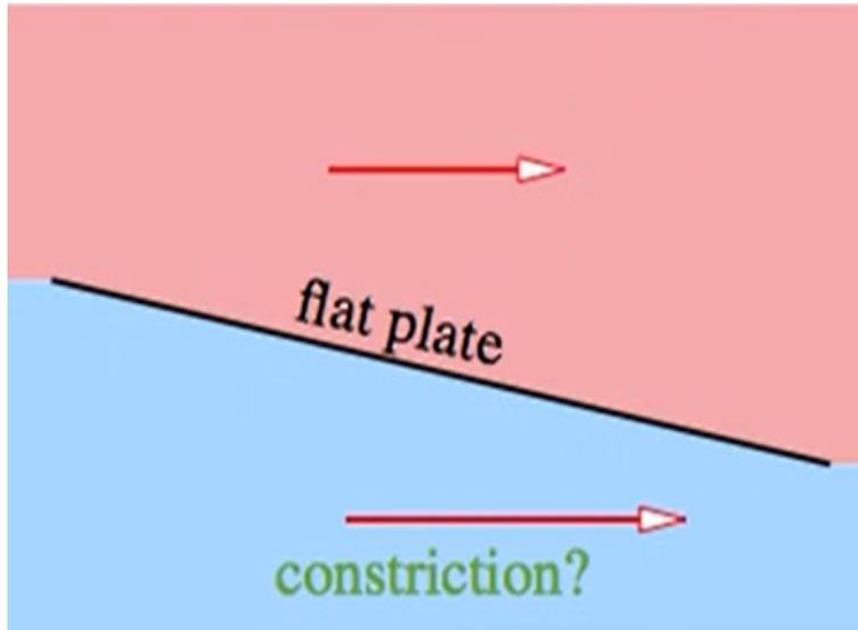
<https://youtu.be/6UlsArvbTeo>

Venturi Effekt Theorie **FALSCH**



- „Verengung an der oberen Fläche führt zur Geschwindigkeitserhöhung.
- Bernoulli: dadurch ist der Druck oberhalb geringer.

Venturi Effekt Theorie **FALSCH**



keine Wand!



- Erklärt Funktionieren der ebenen Platte nicht.
- Freie Strömung: es gibt keine Wände

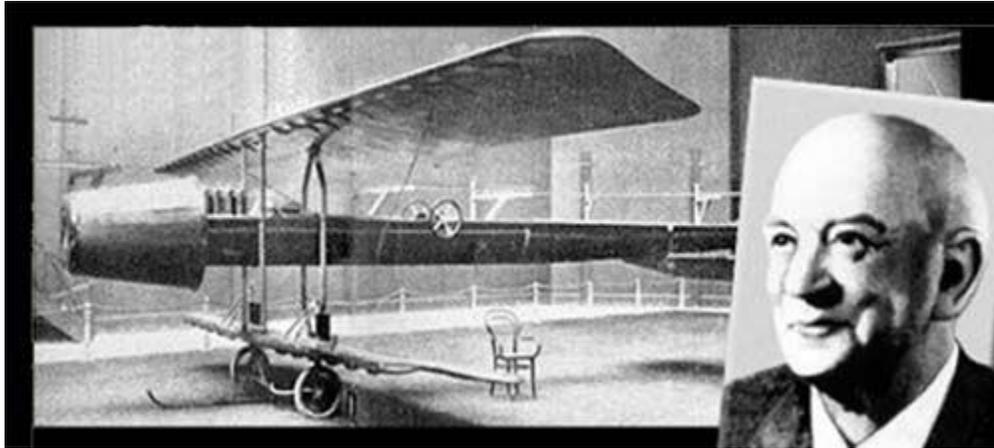
Resümee „Equal-Transit-Time“ Theorie

- Die Bernoulligleichung ist zwar korrekt, kann aber nicht erklären, warum die Geschwindigkeit an der Oberseite größer ist.
- **Ursache und Wirkung:** damit ein Fluid beschleunigt wird, braucht es einen Druckgradienten. Was kommt also vorher? Druck oder Geschwindigkeit?

Coanda-Effekt

Henri Coanda: rumänischer Physiker und Aerodynamiker

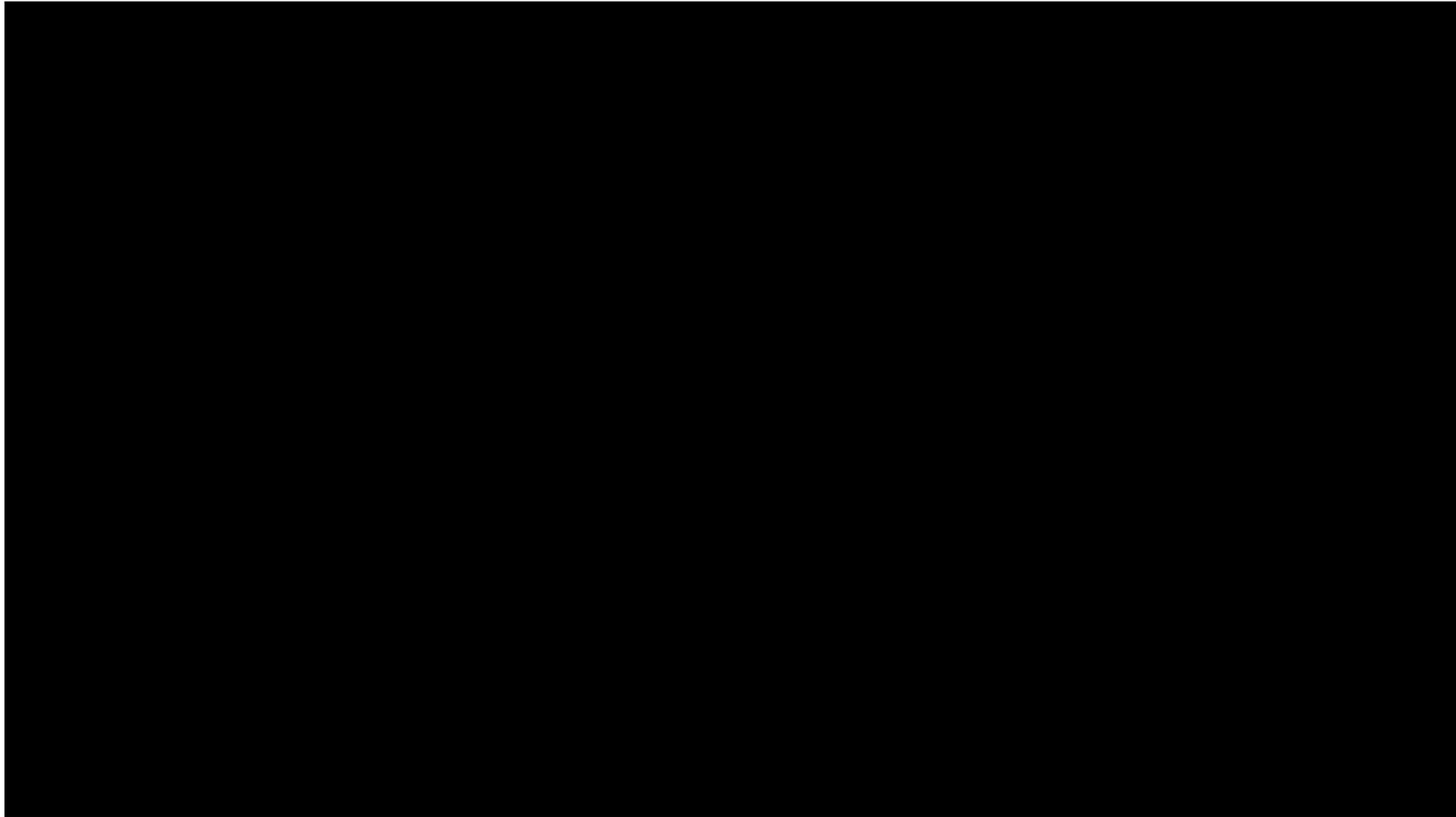
Baute 1910 seine Coanda-1910



Thermojet-Triebwerk:
Heiße Abgasstrahlen liefen der
Rumpfkontur entlang und zerstörten
das Flugzeug.

