

1 Flugtechnik

1.1 Atmosphäre

1.1.1 Allgemeine Eigenschaften

Zusammensetzung: $\sim 78\%N_2, \sim 21\%O_2, \sim 1\%He, H, He$

Troposphäre (0-7/17 km): $\frac{dT}{dH} = -6.5 \cdot 10^{-3} \frac{K}{m}$
In ihr findet das Wetter statt

Tropopause (abhängig von Breitengrad und Jahr):
Äquator (17 km): $T = 191K$
Pole (7km): $T = 221K$

Standardatmosphäre (11 km): $T_{11000} = 216.65K, p_{11000} = 226.32HPa, \rho_{11000} = 0.3639kg/m^3$

Stratosphäre (bis ~ 50 km): $T = 217K$ (direkt über Tropopause, max. bei 50 km)

Stratopause (~ 50 km): $T = 273K$

Mesosphäre (bis ~ 80 km): $T = 173K$ (negativer Temp. gradient)

Thermosphäre und Ionosphäre (bis $\sim 800km$): $T = 1270K$ bei $480km$

Exosphäre (ab $800km$): Führt gleitend in den Weltall

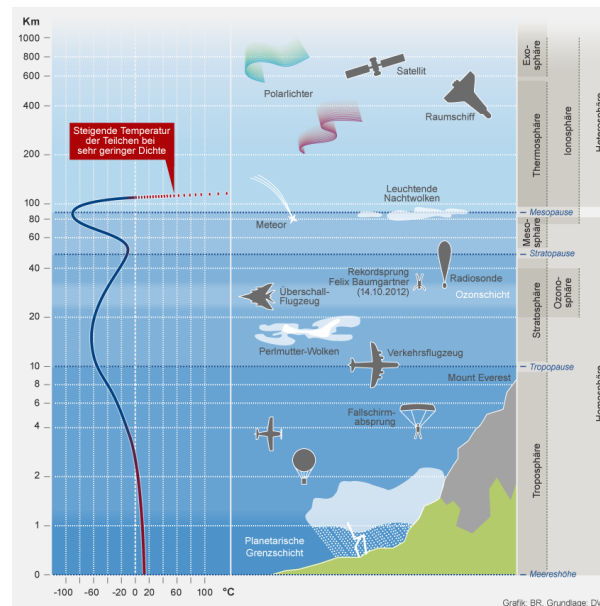
Physikalischen Eigenschaften:

- $p = \rho RT$ mit $R = 287.3J/(kgK)$
- Bernoulli: $p + \frac{\rho}{2} V^2 = const$
- Schallgeschwindigkeit: $a = \sqrt{\gamma RT}$ mit $\gamma = c_p/c_v$
- $\frac{\Delta p}{\rho} \approx \frac{1}{2} M^2$, Machzahl $M = V/a$

1.2 Standardatmosphäre

- $H = 0m$

- $T = 288.15K, p = 1013HPa, \rho = 1.225kg/m^3, g = 9.806m/s^2$
- $H < 11000m$:
- $\frac{T}{T_0} = \Theta(H) = 1 + \frac{a}{T_0} H = 1 - 22.558 \cdot 10^{-6} \cdot H$
- $\frac{p}{p_0} = \delta = \Theta^{5.2561}$
- $\frac{\rho}{\rho_0} = \sigma = \Theta^{4.2561}$
- $H = 11000m$:
- $\frac{T_{11000}}{T_0} = 0.7519, \frac{p_{11000}}{p_0} = 0.2234, \frac{\rho_{11000}}{\rho_0} = 0.2971$
- $11000m < H < 25000m$:
- $\frac{T}{T_0} = 0.7519, \frac{p}{p_0} = 0.2234 \cdot e^{-\frac{H-11000}{6341.9}}, \frac{\rho}{\rho_0} = 0.2971 \cdot e^{-\frac{H-11000}{6341.9}}$
- Dynamische Zähigkeit der Luft:
- $\mu = (1.458 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1.5}) / (T + T + 110.4) Ns/m^2$
- $\mu_0 = 17.894 \cdot 10^{-6} Ns/m^2$

