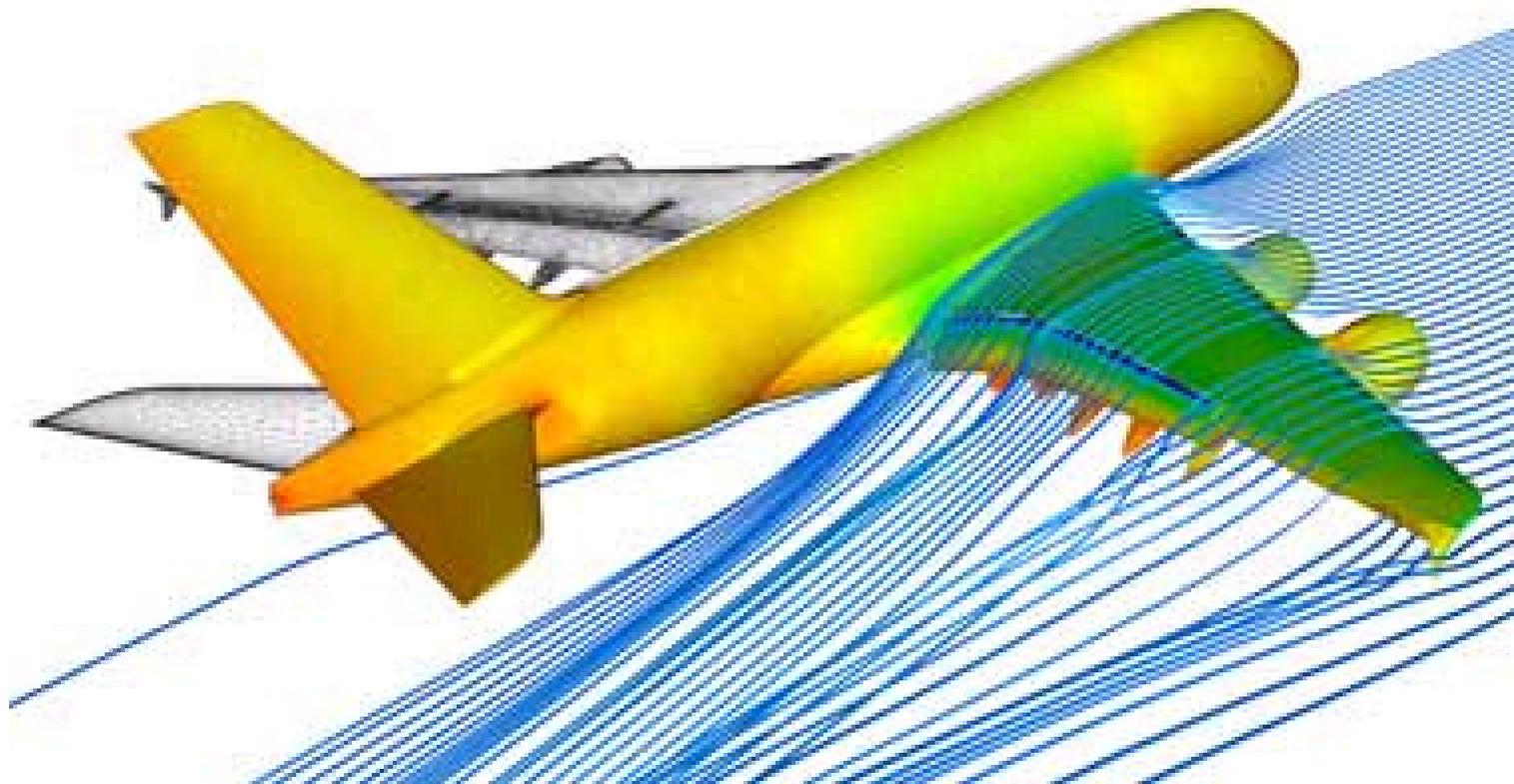


Aerodynamik



Auftrieb



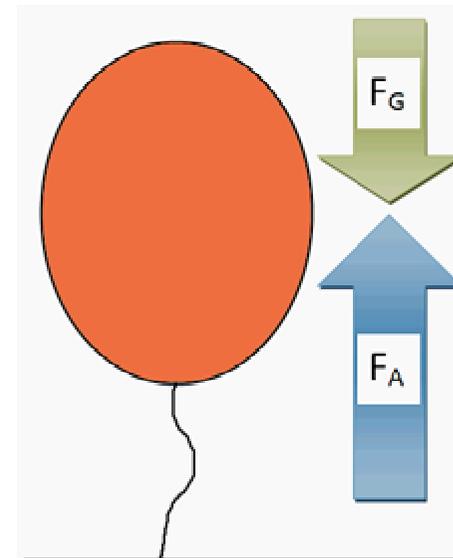
- Damit ein Flugzeug fliegen kann benötigt es einer Kraft die es in der Luft hält:
- Diese Kraft wird **AUFTRIEB** genannt
- Es gibt zwei Arten von Auftrieb:
 - Statischer Auftrieb (Ballon)
 - Dynamischer Auftrieb (Flugzeug)



Statischer Auftrieb



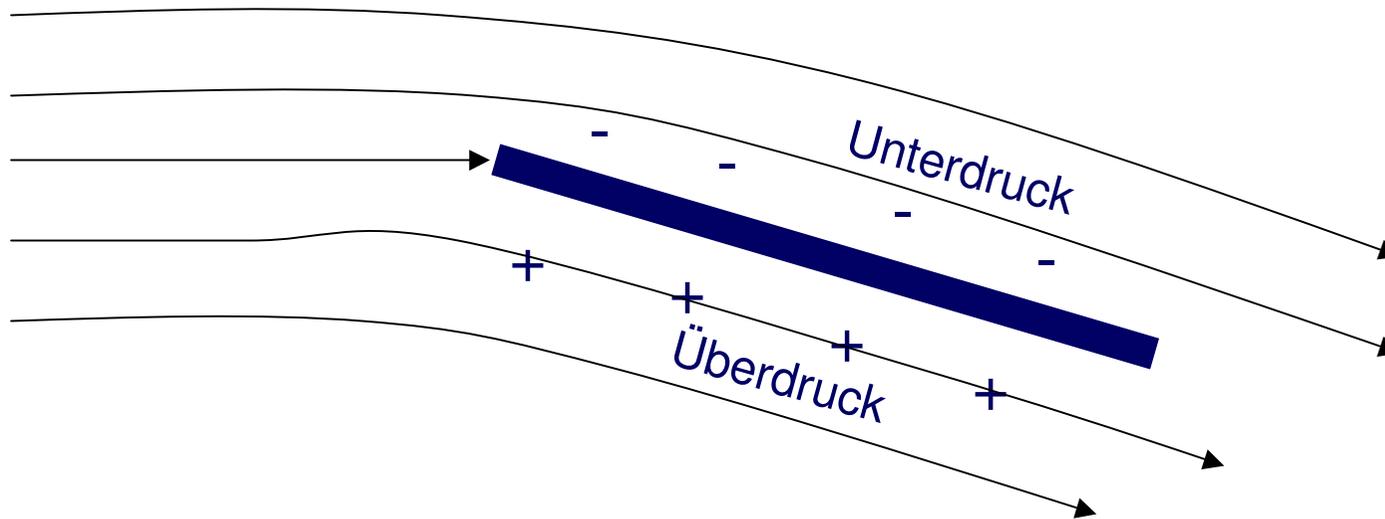
- Statischer Auftrieb entsteht durch unterschiedliche Dichte
- Ein Schiff schwimmt weil es leichter ist als das Verdrängte Wasser
- Ein Ballon fliegt weil er leichter ist als die verdrängte Luft
- Luftdichte der Standardatmosphäre:
 $1,225 \text{ kg/m}^3$



Dynamischer Auftrieb



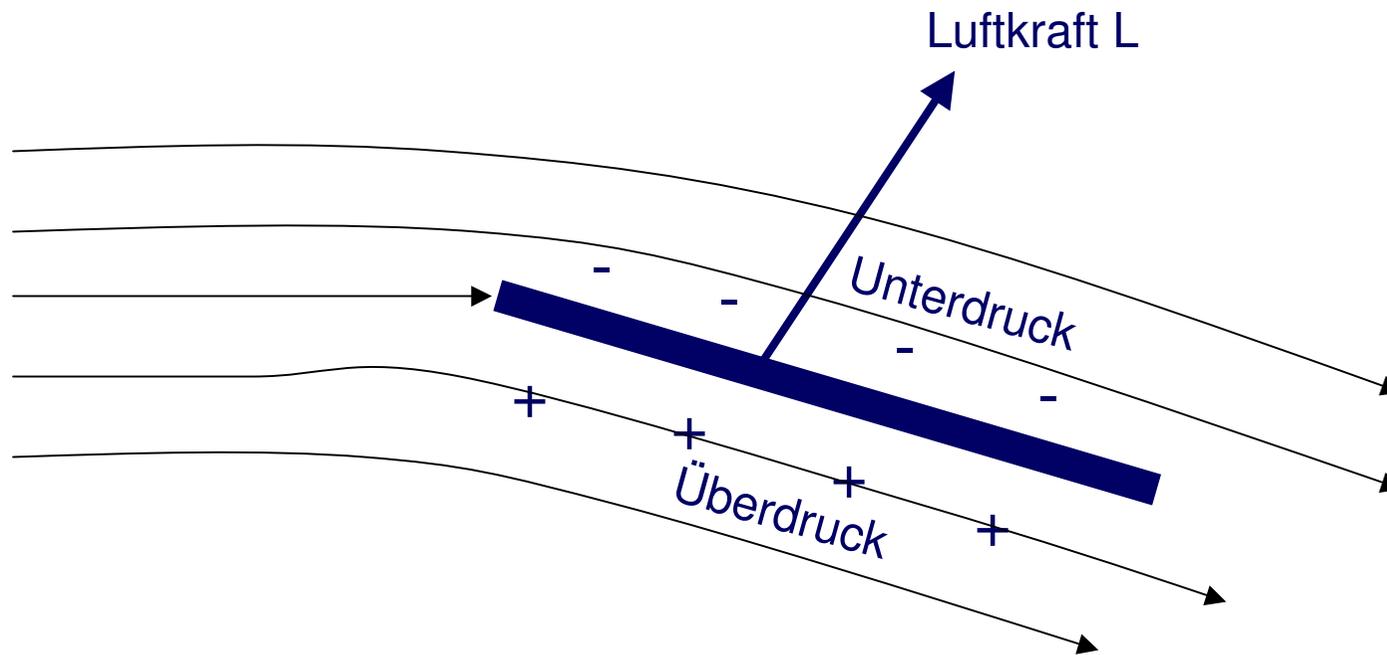
- Dynamischer Auftrieb entsteht durch die Umströmung von Körpern (Tragflächen) durch Luftmoleküle
- Durch die Ablenkung der Luft an dem Körper entstehen Druckunterschiede



Luftkraft

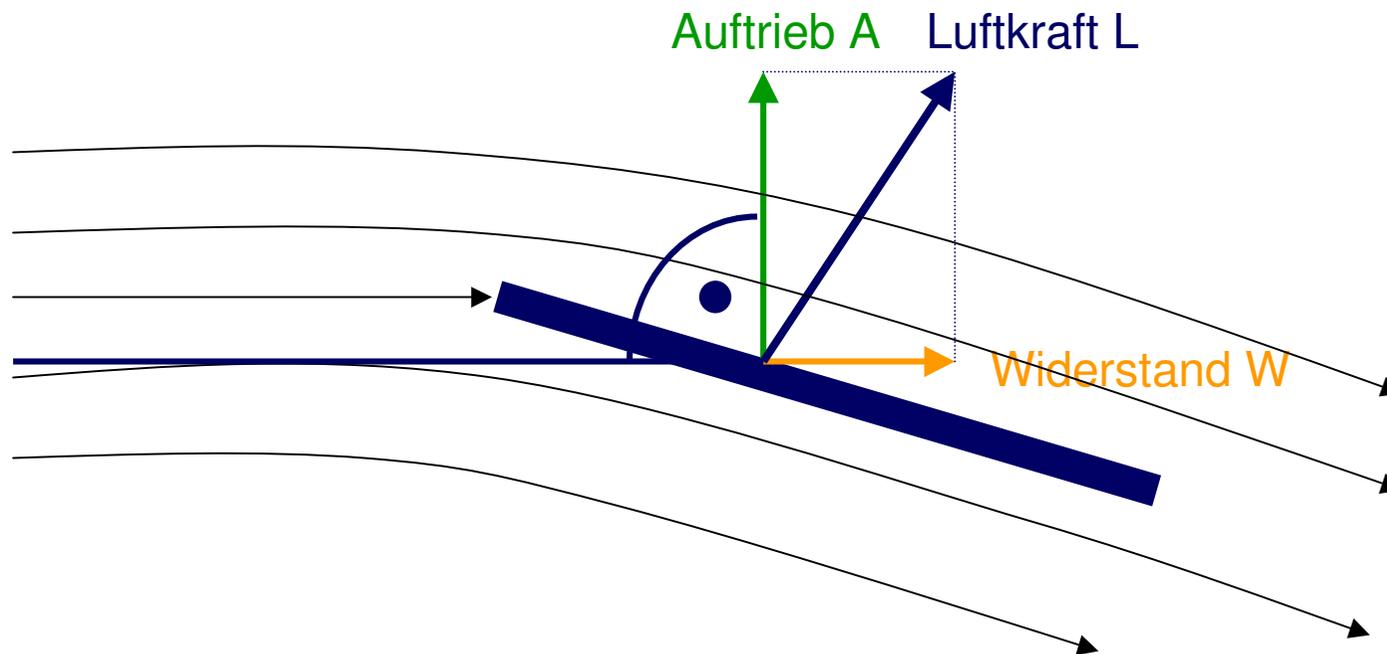


- Die Druckunterschiede erzeugen eine auf den Körper wirkende Kraft: **Die Luftkraft**



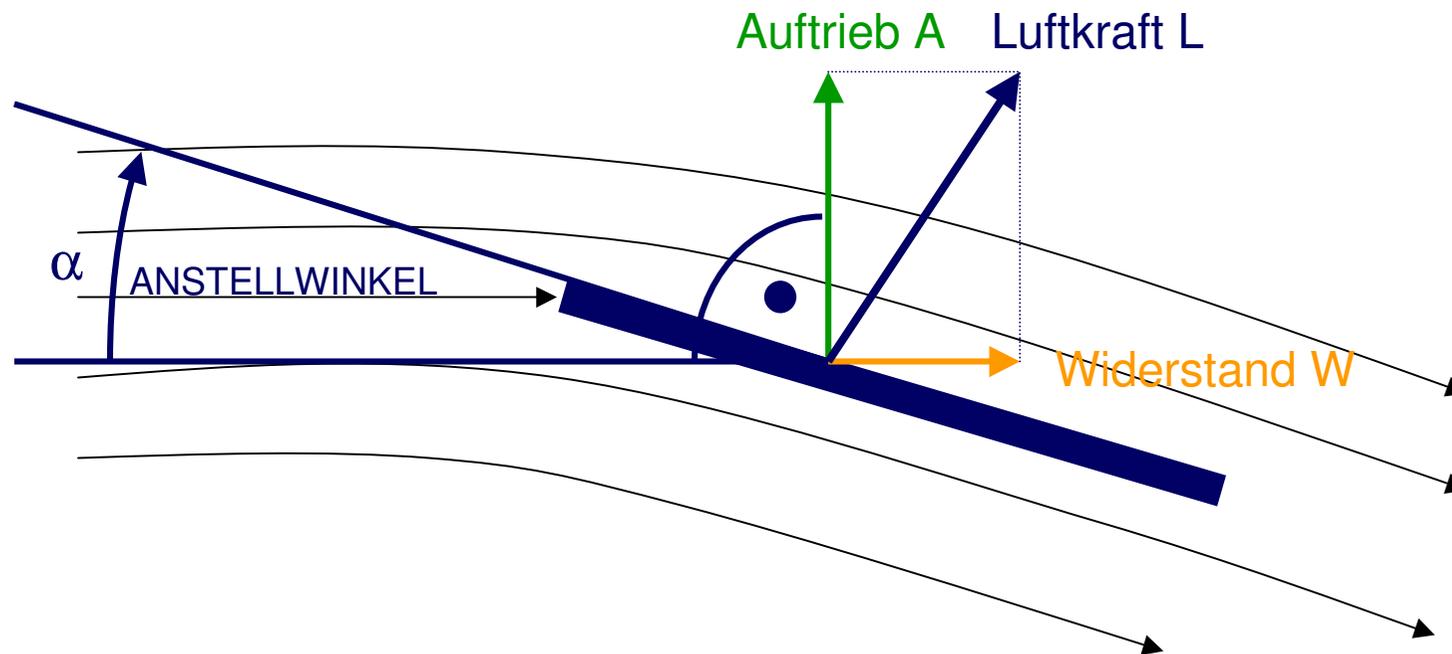
Auftrieb / Widerstand

- Die Luftkraft teilt man in zwei Komponenten auf:
- Auftrieb A
(senkrecht zur anströmenden Luft)
- Widerstand W
(parallel zur anströmenden Luft)



Anstellwinkel

- Den Winkel unter dem der Flügel gegenüber der anströmenden Luft bildet nennt man: ANSTELLWINKEL (α)
- Der Auftrieb verändert sich in Abhängigkeit vom Anstellwinkel!

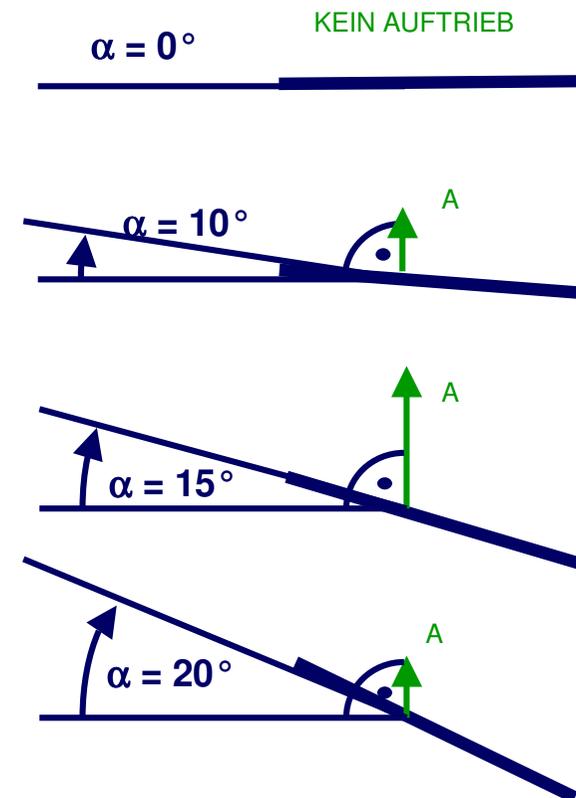


Die Ebene Platte



Wie verändert sich der Auftrieb bei Variation des Anstellwinkels?

