

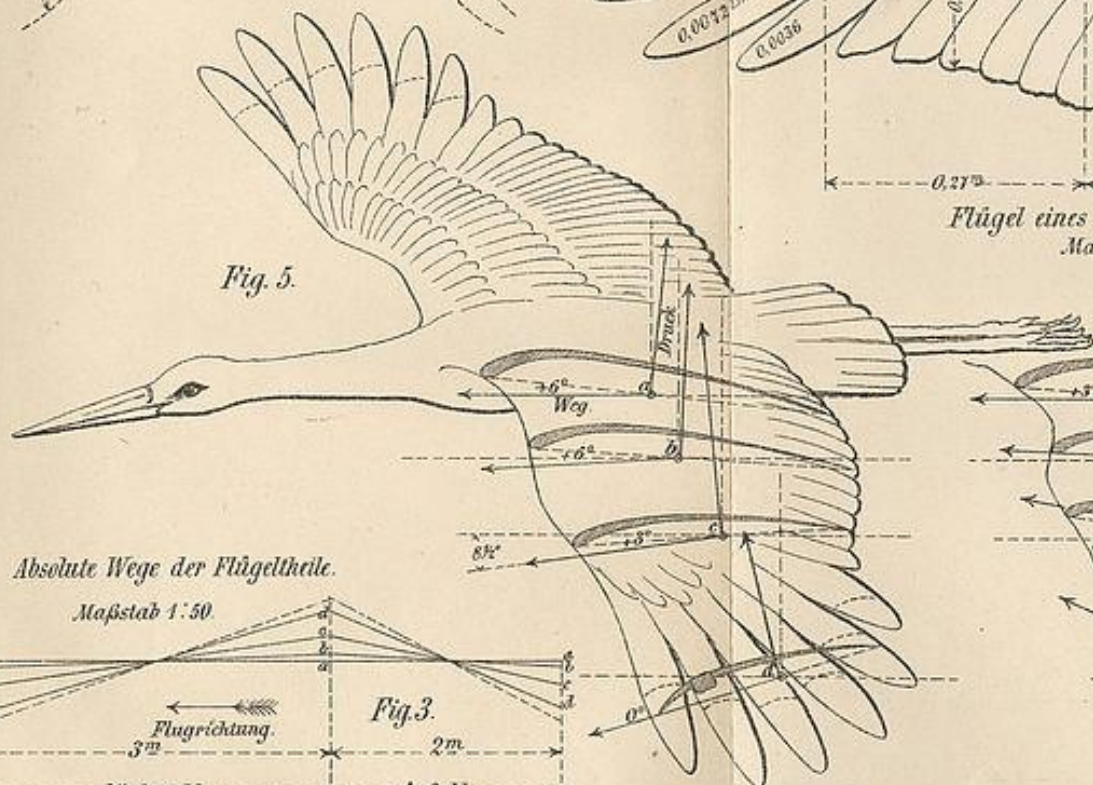
Aerodynamik

Warum fliegt
ein Flugzeug?



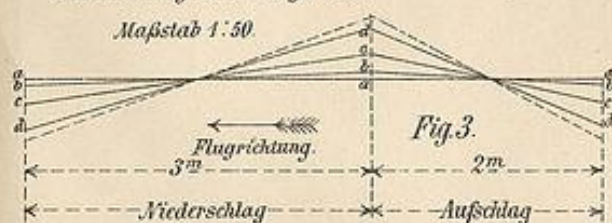


Fig. 5.



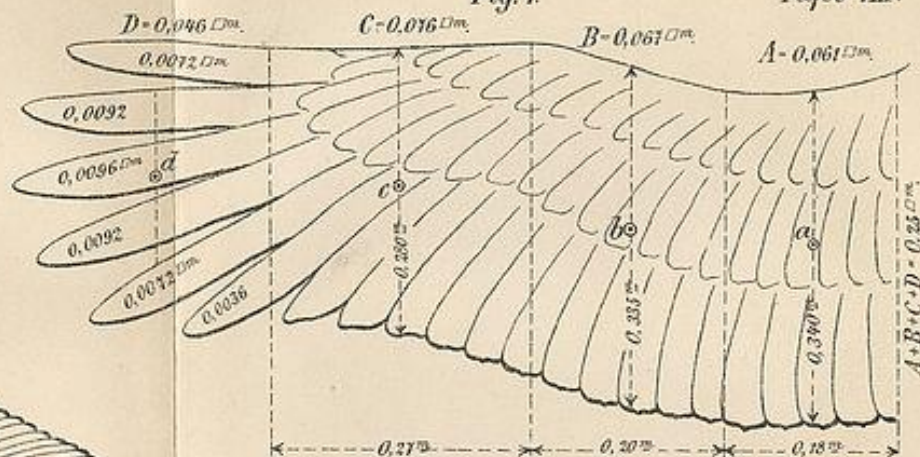
Absolute Wege der Flügeltheile.

Maßstab 1:50.



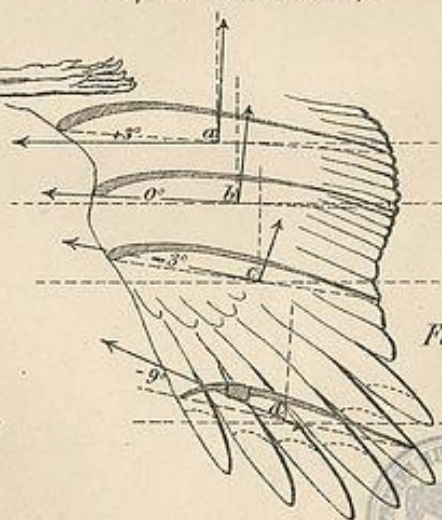
beim Niederschlag.

Fig. 1.



Flügel eines 4 kg schweren Storches.
Maßstab $\frac{1}{2}$ natürlicher Größe.

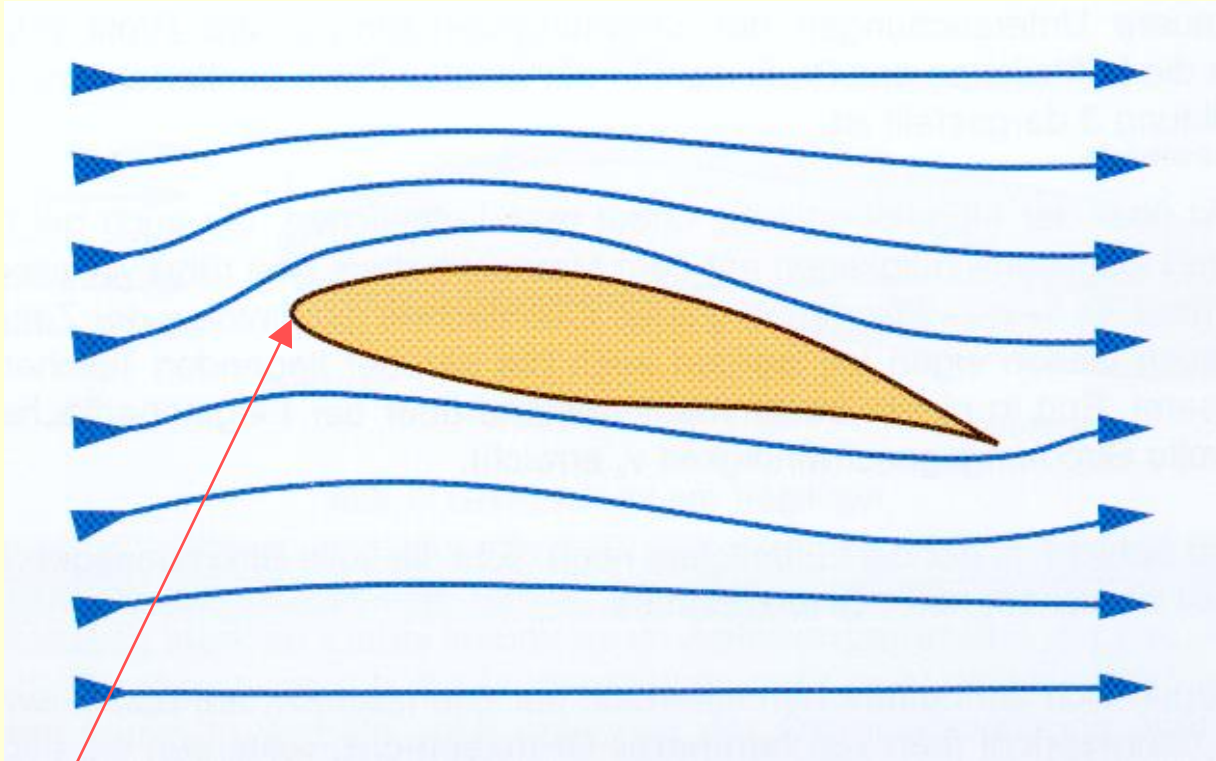
Fig. 4.



beim Aufschlag.

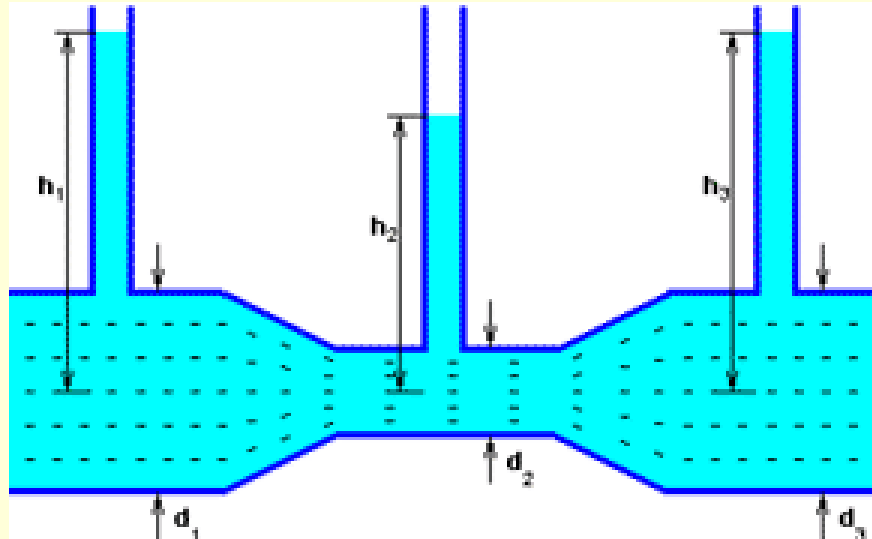


Strömung am Tragflügel



- ➔ Staupunkt (Strömung teilt sich)
- ➔ Unterseite: Überdruck (Stau) → geringere Geschwindigkeit
- ➔ Oberseite: Unterdruck (Teilvakuum) → höhere Geschwindigkeit