Nach ihm benannter Effekt eines Fluids einer konvexen Oberfläche entlangzulaufen.

Coanda-Effekt



<https://www.youtube.com/watch?v=NvzXKZNJ7ZU>

Video: Experimente zum Coandaeffekt (mit Luftströmung)

Coanda-Effekt



(a)



(b)

Figure 7.3.6 Water-faucet experiment that is sometimes proposed as a demonstration of the “Coanda effect” but actually demonstrates molecular attraction and surface tension (Photos by the author). (a) The slowest coherent stream that an ordinary garden nozzle can produce enters vertically downward on the left, adheres to the surface of a drinking glass, and is deflected through more than 90° . (b) A somewhat faster stream from same nozzle breaks up and is not deflected nearly as much

Experiment mit Wasser ist nicht zur Erklärung des Coandaeffekts geeignet.

(War also im Video falsch)

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

Coanda-Effekt: Erklärung

- **Begrenzter Strahl** mit mehr Totalenergie als in der Umgebung (**gleiches Medium**).
- Turbulente Strömung am Rand reißt Luft mit.
- Luft strömt von der Umgebung nach.
- Durch Verengung kann der Nachstrom nicht mehr folgen und Strömung legt sich an.

Funktioniert nur bei einem Strahl aus einer Düse.

Gilt nicht für freie Strömungen (Wind).

Kann daher nicht zur Erklärung der Umströmung herangezogen werden.

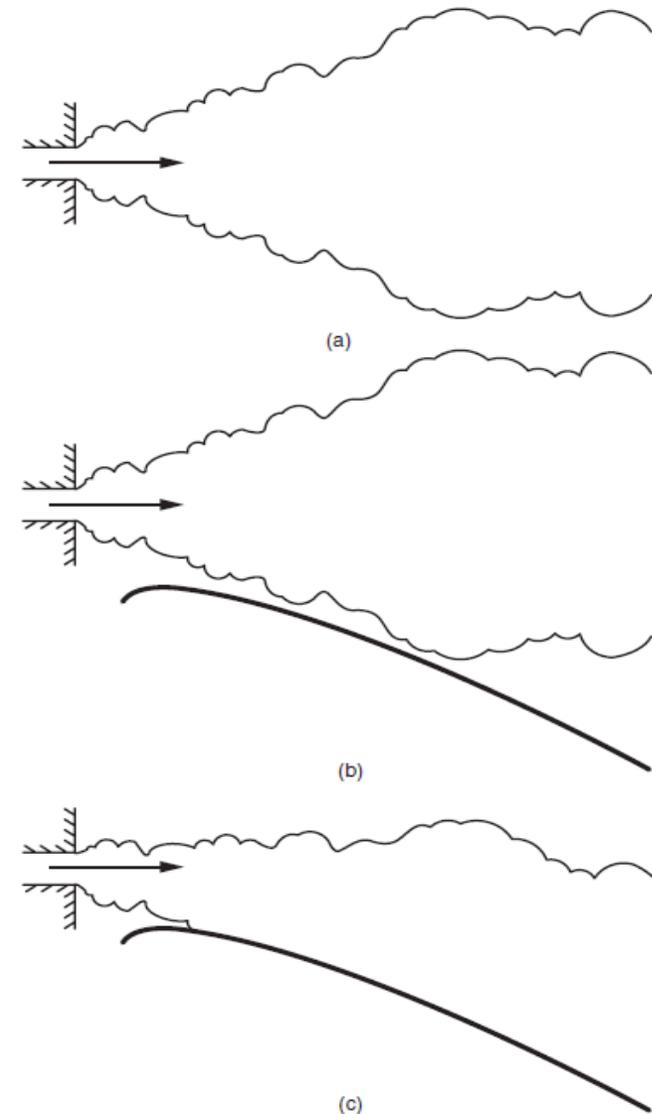
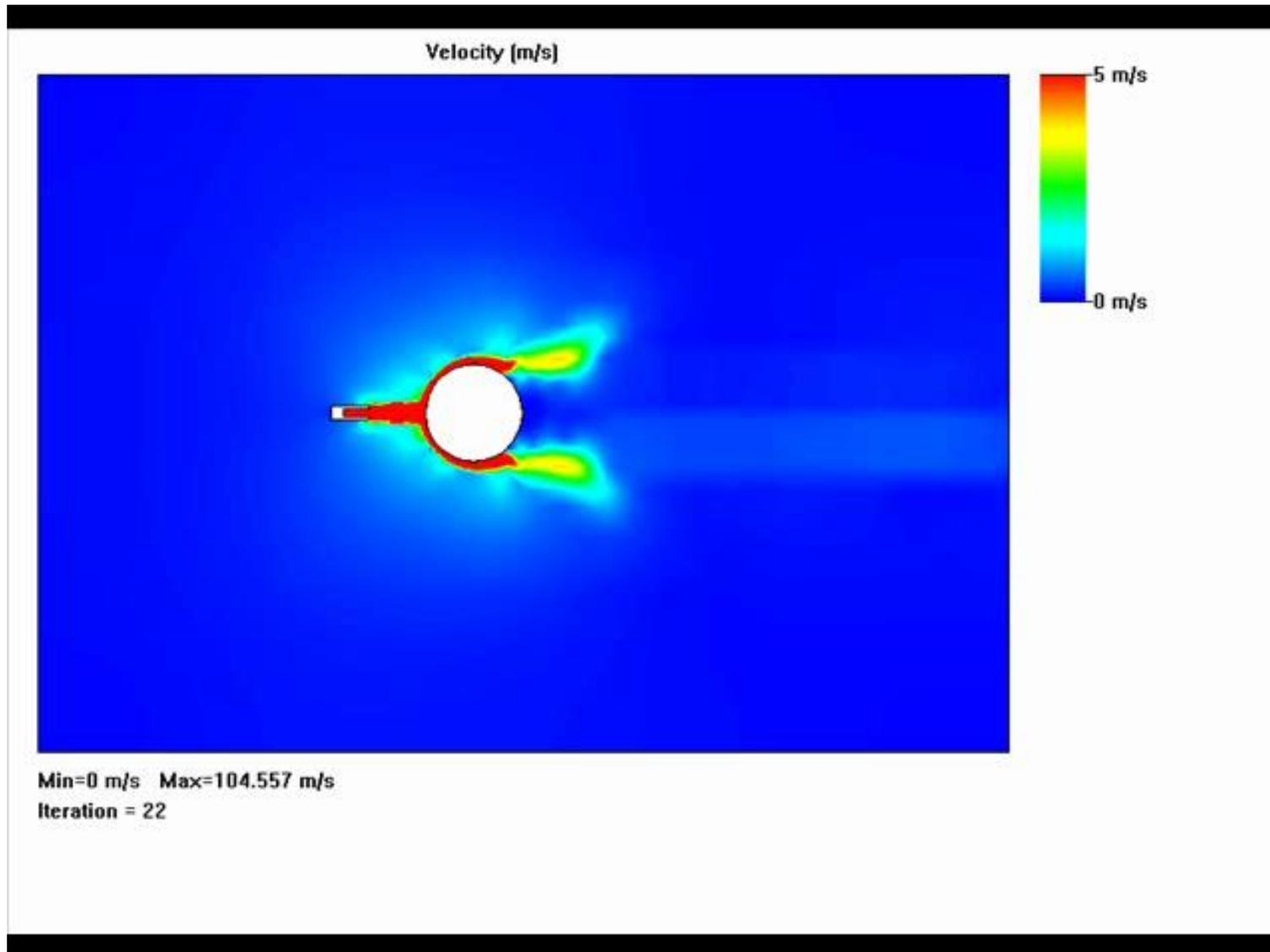