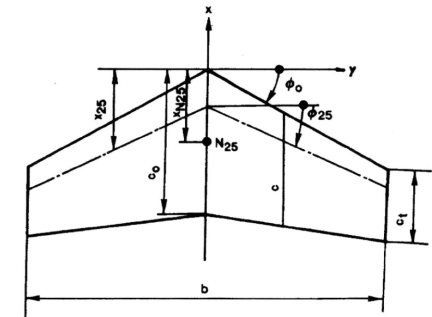


1.3 Auftrieb

1.3.1 Flügelgeometrie

- Zuspitzung: $\lambda = \frac{c_t}{c_0}$
- Flügelfläche: $F = \int_{-b/2}^{b/2} c(y) dy$
- Streckung: $\Lambda = b^2/F$
- Mittl. geome. Flügeltiefe: $\bar{c} = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{b/2} c(y) dy = F/b$
- Mittl. aero. Flügeltiefe: $l_\mu = \frac{1}{F} \int_{-b/2}^{b/2} c^2(y) dy$
- Geometrischer Neutralpunkt = Ort wo die Änderung des Anstellwinkels keine Auswirkung auf Kraft und Moment hat
- $x_{N25} = \frac{1}{F} \int_{-b/2}^{b/2} c^2(y) x_{25}(y) dy \approx x_{c0/4}, y_{N25} = 0$

Achtung: $b_{ges} = 2 \cdot b_{flügel}$!



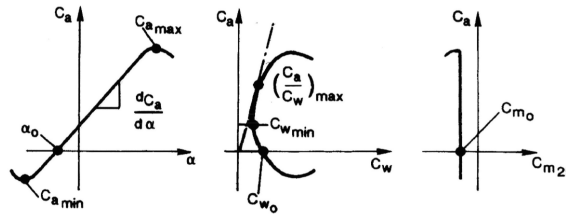
	Recht	Trapez	Dreieck	Ellipse
F	bc	$\frac{c_0+c_t}{2} b$	$\frac{c_0}{2} b$	$\frac{\pi}{4} bc_0$
Λ	b/c	$2b/(c_0 + c_t)$	$2b/c_0$	$4b/(\pi c_0)$
λ	1	c_t/c_0	0	-
\bar{c}	c	$(c_0 + c_t)/2$	$c_0/2$	$\pi/4$
l_μ	c	$\frac{2}{3} \frac{c_0^2 + c_0 c_t + c_t^2}{c_0 + c_t}$	$2c_0/3$	$\frac{8}{3\pi} c_0$
x_{25}	$c/4$	$\frac{c_0}{4} + \frac{c_0 b}{6(c_0+c_t)} (1 + \frac{2c_t}{c_0}) tg(\phi_{25})$	$\frac{c_0}{4} \frac{b}{6} tg(\phi_{25})$	$\frac{c_0}{4} \frac{b}{6} tg(\phi_{25})$

1.3.2 Flügelprofile

	Flügel (3D)	Profil (2D)
Auftrieb	$c_A = \frac{A}{\frac{1}{2}\rho V^2 F}$	$c_a = \frac{A'}{\frac{1}{2}\rho V^2 c}$
Widerstand	$c_W = \frac{W}{\frac{1}{2}\rho V^2 F}$	$c_w = \frac{W'}{\frac{1}{2}\rho V^2 c}$
Nickmoment	$c_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 F l_\mu}$	$c_m = \frac{M'}{\frac{1}{2}\rho V^2 c^2}$

Hierbei sind Grössen mit Apostroph pro Spannweite berechnet (Kraft/Moment pro b)

