

Inhaltsübersicht

Physik des Fliegens

Dr. Wolfgang Send - DLR-Institut für Aeroelastik, Göttingen

Erster Tag

1 Einstieg in die „Physik des Fliegens“

- 1.1 Evolution des Flugvermögens: Der Urvogel Archaeopteryx
- 1.2 Der Traum vom Fliegen – Leonardo da Vinci (1452-1519)
- 1.3 Schuberzeugung mit Schlag- und Drehschwingung – Étienne-Jules Marey (1830-1904):
Historisches Experiment zur Schubkraft beim Schwingenflug {EXP}
- 1.4 Tragfähigkeit ebener und gewölbter Flächen – Otto Lilienthal (1848-1896)
- 1.5 Beobachtungen Lilienthals zum Schwingenflug
- 1.6 Das zentrale Gleichgewicht der vier Kräfte beim Fliegen: Auftrieb und Gewicht, Schubkraft
und Widerstand – Steigen durch Schubkraft
- 1.7 Lilienthals Beschreibung der Quelle des Widerstands beim Fliegen: Die Lilienthalsche
Polare – Die aerodynamischen Beiwerte als dimensionslose Kenngrößen
- 1.8 Aerodynamik: Ein Teilgebiet der Strömungsmechanik - Charakterisierung
- 1.9 Flugdynamik: Aerodynamik und klassische Mechanik – Die Stabilität der Fluglage beim
Fliegen: Die Phugoide nach F. W. Lanchester (1908)
- 1.10 Ein Ziel der Vorlesung: Neugierde wecken – Könnte ein Mensch jemals fliegen wie ein
Vogel? – Könnte der Mechanismus des Schwingenflugs technisch genutzt werden?

2 Verschiedene Blickwinkel auf das Fliegen

- 2.1 Fluggeräte: Von Lilienthals Gleiter zum Airbus A380 – Wichtige Kennzahlen und
Konstruktionsmerkmale
- 2.2 Meilensteine der Aeronautik: Nur die wenigsten historischen Daten sind unumstritten
- 2.3 Messen im Labor: Die Entwicklung der Windkanäle – geschlossene Göttinger Bauart nach
Ludwig Prandtl (1875-1953) und offener Kanal nach Alexandre Gustave Eiffel (1832-
1923) – Rundlauf nach O. Lilienthal
- 2.4 Das Medium Luft als Newtonsches Fluid und seine physikalischen Eigenschaften:
Standardatmosphäre – Kompressibilität, Zähigkeit, Wärmeleitung – Turbulenz {EXP}
- 2.5 Beschreibung der Bewegung *in* einem Fluid: Starrkörperbewegung und kinetische Energie
bewegter Körper – nützliches Hilfsmittel: Summationskonvention nach A. Einstein
- 2.6 Beschreibung der Bewegung eines Fluids: Materiekoordinaten und die Erhaltung der Masse
– Geschwindigkeitsfeld der Materie – Energie im bewegten Fluid
- 2.7 Die mathematische Formulierung des Umströmungsproblems: Keine Durchdringung von
Oberflächen – Bedingung für das Geschwindigkeitsfeld der Relativbewegung
- 2.8 Die ersten Bilder von Umströmungen: Rauchkanal von É.-J. Marey (um 1900) –
Abbildungen der Funktionentheorie von W. M. Kutta (1902) und N. Joukowsky (1910)
- 2.9 Am Rande gestreift: Aerostaten (Luftschiffe und Ballone) und Hubschrauber
- 2.10 Strömungsmechanik: Der Umschlag von laminarer in turbulente Strömung

