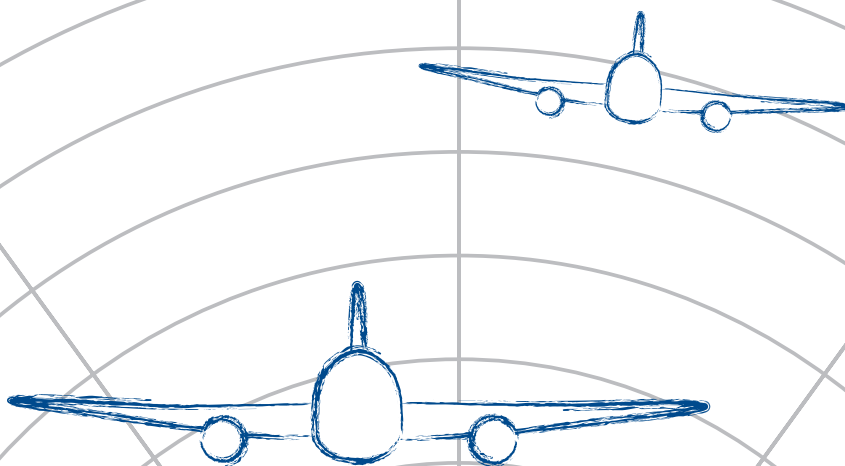
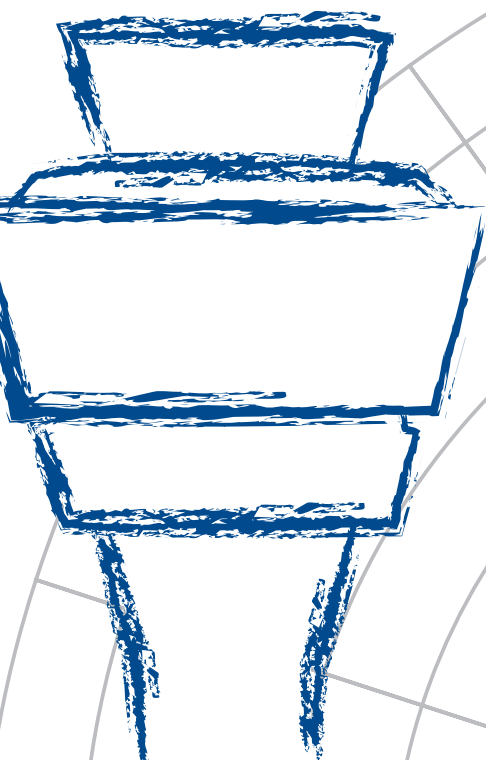




KAPITEL 5

Fluggeräte und Technik

- Fluggeräte – eine Übersicht
- Impuls
- Impulserhaltung
- Hubschrauber
- Flugzeuge
- Wir bauen ein Flugmodell
- Navigationssysteme (ILS) und Radar

5.1 Fluggeräte – eine Übersicht

Fliegen heißt Fortbewegung durch die Luft. Am Himmel bewegen sich sowohl Lebewesen – neben Vögeln und Insekten vor allem viele Pollen und Sporen von Pflanzen (mehr darüber in Kapitel 6) – als auch Geräte, die von Menschen zu genau diesem Zweck gebaut wurden: Fluggeräte. In Deutschland werden sie in Artikel 1 des Luftverkehrsgesetzes in verschiedene Luftfahrzeugklassen eingeteilt.

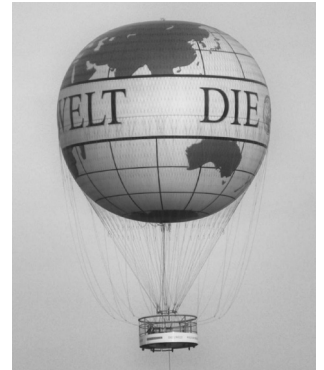
Zu den Luftfahrzeugen, die leichter als Luft sind, gehören Fesselballone (ohne Antrieb) sowie Luftschiffe und Heißluftballone mit eigenem Antrieb. Segelflugzeuge, Hängegleiter und Gleitschirme sind schwerer als Luft, sie können sich aufgrund ihrer Eigenschaften aber in der Luft halten. Die meisten verfügen über einen eigenen Antrieb, mit dessen Hilfe sie sich gegen die Schwerkraft nach oben bewegen können. Es handelt sich um Flugzeuge und Hubschrauber.