- **Auftriebspolaren:** Nullauftriebswinkel α_0 (Winkel wo aerodyn. Auftrieb verschwindet)
- $\alpha_0 = 0$ für symmetrische Profile
- $\alpha_0 < 0$ für gewölbte Profile
- **Linearbereich**
- $c_a = \frac{dc_a}{d\alpha}(\alpha - \alpha_0)$ mit Auftriebsgradient
- $\frac{dc_a}{d\alpha}$: Konstant im Linearbereich
- **Maximaler Auftriebsbeiwert:** $c_{a,max}$ bestimmt die Abbrissgeschwindigkeit
- **Minimaler Auftriebsbeiwert:** $c_{a,min}$ analog wie $c_{a,max}$ im Rückenflug
- **Minimaler Widerstandsbeiwert:** $c_{w,min}$
- $c_{w,min} = 0$ für symmetrische Profile
- $c_{w,min} > 0$ für gewölbte Profile ungefähr beim stossfreien Eintritt (tangentialle Umströmung)
- **Sturzflug-Momentenbeiwert** $c_{m0} = c_m(c_a = 0)$
- **Bester Gleitwinkel:** $\tan(p) = \frac{1}{(\frac{c_a}{c_w})_{max}}$
- **Grössstmögliche Reichweite:** $(\frac{c_a}{c_w})_{max}$
- **Beste Steigzahl / Profilsinkzahl:**
- $(\frac{c_a^3}{c_w^2})_{max}$ resp. $\sqrt{\frac{c_a^3}{c_w^2}}$ längste Flugdauer



- **Druckpunkt / Neutralpunkt**
- Druckbeiwert: $c_p = \frac{p-p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2}$
- Moment um beliebigen Punkt am Profil:
- $c_{m_x} = \frac{x-x_{DP}}{c} (c_a \cos \alpha + c_w \sin \alpha) \approx \frac{x-x_{DP}}{c} c_a$
- x_{DP} : Lage des Druckpunktes
- Am **Druckpunkt:** $c_{m,DP} = 0$
- **Neutralpunkt:** $\frac{dc_{m_x}}{d\alpha}|_{NP} = 0$ und $\frac{dc_{m_x}}{dc_a}|_{NP} = 0$
- $\frac{x_{NP}-x_R}{c} = -\frac{c_{mR}-c_{m0}}{c_a}$ mit R als Referenzpunkt

1.3.3 Profileigenschaften

- Auftrieb [N/m]: $A = \rho V \Gamma$ mit Zirkulation des Profils $\Gamma = \int_0^c \gamma dx$
- **Einwirbel-Modell**
- $A = \rho V^2 \pi c \alpha$, $\frac{c_a}{d\alpha} = 2\pi$

1.3.4 Profilsystematik siehe p. 3.34

1.3.5 Tragflügel endlicher Spannweite

Aerodynamische Kraft auf Flügel

$$A = \int_{-b/2}^{b/2} \rho V \Gamma(y) dy$$

Induzierter Widerstand

- $W_i = \frac{A^2}{2\rho V^2 F^*} = \frac{2}{\rho V^2 \pi} \left(\frac{A}{b}\right)^2$
- mit Prandtl'schem Ansatz $F^* = \frac{\pi}{4} b^2$

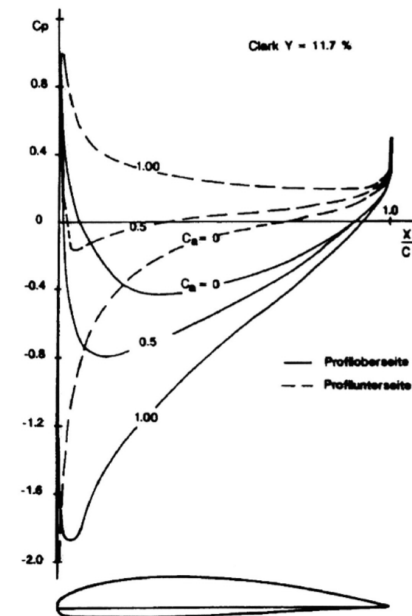
$$c_{wi} = \frac{c_a^2}{\pi \Lambda} \text{ und } \alpha_i = \frac{c_a}{\pi \Lambda}$$

Einfaches Wirbelmodell (Hufeisenwirbel)

- Abwind im Hufeisenwirbel mit $-x \gg y$
- $w = w_{re} + w_{li} = \frac{\Gamma}{2\pi} \left(\frac{1}{b/2-y} + \frac{1}{b/2+y} \right)$
- Abwind im Hufeisenwirbel auf Flügelinie
- $w = w_{re} + w_{li} = \frac{\Gamma}{4\pi} \left(\frac{1}{b/2-y} + \frac{1}{b/2+y} \right)$
- Auftrieb über ganze Spannweite
- $A = \rho V \Gamma b$