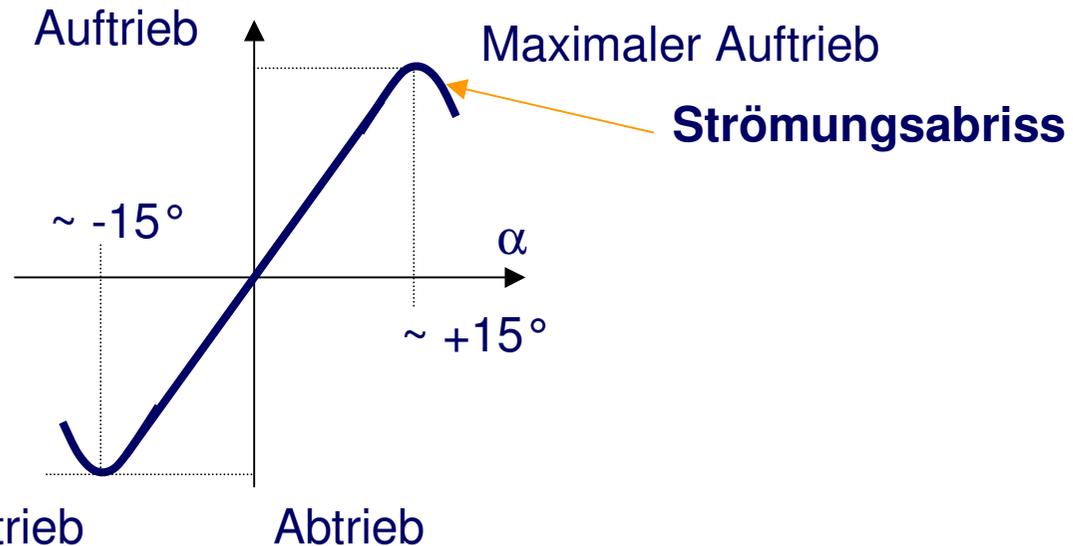
- Kein Auftrieb bei $\alpha = 0^\circ$
- Auftrieb bei $\alpha > 0^\circ$;
- Bei Vergrößerung des Anstellwinkels zunehmender Auftrieb
- Maximaler Auftrieb bei etwa $\sim +15^\circ$
- Bei weitere Vergrößerung von α nimmt der Auftrieb schnell ab
- Gleiches Verhalten bei negativem Anstellwinkel:
- Abtrieb bei $\alpha < 0^\circ$;
- Bei Verringerung des Anstellwinkels zunehmender Abtrieb
- Maximaler Abtrieb bei etwa $\sim -15^\circ$
- Bei weitere Verringerung von α nimmt der Abtrieb schnell ab



Die Ebene Platte



- Auftrieb und Anstellwinkel als Grafik:



- Das Zusammenbrechen des Auftriebs wird als **Strömungsabriss** bezeichnet
- **Strömungsabriss tritt unabhängig von der Anströmungsgeschwindigkeit ein!**
- **Auch bei Hoher Geschwindigkeit tritt der Strömungsabriss bei Erreichen des kritischen Anstellwinkels ein!**

Auftriebsgleichung



- Wieviel Auftrieb entsteht?

$$A = C_A * F * \frac{\rho}{2} * v^2 \quad \swarrow \text{Geschwindigkeitsquadrat!}$$

- A = Auftrieb
- C_a = **Auftriebsbeiwert**
- F = Grundfläche des Flügels / der Platte
- ρ = Luftdichte (Standardatmosphäre: 1,225 kg/m³)
- v = Geschwindigkeit der anströmenden Luft

$$q = \frac{\rho}{2} * v^2 \quad \text{Staudruck} \quad \leftrightarrow \quad v = \sqrt{2 * \frac{q}{\rho}} \quad \text{Fahrmesserprinzip: Messwert ist der Staudruck!}$$

- q = **Staudruck**
(Dient dem Fahrmesser zur Geschwindigkeitsanzeige)

Widerstandsgleichung



- Wieviel Widerstand entsteht? → In Analogie zum Auftrieb:

$$W = C_W * F * \frac{\rho}{2} * v^2$$

↖ Geschwindigkeitsquadrat!

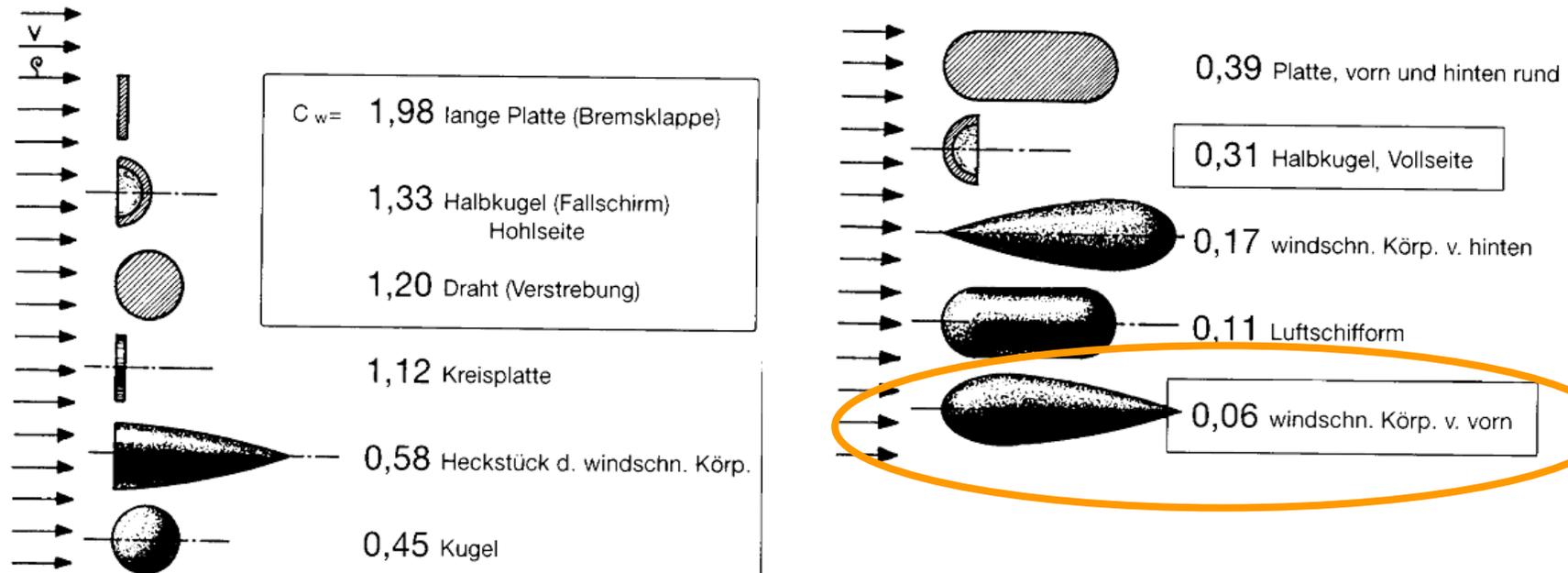
- W = Widerstand
- C_W = **Widerstandsbeiwert**
- F = Grundfläche des Flügels / der Platte
- ρ = Luftdichte (Standardatmosphäre: 1,225 kg/m³)
- v = Geschwindigkeit der anströmenden Luft

Warum „**Beiwerte**“?

Sie ermöglichen die aerodynamischen Eigenschaften von Formen unabhängig von ihrer Größe oder der Anströmungsgeschwindigkeit zu vergleichen.

Widerstandsbeiwert

- Beispiel: Widerstandsbeiwerte verschiedener Formen:

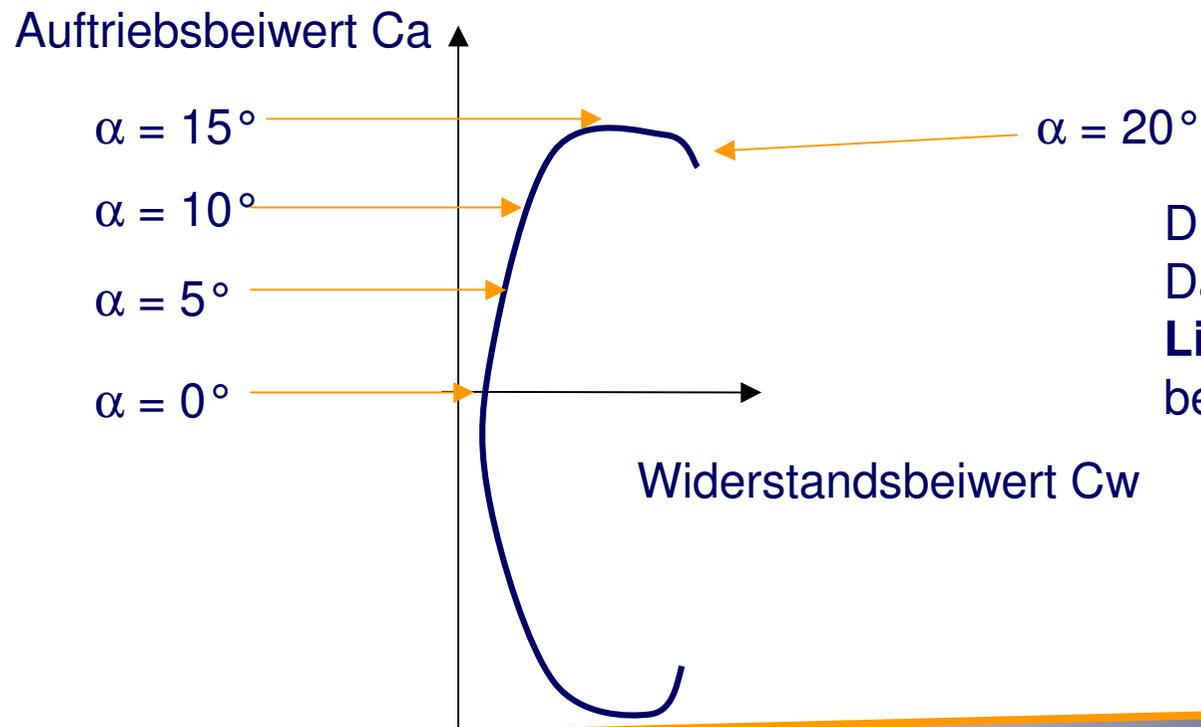


- Tropfenform ist besonders günstig!
→ Gut zum verkleiden von z.B. Streben
- Quer angeströmte Platte besonders schlecht
→ Gute Bremswirkung

Die Lilienthal Polare



- Das Verhältnis von Auftriebsbeiwert zu Widerstandsbeiwert ist entscheidend für die Flugleistung!
- Grafische Darstellung für die ebene Platte: 
Auftriebs und Widerstandsbeiwert bei Variation des Anstellwinkels (Polare)



Diese Form der Darstellung wird als **Lilienthalpolare** bezeichnet!

Einfluss von Wölbung

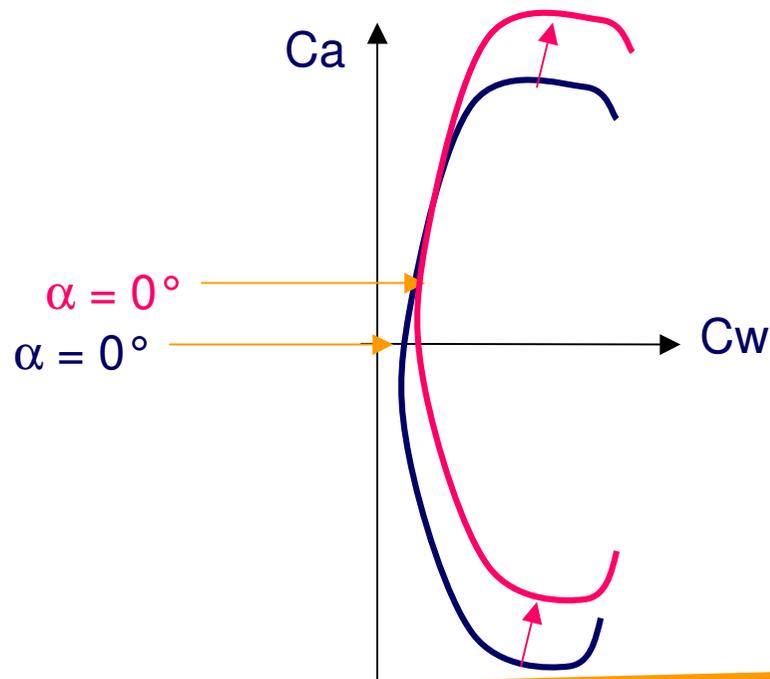


- Wölbung verschiebt die Polare
 - Höherer Maximaler Auftrieb
 - Etwas mehr Widerstand
 - Schlechtere Rückenflugeigenschaften
 - Auftrieb schon bei $\alpha = 0^\circ$

Gewölbte Platte



Ebene Platte

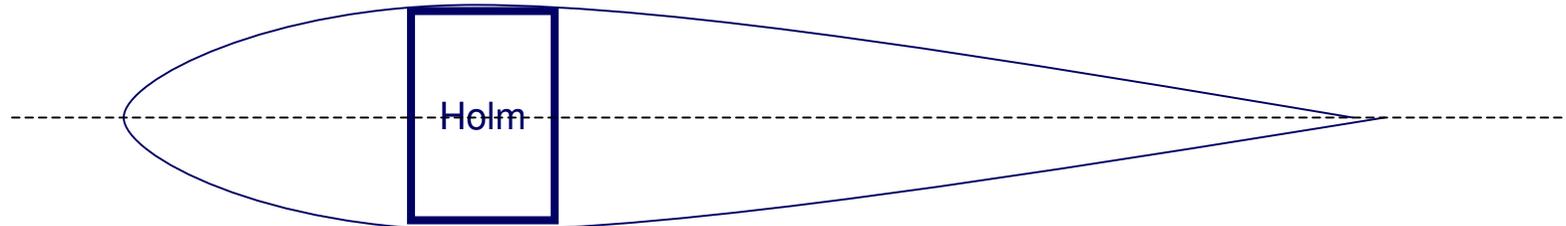


Ideal als Tragflügelprofil?

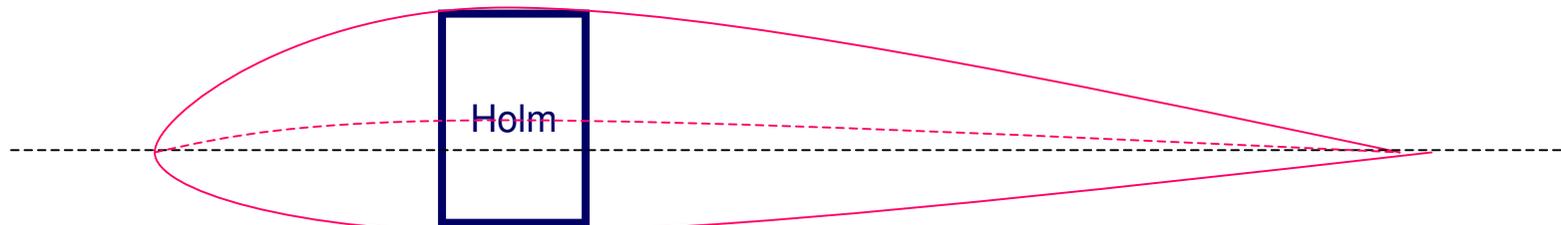
- Nein!
- Zu dünn, der Flügel würde brechen
- Der Flügel muss dicker werden um beispielsweise einen Holm für die Aufnahme der Biegekräfte unterbringen zu können...

Das Tragflügelprofil

- Anforderungen an das Tragflügelprofil:
- Bauhöhe ermöglichen (Holm umschließen)
- Wenig Widerstand → Tropfen
(beste Form zur aerodynamischen Verkleidung von Körpern)



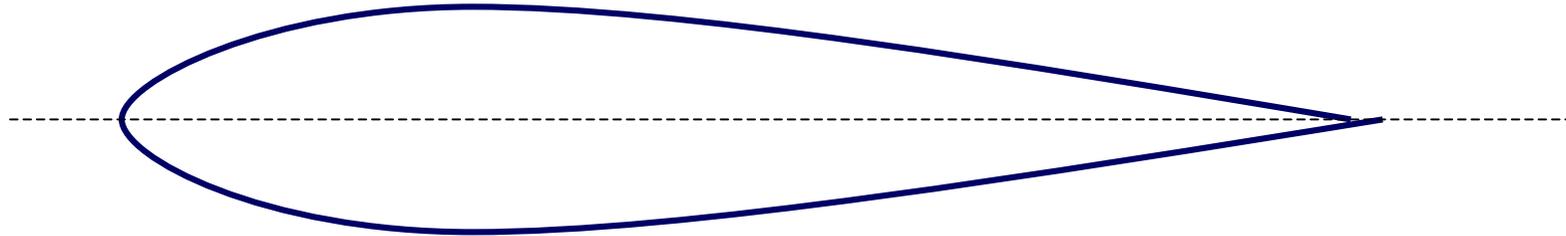
- Günstiges Verhältnis Auftrieb / Widerstand → Wölbung
→ Gewölbter Tropfen



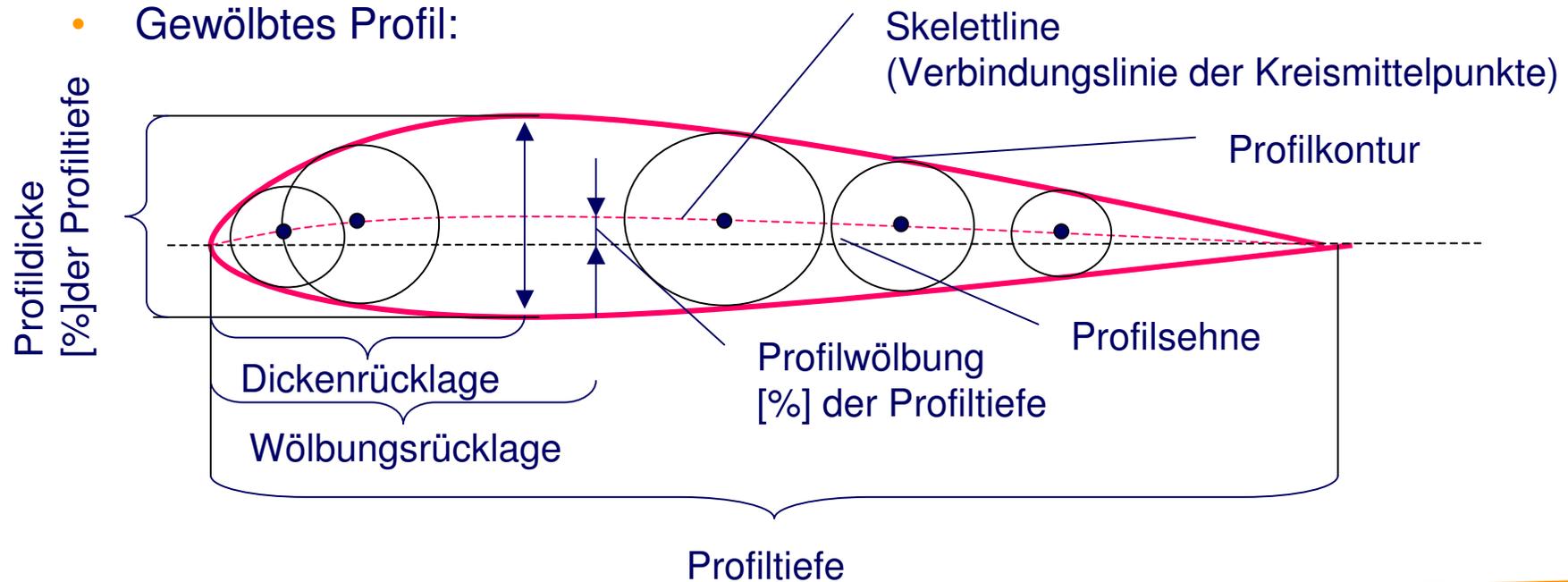
Das Tragflügelprofil



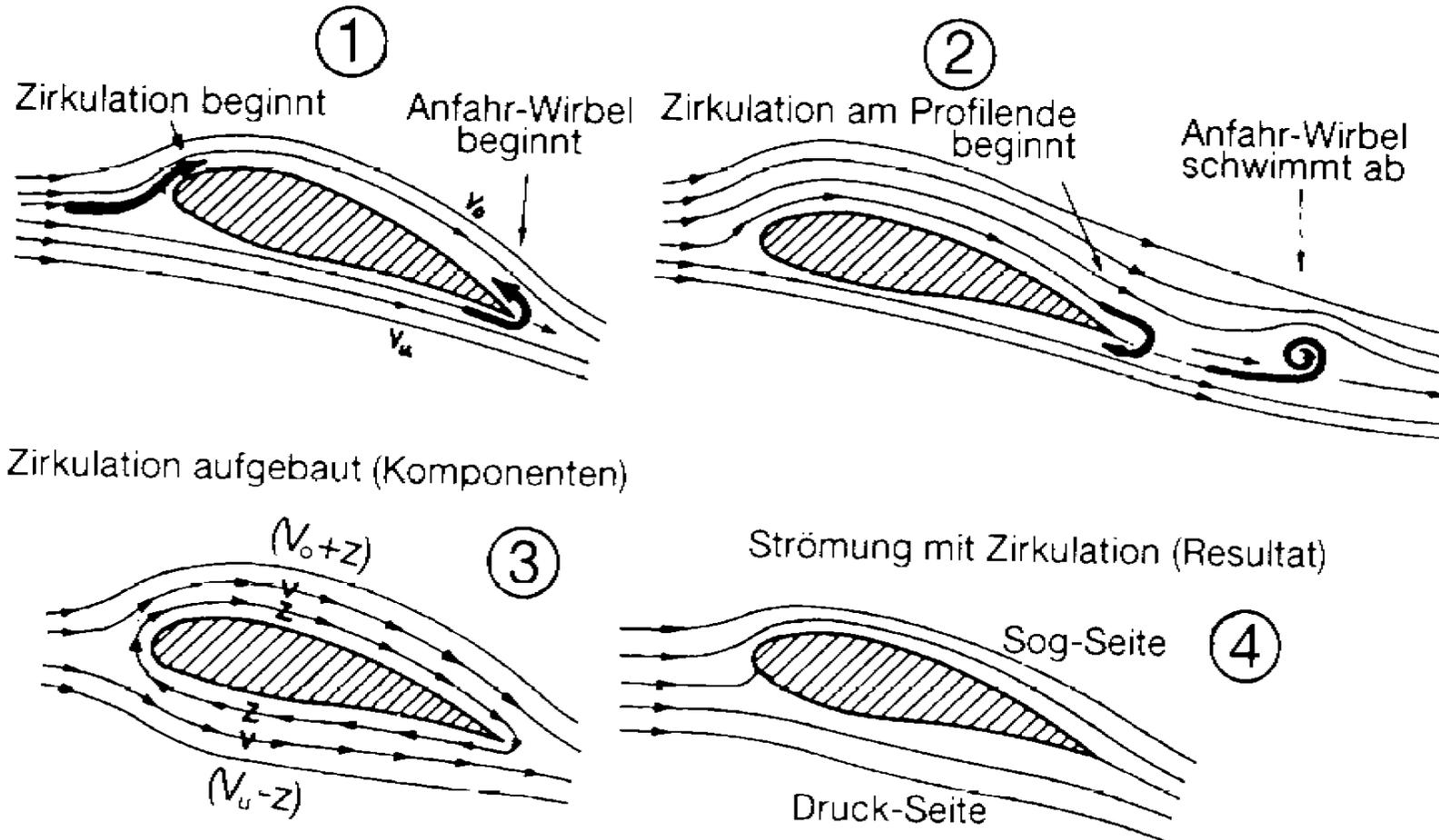
- Symmetrische Profil:



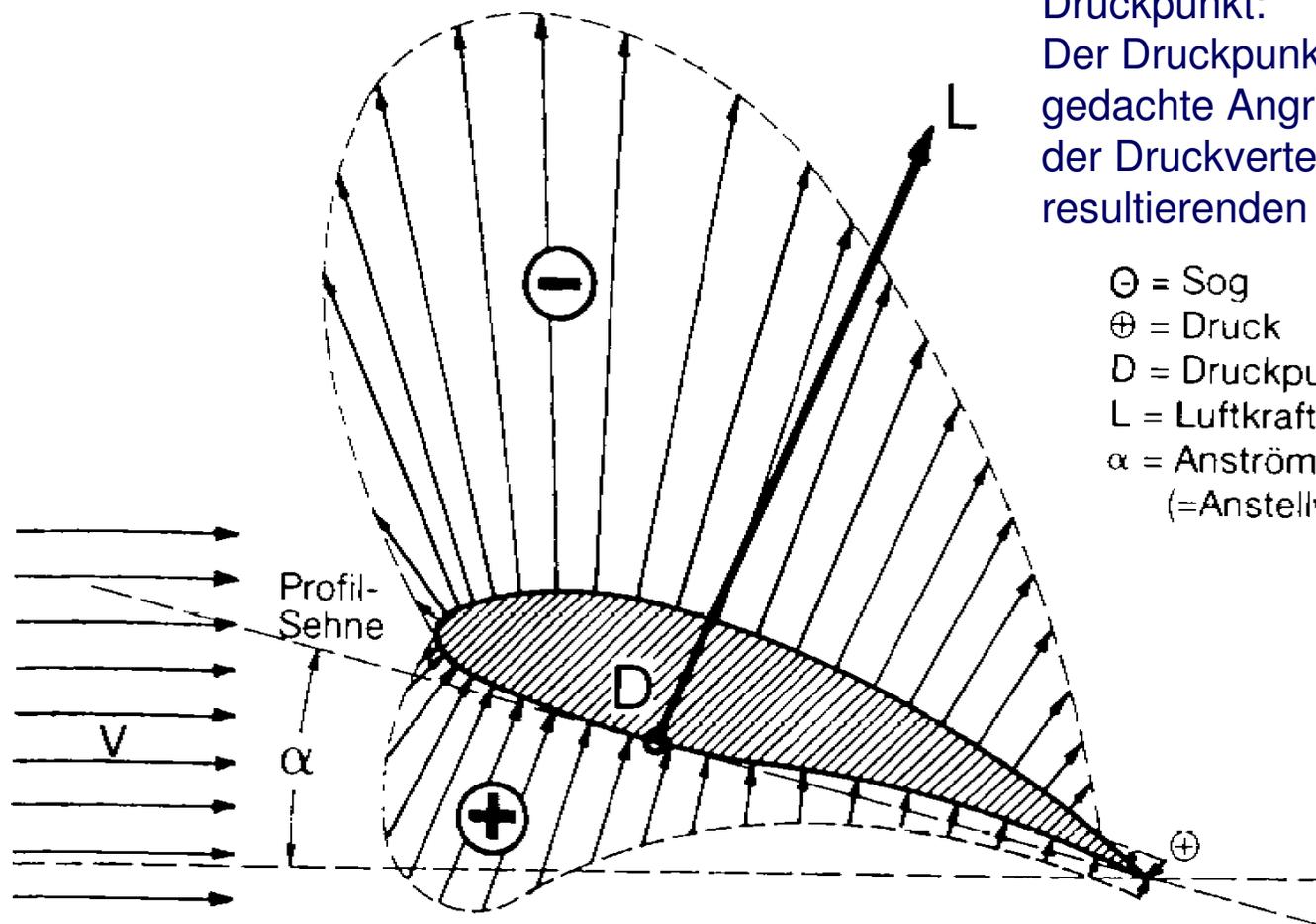
- Gewölbtes Profil:



Zirkulation um das Tragflügelprofil



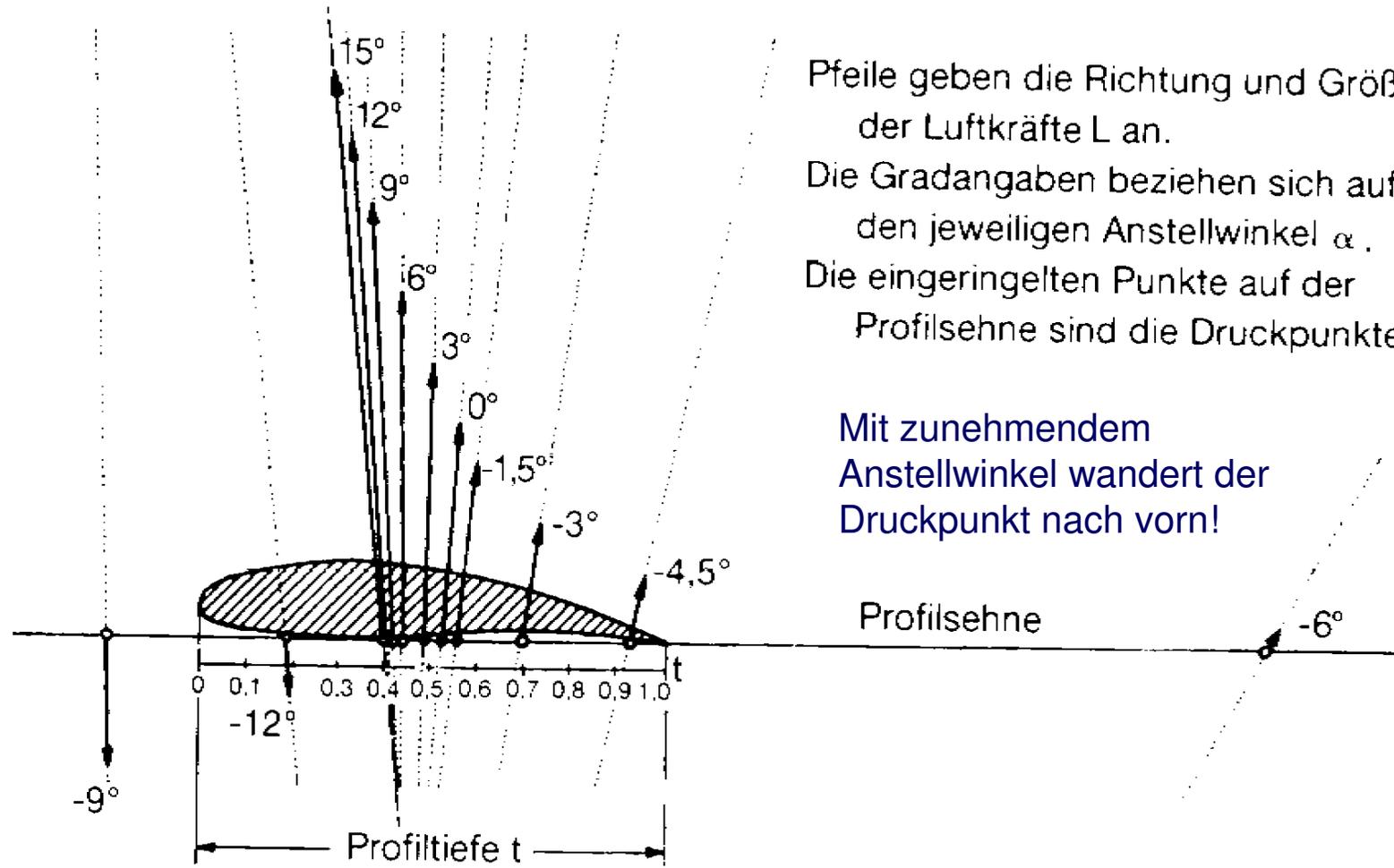
Druckverteilung am Profil



Druckpunkt:
Der Druckpunkt D ist der
gedachte Angriffspunkt der aus
der Druckverteilung
resultierenden Luftkraft L

- ⊖ = Sog
- ⊕ = Druck
- D = Druckpunkt
- L = Luftkraft-Resultierende
- α = Anströmwinkel
(=Anstellwinkel)

Druckpunktwanderung



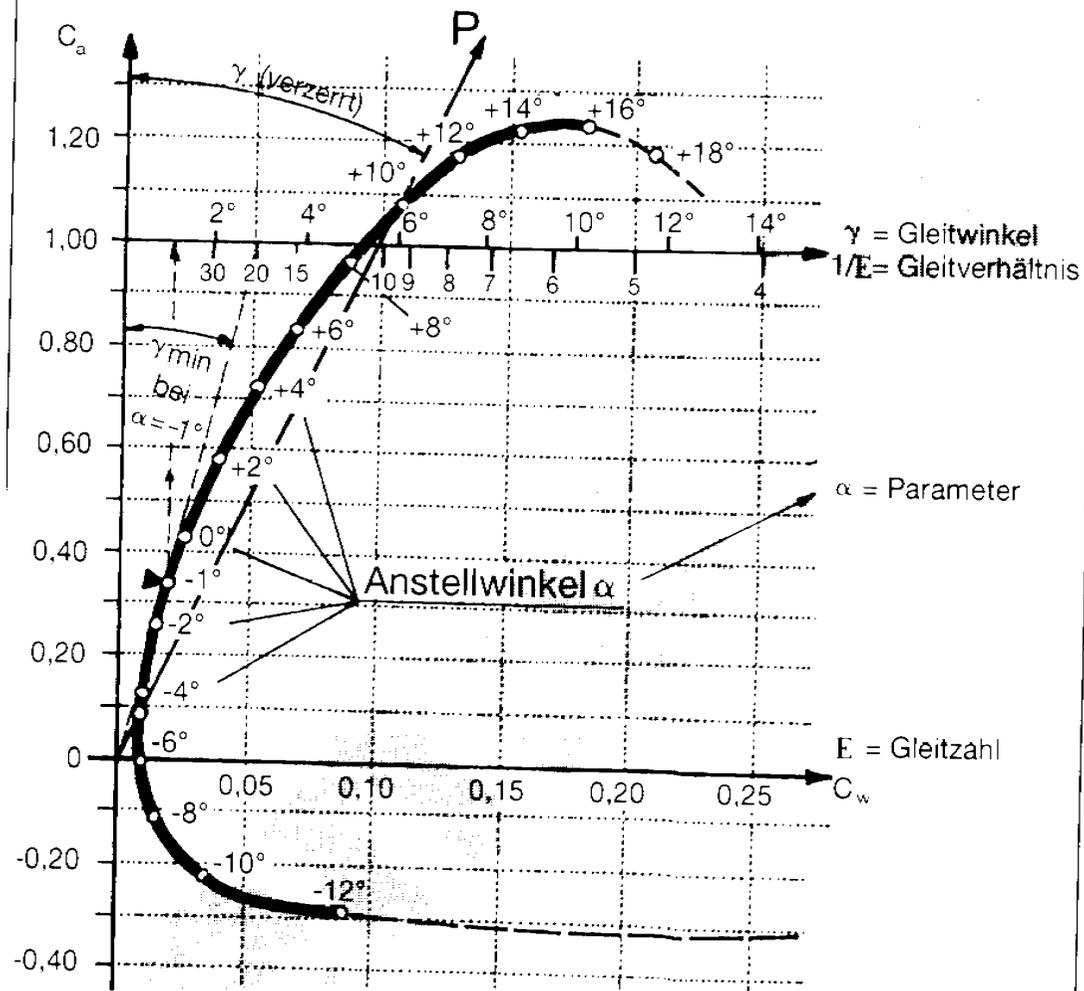
Pfeile geben die Richtung und Größe der Luftkräfte L an.

Die Gradangaben beziehen sich auf den jeweiligen Anstellwinkel α .

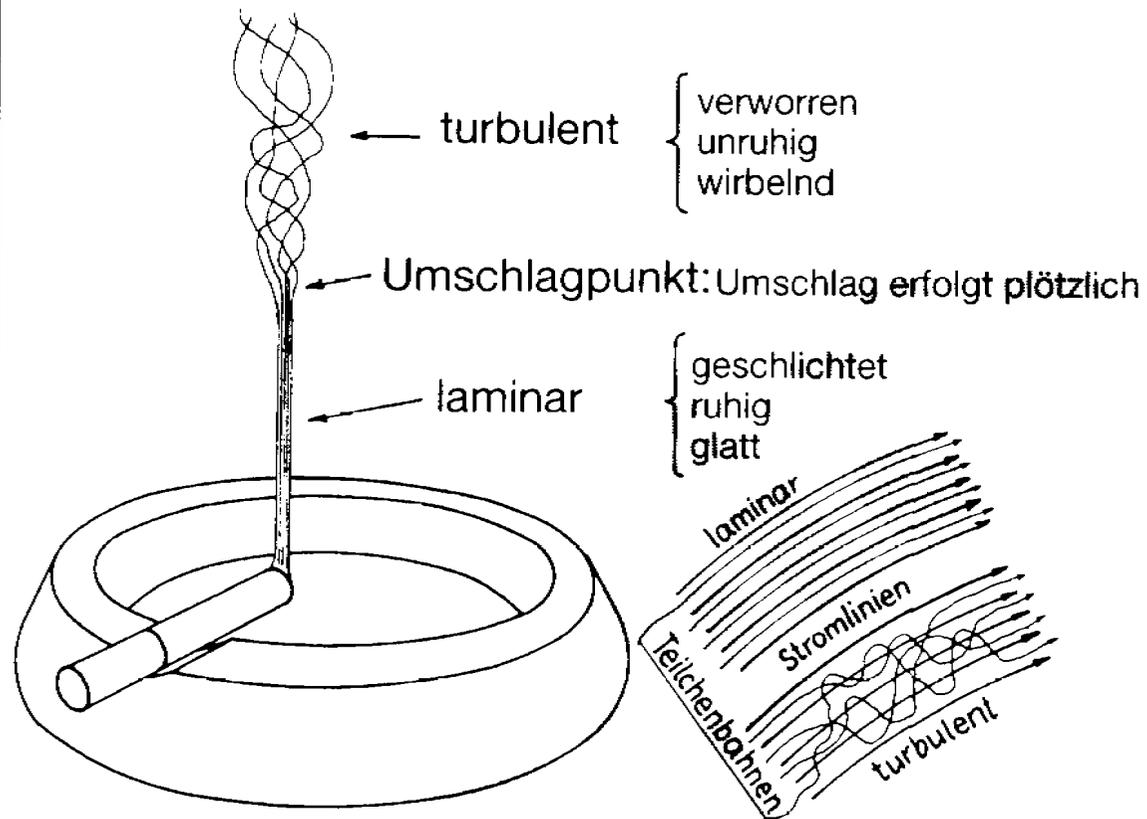
Die eingeringelten Punkte auf der Profilsehne sind die Druckpunkte D .

Mit zunehmendem Anstellwinkel wandert der Druckpunkt nach vorn!

