

Aeroelastik

Prof. Dr.-Ing. Johannes Wandering

Literatur

- Strukturdynamik:
 - Wandinger, Skripten zum Modul Strukturdynamik
- Aerodynamik:
 - Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill 2001
 - Moran, *An Introduction to Theoretical and Computational Aerodynamics*, Dover 1984
 - Karamcheti, *Principles of Ideal-Fluid Aerodynamics*, Krieger 1980
 - Mason, *Applied Computational Aerodynamics*, Cambridge 2015

Literatur

- Katz, Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics*, Cambridge 2001
- Schlichting, Truckenbrodt, *Aerodynamik des Flugzeuges*, Bände 1 und 2, Springer 2000
- Flugmechanik:
 - Etkin, Reid, *Dynamics of Flight, Stability and Control*, Wiley 1996
- Aeroelastik:
 - Hodges, Pierce, *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*, Cambridge 2013
 - Wright, Cooper, *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*, Wiley 2007

Literatur

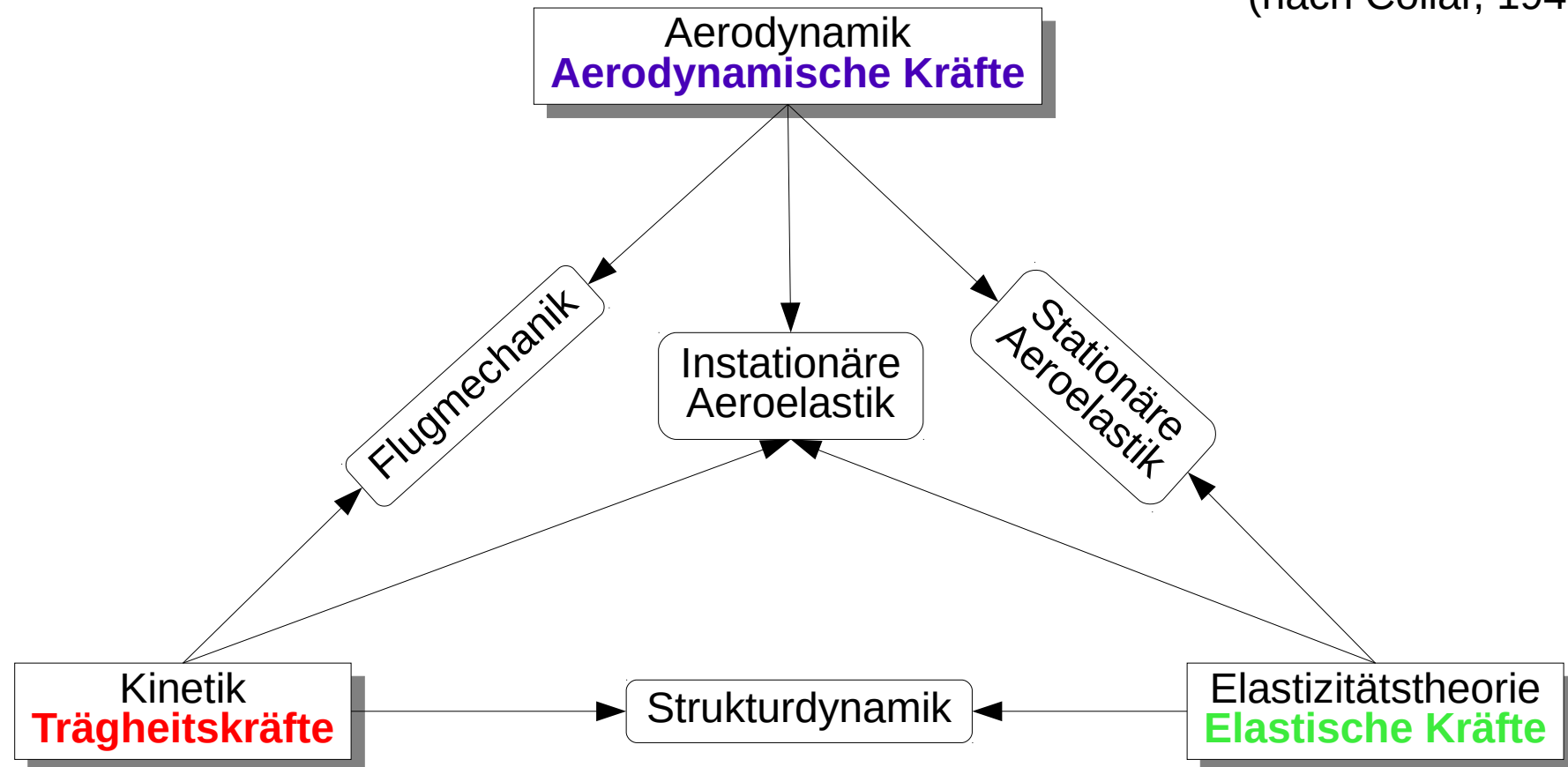
- Försching, *Grundlagen der Aeroelastik*, Springer 2014
- Dowell (Ed.), *A Modern Course in Aeroelasticity*, Kluwer 2004
- Fung, *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*, Dover 1993
- Bisplinghoff, Ashley, Halfman, *Aeroelasticity*, Dover 1996