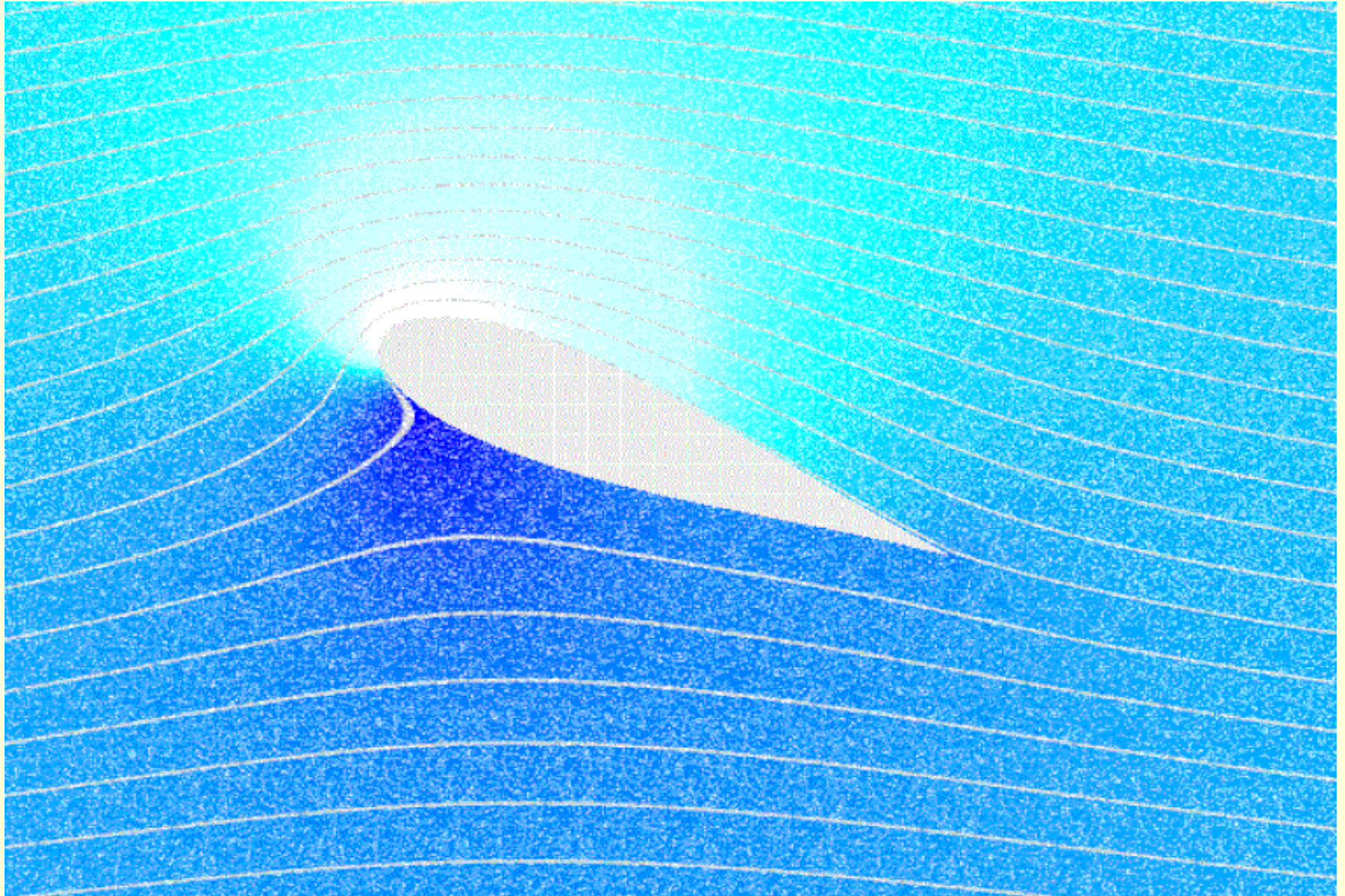
Gesetz von Bernoulli



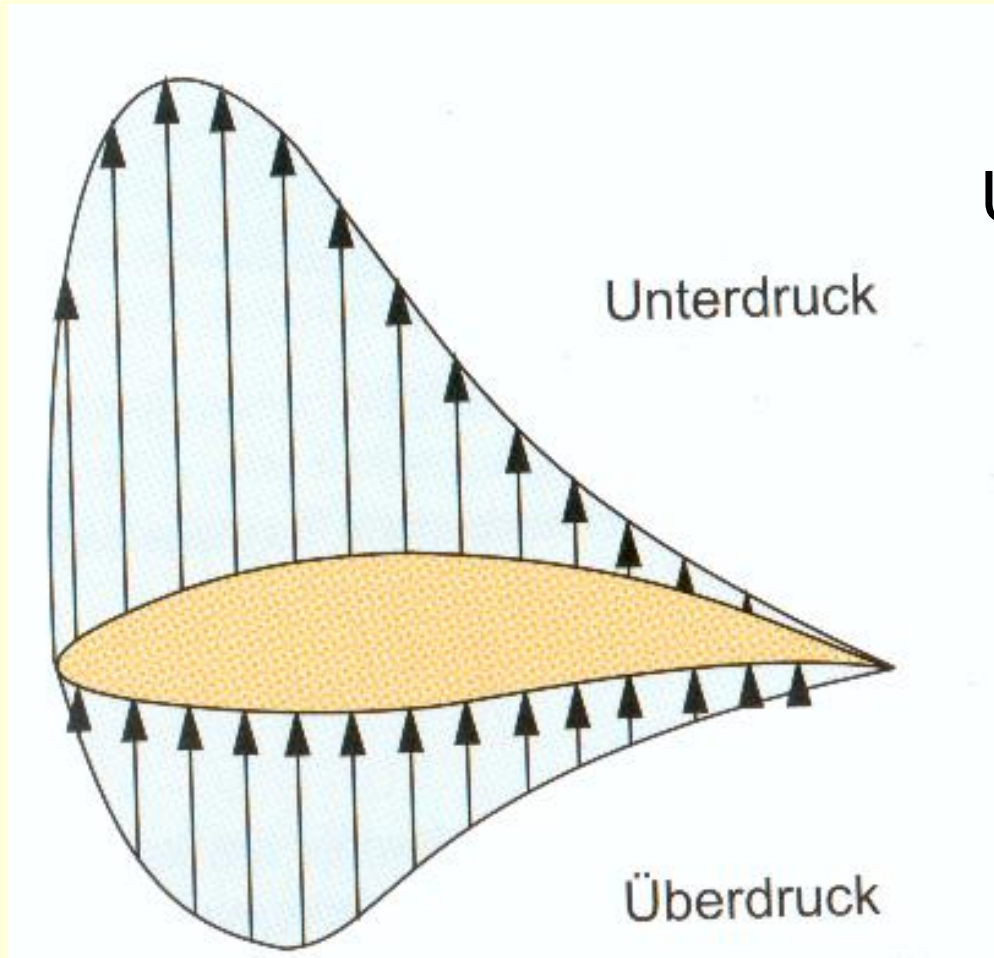
Statischer Druck + Staudruck = Gesamtdruck = Konstant

Engerer Querschnitt → höhere Strömungsgeschwindigkeit
→ niedrigerer statischer Druck

Druckverteilung



Druckverteilung



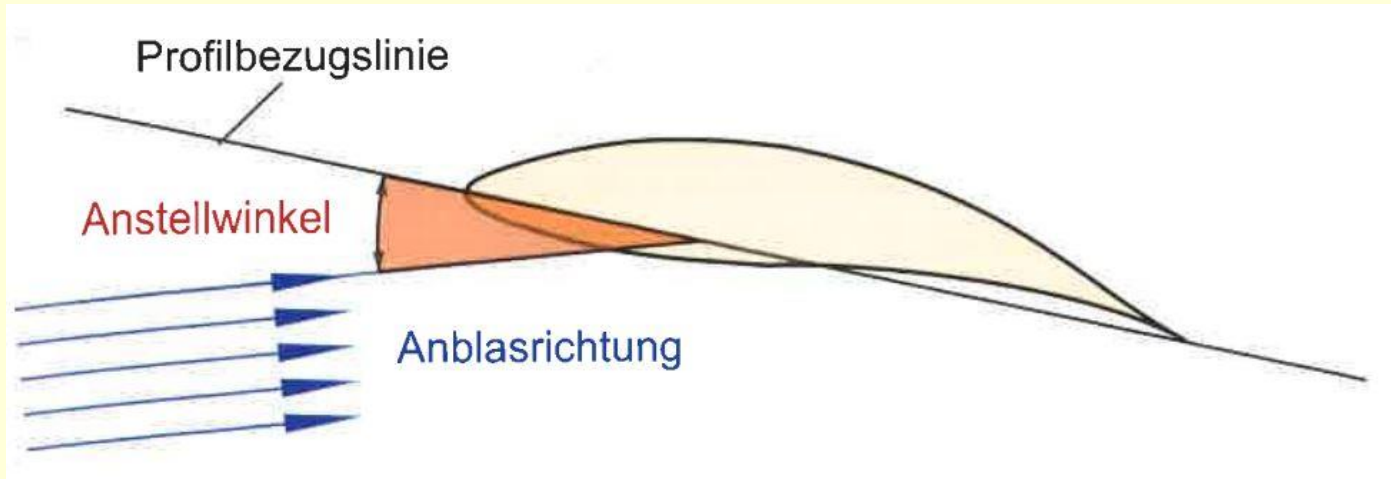
Unterdruck/Überdruck

oder

Sog/Druck

2:1

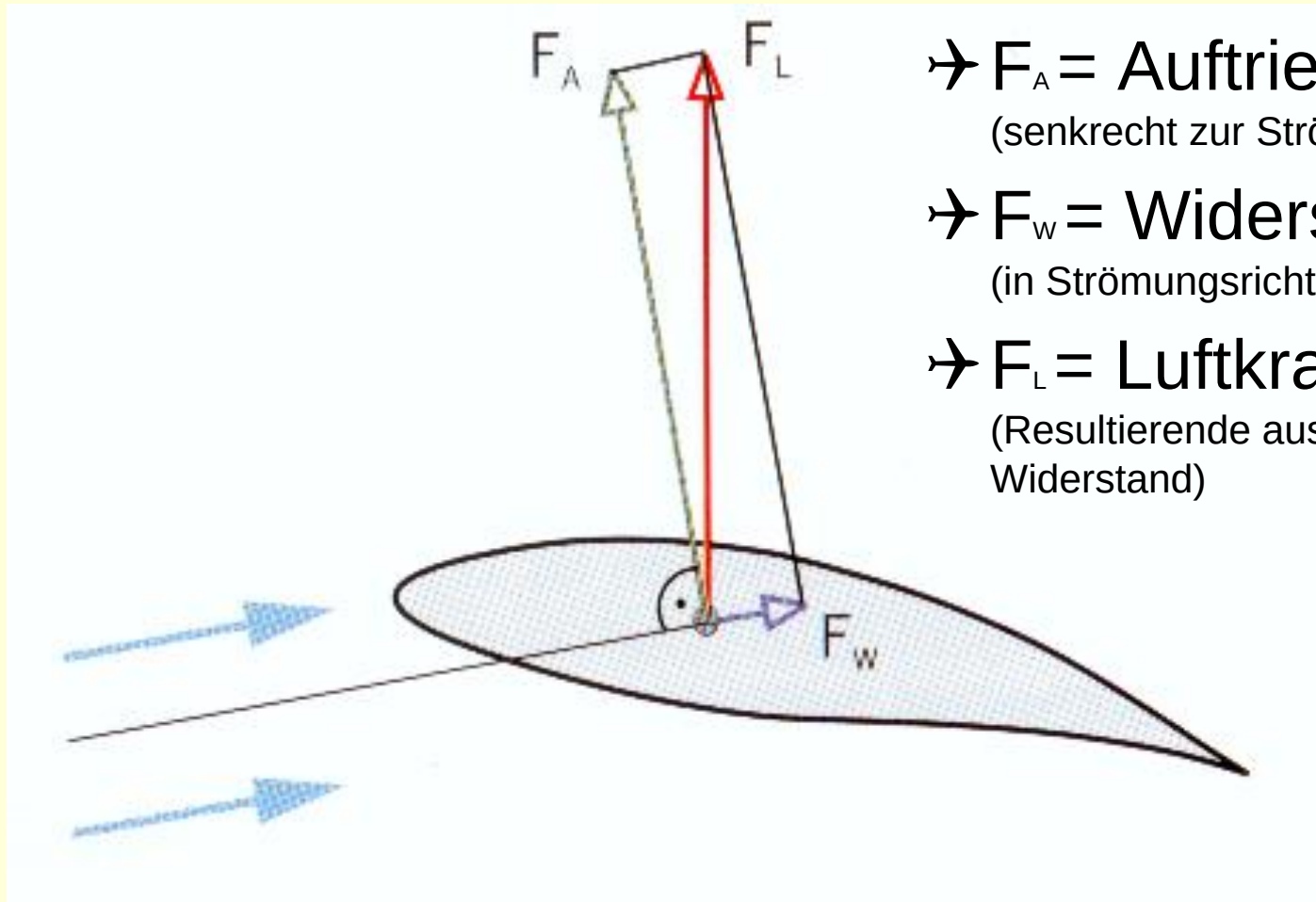
Anstellwinkel



Anstellwinkel: Winkel zwischen ungestörter Anströmung und der Profilbezugslinie

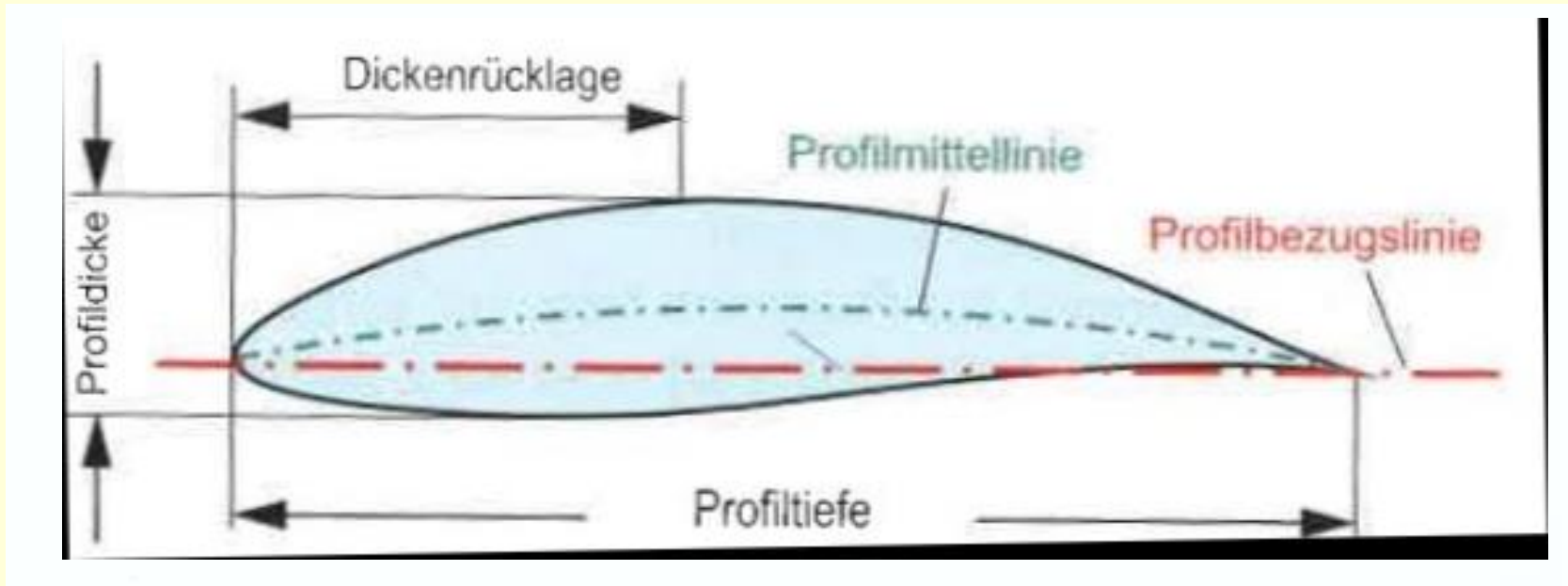
Größerer Anstellwinkel bewirkt größeren Auftrieb **und** größeren Widerstand