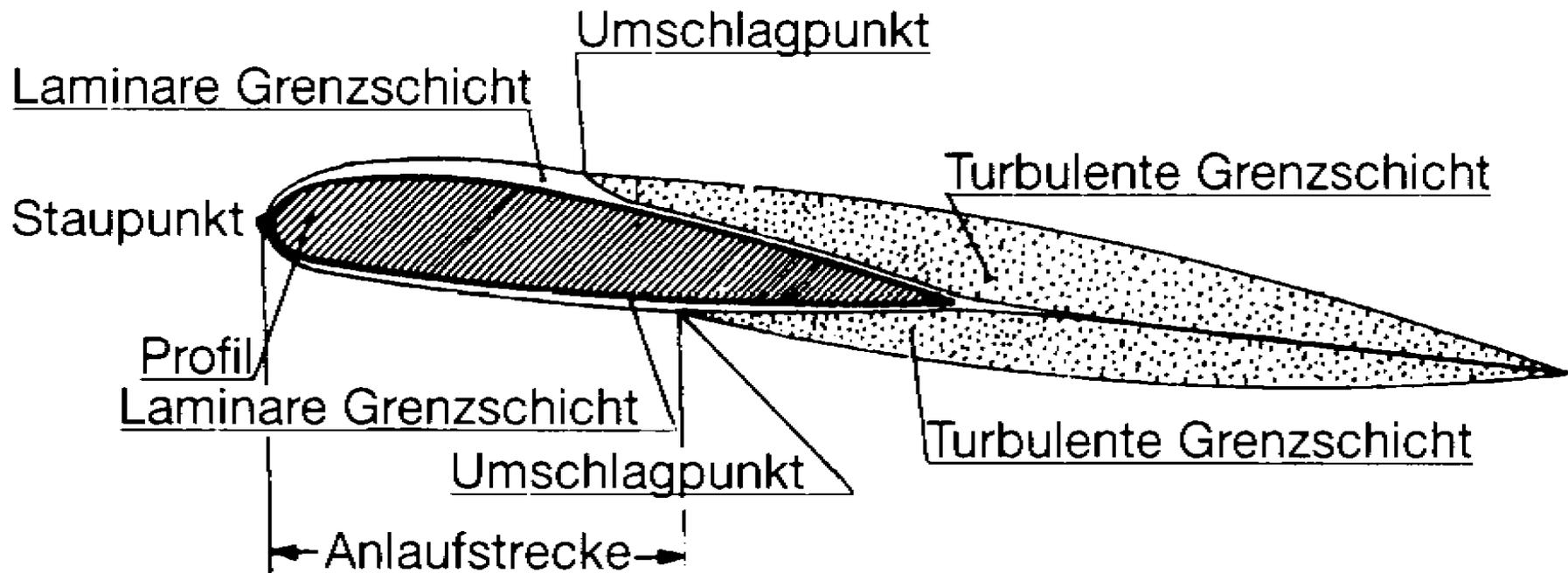
Lilienthalpolare im Detail



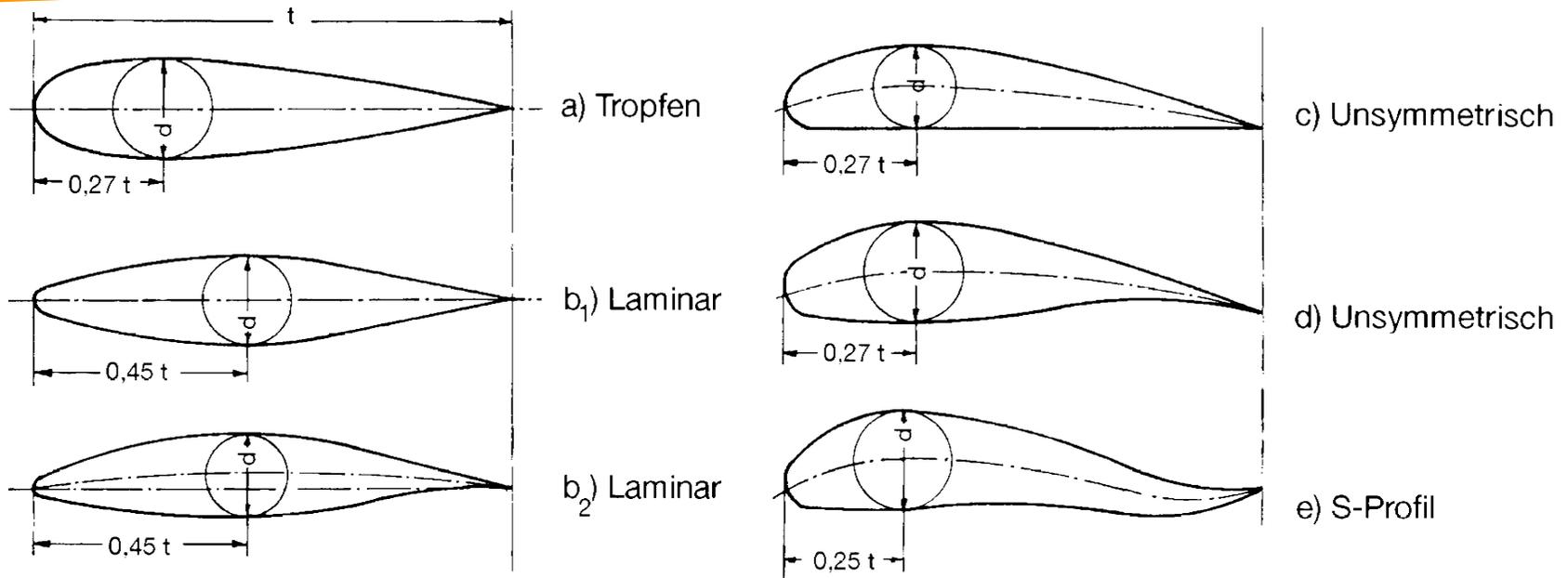
Laminar / Turbulent



Grenzschicht am Profil

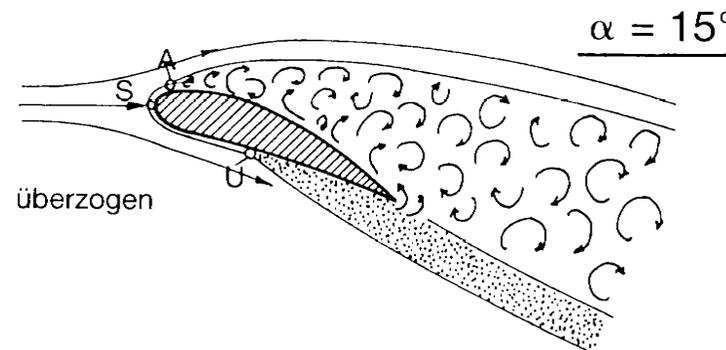
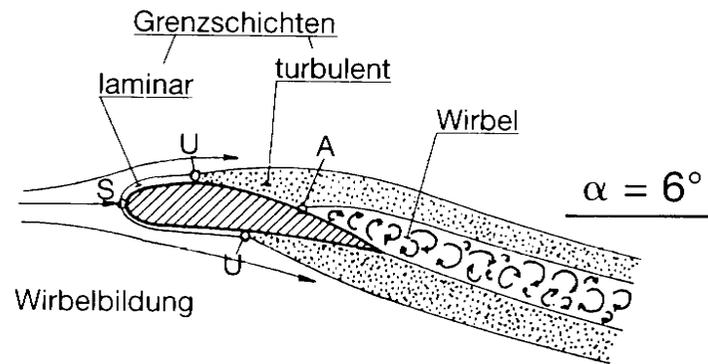
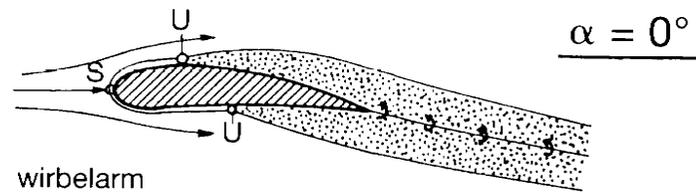


Profilformen

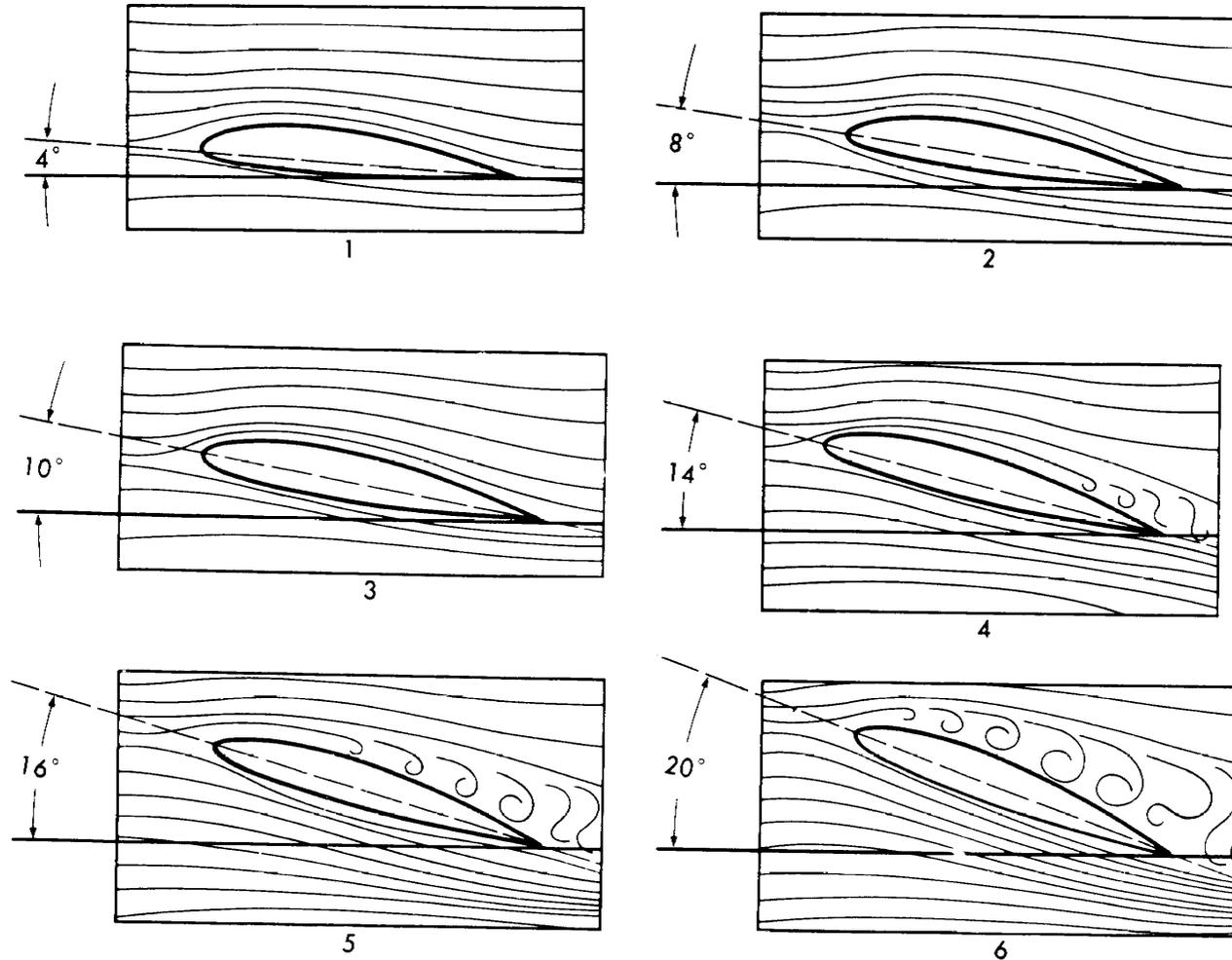


- Bei zunehmendem Dickenverhältnis d/t steigt der Druckwiderstand
- Bei zunehmender Wölbung steigt der Höchstauftrieb
- Dickere Profile sind unempfindlicher gegen Änderung des Anstellwinkels
- Mit zunehmender Dickenrücklage vermindert sich der Reibungswiderstand

Ablösung der Grenzschicht



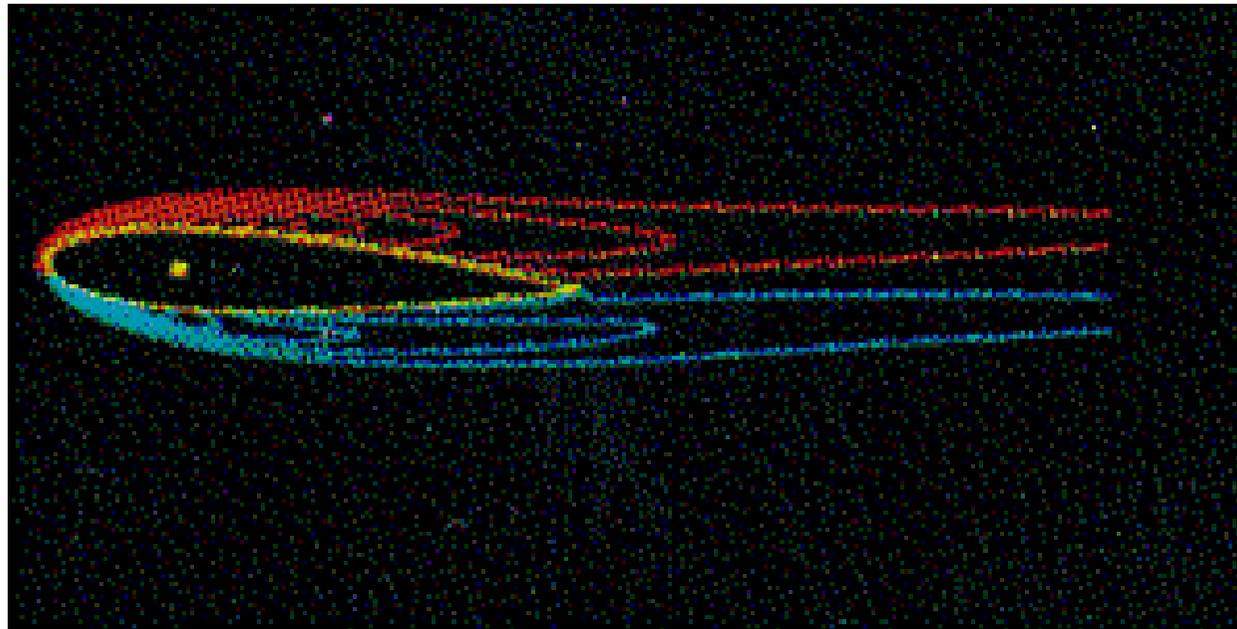
Ablösung der Grenzschicht



Luftströmung
am Tragflügel
bei
verschiedenen
Anstellwinkeln

Abb. 24

Ablösung der Grenzschicht



Unterdruck am Tragflügel



Unterdruck am Tragflügel



Unterdruck am Tragflügel



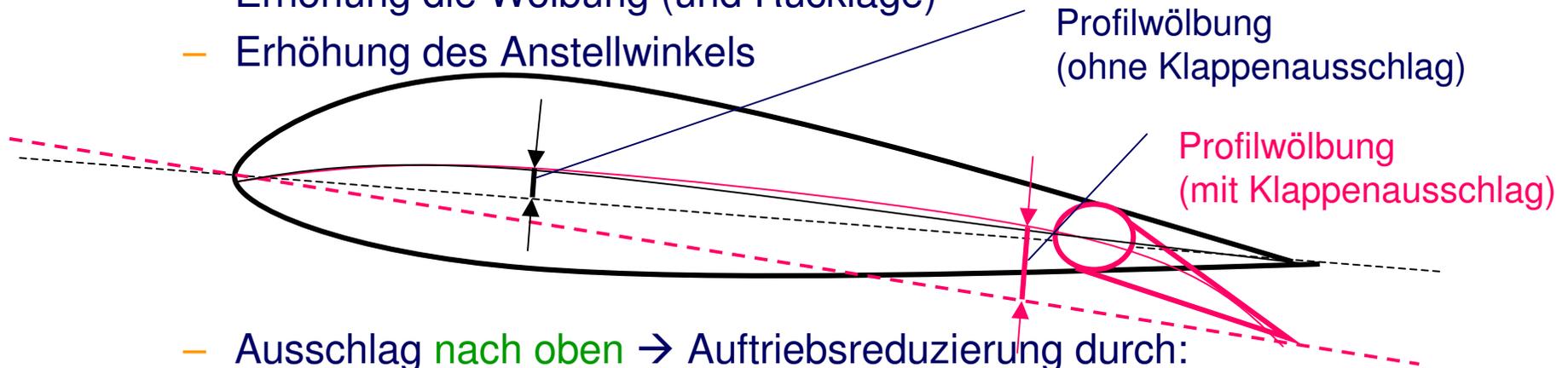
Einfluss von Klappen



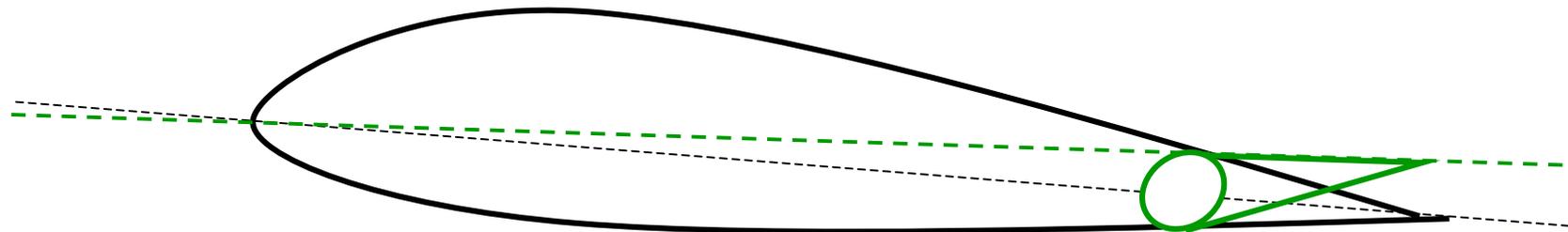
Klappen am Tragflügel:

- Ausschlag **nach unten** → Zusatzauftrieb durch:

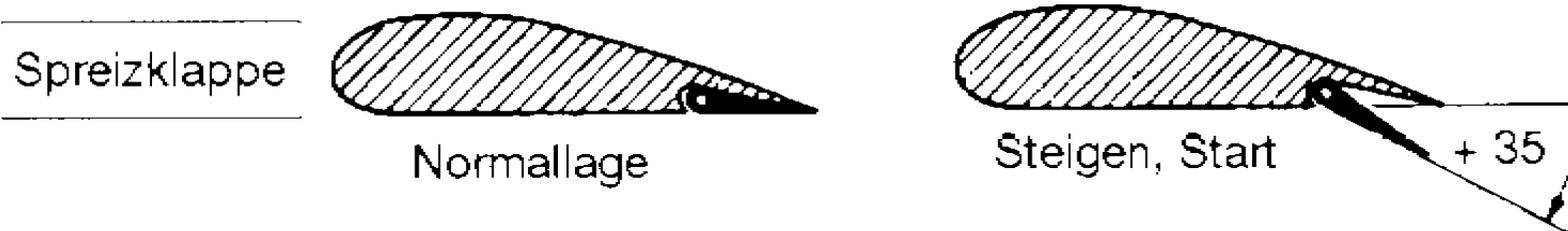
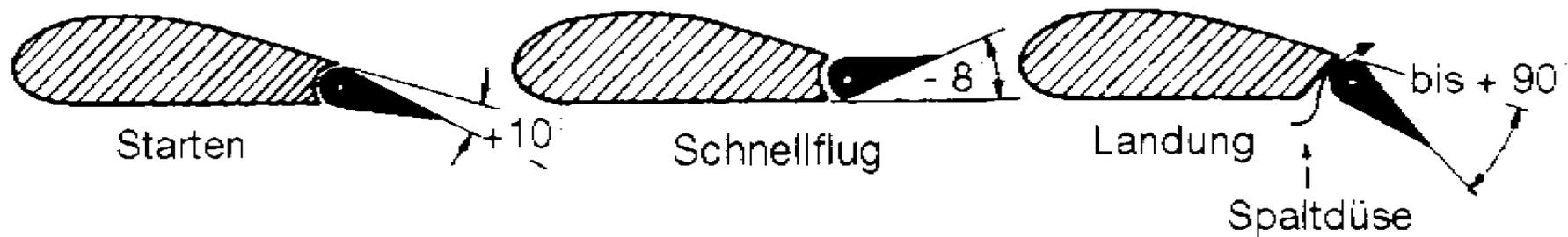
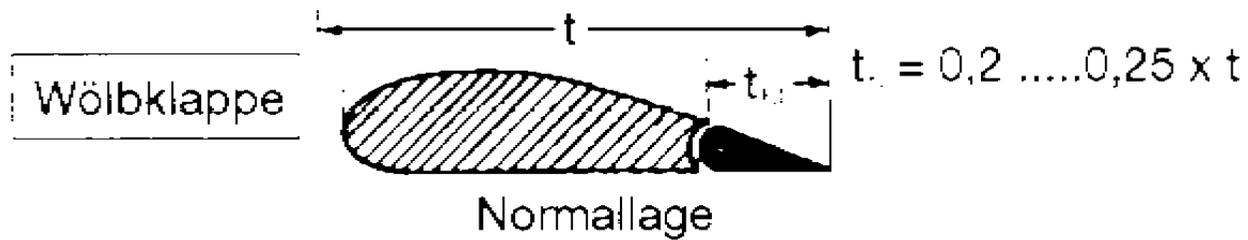
- Erhöhung der Wölbung (und Rücklage)
- Erhöhung des Anstellwinkels



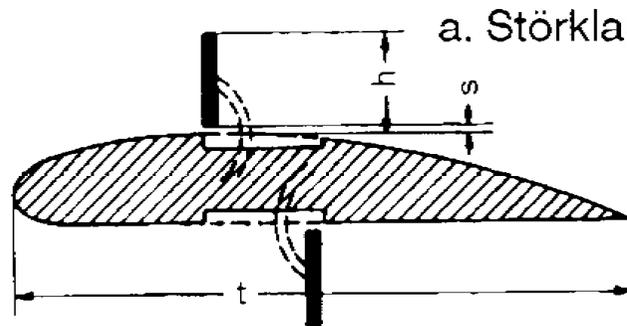
- Ausschlag **nach oben** → Auftriebsreduzierung durch:
- Verminderung der Wölbung (und Rücklage)
- Verminderung des Anstellwinkels



Wölbklappe / Spreizklappe



Bremsklappen



a. Störklappe

F = Flügelfläche

L = Klappenlänge ($L \times h = 0,01 \dots 0,05 \times F$)

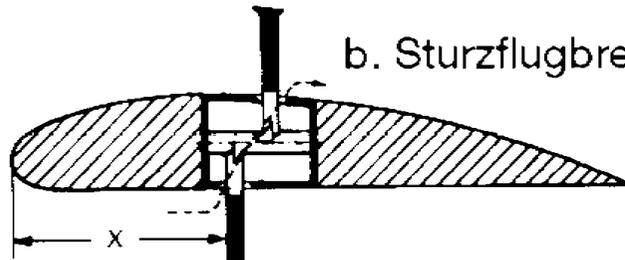
h = Klappenhöhe einschl. s ($\approx 0,15 \times t$)

s = Schlitzbreite ($0,2 \dots 0,3 \times h$)

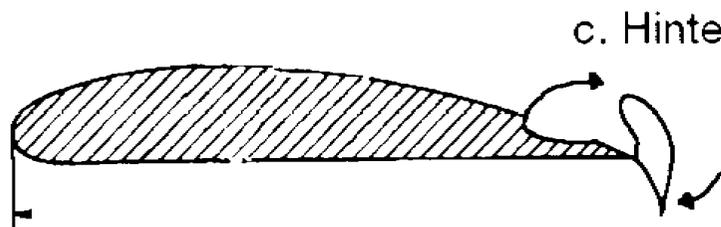
t = Profiltiefe

$\lambda = 0,25 \dots 0,45 \times t$

Sturzflugbremsen ermöglichen teilweisen Druckausgleich zwischen Profilober- und -unterseite.



b. Sturzflugbremse



c. Hinterkantendrehklappe

Fragen Teil I



- Was ist laminare, turbulente bzw verwirbelte Strömung?
- Was versteht man unter Umschlagpunkt?
- Beschreibe die Ablösung der Strömung?
- Wie entsteht der Auftrieb am Flügel?
- Wie verändert sich der Widerstand bei Verdoppelung der Geschwindigkeit?
- Wie verändert sich die Mindestfahrt in 10000 m Höhe gegenüber NN?
- Mit welchem Anstellwinkel fliege ich ungefähr stationär bei doppelter Mindestfahrt?
- wie verändert sich der Staudruck bei Verdoppelung der Geschwindigkeit?
- Warum ist es gefährlich im Landeanflug die Wölbklappen plötzlich zurückzunehmen?