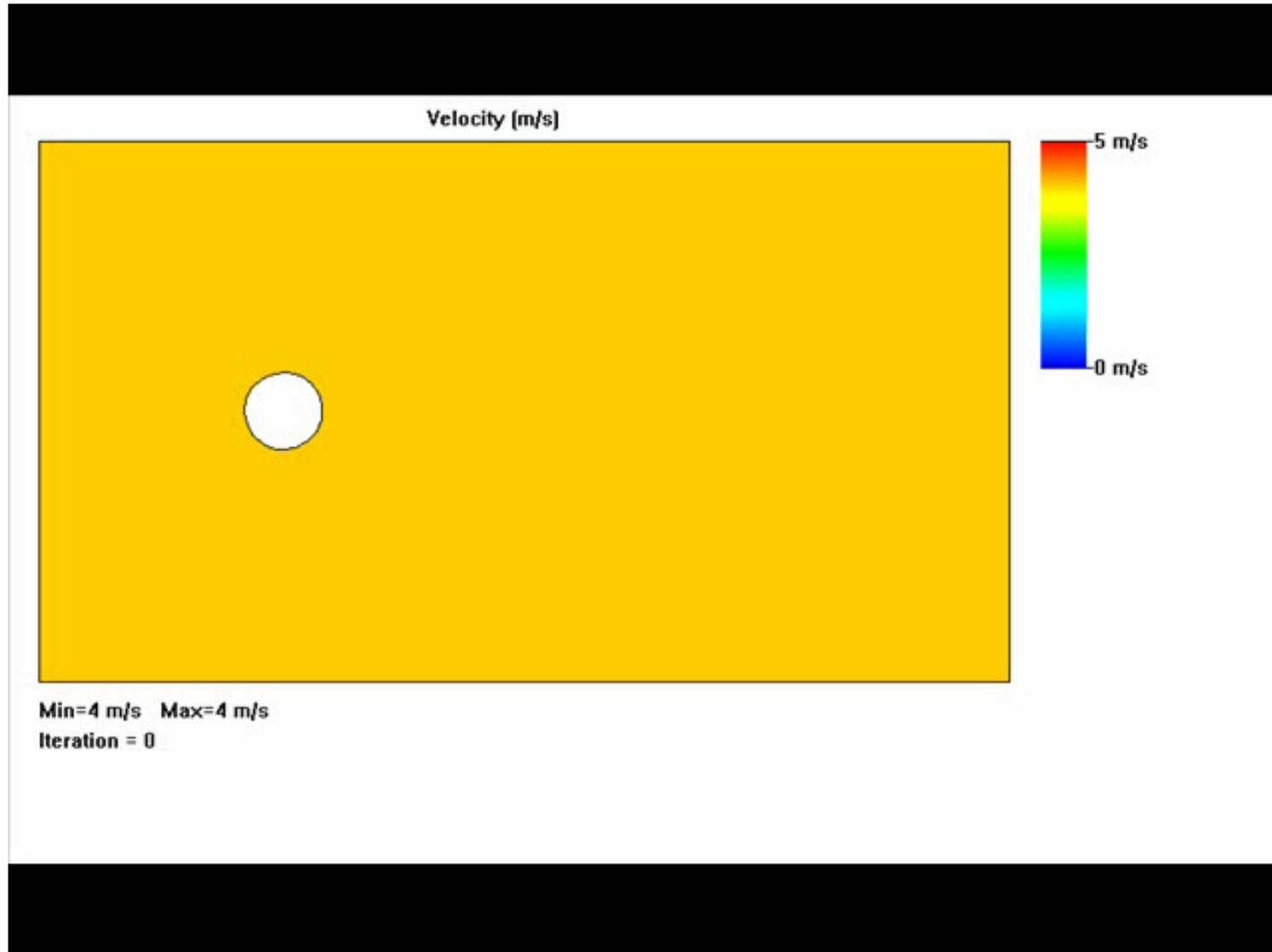
Figure 7.3.4 Illustration of the Coanda effect. (a) Isolated free jet in otherwise quiescent air. (b) Curved surface added adjacent to the jet, but not altering the flow. (c) Jet attached to the curved surface

Coanda-Effekt: CFD Simulationen



Begrenzter Strahl

Coanda-Effekt: CFD Simulationen



freie Strömung

Newton'scher Ansatz

- Partikel – Kinetik – Theorie

Zweite Newton'sche Axiom: Aktionsprinzip

Aktionsprinzip:

Eine **zeitliche Änderung** der **Bewegungsgröße** (Impuls $m\vec{v}$) ist der bewegenden **Kraft**, durch die sie verursacht wird, **proportional und verläuft in Richtung** der Kraft.

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}$$

speziell für $m = \text{const}$: $\frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$

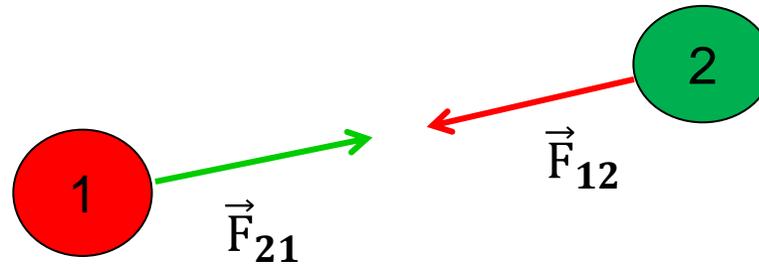
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Dritte Newton'sche Axiom: Reaktionsprinzip

Reaktionsprinzip:

Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft (\vec{F}_{12}) (actio) aus, dann übt der Körper 2 auf den Körper 1 die **gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete** Kraft (\vec{F}_{21}) aus (reactio).