Kräfte am Tragflügel



- F_A = Auftrieb
(senkrecht zur Strömungsrichtung)
- F_W = Widerstand
(in Strömungsrichtung)
- F_L = Luftkraft
(Resultierende aus Auftrieb und Widerstand)

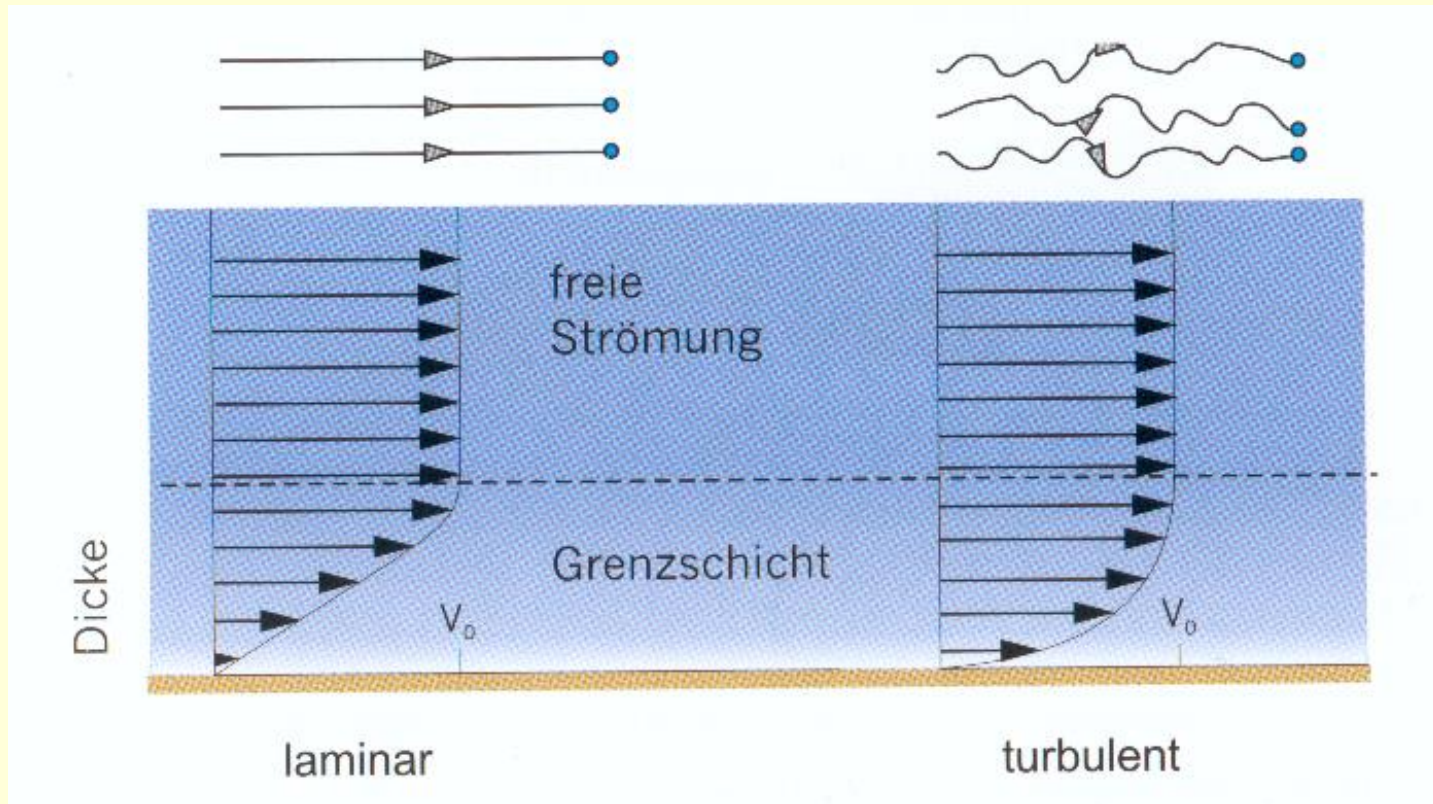
Profil des Tragflügels 1



- ➔ Profiltiefe
- ➔ Profildicke (Profilhöhe)
- ➔ Profilbezugslinie
- ➔ Dickenrücklage

- ➔ Profiltiefe
- ➔ Profilwölbung
- ➔ Profilsehne

Grenzschicht

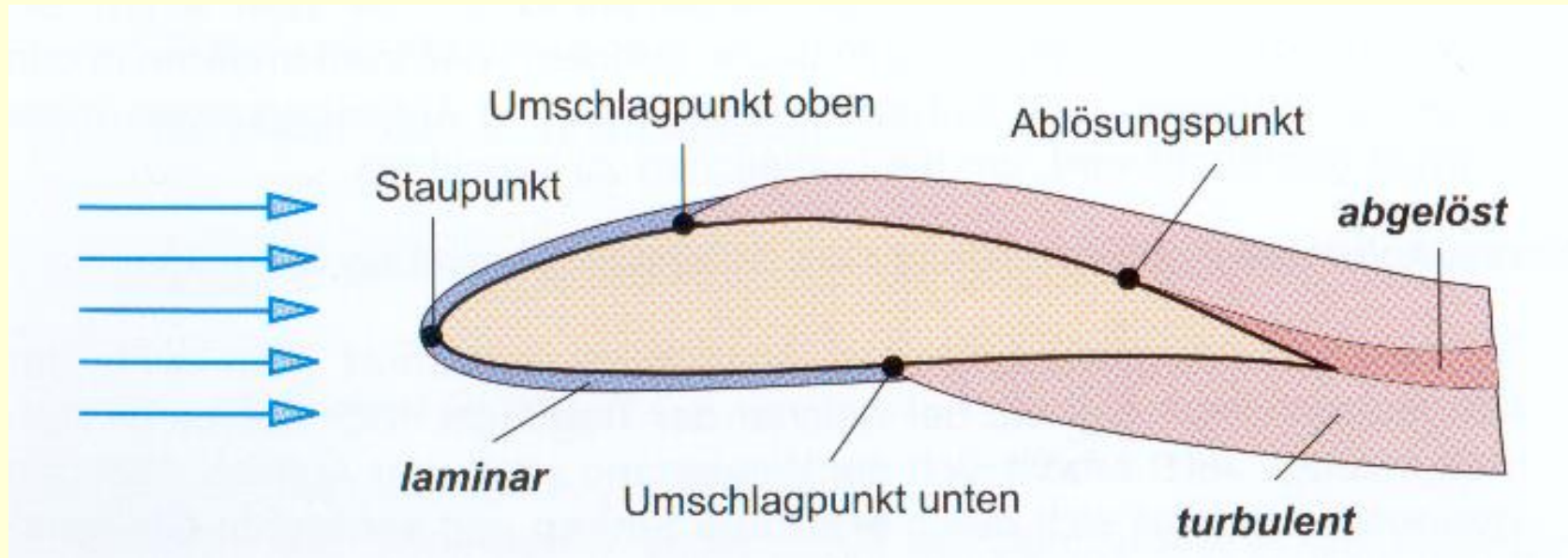


Grenzschicht: Luftteilchen haben noch nicht die volle Strömungsgeschwindigkeit

Laminare Grenzschicht: paralleler Verlauf der Stromlinien

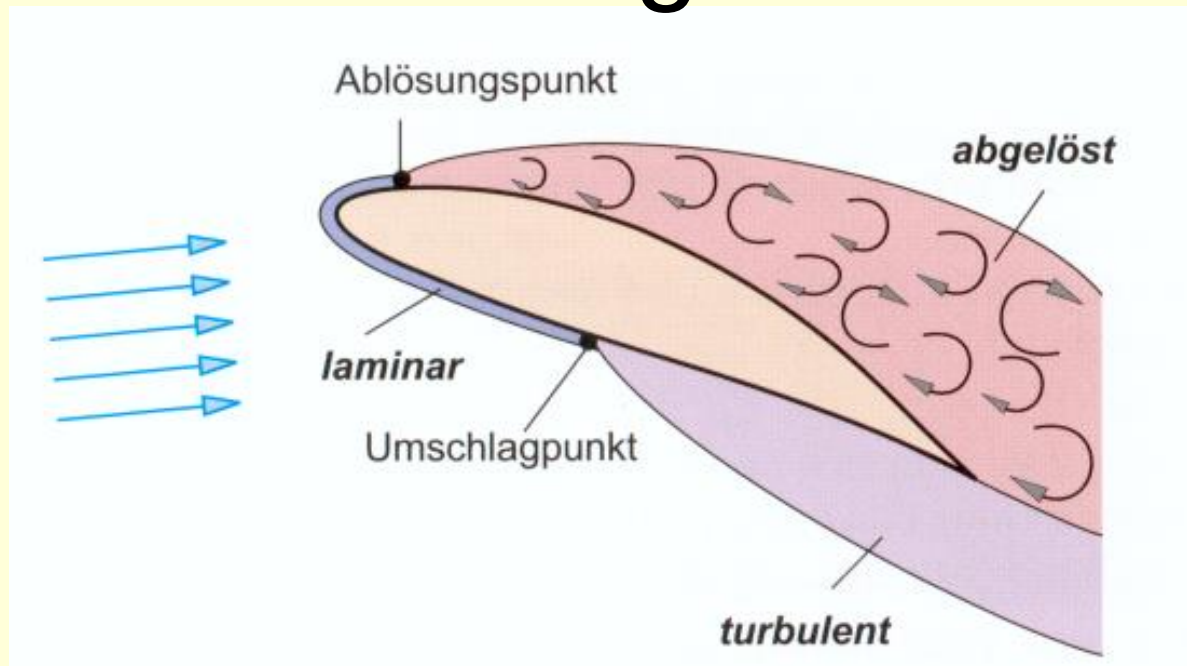
Turbulente Grenzschicht: gestörter Verlauf der Stromlinien,
hoher Energieaufwand = hoher Widerstand

Grenzschicht am Tragflügel



- ➔ Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung am **Umschlagpunkt**
- ➔ Durch starken Druckanstieg **Ablösung** im Bereich der Hinterkante