3 Der Teil für das Ganze: Die Kraft auf eine bewegte Tragfläche

- 3.1 Reaktionskraft eines Fluids auf eine darin bewegte Tragfläche – 2D Schnitt
- 3.2 Druck und Schubspannung als Ursache für Auftrieb und Widerstand
- 3.3 Vorgriff auf ein Hilfsmittel: Die Bernoullische Gleichung – Integral des Impulssatzes für das inkompressible Fluid ohne Zähigkeit und ohne Wärmeleitung (adiabatischer Zustand)
- 3.4 Eine wichtige Beobachtung: der glatte Abfluss an der Hinterkante
- 3.5 Auftrieb der angestellten ebenen Platte: Ein simples Modell als Folge von Verdrängung und glattem Abfluss – Staulinie auf der Unterseite der Tragfläche als Menge der Fußpunkte der teilenden Stromlinien
- 3.6 Widerstand der ebenen Platte: Wandschubspannung des zähen Fluids
- 3.7 Übergang zu großen Geschwindigkeiten – Konzept der infinitesimal dünnen Grenzschicht
- 3.8 Druckausgleich an den Seitenenden der Tragfläche: Bildung der Randwirbel **{EXP}**
- 3.9 Die Spuren der Bewegung: Nachlauf hinter einer Tragfläche

Zweiter Tag

4 Erhaltungssätze für Impuls und Energie

- 4.1 Lokale Bewegung des Fluids: Zerlegung in formtreue Drehung, Volumen erhaltende Scherung und isotrope skalare Dehnung
- 4.2 Leistungsbilanz für ein bewegtes Massenelement: Energieerhaltung
- 4.3 Bewegungsgleichung des Volumenelements: Impulserhaltung
- 4.4 Stetigkeit von Impulstrom, Massenstrom und Energiestrom: Differentielle Formulierung der Erhaltungssätze als Basis der numerischen Lösung (Differenzgleichungen in Zeit und Raum) von Umströmungsproblemen
- 4.5 Größenordnung von Kompressibilität, Viskosität und Schwerkraft – Machzahl Ma , Reynoldszahl Re und Froudezahl Fr
- 4.6 Größenordnung der physikalischen Effekte: Lösung für den Kreiszyylinder als Beispiel
- 4.7 Im Ergebnis: Die vereinfachten Erhaltungssätze der klassischen Aerodynamik für Impuls, Masse und Energie

5 Inkompressible Strömung und der Einfluss der Kompressibilität

- 5.1 Der Fundamentalsatz der Vektoranalysis: Darstellung eines jeden Vektorfeldes \mathbf{v} als Gradient eines skalaren Potentials ϕ mit $\delta = \text{div } \mathbf{v}$ als Quelldichte und Rotation eines Vektorpotentials \mathbf{A} mit $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{v}$ als Wirbeldichte
- 5.2 Bedeutung von Wirbeldichte \mathbf{j} und Quelldichte δ im Fluid: Impulsübertragung und Wellenausbreitung - Entkopplung von Viskosität und Kompressibilität
- 5.3 Inkompressible Strömung: Übergang vom Impulssatz zur Wirbeltransportgleichung
- 5.4 Wirbeltransportgleichung: Integrale Formulierung der Erhaltungssätze als Basis der analytischen Lösung (Reihen und Funktionsansätze) von Umströmungsproblemen
- 5.5 Formulierung der Lösung des Umströmungsproblems in inkompressibler Strömung
- 5.6 Näherungen der Integrodifferentialgleichung für den Wirbeltransport: Was ist physikalisch sinnvoll? – Was soll die Lösung beschreiben? – Welchen Aufwand will man betreiben?
- 5.7 Mit Wirbeldichte vertraut werden: Der praktische Umgang mit Potentialtheorie
- 5.8 Start einer Tragfläche aus der Ruhe: Beobachtung und theoretisches Modell - Anfahrwirbel