Mit Flugzeugen und Hubschraubern beschäftigt sich das folgende Kapitel. Die Lerneinheiten geben mit zahlreichen Erklärungen und Aufgaben einen Einblick in die physikalischen und technischen Ansätze von Fluggeräten und erklären, warum manche fliegen und andere nicht.

Arten von Luftfahrzeugen

§ 1 Abs. 2 des deutschen Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) definiert den Begriff Luftfahrzeug für die weitere Verwendung im deutschen Luftrecht durch eine Listung von Hauptgruppen. Umgekehrt ist somit jedes einzelne Luftfahrzeug nach deutschem Recht eindeutig einer dieser Luftfahrzeugklassen zuzuordnen:

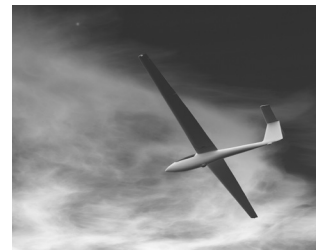
- Flugzeuge
- Drehflügler (Hubschrauber)
- Luftschiffe (Zeppeline)
- Segelflugzeuge
- Motorsegler
- Freiballone und Fesselballone
- Drachen
- Rettungsfallschirme
- Flugmodelle
- Luftsportgeräte
- sonstige für die Benutzung des Luftraums bestimmte Geräte



Verschiedene Arten von Fluggeräten: Fesselballone (ohne Antrieb) ...



... und Heißluftballone (mit Antrieb) sind leichter als Luft.



Segelflieger (ohne Antrieb) ...



... und Passagierflugzeug (mit Antrieb) sind schwerer als Luft, können aufgrund ihrer Eigenschaften aber trotzdem fliegen.

5.2 Impuls

Masse

Die Masse eines Körpers wird in Kilogramm (kg) gemessen:
 $[m] = 1 \text{ kg}$

Geschwindigkeit

Für die SI-Einheit der Geschwindigkeit gilt:
 $[v] = 1 \text{ m/s}$

In der Flugphysik wird häufig die Einheit feet per second verwendet.

Hierbei gilt:
 $1 \text{ m/s} = 3,28 \text{ ft/s}$
oder: Knoten
 $1 \text{ m/s} = 1,94 \text{ knot}$

Impulseinheit

$[p] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

Didaktische Impulseinheit

In den SI-Einheiten gibt es keine international verbindliche Abkürzung für die Impulseinheit. Didaktische Gründe sprechen aber dafür, für den Impuls eine sogenannte didaktische Einheit einzuführen.

Didaktische Einheit für den Impuls:
 $[p] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1 \text{ Hy}$
(= 1 Huygens)

Aus dem Alltag haben wir eine Vorstellung über den Schwung und die Wucht eines Körpers. Fahren wir mit dem Fahrrad eine abschüssige Straße hinunter, nehmen wir Schwung auf und verlieren diesen wieder, wenn wir bergauf fahren. Wenn ein Fußball von einem Stürmer auf das Tor geschossen wird, hängt die Wucht des Balls, mit der er den Torwart trifft, von der Geschwindigkeit des Balls ab. Im folgenden Experiment soll geklärt werden, von welchen anderen Größen der Schwung oder die Wucht eines Körpers, in der Physik Impuls genannt, noch abhängt.

Aufgabe 5.2.1

Stellen Sie Ihr Physikbuch aufrecht auf den Tisch und rollen Sie verschiedene Bälle, z. B. Medizinball, Fußball, Tennisball oder Tischtennisball, gegen das Buch. In welchen Situationen führt der Schwung (Impuls) der Bälle dazu, dass das Buch umfällt? Bewegen sich Gegenstände unterschiedlicher Masse mit der gleichen Geschwindigkeit, dann hängt der Schwung oder die Wucht dieser Gegenstände von ihrer Masse ab.