Strömungsabriss

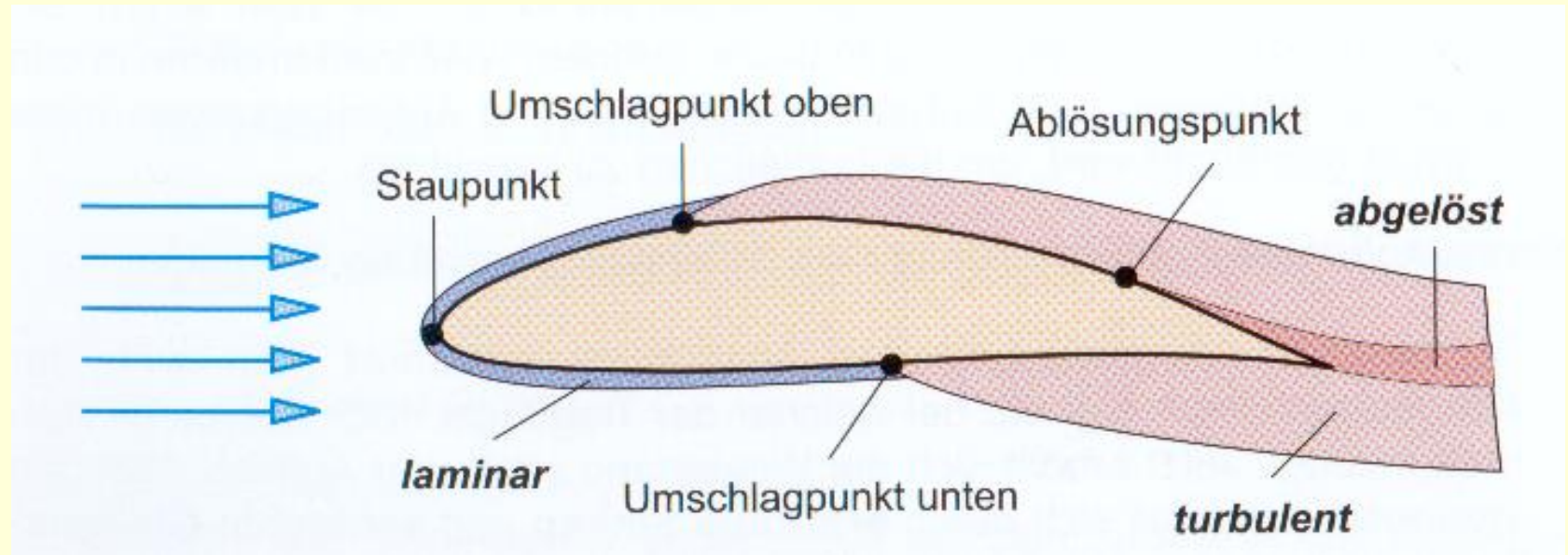


- ➔ Überschreiten des kritischen Anstellwinkels ($< -10^\circ$ oder $> +20^\circ$) durch Überziehen
- ➔ Ablösung der Grenzschicht vom Flügel – überzogener Flugzustand
- ➔ Auftrieb bricht zusammen, Widerstand nimmt stark zu
- ➔ „abgerissene Strömung“ – Abkippen/Sackflug

WDR



Grenzschicht am Tragflügel



Anstellwinkel verändern



➤ Vergrößern des Anstellwinkels ->

Umschlagpunkt und Ablösepunkt wandern nach vorn

Auftrieb und Widerstand

abhängig von:

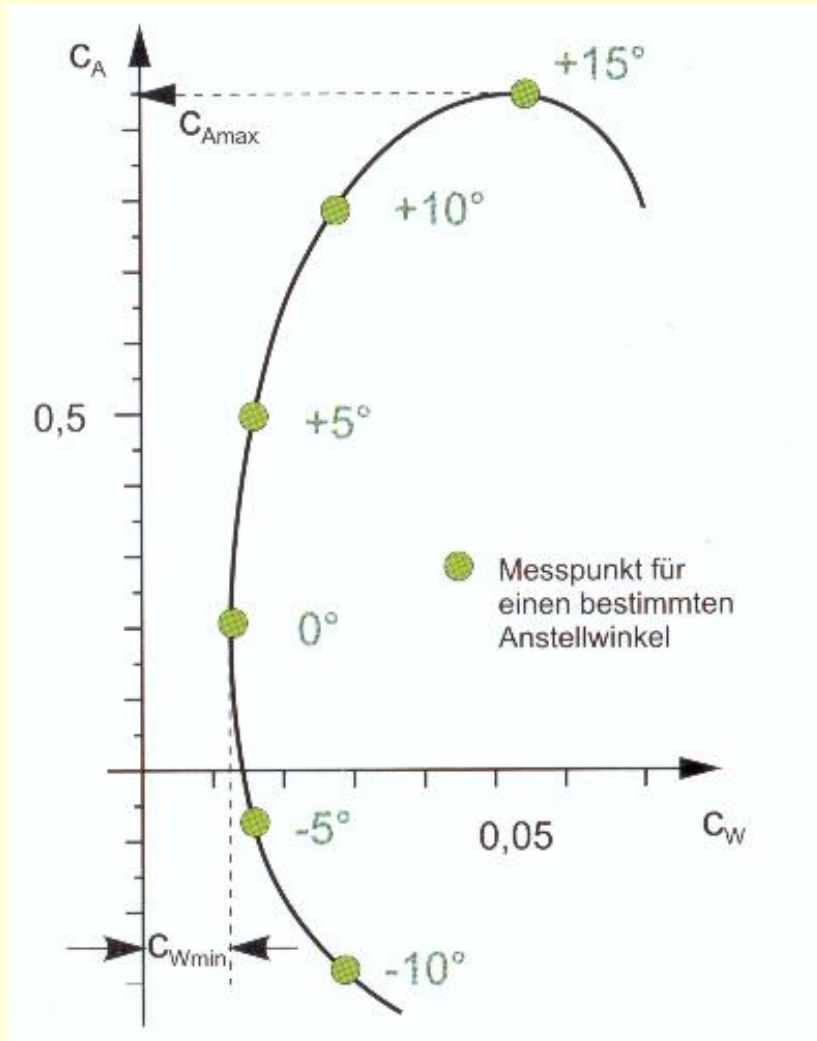
- Eigengeschwindigkeit = Fahrt v^2
- Luftdichte ρ (rho)
- Fläche des Tragflügels A
- Form des Tragflügels, Profilform c_A , c_w

Staudruck $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$

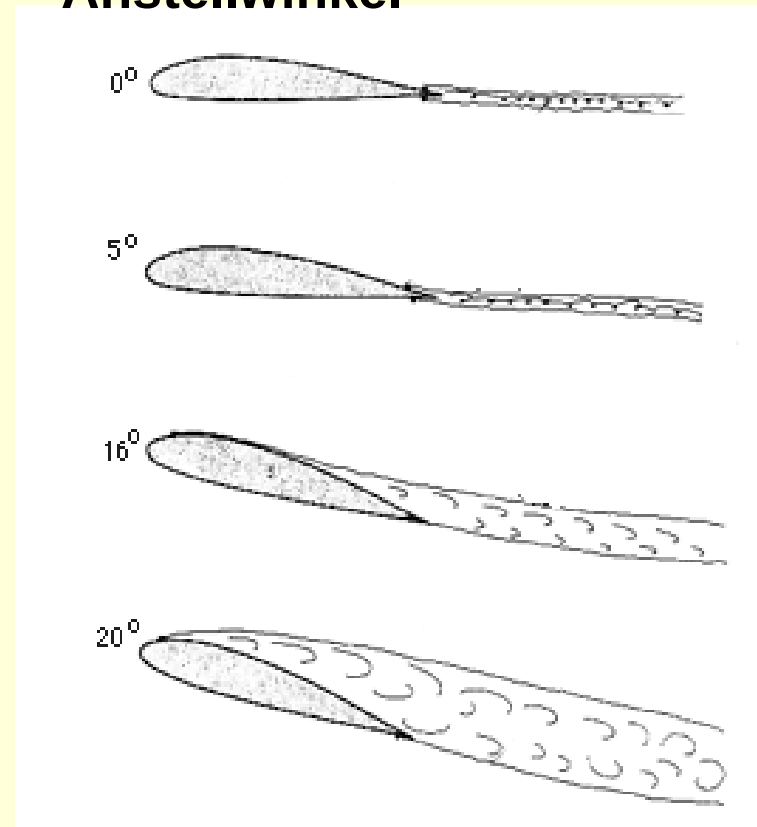
Auftrieb $F_A = c_A \cdot q \cdot A$

Widerstand $F_w = c_w \cdot q \cdot A$

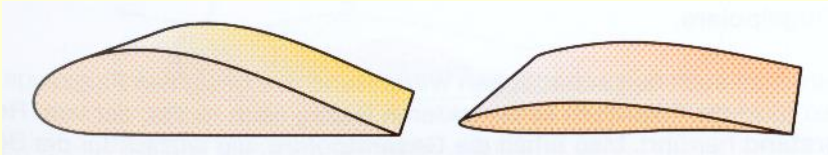
Profilpolare / Lilienthalpolare



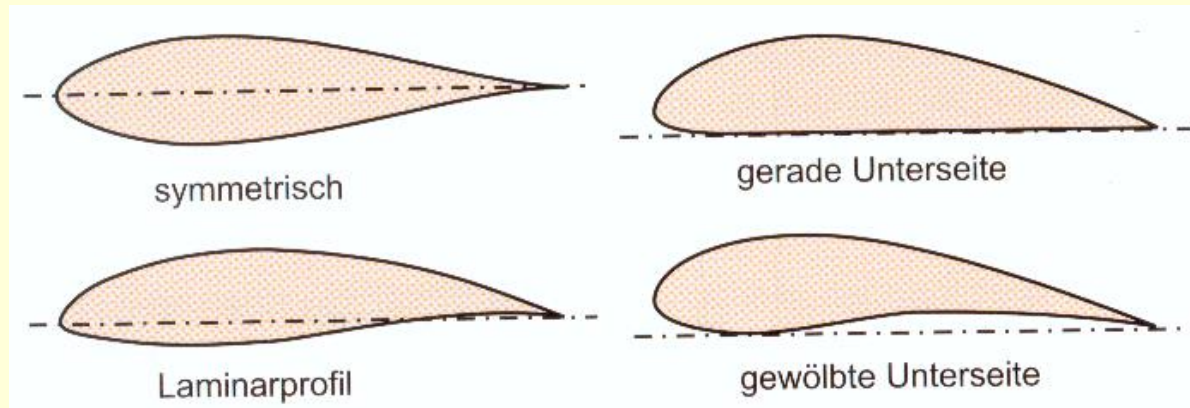
**Auftriebsbeiwert c_A und
Widerstandsbeiwert c_W
in Abhängigkeit vom
Anstellwinkel**



Profilarten

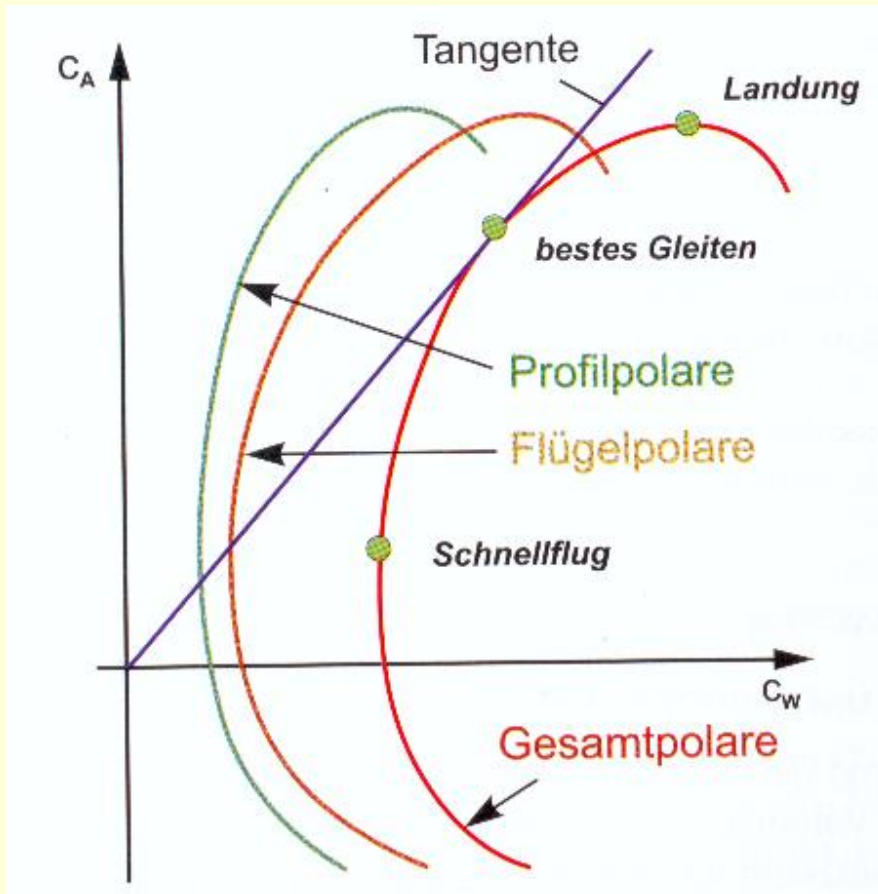


Langsamflugprofil
Schnellflugprofil



Standard heute: Laminarprofile (größte Dicke bei ca. 50% Tiefe)