Thema

- Die Aeroelastik untersucht den Zusammenhang zwischen der Verformung eines umströmten elastischen Körpers und den aerodynamischen Kräften:
 - Die Druckkräfte auf den Körper führen zu einer Verformung.
 - Die Verformung des Körpers ändert seine Gestalt und damit die Randbedingungen für die Strömung.

Das aeroelastische Dreieck

(nach Collar, 1946)



Aufgabenstellungen

- Stationäre Aeroelastik:
 - Trimm-Analysen
 - Belastungsanalysen
 - Ruderwirksamkeit
 - Statische Divergenz
- Instationäre Aeroelastik:
 - Manöver
 - Böen
 - Turbulenz
 - Flattern

Stationäre Aeroelastik

- Trimm-Analysen:
 - Gesucht sind die Ruderausschläge, die nötig sind, um ein bestimmtes stationäres Manöver durchzuführen:
 - stationärer Geradeausflug
 - stationäres Hochziehen (Pull-up)
 - stationärer Kurvenflug
 - Die Ruderausschläge hängen von der elastischen Verformung des Flugzeugs ab:
 - Torsion und Biegung des Flügels bei Querruderausschlägen
 - Torsion und Biegung des Rumpfs bei Seiten- und Höhenruderausschlägen

Stationäre Aeroelastik

- Belastungsanalysen:
 - Aus den Trimm-Analysen ergeben sich auch die Kräfte am elastisch verformten Flugzeug.
 - Infolge der Torsion und der Biegung des Tragflügels ändert sich die Auftriebsverteilung gegenüber der Auftriebsverteilung bei einem ideal starren Tragflügel.
- Ruderwirksamkeit:
 - Die Verformung des Flugzeugs führt zu einer Änderung der Ruderwirksamkeit, die sogar eine Umkehr der Ruderwirkung zur Folge haben kann.

Stationäre Aeroelastik

- Bei der Bristol Bagshot (1927) führte die Torsion des Tragflügels dazu, dass die Querruderwirksamkeit mit zunehmender Fluggeschwindigkeit abnahm und schließlich negativ wurde.
- Statische Divergenz:
 - Wenn die Torsion des Tragflügels dazu führt, dass das Torsionsmoment zunimmt, kann es zu einer Instabilität kommen, die zum Versagen des Tragflügels führt.
 - Diese Instabilität trat zum ersten Mal 1918 bei der Fokker D-8 auf und führte zu mehreren tödlichen Unfällen.