actio est reactio



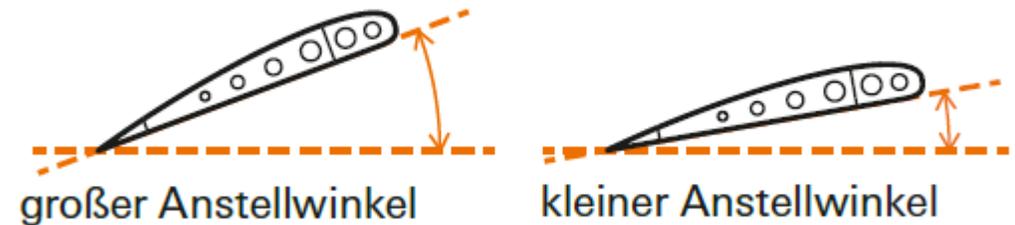
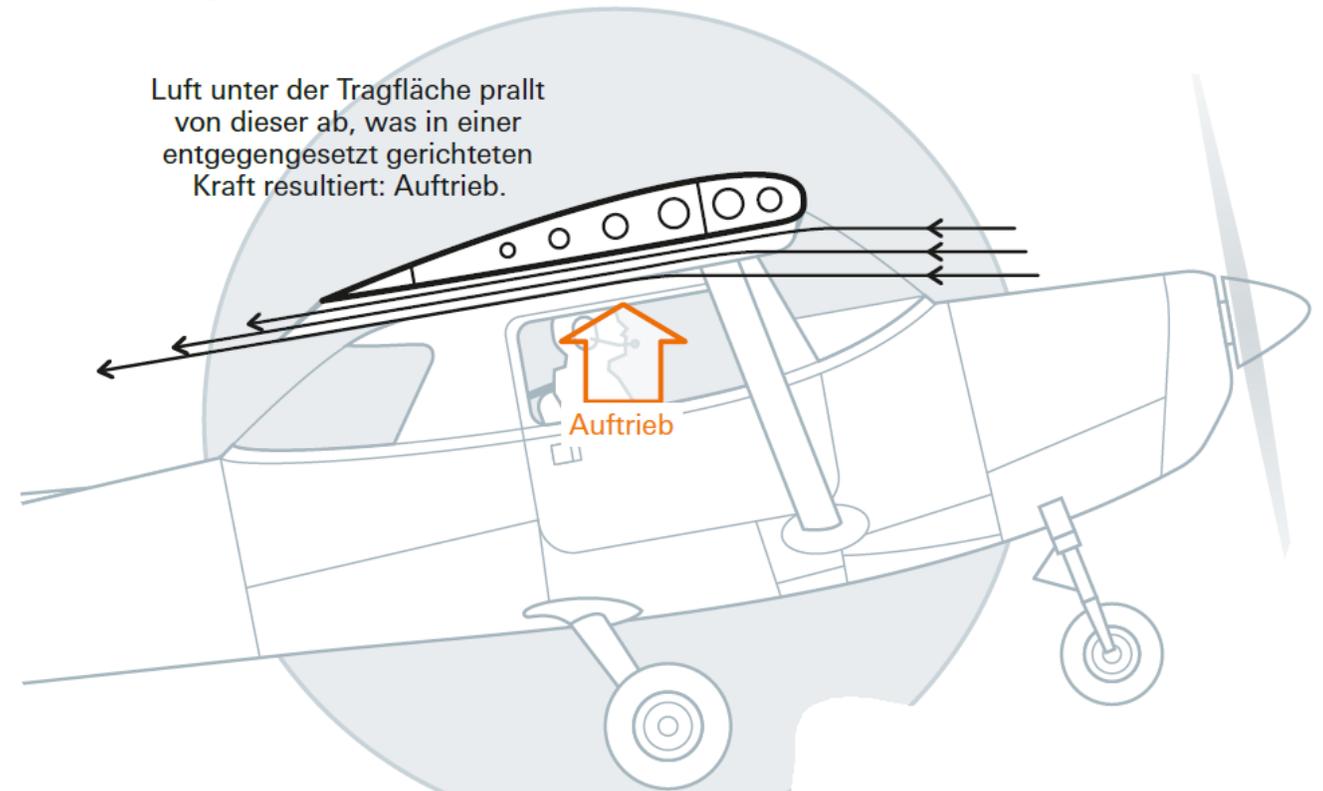
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Kräfte treten also immer paarweise auf.

Gilt für Kontaktkräfte, als auch für Fernwirkungskräfte (Gravitation)

Partikel-Kinetik-Theorie (Newton)

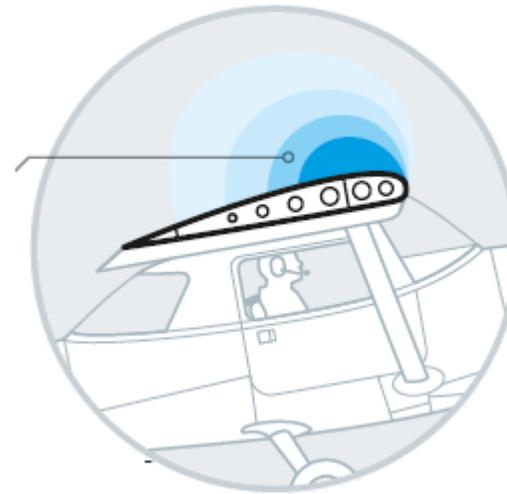
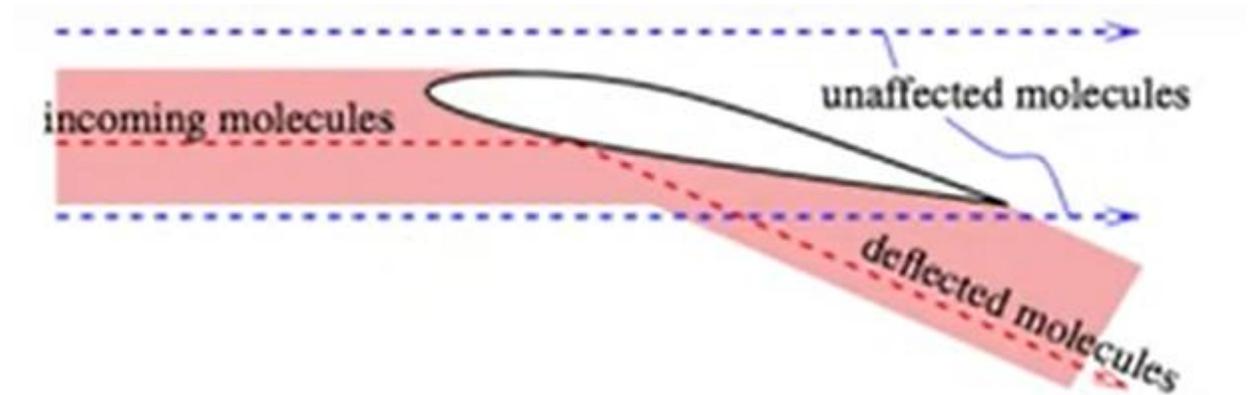
- Moleküle treffen auf die Unterseite der Tragfläche auf.
- **Impuls** wird nach unten **ablenkt** (durch Kraft von Profil auf Moleküle).
- Nach **actio est reactio** entsteht eine Gegenkraft mit Auftriebskomponente.
- Funktioniert mit jedem Profil, ebener Platte und kopfüber.
- Grundsätzlich besser geeignet.



Partikel-Kinetik-Theorie (Newton): Mängel

- Kraft wäre proportional zu $\sin^2(\alpha)$
 - ein Sinus wegen Projektion der Fläche (Massenstrom)
 - zweiter Sinus wegen der Ablenkung
 - Auftrieb ist aber linear mit α

- Was passiert oberhalb des Profils?
- Warum wird auch die Strömung oberhalb abgelenkt, und zwar signifikant?
- Kann Druckverteilung oberhalb nicht wirklich erklären.



Spektrum der Wissenschaft 5.20

„Gute Erklärung“

Umströmung der Tragfläche - Geschwindigkeitsfeld

- Aufgrund der unregelmäßigen (thermischen) **Bewegung stehen die Teilchen ständig über Stöße in Wechselwirkung** miteinander.
- Luft kann daher als zusammenhängendes, kontinuierliches Medium betrachtet werden .
- Luft **umströmt das Profil** und wird auf Grund der Form bzw. des Anstellwinkels nach **unten abgelenkt**.
- Geschwindigkeitsfeld

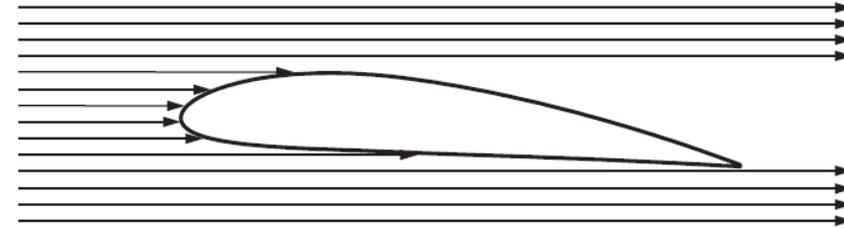


Figure 7.3.9 If molecules had no random motion and never interacted with each other, they would fly directly into the forward-facing parts of the airfoil and not touch the aft-facing parts