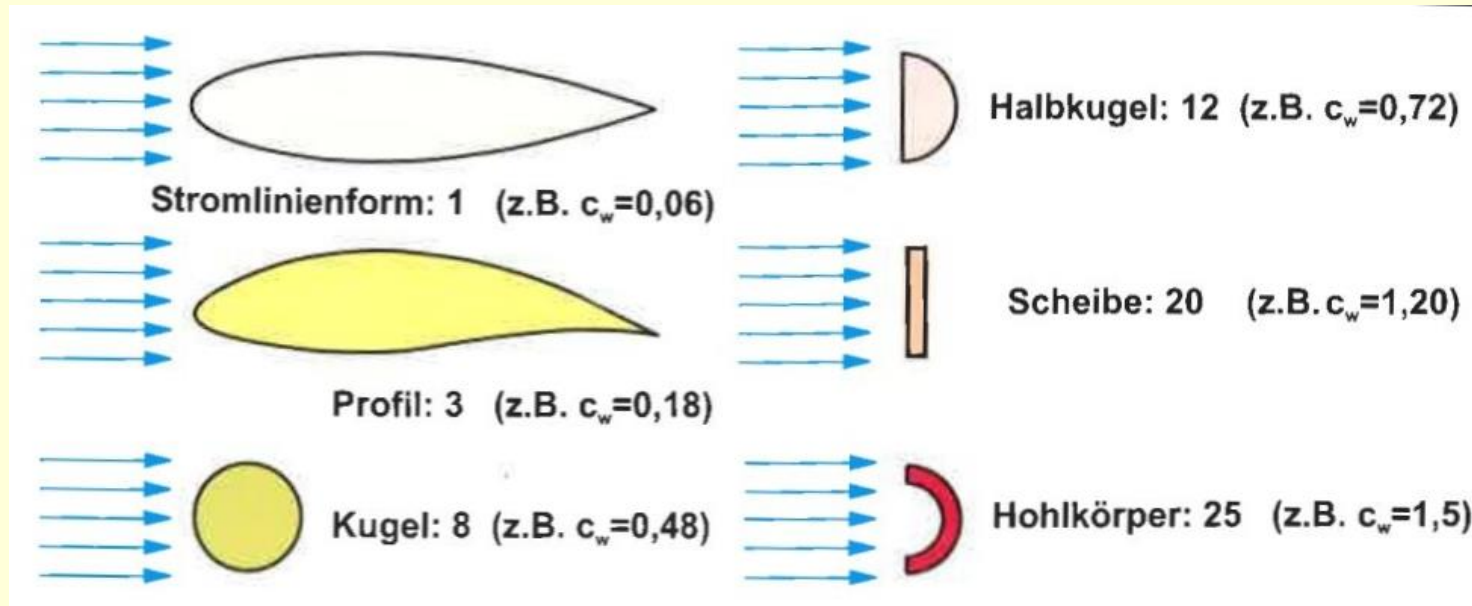
Gesamtpolare / Bestes Gleiten



- ➔ Profilpolare
- ➔ Flügelpolare
- ➔ Gesamtpolare
- ➔ Tangente ergibt Punkt des „Besten Gleitens“
 $C_W/C_A = \varepsilon$ (Epsilon)
- ➔ $1/\varepsilon = \text{Gleitverhältnis}$
= Distanz/Höhe

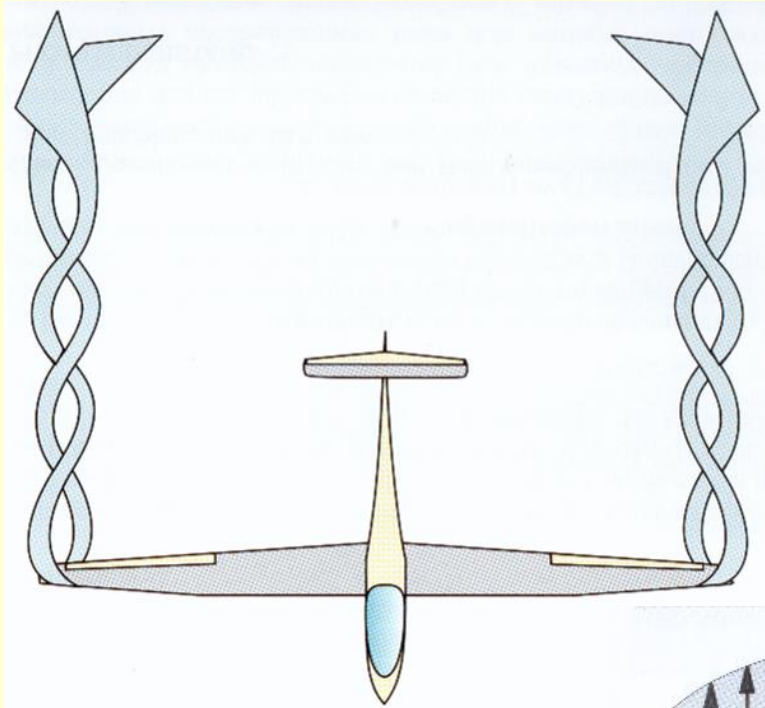
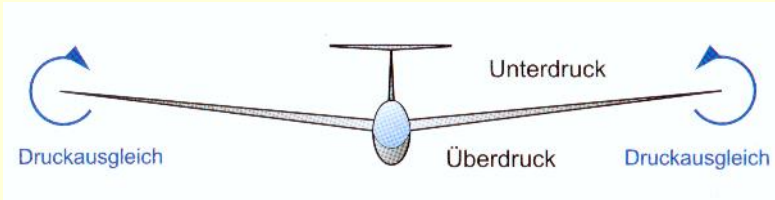


Widerstand



- ➔ Formwiderstand oder Druckwiderstand
- ➔ Reibungswiderstand oder Grenzschichtwiderst.
- ➔ Formwiderstand+Reibungswiderstand
= Profilwiderstand

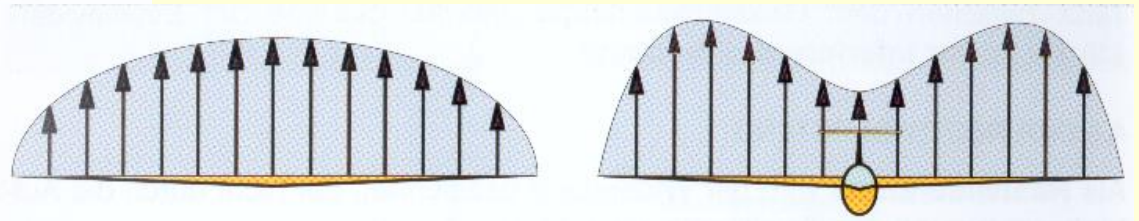
Induzierter Widerstand 1



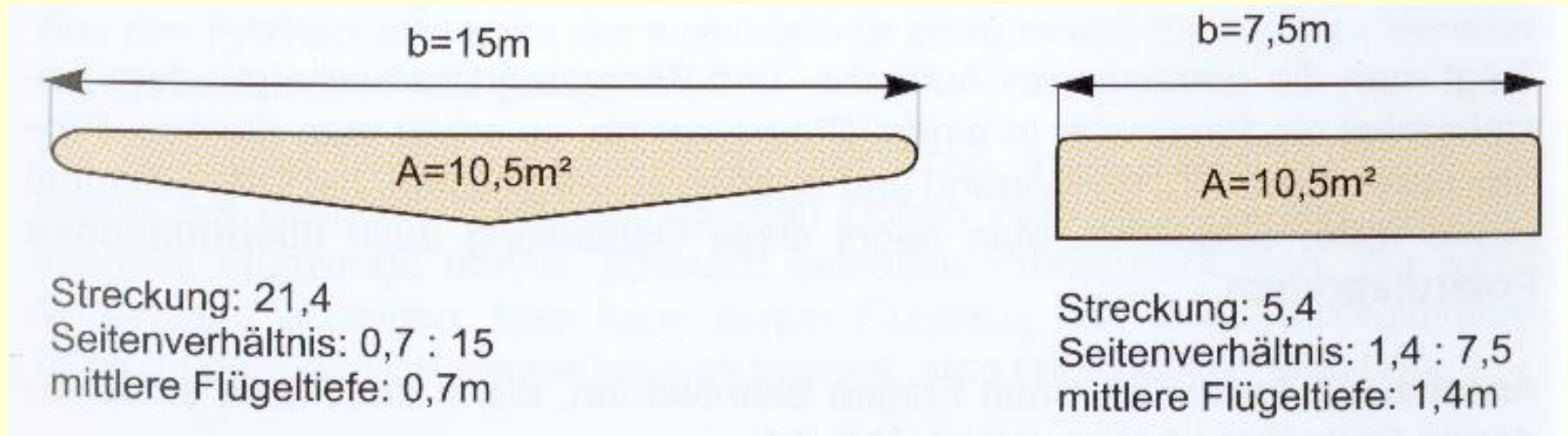
- Druckausgleich am Flügelende
- Wirbelzöpfe erzeugen Rand- oder induzierten Widerstand
- Winglets reduzieren diesen

Regeln

- großer Auftrieb -> großer ind. Widerstand
- Flug bei Mindestgeschwindigkeit – großer induz. Widerstand
- Schnellflug – kleiner induz. Widerstand
- elliptische Auftriebsverteilung optimal



Induzierter Widerstand 2



Flügelstreckung = Spannweite / Flügeltiefe

Merke: je größer die Streckung desto kleiner ist der induzierte Widerstand

Gesamtwiderstand

Druckwiderstand Profilwiderstand
+ Reibungswiderstand Flögelwiderstand
+ Induzierter Widerstand
+ Restwiderstand
+ Interferenzwiderstand

=====

Gesamtwiderstand

Flugleistungen im Vergleich

Spannweite und Gleitverhältnis

- ASK 21 : 16,90m -> 34
- ASK 23 : 15m -> 32
- LS4: 15m -> 41
- Mini-Nimbus: 15m -> 41
- Condor: 18m -> 28
- DG-1000: 20m -> 46