Definition

In der Physik bezeichnet man den Schwung oder die Wucht als Impuls. Den Impuls p berechnet man nach der Formel: $p = m \cdot v$

Beispiel: $m = 20 \text{ kg}$, $v = 12 \text{ m/s}$ ergibt $p = 240 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ (= 240 Hy)

Aufgabe 5.2.2

- a | Ein Auto (Masse 1t) fährt mit 108 km/h über die Autobahn. Bestimmen Sie den Impuls dieses Autos.
- b | Schätzen Sie den Impuls eines Weltrekordläufers über 100 m ab, wenn man davon ausgeht, dass er eine Masse von 90 kg hat.
- c | In der folgenden Tabelle sind bewegte Objekte aufgeführt, die jeweils unterschiedliche Impulse haben. Ordnen Sie diese Objekte nach den Impulswerten.
- Luftgewehrkegel
 - Tennisball
 - Eishockey-Puck
 - Schüler beim Fahrstuhlfahren
 - Schülerin beim 100-Meter-Lauf
 - Motorrad innerhalb der Stadt
 - PKW in der Fußgängerzone
 - Formel-1-Wagen
 - PKW auf Landstraße
 - Kampfjet
 - ICE bei voller Fahrt
 - Airbus A380
 - Titanic

5.3 Impulserhaltung

Wenn ein 100-Meter-Läufer beim Startschuss aus dem Startblock heraus tritt, dann hat er nach dem Start einen Impuls von z. B. 800 Hy (= 800 kg m/s) in Richtung der Laufbahn, und der Startblock erfährt einen gleich großen negativen Impuls von 800 Hy nach hinten, also entgegen der Laufrichtung. Der Impuls des Startläufers (800 Hy) kommt aus der Erde, also fehlt der Erde anschließend genau dieser Impuls. Damit hat die Erde einen negativen Impuls von -800 Hy. Wenn der Läufer seinen Lauf abbremst und stehen bleibt, geht der Impuls wieder zurück in die Erde.

Recherche 5.3.1

Wo im Alltag stößt man auf Effekte, die man mit dem Impulserhaltungssatz erklären kann?

Experiment 5.3.2

Stellen Sie sich mit dem Rücken zu einer festen Wand und stoßen Sie sich mit Ihrem Fuß von der Wand ab. Vor dem Abstoßen haben Sie den Impuls Null und nach dem Abstoßen haben Sie einen Impuls. Mit welcher experimentellen Anordnung kann man zeigen, dass die Wand beim Abstoßen einen gleich großen Gegenimpuls in die andere Richtung bekommen hat?

Experiment 5.3.3

Münzen-Stoß-Versuch: Legen Sie zwei 1-Euro-Münzen in einem gewissen Abstand voneinander auf eine glatte Tischoberfläche. Nun schnippen Sie mit dem Finger eine der beiden Münzen so an, dass sie die andere Münze zentral trifft. Was kann man beobachten?

Aufgabe 5.3.4

- a| Verhalten im Zug: Diskutieren Sie die Impulsbilanz der Fahrgäste beim Anfahren oder Abbremsen eines Busses oder eines Zugs.
- b| Erläutern Sie die Funktionsweise eines rotierenden Rasensprengers.

Aufgabe 5.3.5

Ein Auto mit der Masse $m = 1 \text{ t}$ fährt mit 30 m/s über die Autobahn.

- a| Welchen Impuls hat das Auto?
- b| Wo kommt dieser Impuls her?
- c| Wie kann das Auto seinen Impuls wieder verlieren? Wie hängen Bremskraft und Impulsänderung zusammen?
- d| Diskutieren Sie Bremskraft und Bremszeit in den folgenden drei Fällen:
 - sanfte Abbremsung
 - Auffahrunfall
 - Vollbremsung

Newtonsche Axiome

Newtonsche Formel

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Häufig findet man die Kirchhoffsche Formulierung:

$$F = m \cdot a$$

Sie gilt nur für den Fall, dass die Masse m des Körpers konstant bleibt.

Impulserhaltungssatz

Wenn ein Körper A einen Impuls Δp aufnimmt, dann muss dieser Impuls Δp von einem anderen Körper abgegeben werden.

Auf diesem Gesetz beruhen auch das sogenannte Trägheitsgesetz von Newton und das Gesetz von Actio-Reactio.



Wie dreht sich ein Rasensprenger?