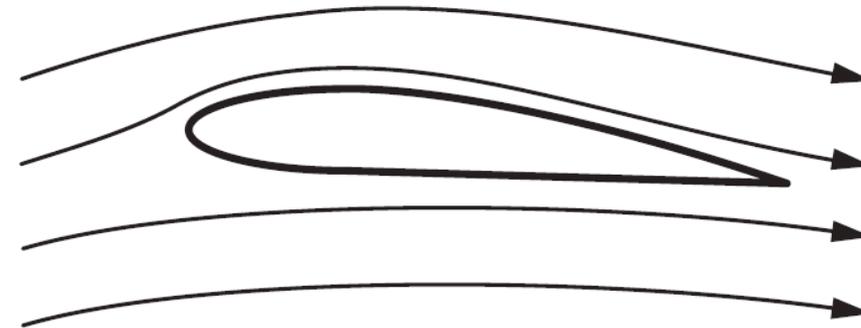


Figure 7.3.10 Because of the random motion and many collisions among its molecules, a fluid actually flows like a continuous material, deforming and changing course to flow around the airfoil, in what is called a *flowfield*

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

Umströmung der Tragfläche - Druckfeld

- Die Strömung wird über einen **weiten Bereich oberhalb und unterhalb** der Tragfläche beeinflusst. Auch **vor und nach** der Tragfläche.
- **Inhomogenes Druckfeld** über einen weiten Bereich rund um die Tragfläche.
- Druck- und Geschwindigkeitsfeld **beeinflussen sich gegenseitig und halten sich gegenseitig aufrecht.**
- **Kein einseitiges Ursache-Wirkungsprinzip**

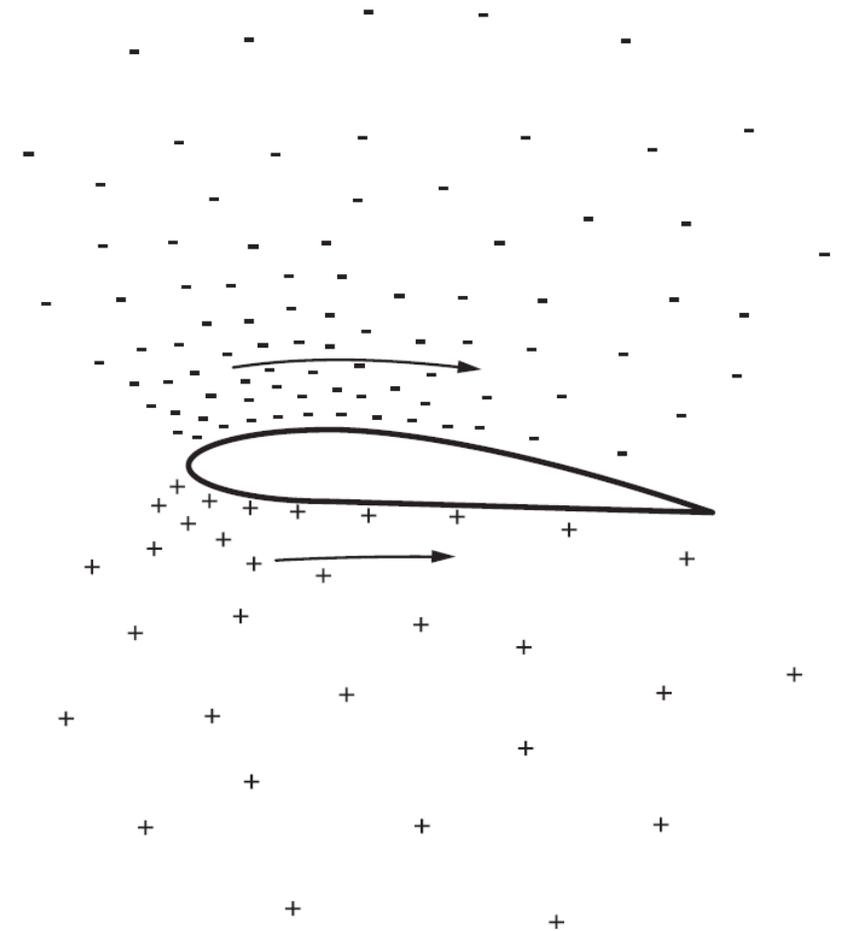


Figure 7.3.11 Illustration of the *pressure field* and the *velocity field* around a lifting airfoil. Minus signs indicate pressure lower than ambient, and plus signs indicate pressure higher than ambient. The tighter the spacing of the symbols, the larger the pressure difference

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

Kraftwirkungen auf Fluidelemente

- Druckgradient für Beschleunigung notwendig.
- Trägheit der Luftmassen als Gegenkraft hält wiederum den Gradienten aufrecht.
- Es muss also Geschwindigkeits- und Druckfeld immer zusammen betrachtet werden und nicht aus dem einen folgt das andere oder umgekehrt.