Technische Daten der eta

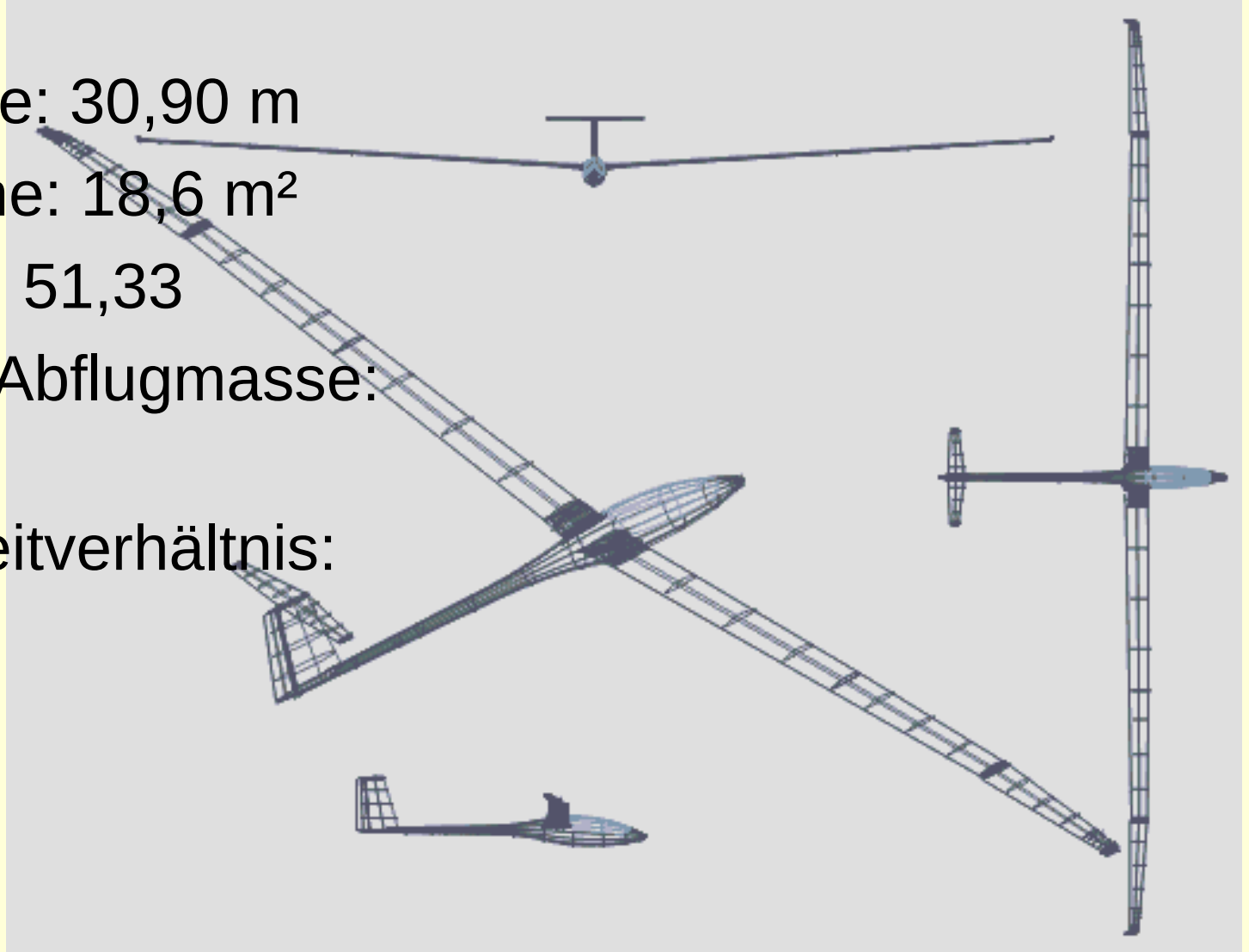
Spannweite: 30,90 m

Flügelfläche: 18,6 m²

Streckung: 51,33

Maximale Abflugmasse:
950 kg

Bestes Gleitverhältnis:
ca. 70

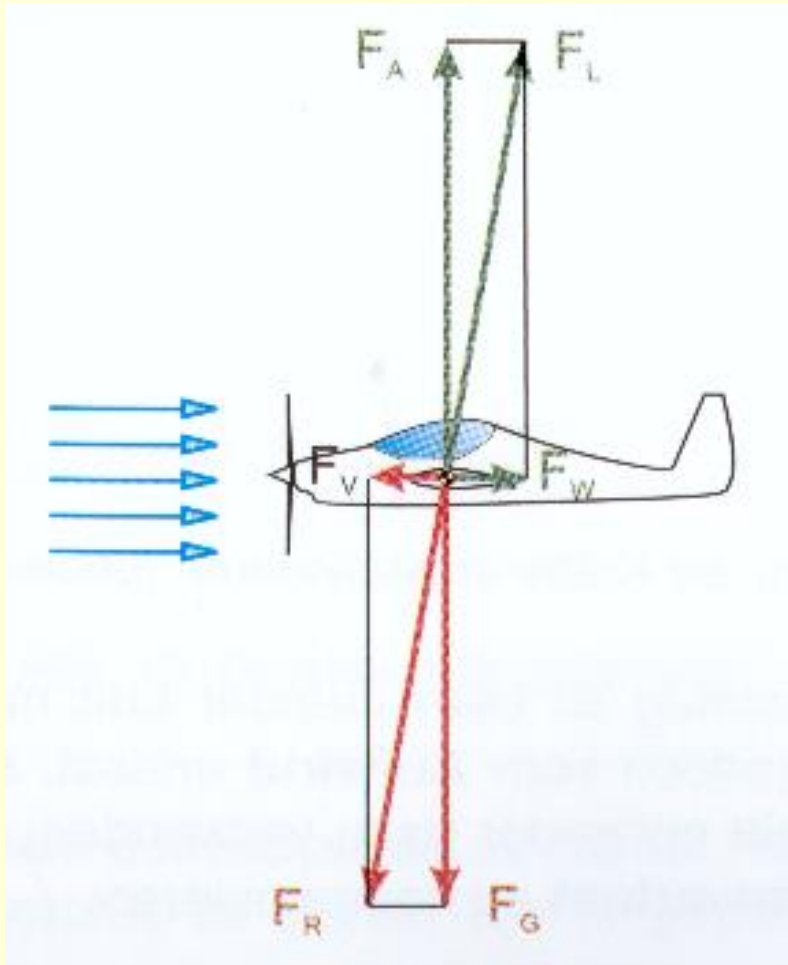








Kräfte im Motorflug

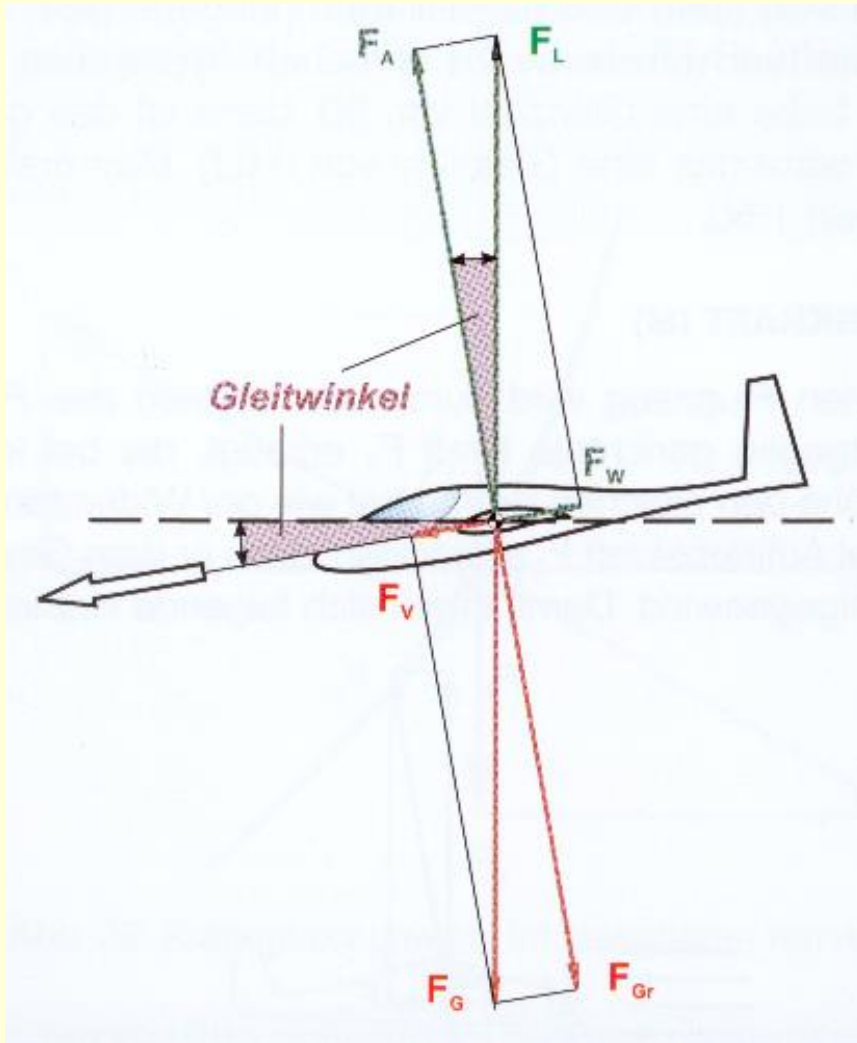


Horizontalflug

Auftrieb = Gewicht

Vortrieb = Widerstand

Kräfte im Gleitflug



Gleitflug

Luftkraft = Gewicht

Vortrieb = Widerstand

$$F_A/F_W = C_A/C_W = 1/\tan \alpha = 1/\varepsilon$$

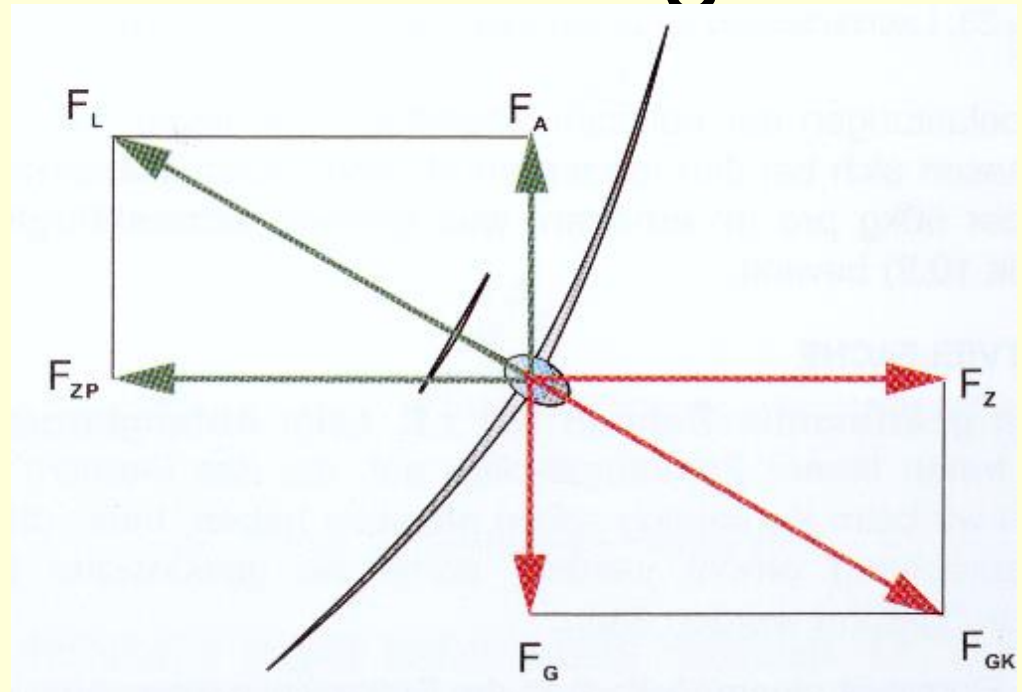
Beispiel eta:

$$F_G = 8500\text{N} \quad 1/\varepsilon = 70$$

$$\Rightarrow F_W = 121\text{N} \sim 12 \text{ kg}$$

Kräfte im Kurvenflug

Zentrifugalkraft F_Z
Zentripetalkraft F_{ZP}
Kurvengewicht F_{GK}

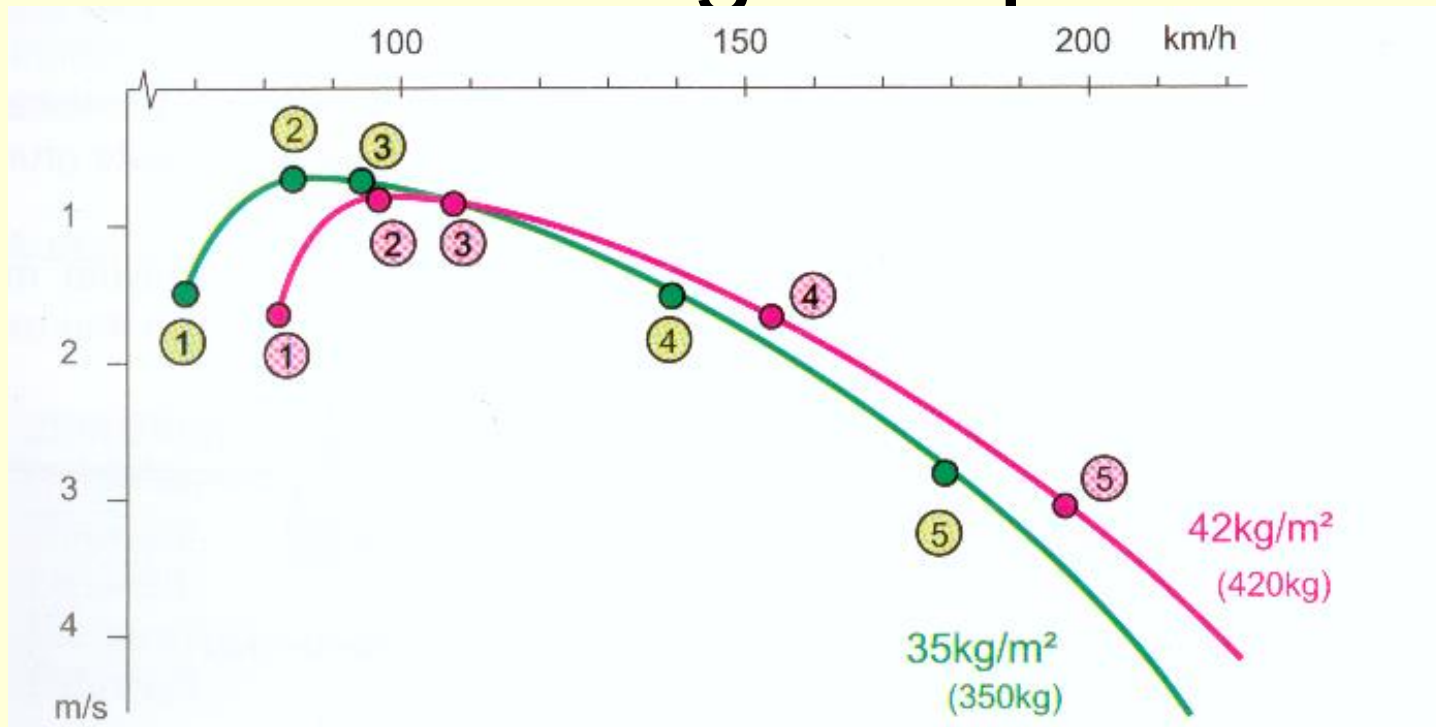


Merke: Mindestgeschwindigkeit erhöht sich
mit größerer Querneigung

Bei 60° ist $v_{\min}$ um 41% erhöht , dabei 2g

Aus 80 km/h wird dann 112 km/h !