Definition

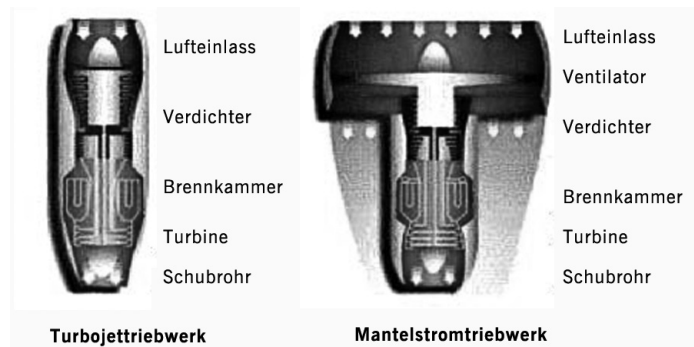
Wenn ein Körper eine Impulsänderung Δp erfährt, dann wirkt während der Zeit Δt eine Kraft F auf den Körper ein. Die Impulsänderung Δp ergibt sich als Produkt aus der Kraft F und der Wirkungszeit Δt :

$$\Delta p = F \cdot \Delta t$$

Diese Definition erlaubt die Berechnung der Schubkraft eines Flugzeugs. Wenn die Triebwerke eines Flugzeugs in der Zeit Δt eine Gasmasse von Δm mit einer Geschwindigkeit v ausstoßen, dann liefert dieses Triebwerk nach Newton die Schubkraft:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{mit} \quad \Delta p = \Delta m \cdot v$$

Bei Mantelstrom- oder Bypass-Triebwerken wird eine größere Luftmenge bei kleiner Ausströmgeschwindigkeit erzeugt und damit die Reduzierung von Fluglärm erreicht.



Mantelstromtriebwerke bewegen eine größere Luftmenge bei kleiner Ausströmgeschwindigkeit.

Aufgabe 5.3.6

- a| Ein A380 Triebwerk erzeugt eine Schubkraft von 320 kN. Welche Masse muss das Triebwerk pro Sekunde mit 1.000 m/s ausstoßen, damit diese Schubkraft zustande kommt?
- b| Welche Ausströmgeschwindigkeit ergibt sich, wenn man die pro Sekunde ausgestoßene Masse verdoppelt?
- c| Welche Kerosineinsparung ergibt sich bei Verdopplung der pro Sekunde ausgestoßenen Masse?
- d| Diskutieren Sie in beiden Fällen die anfallende Lärmbelästigung beim Betrieb des Triebwerks.

Aufgabe 5.3.7

- a| Welchen Impuls hat ein Airbus A380 bei einer Masse von 500 t, wenn er mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h auf der Landebahn aufsetzt?
- b| Wir gehen davon aus, dass die Triebwerke im Umkehrschubmodus bei zwei Drittel der maximalen Schubkraft von 300 kN laufen. Wie groß ist die Bremszeit, wenn der A380 seine Geschwindigkeit auf 80 km/h abbremsen will?
- c| Wie groß ist dabei die Verzögerung und der Bremsweg? Vergleichen Sie diese A380-Werte mit einer S-Bahn.

5.4 Hubschrauber

Ein Hubschrauber ist ein Luftfahrzeug, das mittels eines Verbrennungsmotors oder eines Turbinentriebwerks vertikal starten und landen kann. Für den Auftrieb und den Vortrieb nutzen Hubschrauber Rotoren – also sich drehende Flügel. Warum fliegt der Hubschrauber?

Impulsbetrachtung

Wenn man einen Körper aus einer Höhe h fallen lässt, wird er durch die Schwerkraft im Gravitationsfeld der Erde nach unten beschleunigt. Seine Geschwindigkeit wächst und sein Impuls nimmt zu.

Aufgabe 5.4.1

- a| Woher kommt der Impuls, den der Körper kurz vor dem Auftreffen auf den Fußboden hat?
- b| Wo ist der Impuls dieses Körpers nach dem Auftreffen?
- c| Warum kann man Impulsänderungen der Erde, die wir Menschen verursachen, nicht wahrnehmen?
- d| Warum fällt ein Hubschrauber, der sich im Schwebeflug befindet, nicht nach unten? Die Erde zieht über das Gravitationsfeld immer noch mit einer Schwerkraft an dem Hubschrauber. Warum nimmt der Impuls des Hubschraubers dann aber nicht zu?
- e| Wie „entsorgt“ der Hubschrauber den Impuls, der ihm von der Erde ständig zufließt?

Kraftbetrachtung

Betrachtet man den Schwebeflug des Hubschraubers im „Kraftbild“, dann nimmt die Geschwindigkeit des Hubschraubers beim Fallen aufgrund der Actio „Gewichtskraft“ zu. Die Reactio wirkt auf die Erde mit dem gleichen Betrag nach oben. Im Schwebeflug wirken die Rotorblätter mit der Kraft Actio auf die Luft nach unten, wenn die Rotorblätter eine entsprechend große Luftmenge „nach unten schaufeln“. Die Reactio von der Luft auf die Rotorblätter nach oben gleicht die Gewichtskraft auf den Hubschrauber aus. Wenn der Hubschrauber am Boden steht, wird die Actio auf den Hubschrauber durch die elastische Kraft der Unterlage ausgeglichen.