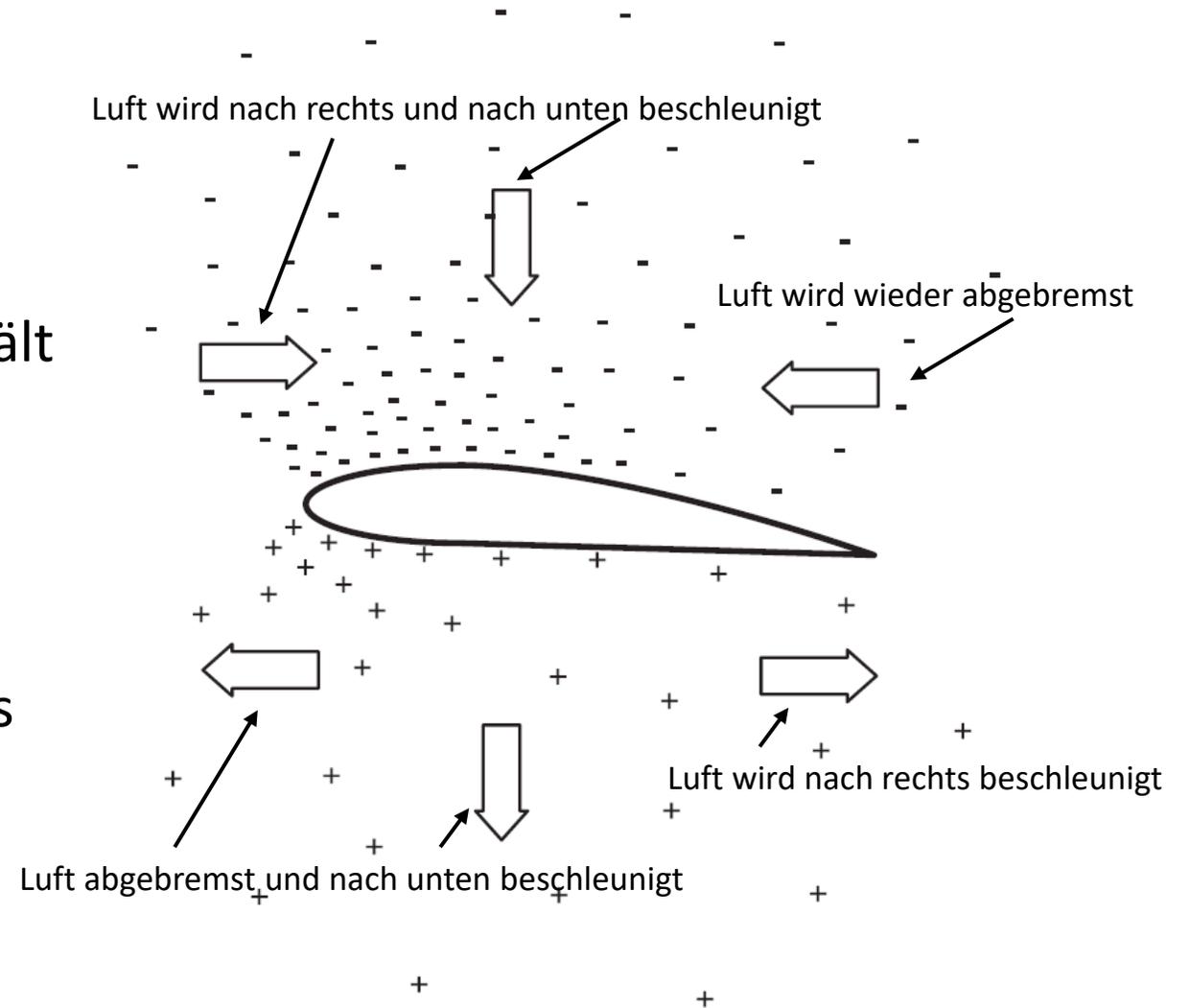
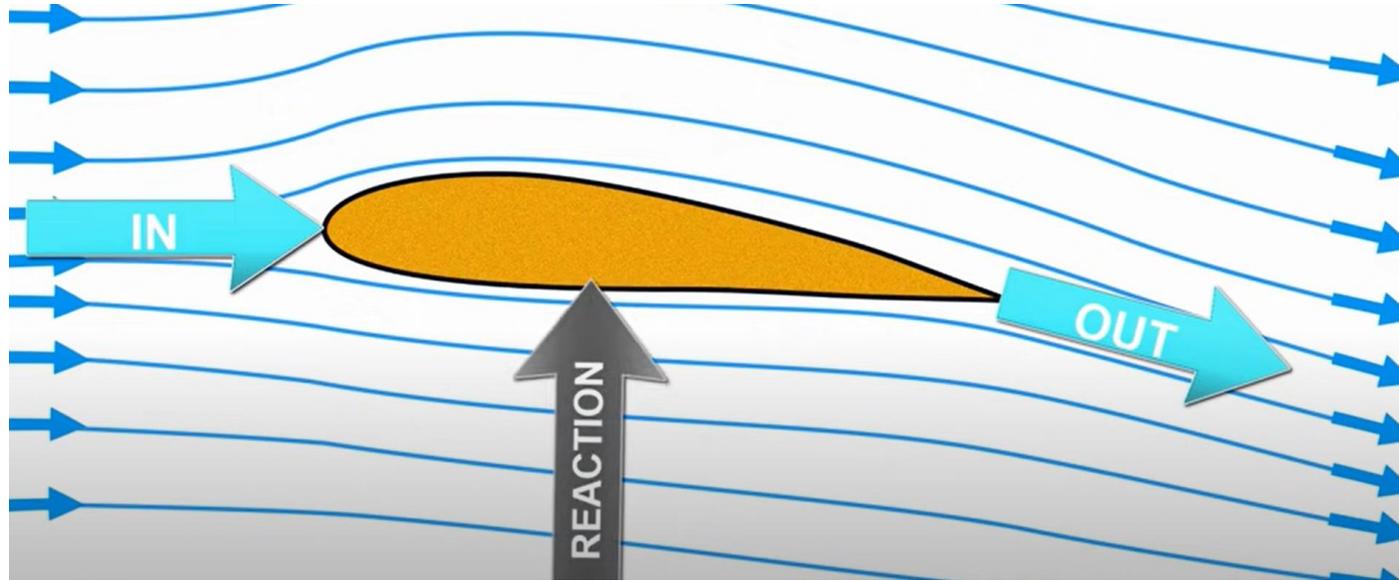


Figure 7.3.13 Pressure differences exert net forces on fluid parcels in different parts of the flowfield as indicated by the block arrows, and these forces are balanced by accelerations of the fluid parcels in the same directions

Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013

Newton: Kraft durch Impulsablenkung

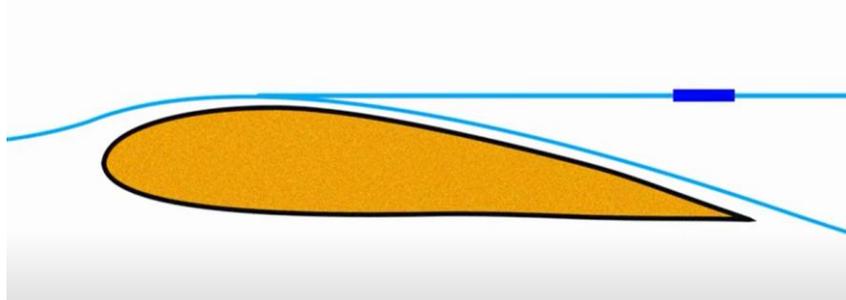


1. Luft **umströmt das Profil** und wird auf Grund der Form bzw. des Anstellwinkels nach **unten abgelenkt**.
2. Die **Auftriebskraft** ist eine **Reaktionskraft**, welche durch die **Ablenkung des Luftstromes nach unten** entsteht.
3. Sie hängt von der Größe der Ablenkung und vom Luftmassenstrom ab.