Kräftegleichgewicht am Segelflugzeug 1



- Kräfte am Segelflugzeug:
- Die Luftkraft wirkt der Gewichtskraft entgegen $L = G$



Kräftegleichgewicht am Segelflugzeug 2

- Durch die Bahnneigung wirkt ein Teil der Gewichtskraft dem Widerstand entgegen
- Der andere Teil der Gewichtskraft wird vom Auftrieb getragen



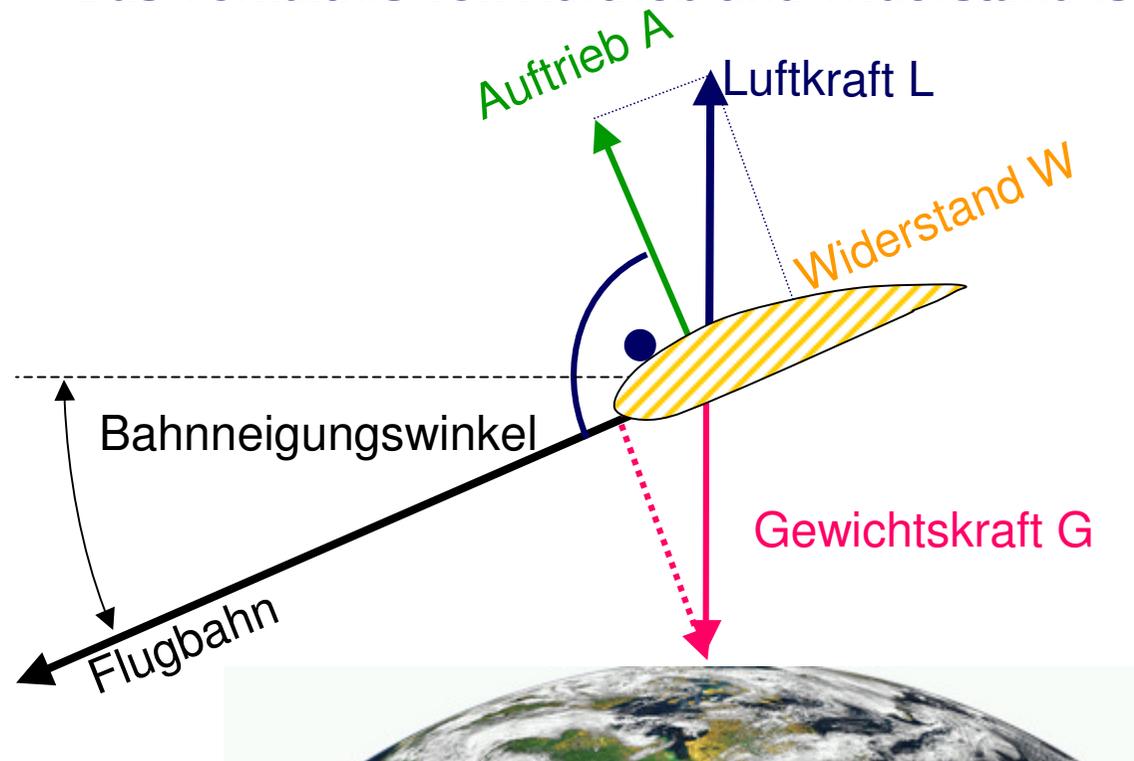
Kräftegleichgewicht am Segelflugzeug 3

- Ein Segelflugzeug fliegt stationär immer mit Bahnneigung um dem Widerstand entgegen zu wirken
- Je kleiner der Widerstand desto flacher ist der Bahnneigungswinkel!

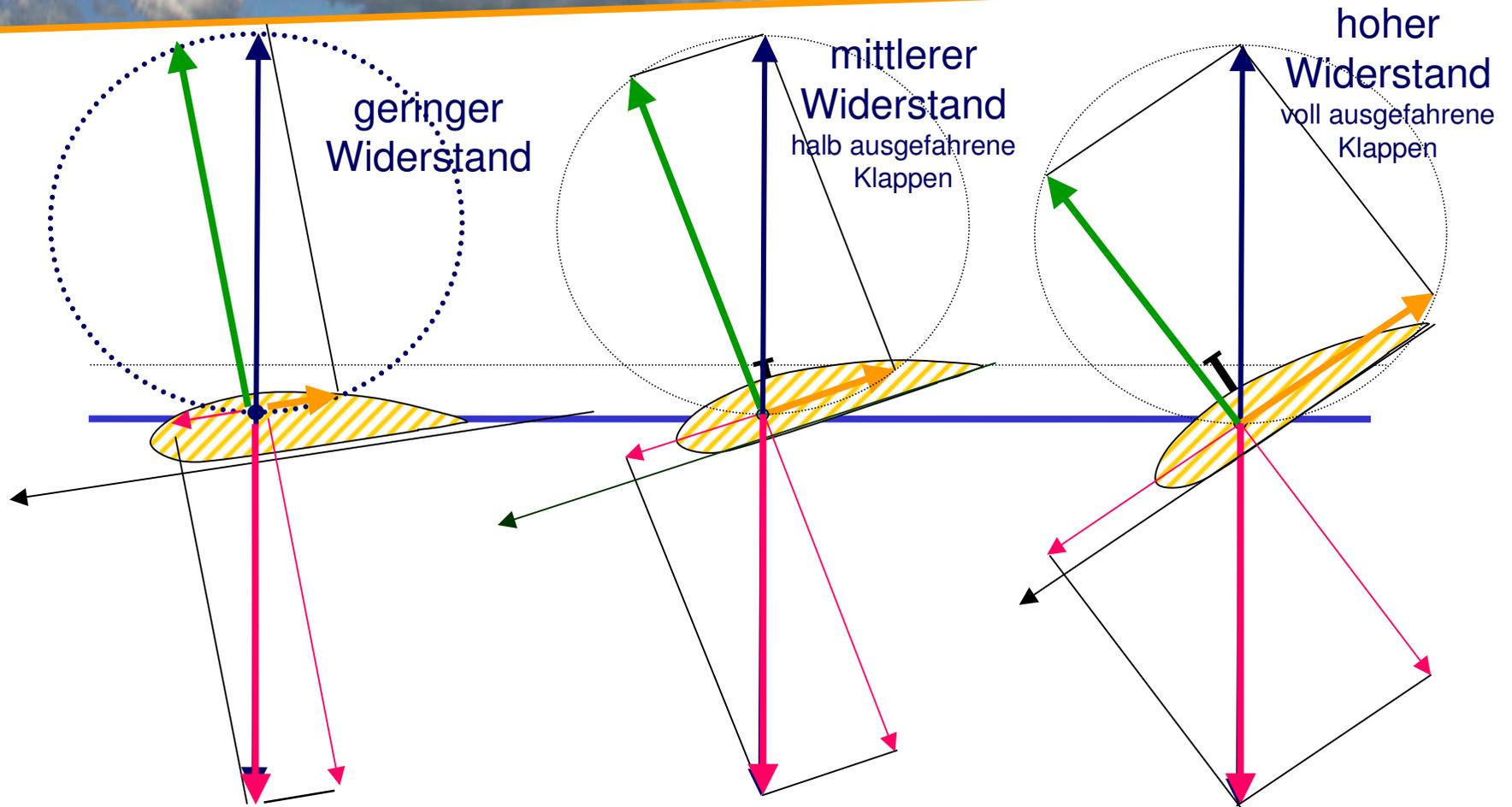


Kräftegleichgewicht am Segelflugzeug 4

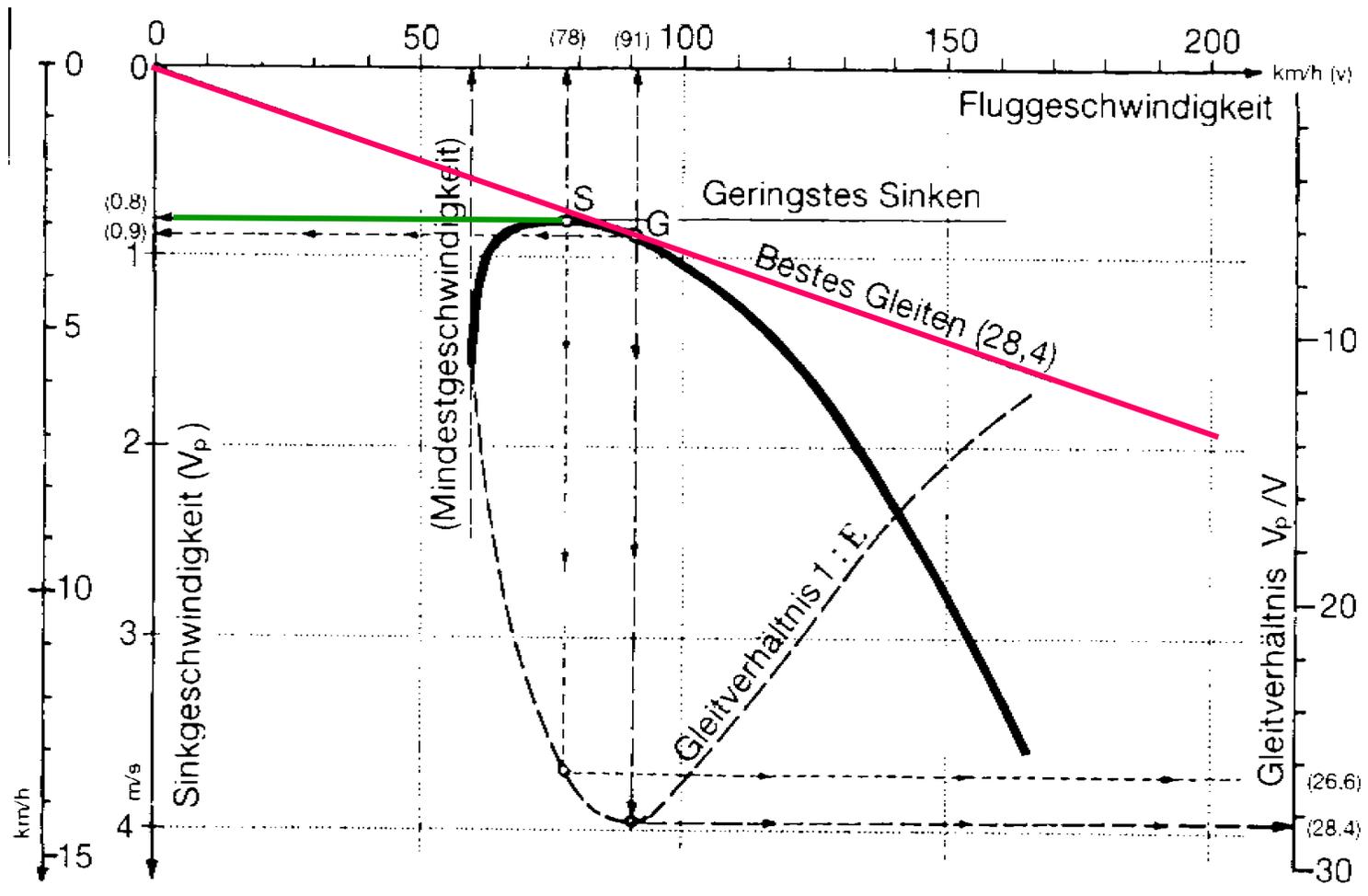
- Für einen kleinen Bahnneigungswinkel benötigt man:
 - Ungefähr soviel Auftrieb wie Gewicht
 - Möglichst wenig Widerstand
- **Das Verhältnis von Auftrieb und Widerstand ist entscheidend!**



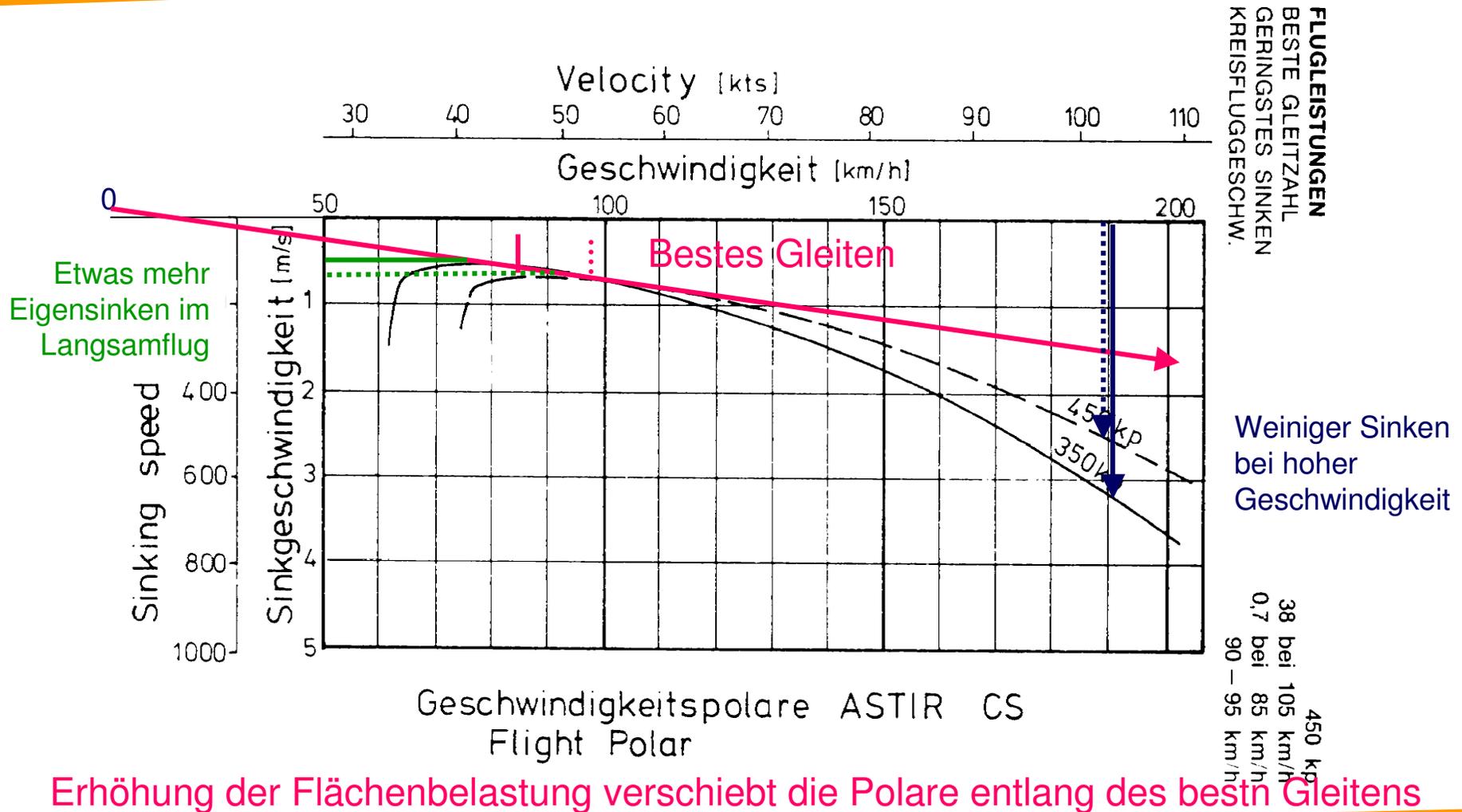
Kräftegleichgewicht am Segelflugzeug 5



Flugleistungspolare



Einfluss der Flächenbelastung



Erhöhung der Flächenbelastung verschiebt die Polare entlang des besten Gleitens

Einfluss der Flächenbelastung



Bei Erhöhung der Flächenbelastung:

- Erhöht sich die Mindestgeschwindigkeit
 - Erhöht sich die min. Sinkgeschwindigkeit
 - Bleibt das beste Gleiten gleich!
 - Verschiebt sich die Geschwindigkeit des besten Gleitens zu höheren Geschwindigkeiten
 - Nimmt die Sinkgeschwindigkeit bei hohen Fluggeschwindigkeiten ab!
- ➔ Höher Flächenbelastung ist vorteilhaft bei starker Thermik:
- Etwas langsames Steigen in der Thermik
 - Deutlich weniger Sinken beim Vorfliegen!

Fragen Teil II



- Wie ermittle ich in der Flugleistungspolaren das beste Gleiten?
- Was versteht man unter der Luftkraft?
- Was versteht man unter stationärem Flug?
- Was versteht man unter Mindestfahrt?
- Wie verändert sich die Fluglage, wenn die Störklappen ausgefahren werden? Erkläre an Hand des Kräfte diagrams!