Bei diesen Kräftebetrachtungen muss man sorgfältig darauf achten, dass Actio- und Reactio-Kräfte immer an unterschiedlichen Körpern angreifen und bei einem Kräftegleichgewicht die Summe der Kräfte in einem Angriffspunkt verschwinden.

Helikopter

Monokopter haben einen Hauptrotor. Quadrokopter, Hexakopter oder Oktokopter nutzen vier, sechs oder acht Rotoren. Vor allem in der Schweiz verwendet man die Bezeichnung Helikopter; aus dem Griechischen: *hélix*, *hélikos* „Windung, Spirale“.

Modellhubschrauber

Im Modellflugsektor gibt es preisgünstige Hubschraubermodelle, die ganz unterschiedliche Steuerungsmechanismen und, damit verbunden, ganz unterschiedliche Eigenschaften haben. So kann man bei einem 2-Kanal-Hubschrauber nur die Haupt- und die Heckrotordrehzahl verändern; dieses einfache Modell kann nur aufsteigen und sich um die Hochachse drehen (Gieren). Ein 4-Kanal-Hubschrauber kann sich noch zusätzlich um die Quer- (Nicken) und Längsachse (Rollen) drehen.

Actio – Reactio

Betrachtet man den Horizontalflug eines Flugzeugs im Kräftebild, wirkt zunächst, ebenso wie beim Helikopter, auf das Flugzeug die Gewichtskraft.

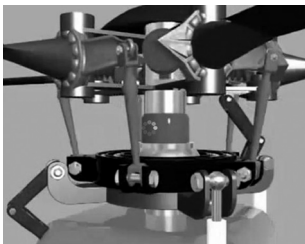
Die Tragflächen lenken mit einer vertikalen Kraftkomponente Luft nach unten ab (Actio auf die Luft nach unten). Die Reactio wirkt auf das Flugzeug zurück und gleicht die Gewichtskraft auf das Flugzeug aus – d. h. die vertikale Reactio trägt das Flugzeug gewissermaßen bei seinem Horizontalflug.

Rotorblätter

Bei einfachen Modellhubschraubern findet man einen festen Anstellwinkel der Rotorblätter, und die dynamische Auftriebskraft wird über unterschiedliche Drehzahlen gesteuert.

Pitch

Bei einem sogenannten pitch-gesteuerten Hubschrauber rotieren die Hauptrotorblätter immer mit der gleichen Drehzahl. Die dynamische Auftriebskraft der Rotorblätter wird in diesem Fall über den Anstellwinkel der Rotorblätter eingestellt.



Mithilfe der Taumelscheibe kann die Richtung der Auftriebskraft gesteuert werden.

Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit liegt, u. a. abhängig von der Temperatur, bei 343 m/s (20 °C).

Die Machzahl (Ma) ist eine dimensionslose Kennzahl der Geschwindigkeit. Mach 2 ist gleichbedeutend mit doppelter Schallgeschwindigkeit.

Aufgabe 5.4.2

Der Hauptrotor bei einem Monokopter sorgt für den notwendigen dynamischen Auftrieb und gleicht damit die Gewichtskraft auf den Hubschrauber aus.

- a| Welche Funktionsweise hat der Heckrotor, den man bei einem „normalen“ Monokopter sieht? Was würde passieren, wenn der Heckrotor ausfällt?
- b| Welche Maßnahmen des Piloten führen zu einer Drehung des Hubschraubers um seine Hochachse?

Schallmauer

Bewegte Körper, wie die Rotorblätter an einem Hubschrauber, wirken als bewegte Schallquellen und schieben die Wellenfronten der Schallwellen in der Bewegungsrichtung zusammen (Dopplereffekt). Erreicht der Körper die Schallgeschwindigkeit, dann verdichten sich diese Wellenfronten zur sogenannten Schallmauer – einer Zone extrem hoher Turbulenz.