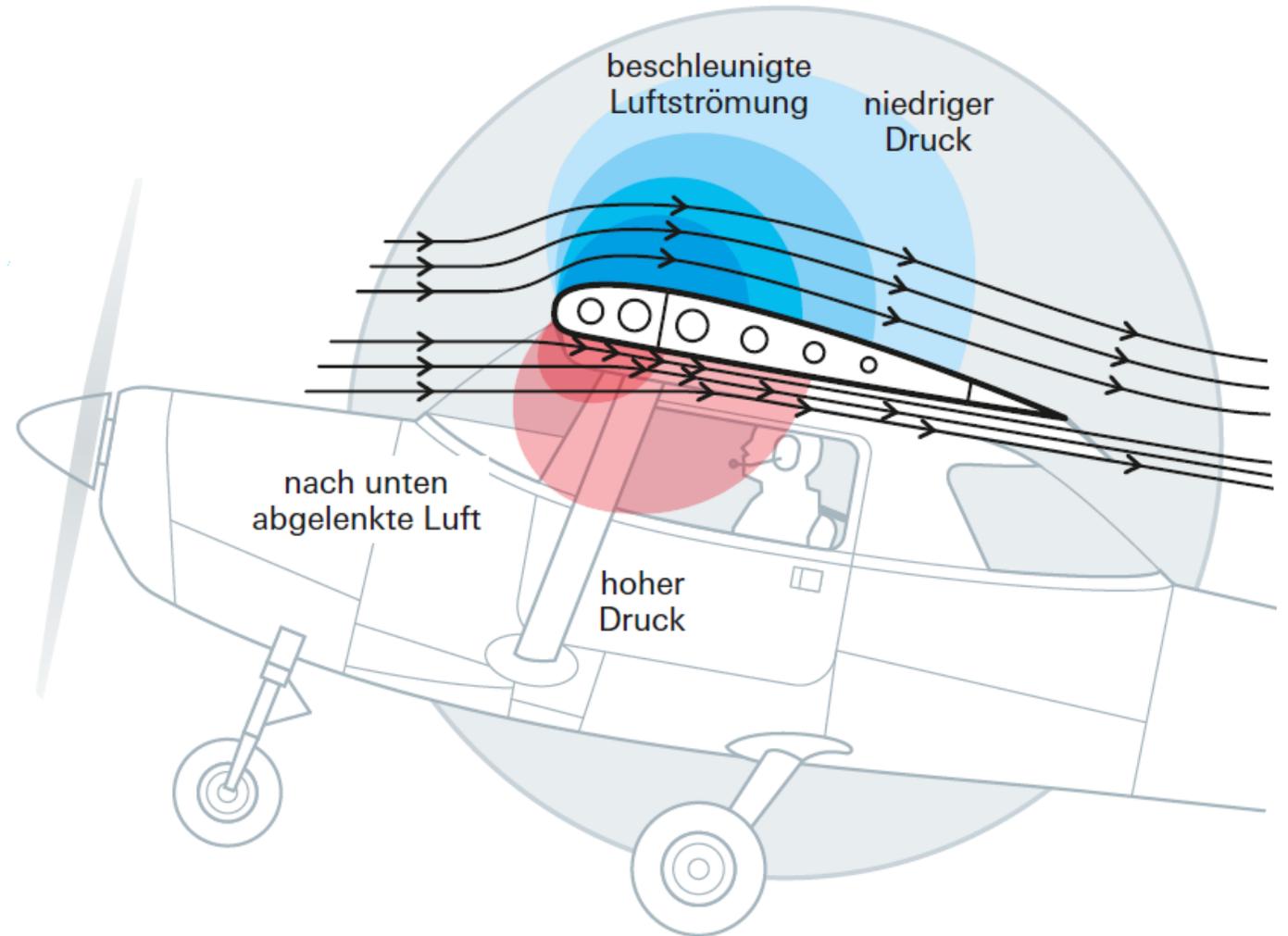
Offene Fragen

Offene Fragen

1. Wie kommt es zur Ablenkung oberhalb der Tragfläche?

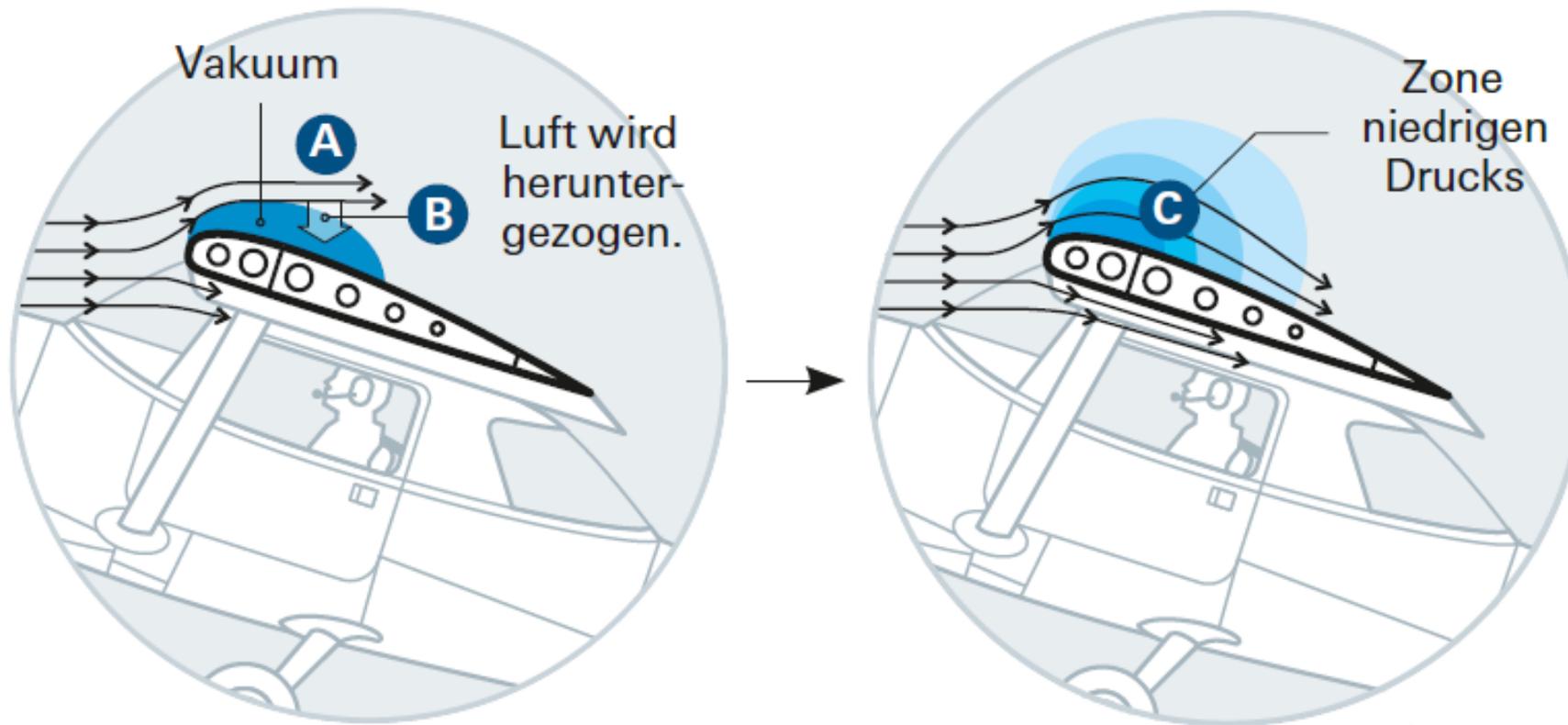


2. Wie kann man die Druckverteilung erklären?



Spektrum der Wissenschaft 5.20

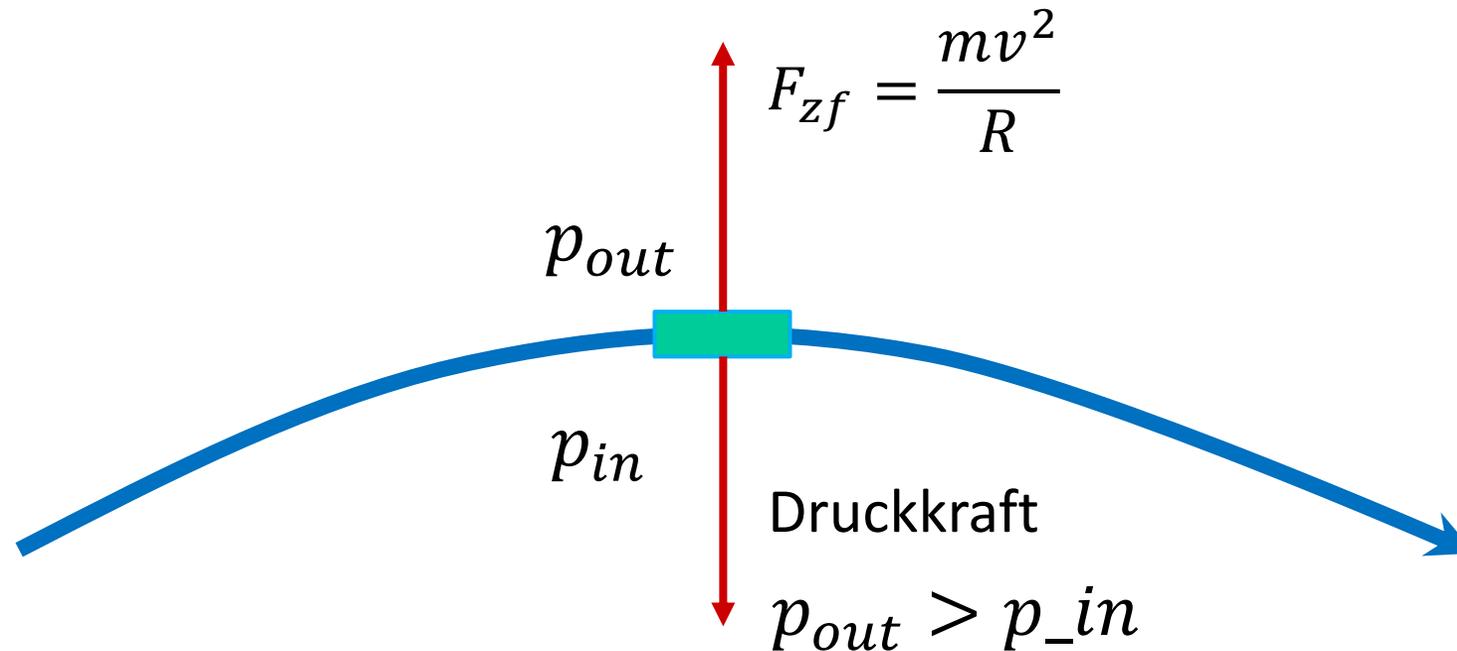
Ablenkung und Unterdruck



Spektrum der Wissenschaft 5.20

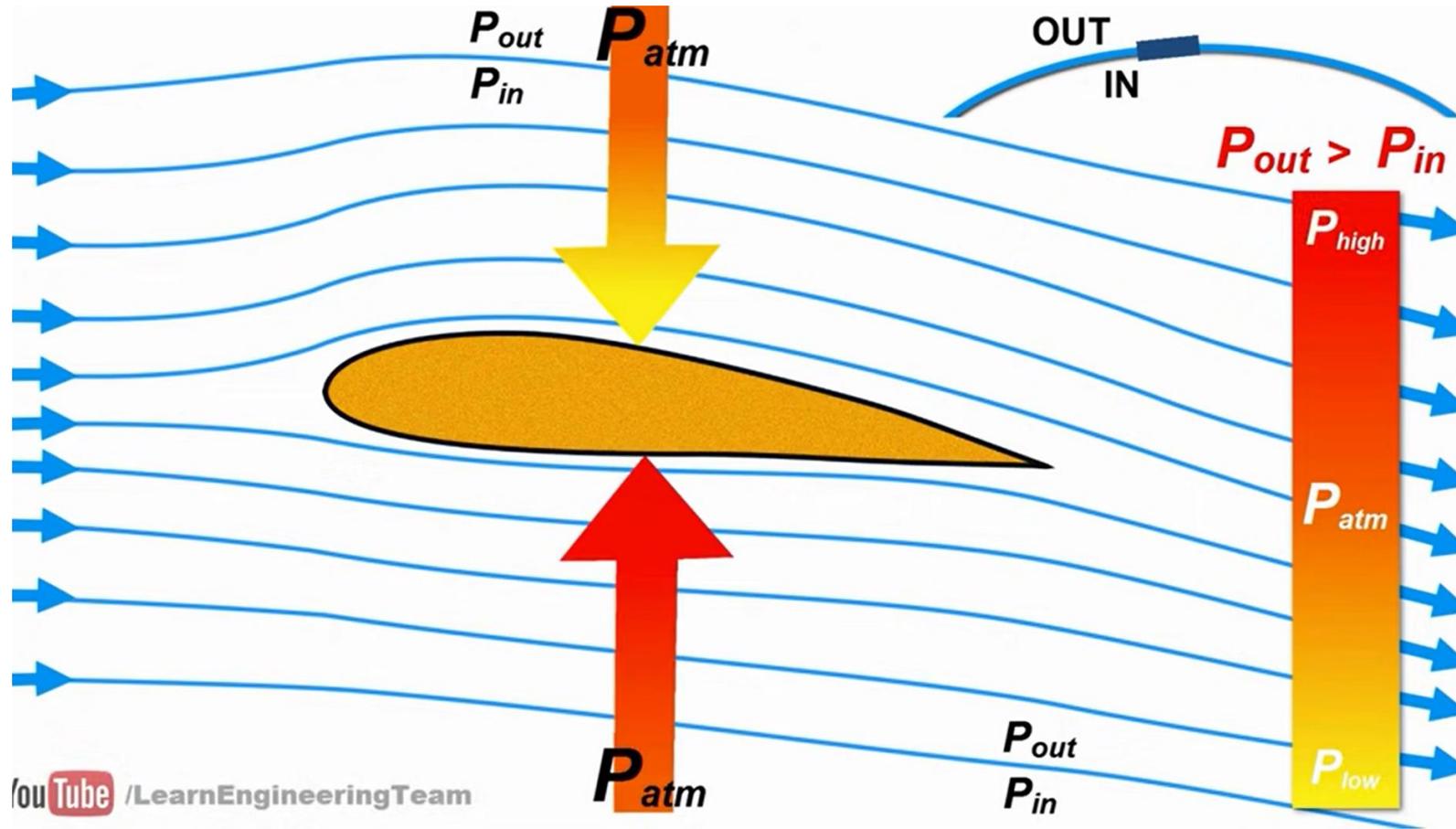
Würde die Luft gerade weiterströmen (A) dann würde sich im **Bereich (B)** ein **Vakuu** ausbilden, weshalb die Luft **nach unten gezogen** wird (eigentlich gedrückt). Da das ein **dynamischer Prozess** ist verbleibt im **Punkt (C)** ein **Unterdruck**.

Druckverteilung bei gekrümmten Stromlinien



Damit die Fluidelemente auf einer gekrümmten Bahn verlaufen, muss ein negativer **Druckgradient in Richtung des Krümmungsmittelpunktes** vorhanden sein

Druckverteilung bei gekrümmten Stromlinien



Mit den gekrümmten Stromlinien kann man auch die Druckverteilung erklären.

Zusammenfassung

- Der Auftrieb entsteht durch eine Ablenkung des Luftmassenstromes nach unten.
- Die Kraft kann über das 2. und 3. Newton'sche Axiom erklärt werden.
- Die Ablenkung des Massenstrom oberhalb Tragfläche ist ein wenig schwieriger zu erklären.
- Sie ist aber durch den entstehenden Leerraum und über die Stöße der Teilchen gut argumentierbar.