Allgemeine induzierte Geschwindigkeit

- Halbunendlicher Wirbelfaden: $w_i = \frac{\Gamma}{4\pi a}$
- Unendlicher Wirbelfaden: $w_i = \frac{\Gamma}{2\pi a}$



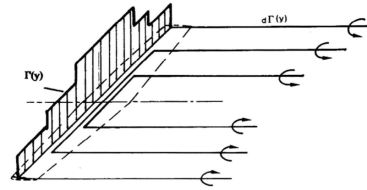
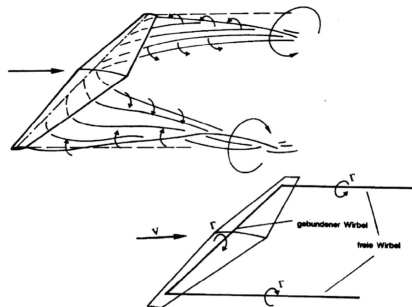
1.3.6 Prandtl'sche Traglinientheorie

Zirkulationsverteilung für **elliptische Auftriebsverteilung**

- $\Gamma(y) = \Gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2}$, ind. Anstellwinkel: $\alpha_i = \frac{\Gamma_0}{2bV}$
- Elliptische Flügel erzeugen ... eine elliptische Auftriebsverteilung
- ... einen in Spannweitenrichtung konstanten Abwind
- ... in Spannweitenrichtung konstanten lokalen Auftriebsbeiwert
- $\alpha_i = \frac{c_A}{\pi \Lambda}$ Abwindwinkel des Ellipsenflügels am Flügel selbst
- $c_A = c_{a\alpha} \frac{\Lambda}{\Lambda+2} \alpha$ Auftriebsbeiwert des Ellipsenflügels
- $\frac{dc_A}{d\alpha} = c_{a\alpha} \left[\frac{1}{1 + \frac{c_{a\alpha}}{\pi \Lambda}} \right]$ Auftriebsderivativ des Ellipsenflügels
- $\frac{dc_A}{d\alpha} = c_{a\alpha} \frac{\Lambda}{\Lambda+2}$ Auftriebsderivativ des Ellipsenflügels (potentialtheoretisch)
- $c_{W_i} = \frac{c_A^2}{\pi \Lambda}$ Induzierter Widerstand des Ellipsenflügels

Beliebige Auftriebsverteilung

- Methode von Schrenk: Aufteilung von Auftriebsverteilung auf Basisauftrieb und Zusatzauftrieb ($A/2$ elliptische Form, $A/2$ proportional zu Flügelgrundriss)
- $\frac{dc_A}{d\alpha} = c_{a\alpha} \left[\frac{\Lambda}{\Lambda + \frac{2(\Lambda+4)}{\Lambda+1}} \right]$ (McCormick Näherung)
- $\frac{dc_A}{d\alpha} = c_{a\alpha} \left[\frac{\Lambda}{\frac{c_{a\alpha}}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{c_{a\alpha}}{\pi}\right)^2 + \Lambda^2}} \right]$, falls $c_{a\alpha} = 2\pi$:
- $\frac{dc_A}{d\alpha} = c_{a\alpha} \frac{\Lambda}{2 + \sqrt{4 + \Lambda^2}}$ (Lowry+Polhemus Näherung)



Prandtl-Glauert Faktoren

- Prandtl-Glauert Faktoren τ und δ geben Abweichungen zum idealen Ellipsenflügel an
- $\alpha_i = \frac{c_A}{\pi \Lambda} (1 + \tau)$
- $c_{W_i} = \frac{c_A^2}{\pi \Lambda} (1 + \delta)$