Widerstand am Flugzeug



Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)



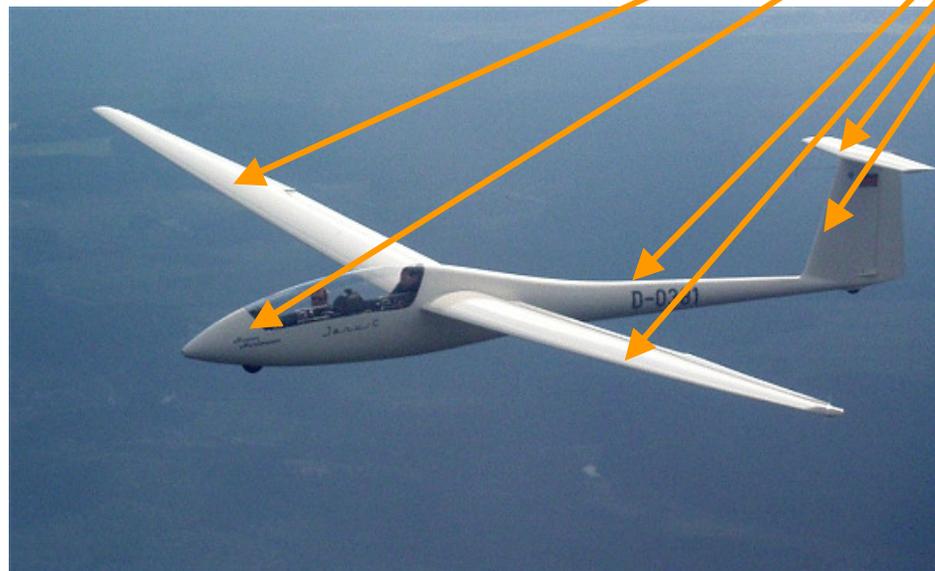
Widerstand am Flugzeug



Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)

Formwiderstand:
An allen umströmten Teilen
(Stirnfläche)



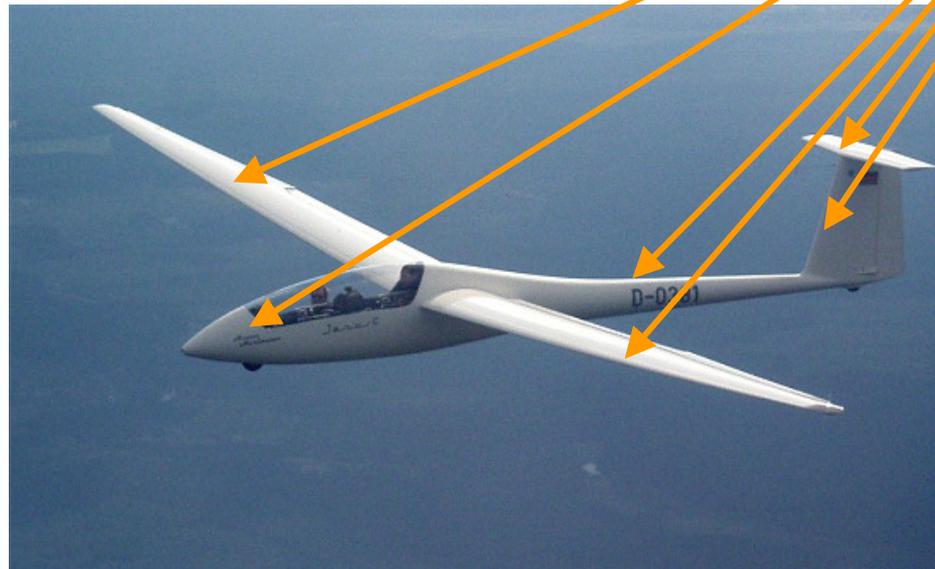
Widerstand am Flugzeug



Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)

Reibungswiderstand:
An allen umströmten Teilen
(Oberfläche)



Widerstand am Flugzeug

Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)

Induzierter Widerstand:
Dort wo Druckausgleich
stattfindet

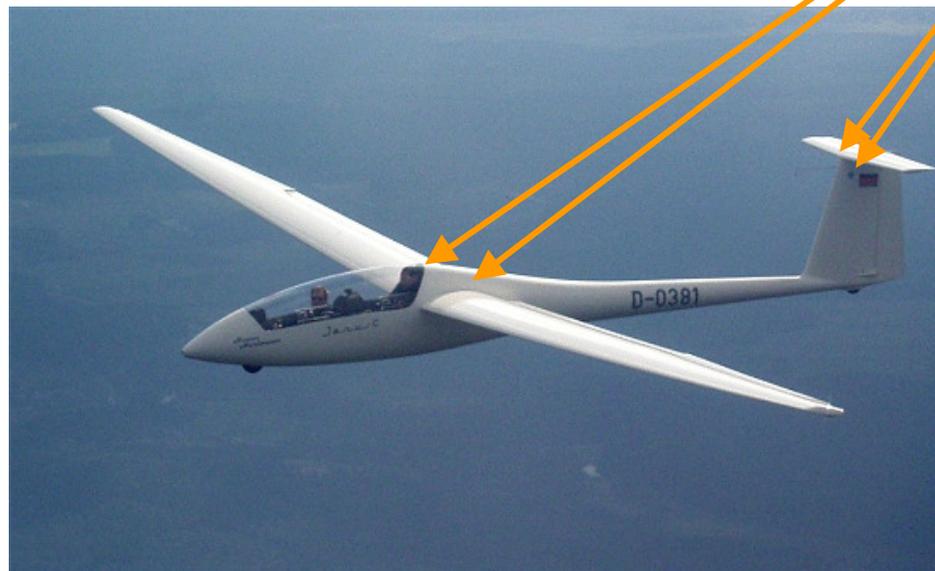


Widerstand am Flugzeug

Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)

Interferenzwiderstand
Übergänge Flügel \leftrightarrow Rumpf
HLW \leftrightarrow SLW (Leitwerk)



Widerstand am Flugzeug

Wo entsteht Widerstand am Flugzeug?

- Formwiderstand (Druckwiderstand)
- Reibungswiderstand
- Induzierter Widerstand
- Interferenzwiderstand
- Nebenwiderstand (Restwiderstand)

Nebenwiderstand
Anlenkungen, Rad,
Haubenspalt, Düse



Induzierter Widerstand



B727



F18

Wirbelschleppe



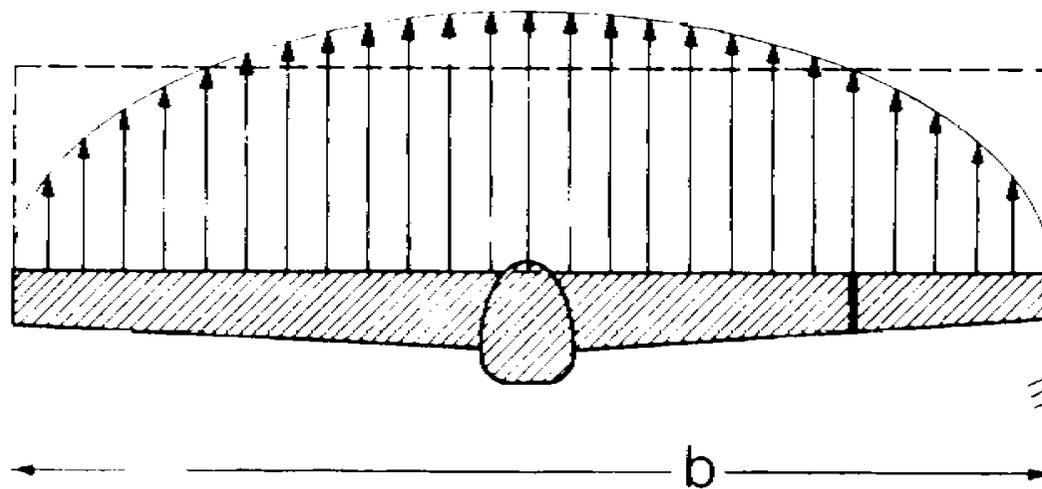
B747



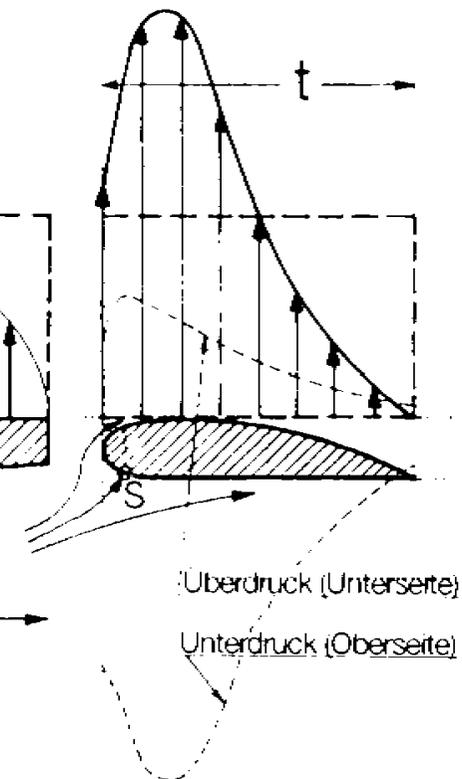
Auftriebsverteilung



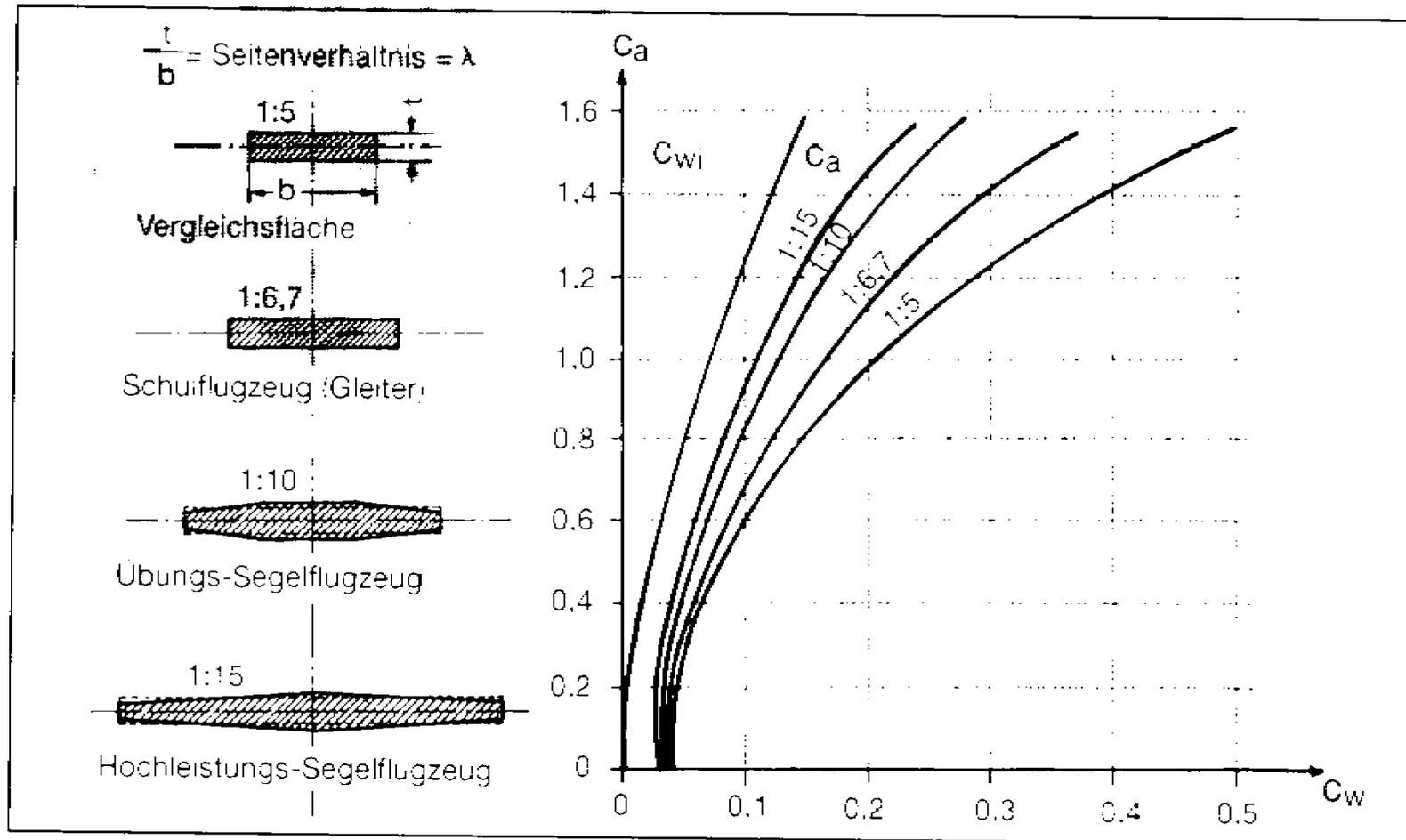
Auftriebsverteilung elliptisch
über Spannweite b



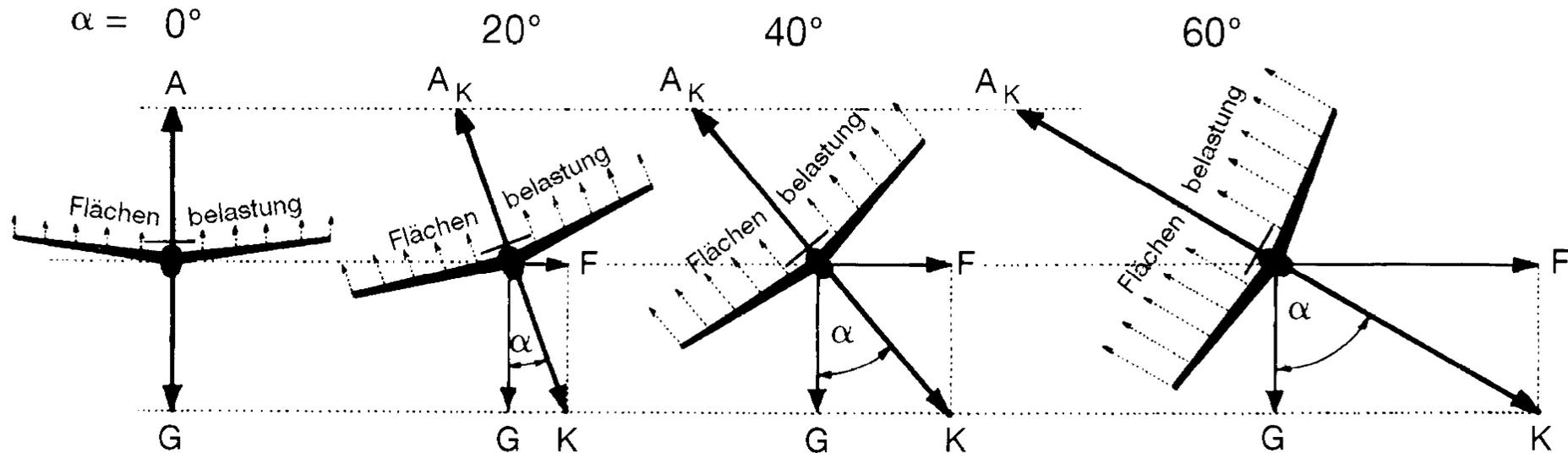
Druckverteilung über
Profiltiefe t



Seitenverhältnis



Kurvenflug



$$K = \frac{G}{\cos \alpha} = A_K ; F \text{ wirkt von Kurvenmittelpunkt nach außen}$$

G = Fluggewicht, A = Auftrieb, F = Fliehkraft, K = Kurvengewicht, A_K = Auftrieb in der Kurve,
 α = Querneigungswinkel

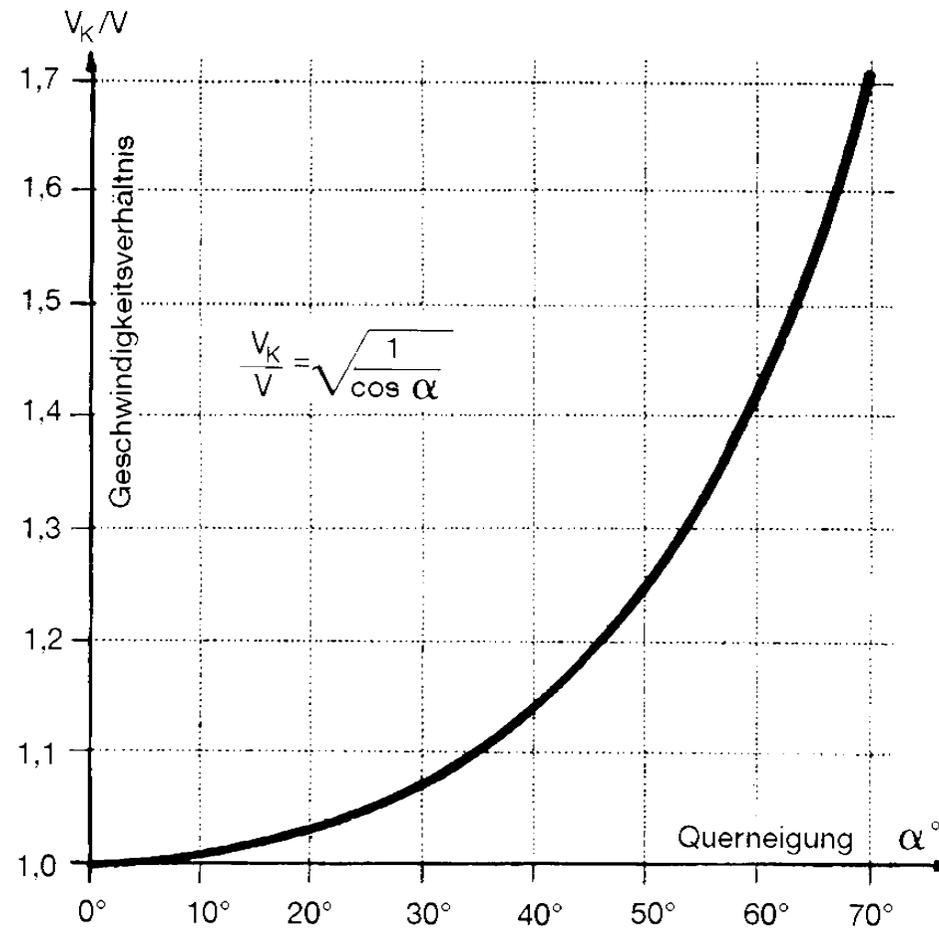
Geschwindigkeit beim Kurvenflug



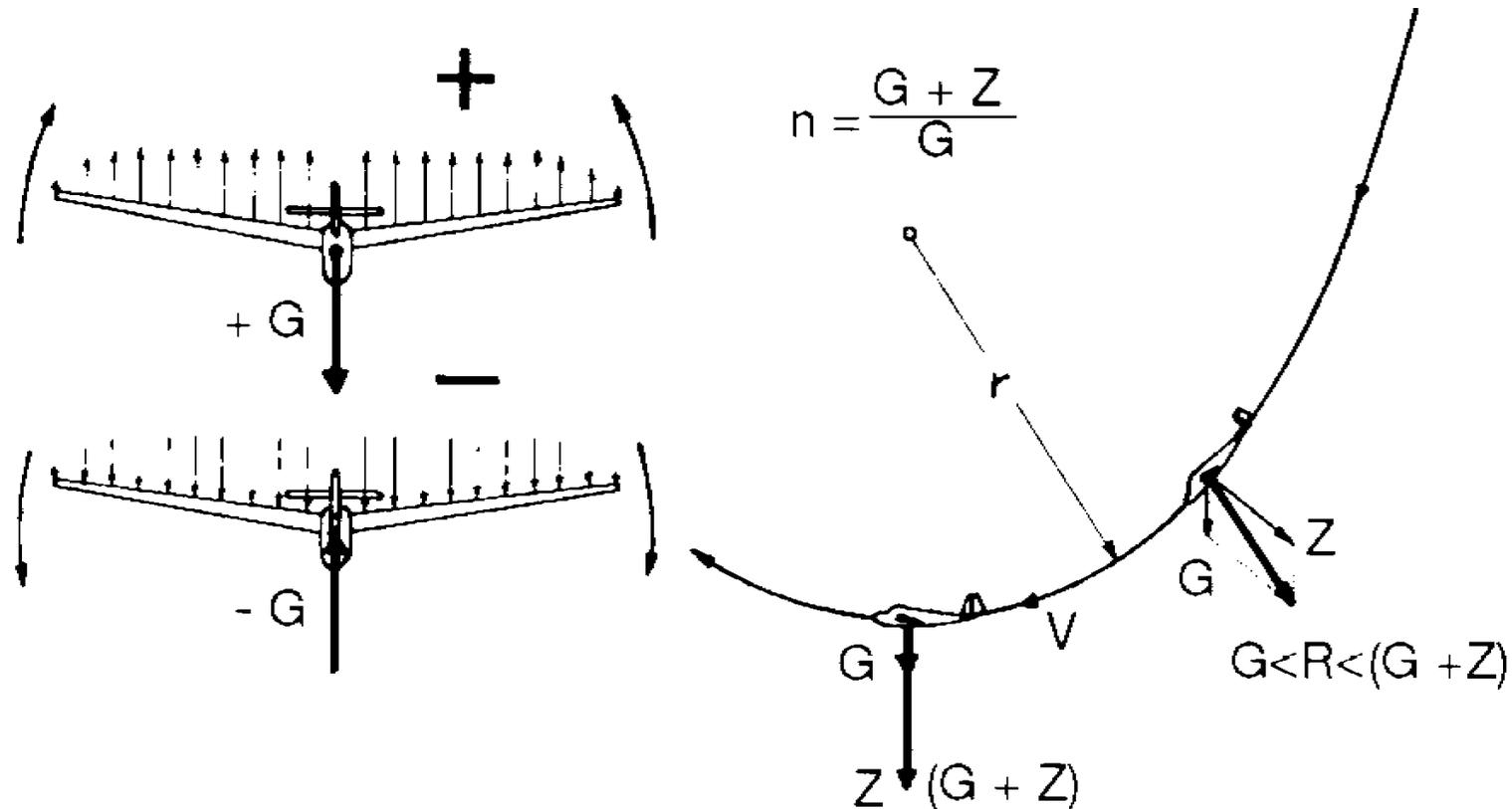
Querneigung	Lastvielfaches	Fahrtzunahme
α	$1 / \cos \alpha$	$\sqrt{1 / \cos \alpha}$
0°	1,00	1,00
20°	1,06	1,03
40°	1,31	1,14
60°	2,00	1,41
80°	5,76	2,40
85°	11,5	3,39

Mindestfahrt
über 40%
höher bei 60°
Kurve!!!