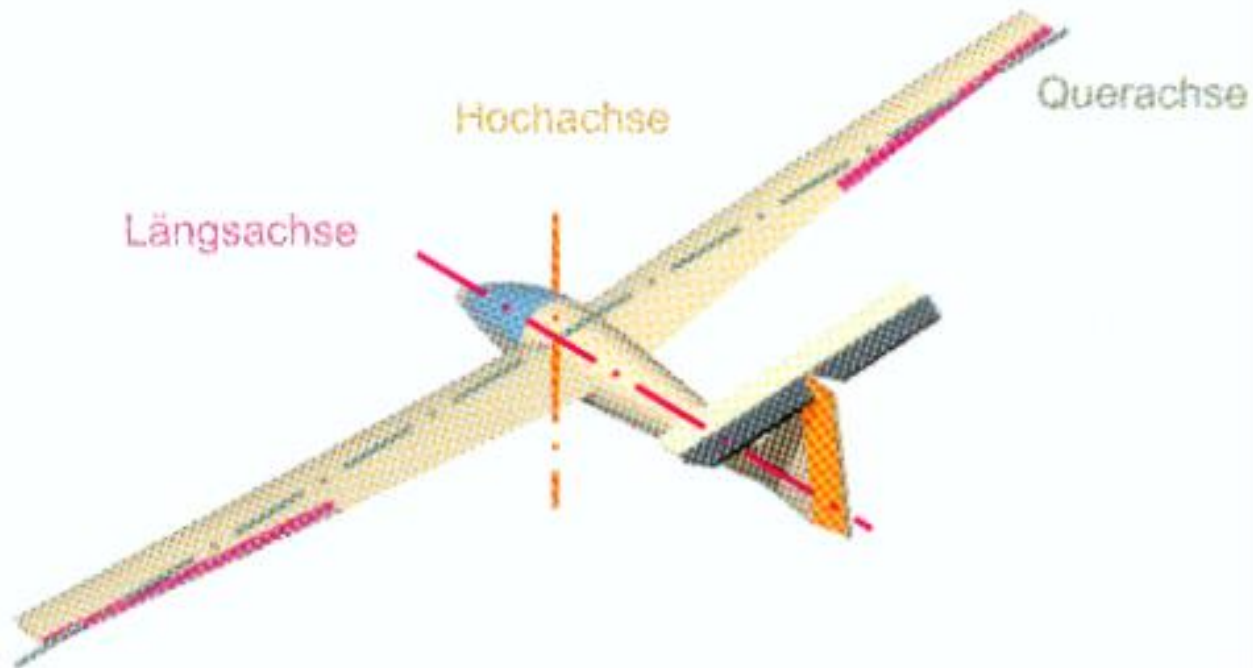
Geschwindigkeitspolare



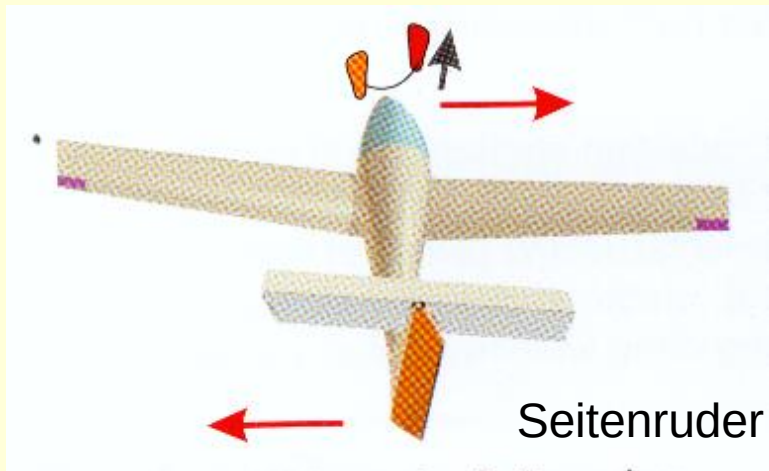
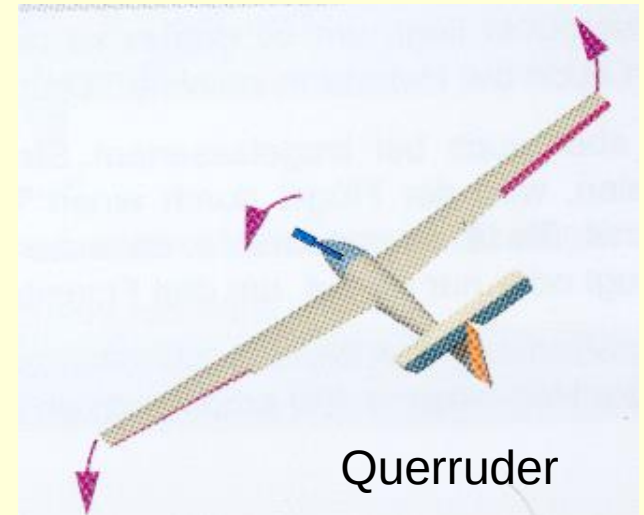
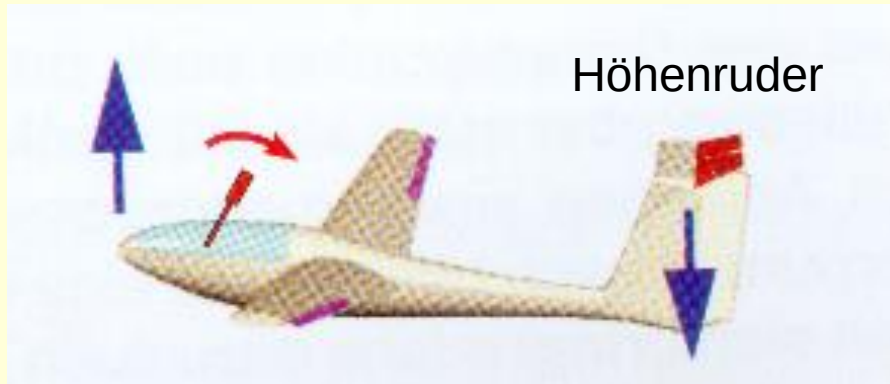
- ➔ Mindestgeschwindigkeit (1)
- ➔ Geringstes Sinken (2)
- ➔ Bestes Gleiten (3)
- ➔ Schnellflug (4) / (5)

Achsen und Ruder

Achse	zugeordnetes Ruder	Bewegung
Hochachse	Seitenruder	Gieren
Längsachse	Querruder	Rollen
Querachse	Höhenruder	Nicken



Wirkung der Ruder



Differenzierte Querruder
verringern das
Negatives Wendemoment

Stabilität



statisch stabil



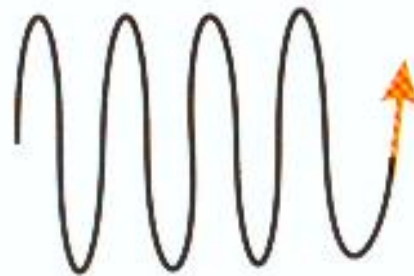
statisch indifferent



statisch labil



dynamisch stabil

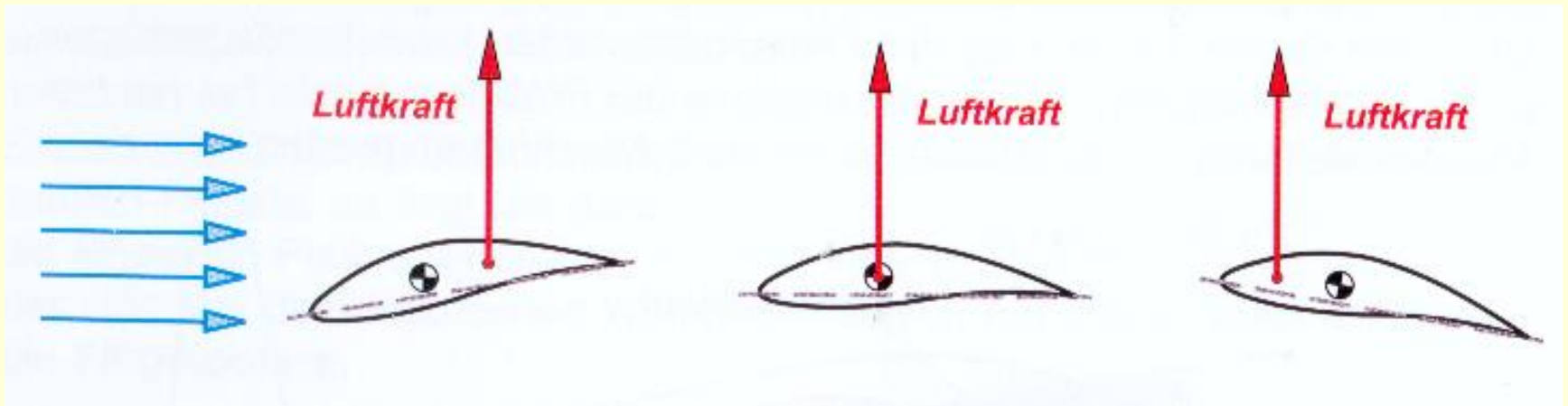


dynamisch indifferent



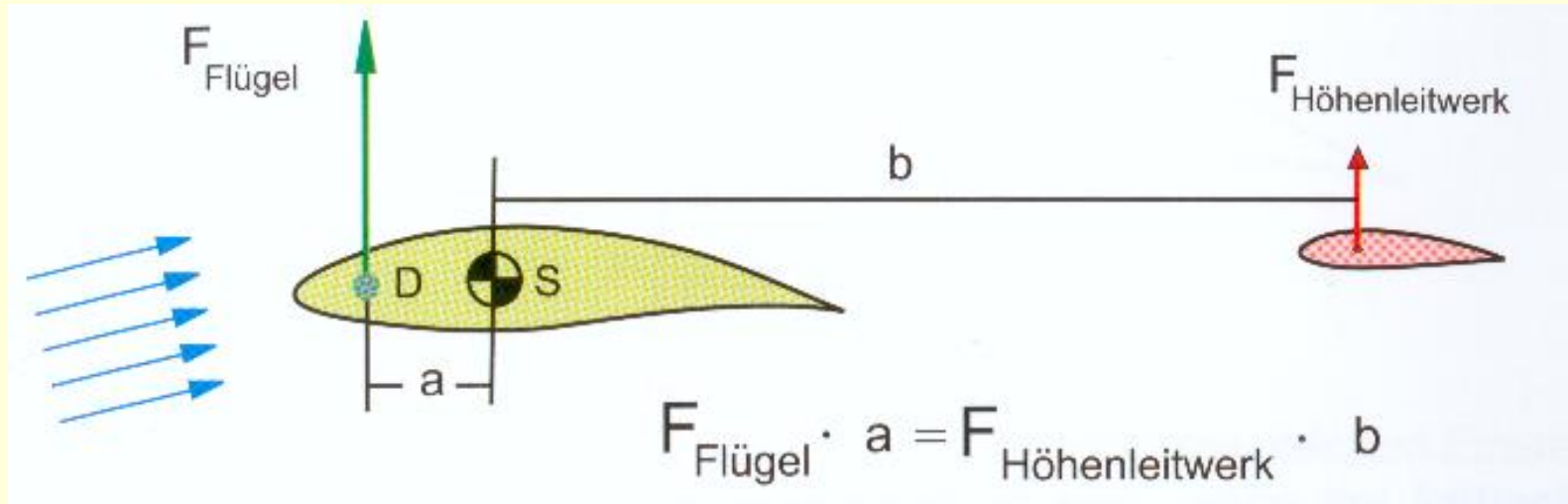
dynamisch labil

Luftkraft und Druckpunkt



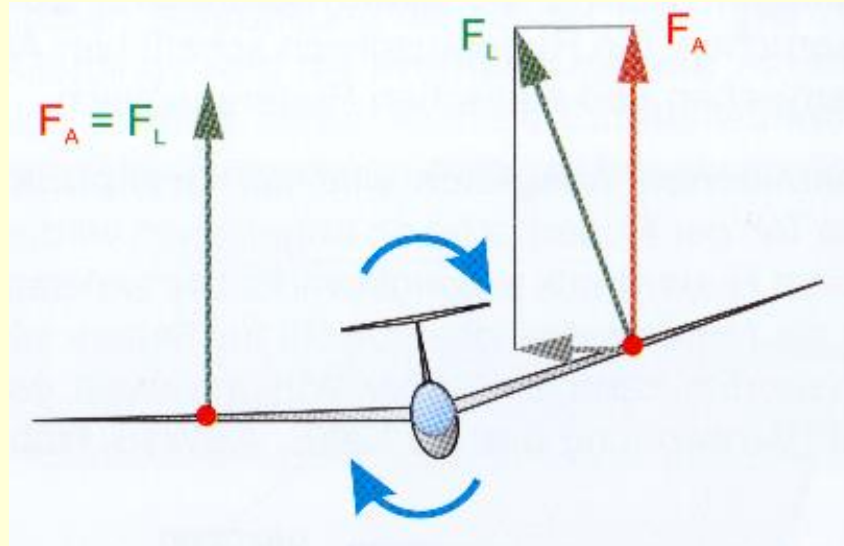
- ➔ Druckpunkt: gedachter Angriffspunkt der Luftkraft (Resultierende aus Auftrieb und Widerstand)
- ➔ Druckpunkt wandert bei größerem Anstellwinkel nach vorn (außer bei S-Schlag-Profilen)
- ➔ Instabiles / labiles Verhalten