1.3.7 Strömungsabriss am Flügel

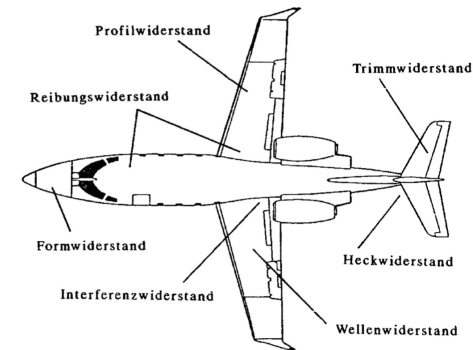
- Abrissverhalten kritischer je ausgeprägter der Auftriebsabfall nach Erreichen von $c_{A,max}$
- Abriss bemerkbar durch Schütteln (Buffeting)
- Abriss erkennbar wenn Innenflügel im abgerissenen Zustand und Aussenflügel gesund umströmt
- Bei Trapezflügel: Abrissverhalten aussen kritischer
- Bei gepfeilter Flügelform: Zusätzlich kann ein Längsmoment (Pitch Up) eintreten, was zu einer Verstärkung des Abriss führt
- **Flügelverwindung:** Aeroelastische Antwort wobei Flügel nach aussen unten verwunden werden (-3°) damit Pilot länger Kontrolle auf Steuerruder hat
- **Stall Control Devices:**
 - Absenkung der Profelnase im Aussenflügel (Drop Nose)
 - Nasenklappen im Aussenflügel
 - Sägezahn (bei Pfeilflügeln) zwecks Aufbau einer Grenzschicht
 - Grenzschichtzaun, verhindert Strömungsabfluss gegen Flügelspitze
 - Vortex-Generatoren, verzögern Ablösung im Querruder
 - Abrisskanten (Stall Strips) am Innenflügel, lösen früher ab, Pilot wird durch Buffeting gewarnt ohne das Querruderwirksamkeit verloren geht

1.3.8 Auftriebserhöhende Klappen

- Schnellflug: $c_{W,min}$ möglichst klein
- Reiseflug: c_a/c_w resp. c_a^3/c_w^2 möglichst gross
- Langsamflug $c_{A,max}$ möglichst gross
- Um alle Anforderungen zu erfüllen, werden Klappen gebraucht
- Die Profilwölbung führt zu einem grösseren $c_{A,max}$
- $\frac{dc_a}{d\alpha}$ bleibt ungefähr gleich
- c_a verschiebt sich zu grösseren Auftriebsbeiwerten

1.4 Widerstand

1.4.1 Widerstandsarten



Gesamtwiderstand = Induzierter Widerstand + Restwiderstand

Restwiderstand

- Reibungswiderstand: Reibungswiderstand auf benetzter Oberfläche
- Formwiderstand: Druckwiderstand auf Oberfläche parallel zur Strömung
- Interferenzwiderstand: Widerstand durch zwei Körper nahe beieinander

- Trimmwiderstand: Zusatzwiderstand durch Komponenten welche zum Momentengleichgewicht benötigt sind
- Profilwiderstand: Reibungs- und Formwiderstand eines 2-D Profils
- Kühlwiderstand: Widerstand durch Impulsverlust beim Durchströmen von Kühleinrichtungen
- Heckwiderstand: Druckwiderstand eines stumpfen Hecks
- Wellenwiderstand: Bei Überschallströmungen, durch Schockwellen

Induzierter Widerstand

- $c_W = c_{W_0} + c_{W_i}$ wobei $c_{W_i} = k c_A^2$ (elliptisch: $k = \frac{1}{\pi \Lambda}$)
- $W = \frac{\rho}{2} V^2 F c_{W_0} + \frac{\rho}{2} V^2 F k c_A^2$ (dimensionsbehaftete Form)
- Stationärer Horizontalflug ($A = mg$ und $c_A = \frac{2mg}{\rho V^2 F}$)
- $W = \frac{\rho}{2} V^2 F c_{W_0} + \frac{k(mg)^2}{\frac{\rho}{2} V^2 F}$

1.4.2 Restwiderstand des Flügels

Profilwiderstand (Widerstand des Flügels) - p. 4.47 ff

- $W_{\text{Flügel}} = W_{\text{Rest, Fl}} + W_{\text{induziert}}$
- $W_{\text{Rest, Fl}} = 2 \frac{\rho}{2} V^2 \int_{b_R/2}^{b/2} c_{W_\infty}(y) c(y) dy$
- c_{W_∞} Profilwiderstand 2D