Stationäre Aeroelastik



Bristol Bagshot,
1927

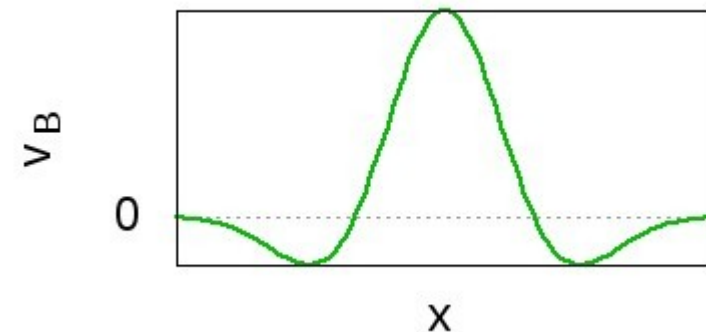
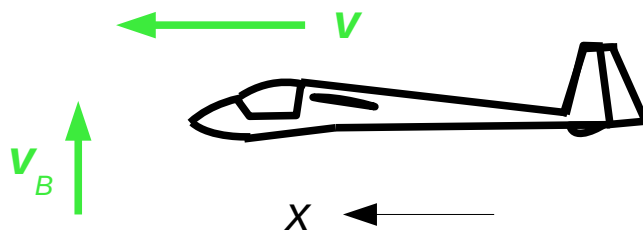
Stationäre Aeroelastik

Fokker D-8, 1918



Instationäre Aeroelastik

- Manöver:
 - Untersucht wird z. B. der zeitliche Verlauf der Antwort des Flugzeugs auf einen Ruderausschlag.
 - Bei einem elastischen Flugzeug führt ein Ruderausschlag zu Schwingungen.
- Böen:



Instationäre Aeroelastik

- Die Vertikalgeschwindigkeit $v_B(x)$ der Bö führt zu einer Änderung des Anstellwinkels:

$$\Delta \alpha(t) = \frac{v_B(vt)}{v}$$

- Daraus resultiert eine Änderung $L(t)$ der Auftriebskraft.
 - Dadurch wird das Flugzeug zu Schwingungen angeregt, die wiederum die aerodynamischen Lasten beeinflussen.
- Turbulenz:
 - Turbulenzen sind stochastisch im Raum verteilte Böen.
 - Bei stationärer Turbulenz wird die Vertikalgeschwindigkeit der Bö durch einen stationären stochastischen Prozess beschrieben (vgl. Skript zur Strukturdynamik).

Instationäre Aeroelastik

- Flattern:
 - Durch Rückkopplung mit der Strömung entsteht eine Schwingung mit großer oder unbegrenzt wachsender Amplitude.
 - Bei einem unbegrenzten Anwachsen der Amplitude spricht man von *explosivem Flattern*. Explosives Flattern führt zur schnellen Zerstörung des Flugzeugs.
 - Wird die Amplitude durch Nichtlinearitäten auf einen endlichen Wert begrenzt, spricht man von *Limit Cycle Oscillations*. Limit Cycle Oscillations können zu einem Versagen durch Ermüdung führen.

Instationäre Aeroelastik

- Beim *Buffeting* wird die Schwingung durch Wirbelablösungen verursacht.
- Beim *Whirl Flutter* tritt eine Kopplung mit den Propellerkräften auf.
- Beispiele:
 - Leitwerksflattern des Handley Page O/400 Bombers, 1918
 - Absturz einer Junkers Ju 90 VI bei einem Testflug 1938
 - Zerstörung der Takoma Narrows Bridge am 07.11.1940 durch Buffeting
 - Lockheed L-188 Electra, 1959: mehrere Abstürze infolge von explosivem Whirl-Flutter

Inhalt

1. Einführende Beispiele
2. Strukturmechanik
3. Grundlagen der Aerodynamik
4. Stationäre Aerodynamik
5. Stationäre Aeroelastik
6. Instationäre Aerodynamik
7. Instationäre Aeroelastik