Geschwindigkeit beim Kurvenflug

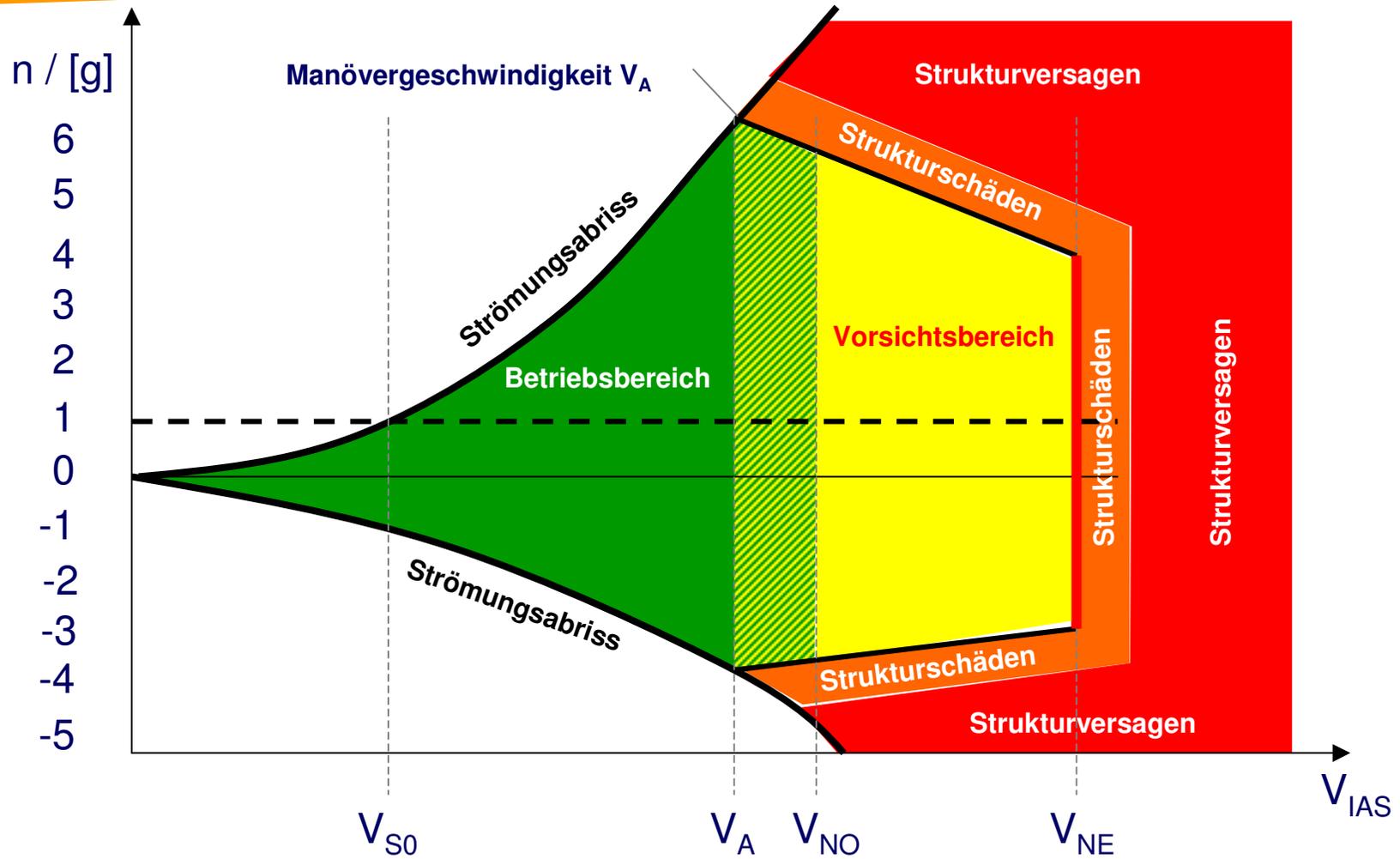


Lastvielfaches im Abfangbogen

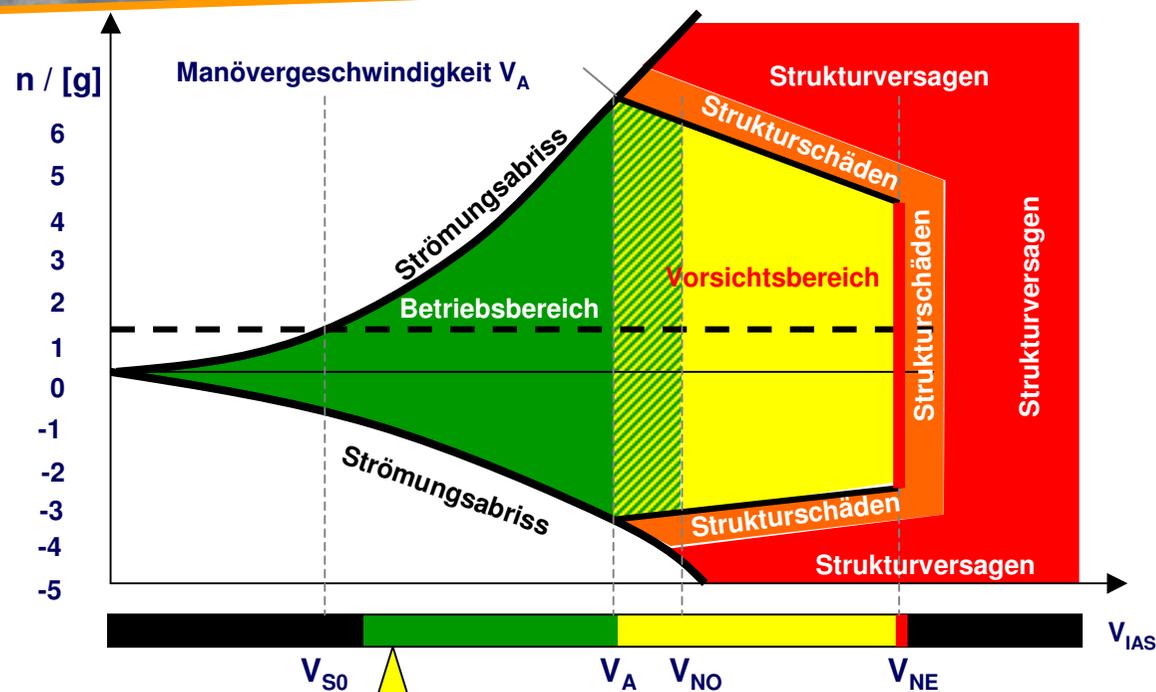


Das Verhältnis zwischen Scheingewichtskraft und Gewichtskraft wird **Lastvielfaches** n genannt.

V-N Diagramm



V-N Diagramm ASK21



ASK 21:

$$V_{S0} = 65 \text{ km/h}$$

$$V_A = 180 \text{ km/h}$$

$$V_{NO} = 200 \text{ km/h}$$

$$V_{NE} = 280 \text{ km/h}$$

Zulässige Lastvielfache:

$$\text{bei } V_A = + 6,5$$

$$= - 4,0$$

$$\text{bei } V_{NE} = + 5,0$$

$$= - 3,0$$

Fahrtmessermarkierung

V_{S0} = Mindestgeschwindigkeit mit eingefahrenen Klappen

V_A = Manövergeschwindigkeit

V_{NO} = Höchstzulässige Geschwindigkeit bei böigem Wetter

V_{NE} = Höchstzulässige Geschwindigkeit

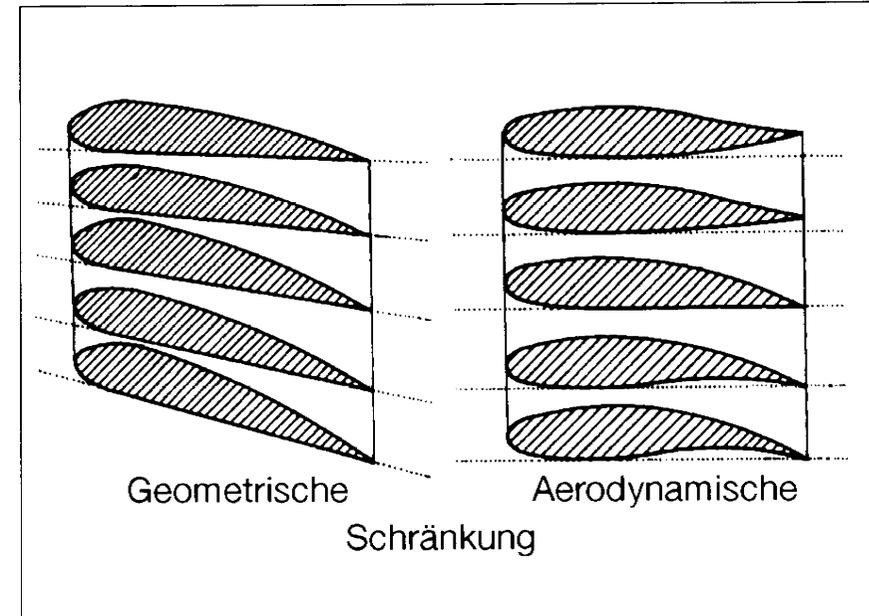
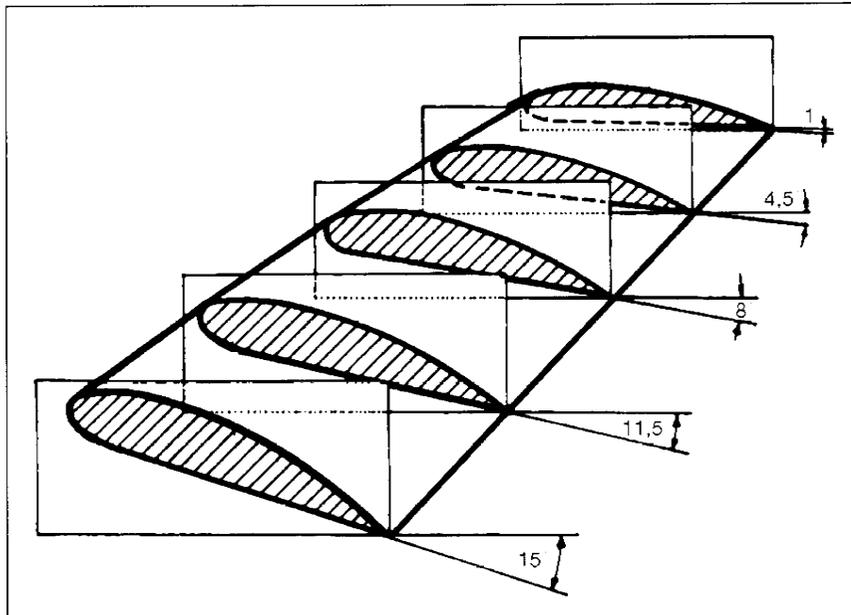


Fragen Teil III



- Welche Widerstandarten gibt es?
- Wie lässt sich der induzierte Widerstand reduzieren?
- Wie kommt es zum Trudeln, wie wird ausgeleitet?
- Erkläre die Lastzunahme im Kurvenflug
- Erkläre warum sich die Mindestfahrt um 1,4 bei einer Kurve mit 60 Grad Schräglage erhöht
- Warum sackt ein mit Mindestflug anfliegender Flugzeug im Abfangbogen durch?
- Warum kann man nur bis V_{NO} volle Ruderausschläge geben?