Unverwundener Ellipsenflügel:

- $W_{\text{Flügel}} = c_{W_\infty} \frac{F^*}{F} + c_{W_i}$
- F^* benetzter Anteil Flügelfläche

Oswald-Faktor

- $c_W = c_{W_0} + \frac{c_A^2}{\pi \Lambda e}$ mit
- $e = \frac{1}{1 + \delta + \pi \Lambda k}$ Oswald-Wirkungsfaktor
- Gilt nur im Linearbereich der Auftriebspolaren!
- Flügel mit elliptischer Auftriebsverteilung: $e = 1$
- Flügel $0.85 < e < 0.95$
- Flugzeug $0.6 < e < 0.9$

Bester Gleitwinkel $(c_A/c_W)_{\max}$

- $c_W = 2c_{W_0}$, $c_A = \sqrt{\pi \Lambda e c_{W_0}}$, $c_{W_0} = c_W (c_A = 0)$

1.4.3 Restwiderstand des Flugzeugs

Reibungswiderstand W_R

- $c_f = \frac{W_R}{\frac{\rho}{2} V^2 F_W}$ mit F_W : benetzte (überstr.) Oberfläche
- Lokale Reynoldszahl: $Re_x = \frac{Vx}{\nu}$

Umschlag von laminar-turbulent

- $Re_{krit} = (Vx/\nu)_{krit} \approx 3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$
- laminar $Re < Re_{krit}$
- turbulent $Re > Re_{krit}$

Ebene Platte mit glatter Oberfläche

- $Re = (Vl/\nu)$ mit l Plattenlänge
- laminar: $c_f = 1.328 \frac{1}{\sqrt{Re}}$
- turbulent: $c_f = 0.074 Re^{-1/5}$

Ebene Platte mit rauher Oberfläche

Rauhigkeit k_s

- $k_s = 0mm$ - Aerodynamisch/hydraulisch glatt
- $k_s = 0.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}mm$ - Metall/Holz poliert
- $k_s = 6 \cdot 10^{-3}mm$ - Farboberfläche, glänzend
- $k_s = 0.01 - 0.03mm$ - Tarnfarbe, unpoliert
- $k_s = 0.15mm$ - Metalloberfläche, galvanisierend

Rauhigkeitsbereiche:

- $\frac{u_\tau k_s}{\nu} < 5$ hydraulisch glatt
- $5 < \frac{u_\tau k_s}{\nu} < 70$ Übergangsbereich
- $\frac{u_\tau k_s}{\nu} > 70$ rauh

Zulässige Rauhigkeitshöhe $k_{s,zul}$ für Grenzschichten

- laminare GS: $k_{s,zul} \leq 15 \frac{u_\tau}{\nu} = k_{s,krit} = 26.03 \frac{\nu \sqrt[4]{Re_x}}{V}$
- turbulente GS: $k_{s,zul} < 100 \frac{\nu}{V} = 100 \frac{l}{Re}$
- $c_f = (1.89 + 1.62 \log(\frac{1}{k_s}))^{-2.5}$ für $10^2 < \frac{1}{k_s} < 10^6$

Plattenförmige Körper ohne grosse Ablösungsgebiete

- $c_W^* = c_f \frac{F_W}{F_F}$

- Benetzte Oberfläche F_W , Frontfläche F_F

Reibungswiderstand für profilierte Flächen (empirische Beziehung)

- $c_{W_0} = c_f \frac{F_F}{F} \left[1 + L \left(\frac{d}{c} \right) + 100 \left(\frac{d}{c} \right)^4 \right]$
- mit $L = 1.2$: Falls Profil max. Dicke $x/c > 0.3$
- mit $L = 2.0$: Falls Profil max. Dicke $x/c < 0.3$
- F : Referenzfläche, F_W : Benetzte Oberfläche
- c : Profiltiefe, d : Profildicke