6 Klassische Lösungen für die Umströmung einer Tragfläche

- 6.1 Gemeinsame Grundlage der klassischen Lösungen: Starrer, bekannter Nachlauf bis ins Unendliche – Infinitesimal dünne Grenzschicht – Inkompressible Strömung
- 6.2 Ludwig Prandtl (1875-1953): Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung (1904) und die Konsequenzen – Druck durch die Grenzschicht hindurch konstant angenommen
- 6.3 Physikalische Betrachtung: Die Prandtlsche Grenzschicht im Grenzübergang zu immer höheren Geschwindigkeiten – Räumliche Wirbeldichte \mathbf{j} und flächenhafte Wirbeldichte \mathbf{j}_F
- 6.4 Der gedankliche Schritt von der endlich dicken Tragfläche zur dünnen Platte als Trennfläche zwischen der Strömung entlang der Ober- und der Unterseite
- 6.5 Ansatz für die flächenhaft verteilte Wirbeldichte: Randbedingung und Lösung – Zähigkeit durch Annahme eines glatten Abflusses berücksichtigt
- 6.6 Stationäre 2D Strömung (in der Mitte einer Tragfläche mit unendlich werdendem Seitenverhältnis): Keine Wirbeldichte im Nachlauf – Folge: Reaktionskraft des Fluids senkrecht auf der Bahnrichtung (leistungslose Umströmung!)
- 6.7 Wirbeltransportgleichung liefert nur Geschwindigkeitsfeld, nicht die Druckverteilung im Fluid und auf der Tragfläche: Zentrales Problem mit einer teilweisen Lösung
- 6.8 Integralkurven der flächenhaften Wirbeldichte: Zirkulation als integrale Größe
- 6.9 Historischer Rückblick: Hufeisenwirbel - Traglinientheorie – Tragflächentheorie (Anfänge der klassischen Aerodynamik markiert durch Prandtls Tragflügeltheorie von 1918)

7 Druckverteilung auf der Tragfläche und im Fluid

Dritter Tag

- 7.1 Ampèresches Theorem als Hilfe aus der Mathematik: Geschwindigkeitsfeld im Außenraum einer flächenhaften Verteilung von Wirbeldichte auch durch ein spezielles skalares Potential darstellbar – Integration des Impulssatzes trotz Wirbeldichte möglich
- 7.2 Dipolbelegung als Äquivalent zur flächenhaften Wirbeldichte
- 7.3 Integration des Impulssatzes für flächenhafte Wirbeldichte und kompressible Strömung liefert die Druckverteilung
- 7.4 Invariante instationäre Bernoullische Gleichung: Druckbeiwert für instationäre Bewegung – Sonderfall der stationären Strömung
- 7.5 Seitenblick auf moderne CFD-Verfahren (Computational Fluid Dynamics): Umfassender Lösungsansatz für zähe, kompressible Strömung (Navier-Stokes Gleichung) – Vereinfachter Lösungsansatz ohne explizite Zähigkeit (Euler Gleichung)
- 7.6 Unsicherheiten bei CFD-Verfahren: Erzeugung der komplexen Rechennetze, Abhängigkeit der Lösung vom Rechenetz, Modellierung der Turbulenz, Beherrschung der Numerik – Vom Wert analytischer Lösungen für das Verständnis und die Nachprüfung
- 7.7 Beispiele von Druckverteilungen: Entwicklung von Flügelquerschnitten und Grundrissen (Pfeilflügel um 1943 in Göttingen entwickelt) – Profilserien (NACA-Serie, Göttinger Profile)
- 7.8 Randwirbel verändern die Druckverteilung und induzierten zusätzlichen Widerstand – Nützliche Formeln für die elliptische Auftriebsverteilung (minimaler induzierter Widerstand)

8 Harmonische Bewegung einer Tragfläche

- 8.1 Instationäre Kinematik von Drehen und Schlagen – Schwenken in der Natur wichtig
- 8.2 Der instationäre Nachlauf hinter einer Tragfläche – Rückwirkung auf die Tragfläche
- 8.3 Zeitlich veränderliche Druckverteilung: Qualitative Betrachtung zu Schlagen und Drehen
- 8.4 Gekoppelte Schlag- und Drehbewegung: Phasenlage und Amplitudenverhältnis

9 Leistungsaustausch mit dem umgebenden Fluid

- 9.1 Schubkraft aus gekoppelter Schlag- und Drehbewegung: Anschauliche Herleitung der Leistungsabgabe beim Schwingenflug zur Überwindung des Widerstands und Demonstration mit einem künstlichen Vogel {EXP}
- 9.2 Spiegelbildlicher Mechanismus der Leistungsaufnahme existiert: Das technisch bedeutsame und gefährliche „Flugzeugflattern“ {EXP} – Wirtschaftliche Nutzung denkbar und als Technologiedemonstrator vorhanden (Hubflügelgenerator)