Schränkung

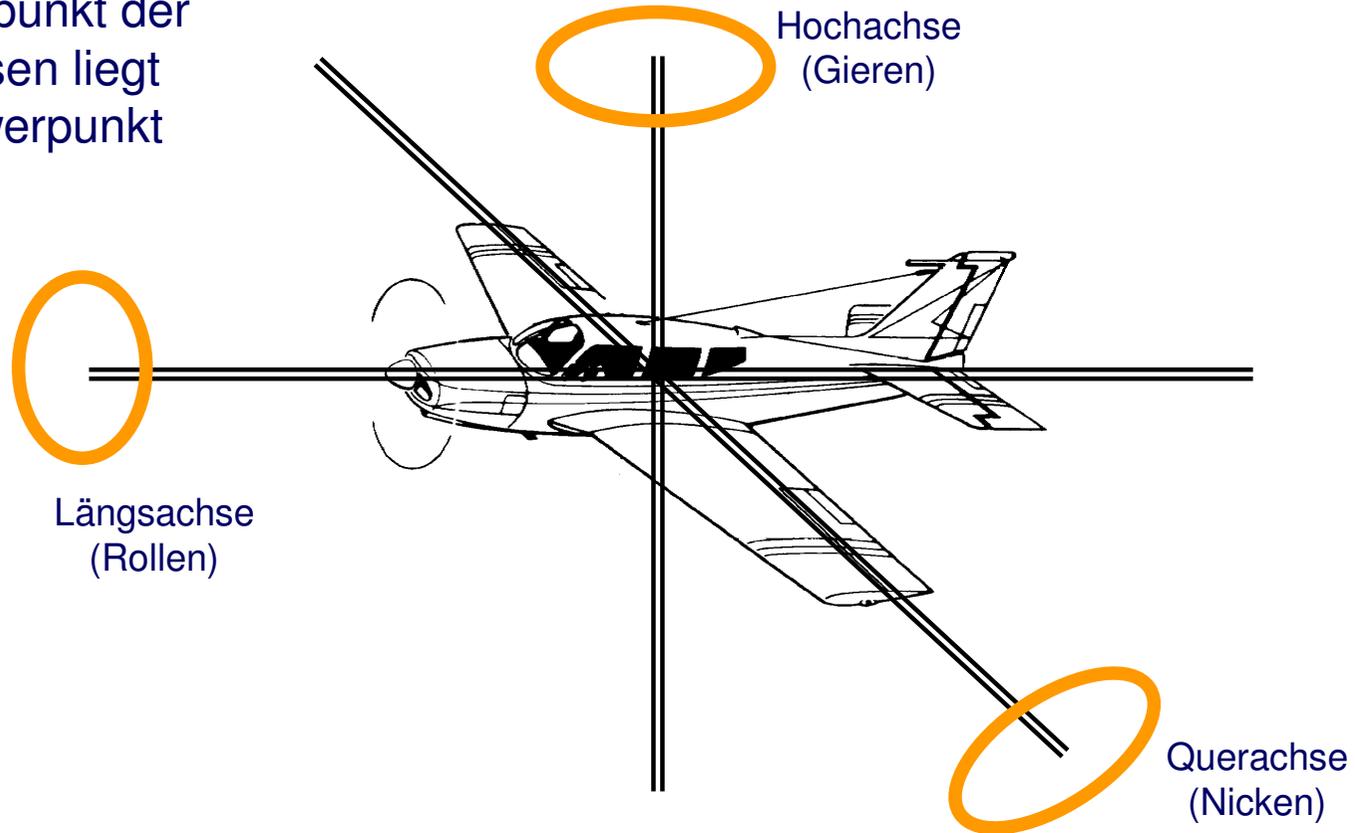


- Strömungsabriss erfolgt zunächst innen
- Die Querruderwirkung bleibt erhalten

Achsen



Im Schnittpunkt der
drei Achsen liegt
der Schwerpunkt

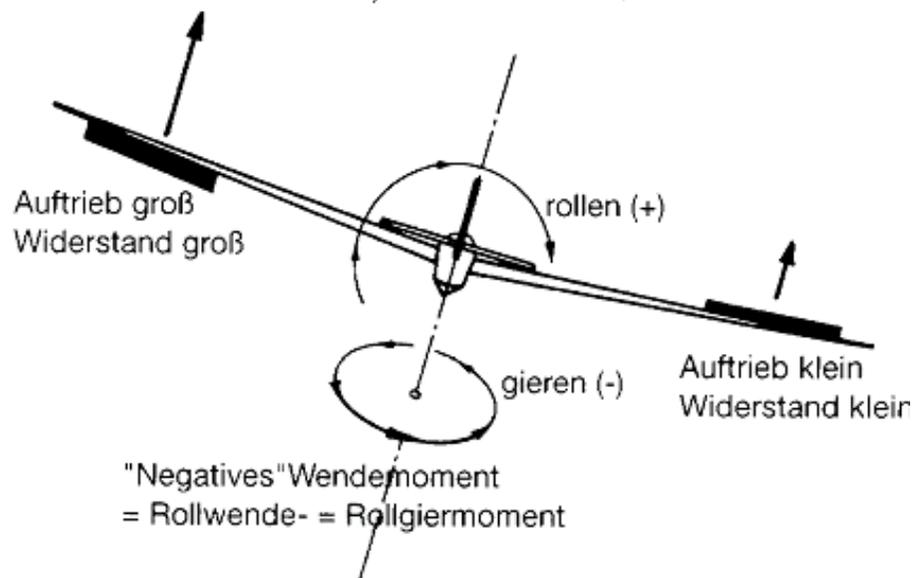


Querruder



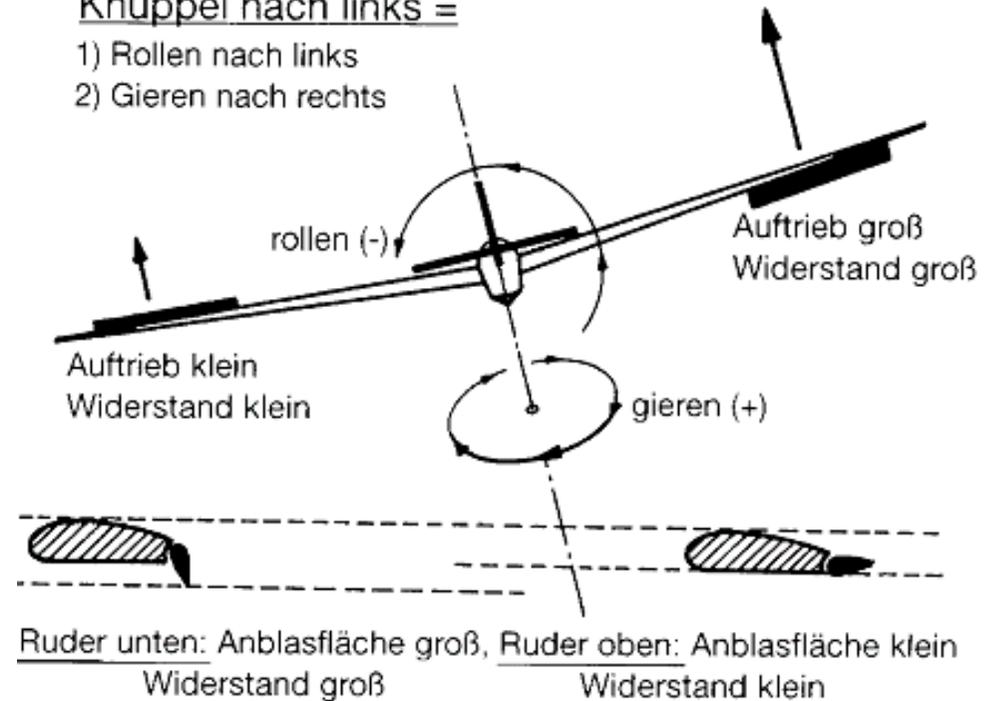
Knüppel nach rechts =

- 1) Rollen nach rechts
- 2) Gieren nach links



Knüppel nach links =

- 1) Rollen nach links
- 2) Gieren nach rechts



Querruderdifferenzierung



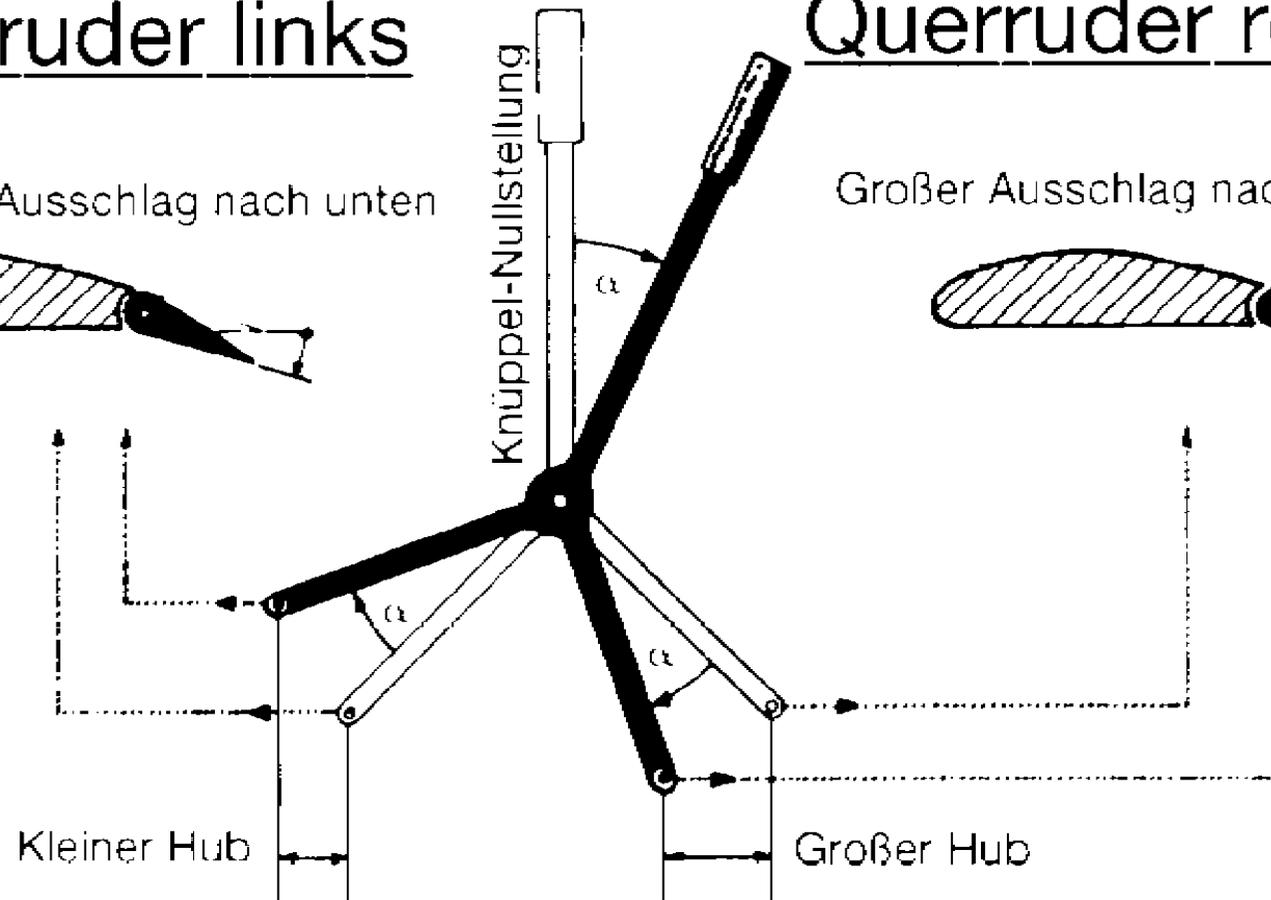
Querruder links

Kleiner Ausschlag nach unten



Querruder rechts

Großer Ausschlag nach oben

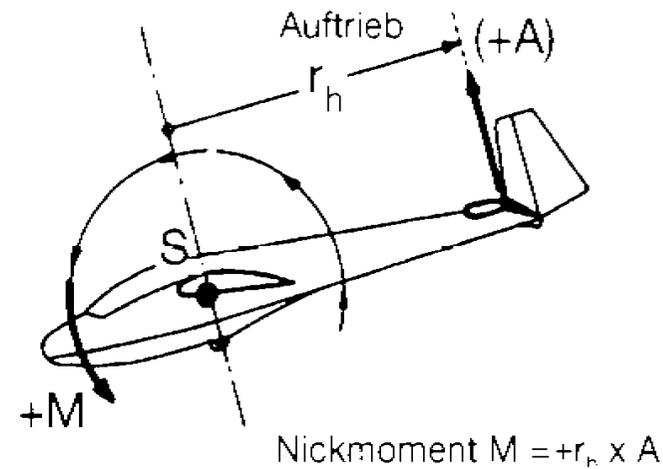
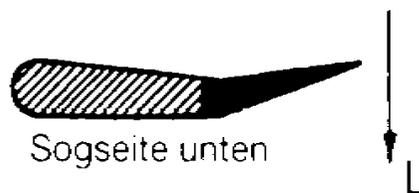
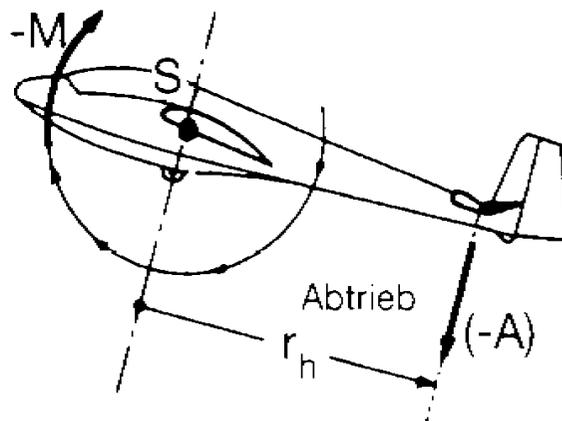


Höhenruder

Knüppel ziehen (zum Piloten):

Nicken der Nase nach oben

Nickmoment $M = -r_h \times A$

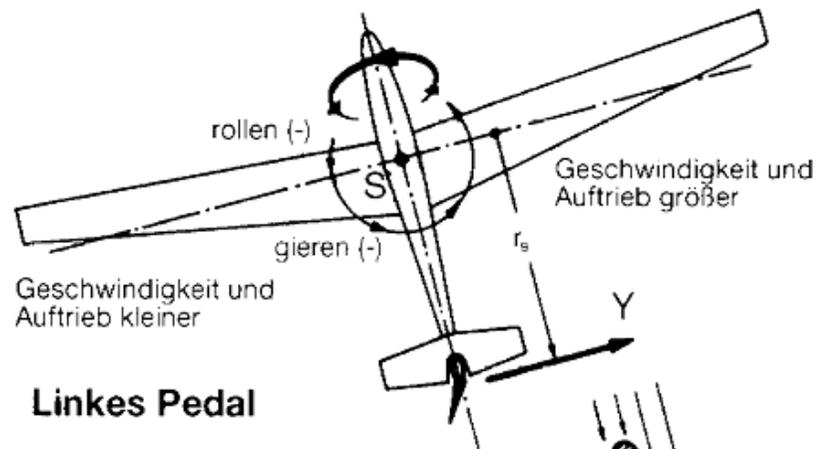


Knüppel drücken (vom Piloten weg):

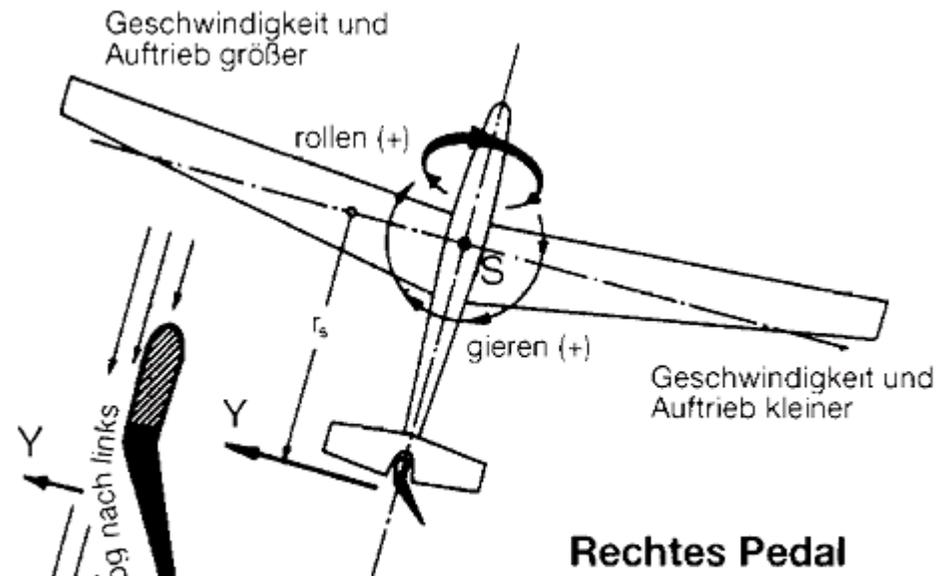
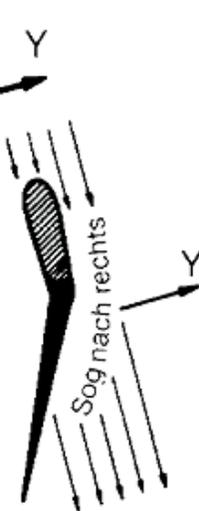
Nicken der Nase nach unten



Seitenruder

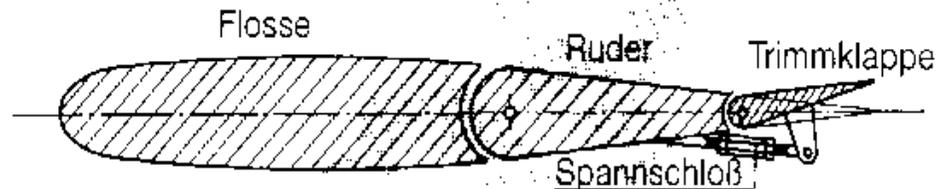


Wenderoll = Gierrollmoment

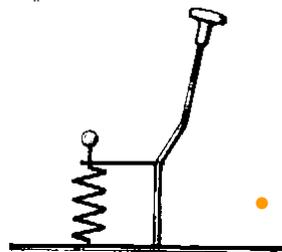
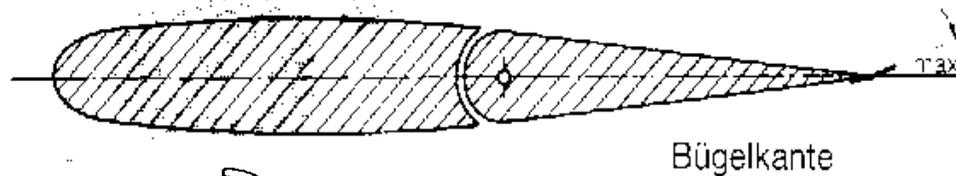


Trimmung

a. Die Trimmklappe

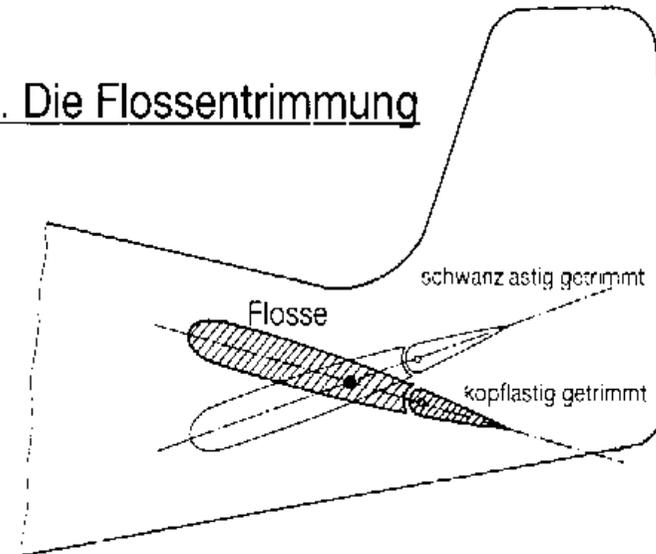


b. Die Bügelkante



- Federtrimmung

c. Die Flossentrimmung



d. Das Trimmruder

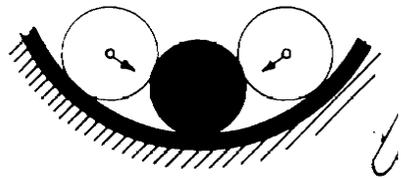


Trimmung kann nicht falsche Beladung ausgleichen!

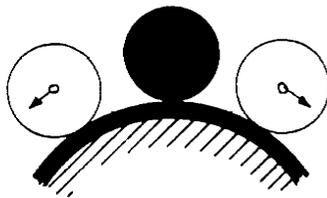
Stabilität



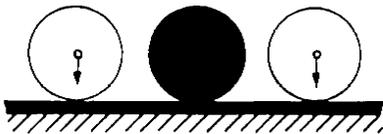
stabil



labil

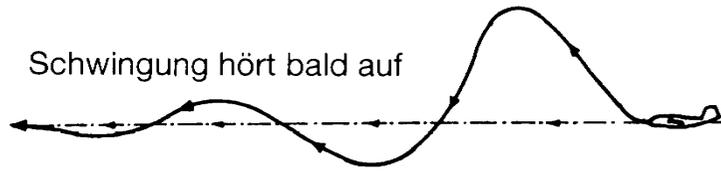


indifferent



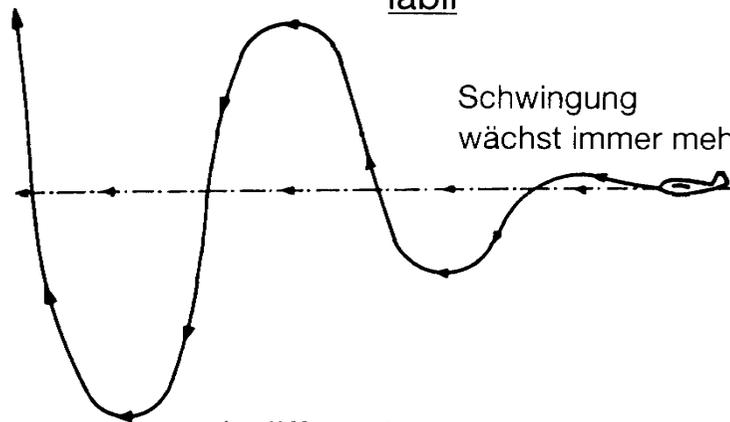
stabil

Schwingung hört bald auf



labil

Schwingung wächst immer mehr



indifferent

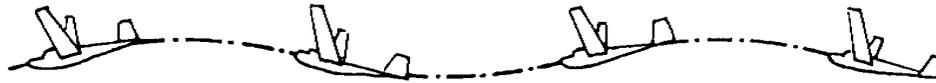
Schwingung bleibt ewig gleich



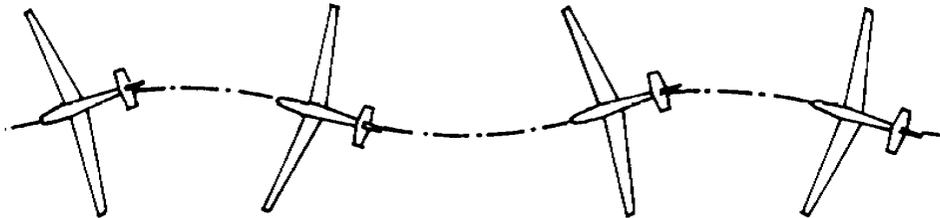
Stabilität



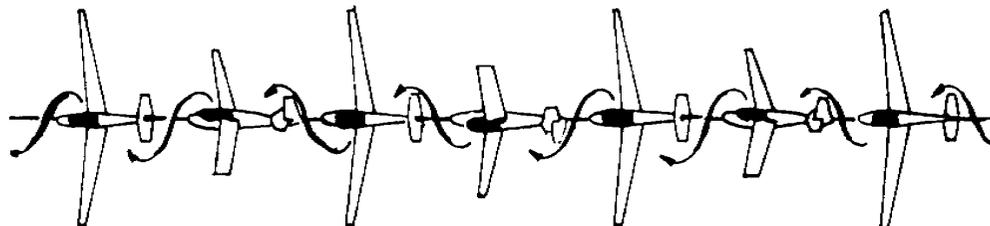
Längsstabilität (um die Querachse)



Kursstabilität (um die Hochachse)



Querstabilität (um die Längsachse)



Linksrolle

Rechtsrolle

Linksrolle

Rechtsrolle

Für Stabilität sorgt:

- Höhenleitwerk
- Druckpunktfestes Profil (Nurflügel)
- Schwerpunktlage

- Seitenleitwerk
- Flügelpfeilung

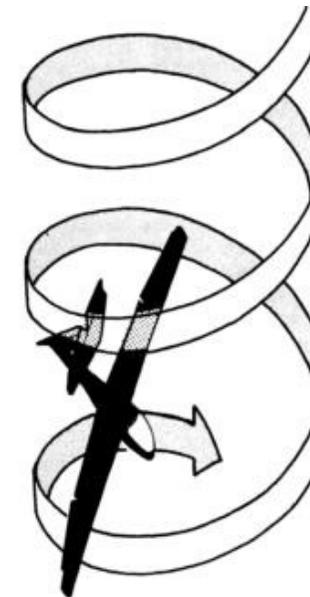
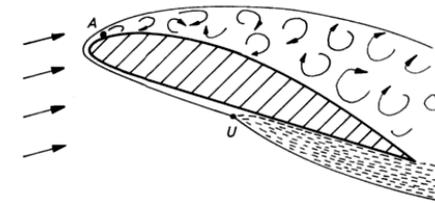
- V-Form
- Tiefer Schwerpunkt (Schulterdecker)

Trudeln



Was ist Trudeln?

- Das Flugzeug bewegt sich um eine nahe beim oder im Flugzeug liegende Achse drehend senkrecht nach unten.
- Die Sinkrate ist hoch, liegt aber deutlich unter der Sturzfluggeschwindigkeit.
- Die Winkelgeschwindigkeit ist wesentlich höher als beim steilsten Kreisflug.
- Die Längsneigung ist groß, über 60 Grad spricht man vom Steil-, darunter vom Flachtrudeln.
- Die Strömung ist an dem Flügel, der der Drehrichtung abgewandt ist, ganz oder teilweise abgerissen und liegt am anderen Flügel an.



Trudeln



Wie gerate ich ins Trudeln?

- Ein Flugzeug gerät ins Trudeln wenn bei einem großen Anstellwinkel die Strömung nur einseitig an einer Tragfläche abreißt; dabei kippt dann diese Fläche nach unten und das Flugzeug beginnt sich korkenzieherähnlich nach unten zu drehen.
- Höhenverlust ca. 80m pro Umdrehung!
- Dazu kommt der Höhenverlust beim Ausleiten / Abfangen
→ Fatal in Bodennähe

Typisches Beispiel:

- Strömungsabriss beim unsauberem Kurvenflug durch zu langsames Fliegen
- Strömungsabriss durch Turbulenz!



Trudeln



Wie beendet man Trudeln?

- **Gemäß Flughandbuch für das jeweilige Muster!**
- Standardmethode:
 - Höhenruder neutral
 - Querruder neutral
 - Seitenruder entgegen der Drehrichtung bis Drehung stoppt
 - Zügiges (jedoch nicht zu heftiges!) Abfangen
- Bei zu heftigem Abfangen:
 - Besteht Gefahr gleich wieder ins Trudeln zu kommen
 - Besteht Gefahr des Überlastens!

Steilspirale



Was unterscheidet Trudeln von der Steilspirale?

- Steilspirale ist dem Trudeln sehr ähnlich.
- Hierbei liegt jedoch noch die Strömung an das Flugzeug ist voll steuerbar
- gefährlich schnelle Geschwindigkeitszunahme (im Gegensatz zum Trudeln)

Wie beendet man die Steilspirale?

- Quer und Seitenruder gegen die Drehrichtung
- Abfangen

➔ Wird anders beendet als Trudeln!

➔ Wichtig ist das man den Unterschied erkennt.



Video:
Trudeln/Steilspirale

Fragen Teil IV



- Wann kann eine Ruderumkehrwirkung eintreten?
- Wie bezeichnet man die Bewegungsachsen eines Flugzeuges?
- Was versteht man unter dem negativen Wendemoment?
- Wie nennt man das Verhältnis zwischen Scheingewichtskraft und Gewichtskraft?
- Welche Kräfte wirken auf das Flugzeug ein?
- Erkläre den Unterschied zwischen Wölb- und Störklappen
- wie erreicht man Stabilität um die Längsachse?
- Was unterscheidet Trudeln von der Steilspirale
- Wie ist die Standardmethode zum Beenden des Trudelns

- 
- Viel Spaß beim praktischen Umgang mit Aerodynamik!!!