Formwiderstand

- $c_{W,Ru}(\alpha) = c_{W_0,Ru} + c_{W_{\alpha,Ru}} + c_{W_{H,Ru}}$
- $c_{W,Ru} = 0.05 - 0.15$
0.15 für kleine, gedrungene Flugzeuge
- $c_{W,Ru} = \left(1 + \frac{D}{2l} \right) c_{f,pl} \frac{F_W}{F}$
 $c_{f,pl}$ Reibungsbeiwert Platte
- $c_{\alpha,Ru} \approx k_R \left(\frac{\alpha}{10} \right)^3 c_{W_0,Ru}$
 $k_R \approx 0.3$ (gedrungen), $k_R \approx 0.9$ (schlank)
- $c_{W_{H,Ru}} = 0.029 \left(\frac{D_H}{D} \right)^3 \frac{1}{\sqrt{c_{W_0,Ru}}} \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{F}$
 D : max. Rumpfdurchmesser, D_H : Heckdurchmesser

Interferenzwiderstand

- $\approx 5\%$ des Rumpfwiderstands bei kleinen Anstellwinkeln, durch Messungen zu bestimmen

Trimmwiderstand

- $\approx \max. 1 - 2\%$ des Gesamtwiderstands im stationären Reiseflug

Abschätzung des Restwiderstands

1. Einzelteile auflisten
2. Geometrie der Einzelteile bestimmen
3. Referenzfläche F_N bestimmen und Widerstandsbeiwert c_{W_n} abschätzen
4. Widerstandsfläche der Einzelteile berechnen: $f_n = c_{W_n} F_n$
5. Widerstandsfläche des Flugzeugs bestimmen: $f = \sum_{i=1}^n f_i$
6. Abschätzen von allfälligen Zusatzwiderständen (Interferenzen, Kühlung)
7. Gesamtwiderstand: $W_{Rest} = \frac{1}{2} \rho V^2 f + W_{zusatz}$

1.4.4 Gesamtwiderstand des Flugzeugs

- $W = \frac{1}{2}\rho V^2 \left(f + F \frac{c_A^2}{\pi \Lambda e} \right)$
- Im stationären Horizontalflug: $A = mg$
- $W = \frac{1}{2}\rho V^2 f + \frac{2}{\rho \pi e} \left(\frac{mg}{b} \right)^2 \frac{1}{V^2}$

Minimaler Widerstand

- $W_{min} = \frac{2mg}{b} \sqrt{\frac{f}{\pi e}}$
- $V(W_{min}) = \left[\frac{4}{\pi e f} \left(\frac{mg}{\rho b} \right)^2 \right]^{0.25}$

1.4.5 Widerstandsverminderung

Reduktion des induzierten Widerstands

- $c_{Wi} = \frac{c_A^2}{\pi \Lambda e} \rightarrow$ möglichst grosse Streckung Λ
- Möglichst elliptischer Auftrieb $e = 1$
- Durch Beeinflussung der Ausgleichsströmung (Flügelend-Tanks, Winglets etc.)

Reduktion des Restwiderstand (p. 4.36)

- Reduktion der Oberflächenreibung durch Laminarhaltung der Strömung
- Reduktion der Oberflächenreibung durch Reduktion der Rauheit
- Grenzschichtbeeinflussung durch passive oder aktive Mittel (Grenzschichtabsaugung, Zusatzinstallation etc.)
- Beeinflussung der Grenzschicht durch Riblets
- Verringerung des Kleinteilewiderstands (Drag clean up), Beschränkung von störenden Teilen auf der Oberfläche auf ein Minimum

2 Einführung in die Fahrzeugaerodynamik

2.1 Grundlagen

2.1.1 Kräfte am Fahrzeug

2.1.2 Fahrleistungen

2.1.3 Treibstoffverbrauch

2.2 Personenwagen

2.2.1 Aerodynamik der Grundform

2.2.2 Komponentengestaltung

2.2.3 Verschmutzung und Benetzung

2.2.4 Windgeräusche

2.3 Nutzfahrzeuge

2.3.1 Lastkraftwagen

2.3.2 Busse

2.4 Rennfahrzeuge

2.4.1 Grundlagen

2.4.2 Tourenwagen

2.4.3 Rennfahrzeuge mit abgedeckten Rädern

2.4.4 Rennfahrzeuge mit offenen Rädern