Stabilität um die Querachse



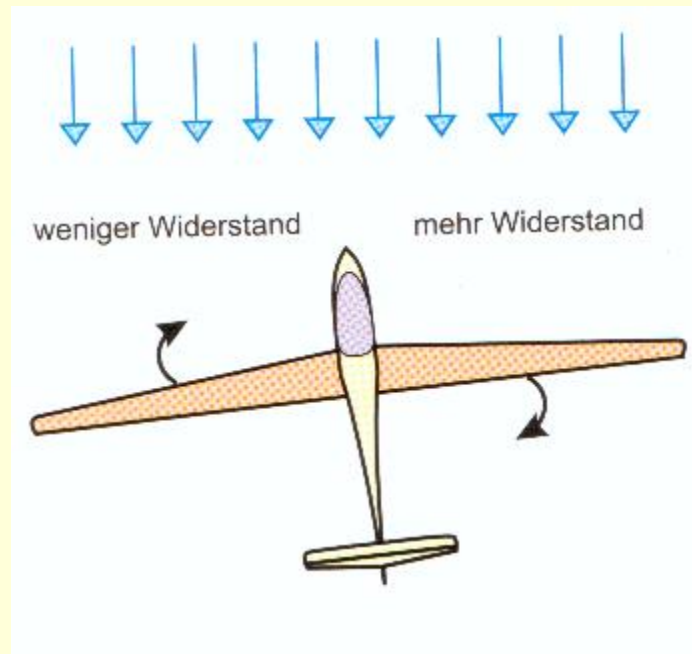
- ➔ Höhenflosse bewirkt Längsstabilität (Querachse!)
- ➔ Schwerpunktrücklage verringert die Eigenstabilität

Stabilität um die Längsachse



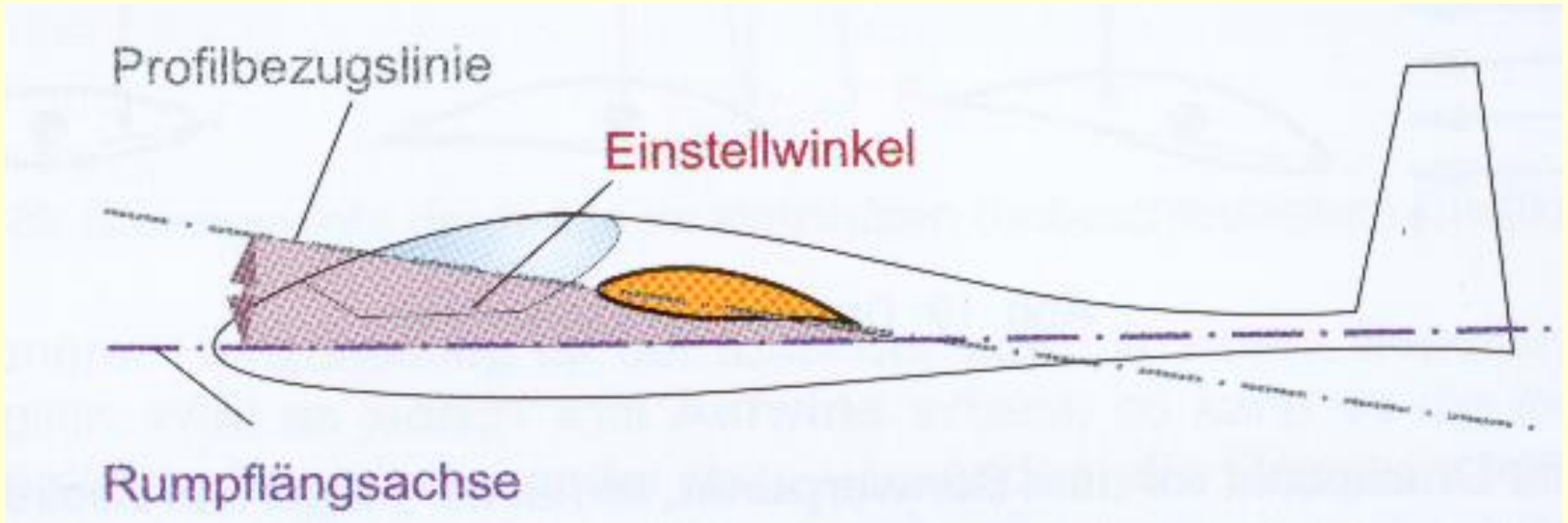
- ➔ V-Stellung des Flügels bewirkt Querstabilität
- ➔ Geringerer Auftrieb am hohen Flügel lässt diesen wieder in Ausgangslage zurückkehren

Stabilität um die Hochachse



- ➔ Vorgeschiebener Flügel bietet mehr Widerstand, kehrt dadurch zurück -> Kursstabilität
- ➔ Seitenflosse mit Windfahneneneffekt stabilisiert zusätzlich

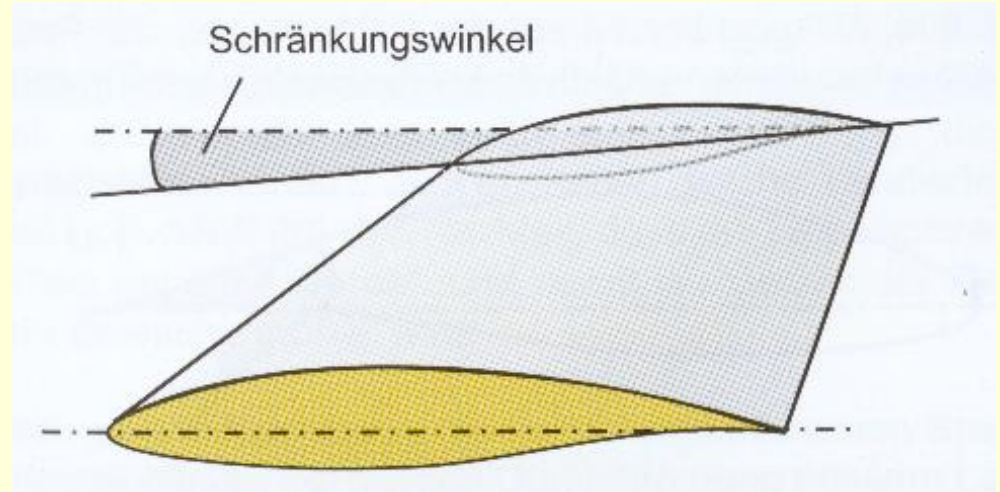
Einstellwinkel



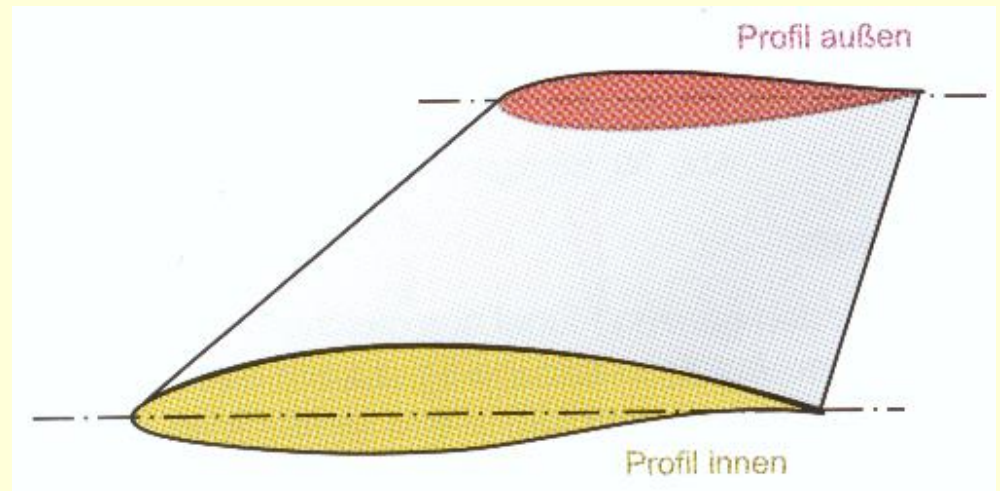
- ➔ Winkel zwischen Profilbezugslinie und Rumpflängsachse
- ➔ Nur veränderbar bei Wölbklappenflugzeugen

Schränkung

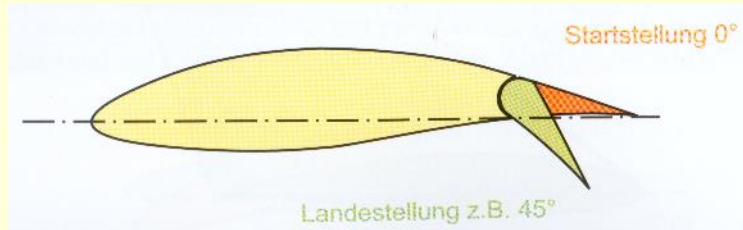
Geometrische
Schränkung



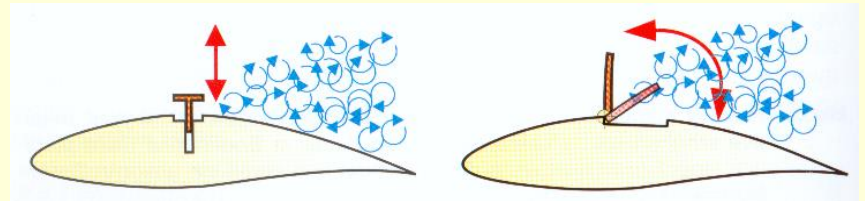
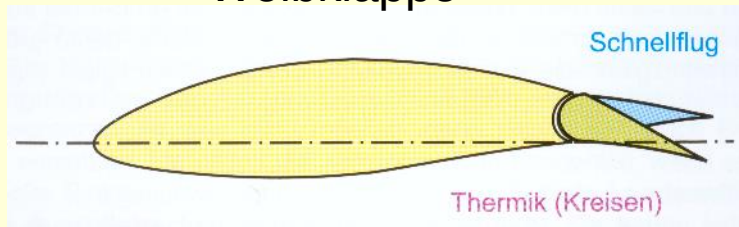
Aerodynamische
Schränkung



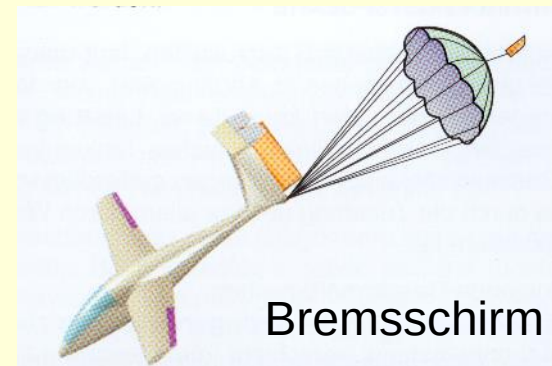
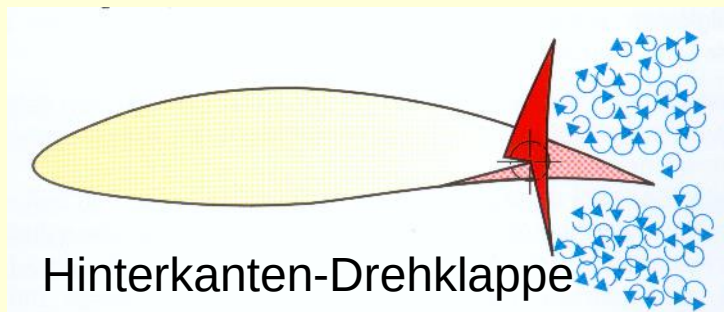
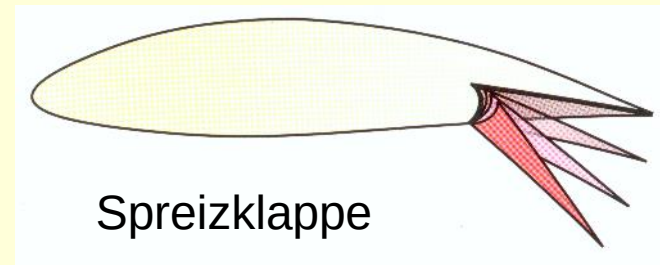
Start- und Landehilfen



Wölbklappe



Stör-, Bremsklappe, Sturzflugbremse
oder Schempp-Hirth-Klappe



Aerodynamik - Ende



Fragen ?