10 Theoretisches Fundament des Leistungsaustausches

Vierter Tag

- 10.1 Näherungsweise Herleitung – Reduzierte Frequenz als dimensionslose Kennzahl für instationäre Vorgänge (sinnverwandte zur Strouhalzahl)
- 10.2 Instationäre Luftkräfte der ebenen schwingenden Platte: Reihenansatz durch W. Birnbaum (1924) – Analytische Lösungen H.G. Küssner (1936) u.a.
- 10.3 Alternierende Wirbel im Nachlauf: Verschiebung zwischen Bewegung und resultierenden Kräften und Momente – Klassisches Ergebnis für schwingende Platte – Druckfeld um eine Tragfläche als Ergebnis einer CFD-Rechnung
- 10.4 Optimale Parameter: Konturlinien der Leistungsbeiwerte und Wirkungsgrade

11 Moderne Luftfahrzeuge

- 11.1 Blick in das Cockpit eines Airbus A340 – Erstflug des Airbus A380 am 27. April 2005
- 11.2 Funktionsweise von Turbinentriebwerken, Nebenstromverhältnis – Start einer Boeing 747
- 11.3 Start am Boden folgt dem Gesetz $Kraft = Masse \times Beschleunigung$ – Warum bei Flugzeugtriebwerken immer nur die Schubkraft angegeben wird
- 11.4 Alternativer Antrieb durch Schwingenflug? – „Full Size Ornithopter“ von J. DeLaurier (1999): Noch ein langer Weg zur technischen Nutzung

12 Was man behalten sollte

- 12.1 Zusammenfassung der Vorlesung – Kleine Formelsammlung – Hinweise im Internet
- 12.2 Anregungen und Kritik (auch zum Behalten!) – Stoffauswahl, Stoffmenge, Stilmittel

Hinweise zur Inhaltsübersicht

Die Hervorhebung bedeutender Personen mit vollem Namen und Lebensperiode (Geburtsjahr-Todesjahr) ist eine sehr subjektive Würdigung. Steht hinter einer Person in Zusammenhang mit einem Sachverhalt nur eine einzelne Jahreszahl (Jahr), dann ist es das Jahr der Veröffentlichung oder Entdeckung des Sachverhalts.

Jede Zeile der voranstehenden Tabelle beschreibt im Normalfall eine Folie oder einen Tafelanschrieb. Jedes Kapitel soll ungefähr den Inhalt einer Vorlesungsstunde umfassen. Auf diese Weise haben sich zwölf Kapitel ergeben. Die Inhaltsübersicht ist ein idealisierter Verlauf der zwölf Vorlesungsstunden und zugleich ein „Ariadnefaden“ zu dem speziellen Ziel, den Schwingenflug der Lebewesen verstehen zu können. Moderne Fluggeräte unterscheiden sich von den fliegenden Lebewesen durch ihre Größe, die großen Nutzlasten und die Verwendung der Drehbewegung für die Erzeugung der Schubkraft mit Propellern und Turbinenantrieb; auch das Fliegen im schallnahen Bereich ist in der Natur ohne Parallele. Die ersten Luftfahrtpioniere sahen im Schwingenflug das Vorbild für den Antrieb.

Der Inhalt aller Folien wird nach der Vorlesung voraussichtlich bis Ende April 2006 im Internet verfügbar sein. Teilweise wird während der Vorlesungen auf bereits veröffentlichtes Material zurückgegriffen. Der Text {EXP} ist der Hinweis auf ein begleitendes Experiment.

Postadresse/Postal address: Dr. Wolfgang Send DLR Institut für Aeroelastik Bunsenstr. 10 37073 Göttingen, Germany Sandersbeek 20, 37085 Göttingen, Germany	Weitere Angaben/Further information: Telefon +49 (0)551-709-2387 Telefax +49 (0)551-709-2862 e-Mail wsend@t-online.de Internet www.aniprop.de Homepage www.aniprop.de/dlrhp
--	--