- Druck und Geschwindigkeit beeinflussen sich gegenseitig und müssen gemeinsam betrachtet werden.
- Die Bernoulligleichung braucht man für die Erklärung nicht.

Quellen

Quellen

- Spektrum der Wissenschaft, 5/2020
- Doug McLean: Understanding Aerodynamics, Wiley 2013
- Animation Auftrieb (Programm zum Download)
<https://www.educational-animation.com/de/buoyancy-wing-profile/>

Videos

- Wie fliegt ein Flugzeug

<https://www.youtube.com/watch?v=3PNbKdlTn6Q&t=225s>

- Krzysztof Fidkowski | How Planes Fly

<https://www.youtube.com/watch?v=aa2kBZAoXg0>

- Lift - Prof. Holger Babinsky

https://www.youtube.com/watch?v=QY2pS-xXC_U

Videos

- Doug McLean | Common Misconceptions in Aerodynamics
<https://www.youtube.com/watch?v=QKCK4IJLQHU>

- Lift and Wings - Sixty Symbols

<https://www.youtube.com/watch?v=PF22LM8AbII>

- How Does A Wing Actually Work?

<https://www.youtube.com/watch?v=aFO4PBolwFg>

Videos

- How do Wings generate LIFT ?
<https://www.youtube.com/watch?v=w78JT6azrZU>
- Understanding Aerodynamic Lift
https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU
- Understanding Aerodynamic Drag
https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU

Videos

- Airplane Aerodynamics (MIT)

<https://www.youtube.com/watch?v=edLnZgF9mUg>

Videos

Flügelschlag

<https://www.youtube.com/watch?v=v482G05Me-8> min 10