Aufgabe 5.4.3

Der Rotordurchmesser beträgt beim „Eurokopter“ 15,60 m, die Höchstgeschwindigkeit ist 278 km/h. Welche Winkelgeschwindigkeit kann der Rotorkopf maximal annehmen, wenn die Geschwindigkeit der Blattspitzen relativ zur umgebenden Luft unterhalb der Schallgeschwindigkeit bleiben soll?

Taumelscheibe

Will man mit dem Hubschrauber einen Vorwärtsflug realisieren, dann muss die Auftriebskraft, die im Schwebeflug vertikal nach oben wirkt, nach vorne geneigt werden. Dies bewirkt die sogenannte Taumelscheibe. Auf YouTube gibt es verschiedene Aufnahmen und Animationen von Taumelscheiben.

Die Rotorblätter des Hauptrotors können über die Taumelscheibe gleichförmig verstellt werden – das bewirkt eine Zunahme oder Abnahme der Auftriebskraft. Zusätzlich kann man durch Kippen der Taumelscheibe erreichen, dass sich die Auftriebskraft der Rotorblätter zyklisch verändert:

- Wenn die Rotorblätter über das Heck streichen, bekommen sie einen größeren Anstellwinkel.
- Wenn sie über die Nase des Hubschraubers streichen, wird der Anstellwinkel verkleinert. In diesem Fall kippt die Auftriebskraft nach vorne und bekommt damit eine Komponente in Vorwärtsrichtung.

Aufgabe 5.4.4

- a| Wie realisiert ein Hubschrauberpilot den Vorwärtsflug eines Hubschraubers?
- b| Hat ein Hubschrauber einen Rückwärtsgang? Wie wird er realisiert?
- c| Kann ein Hubschrauber auch seitlich bewegt werden?

5.5 Flugzeuge

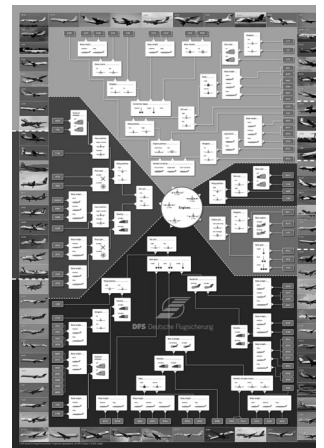
Ein Flugzeug besteht aus einem Rumpf mit der Pilotenkanzel, dem Passagierraum und einer Hülle. Im vorderen Teil des Rumpfs sind die Tragflächen angebracht. An den Tragflächen befinden sich u. a. die Querruder, Start- und Landeklappen, Vorflügel und Bremsklappen. In den Tragflächen sitzt auch der Haupttreibstofftank. Am Ende des Rumpfs befindet sich das Höhenleitwerk mit den Höhenrudern und das Seitenleitwerk mit dem Seitenrunder.



Ein modernes Flugzeug

Für einen Fluglotsen ist es aber nicht nur wichtig, die Flugzeugtypen optisch unterscheiden zu können, wenn er sie vom Turm aus sieht, sondern er muss auch die Leistungsfähigkeit verschiedener Flugzeugtypen korrekt beurteilen können. Die Leistungsfähigkeit eines Flugzeugs hängt von einer Vielzahl einzelner Faktoren ab, z. B. der Antriebsart (Jet, Turbopropeller oder Propeller), dem Einsatzzweck, der Beladung, der Lufttemperatur und der Flughöhe. Ein typisches Kurzstreckenflugzeug, z. B. ein Canadair Regional Jet, muss in der Lage sein, schnell seine Reiseflughöhe zu erreichen, wo es nur wenig Zeit verbringen wird. Dafür wird bei solchen Flugzeugen weniger Wert auf eine hohe Reisegeschwindigkeit gelegt.

Ganz anders sieht es bei einem Airbus A380 aus. Trotz der starken Triebwerke lässt die hohe Abflugmasse keine großen Steigraten zu. Der Steigflug bis zur Reiseflughöhe dauert deutlich länger als bei einem Kurz- und Mittelstreckenjet. Dafür fliegt der A380 im Reiseflug aber bis zu 200 km/h schneller als ein Airbus A320, wodurch sich die Flugzeit von Frankfurt nach Peking um fast zwei Stunden verkürzt (ohne Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Airbus A320 diese Strecke nonstop gar nicht fliegen kann).



Übersicht verschiedener Flugzeugtypen. Diese Darstellung finden Sie zum Ausdrucken auf der CD-ROM.

Aufgabe 5.5.1

- a| Welche Funktion haben die Tragflächen?
- b| Wo muss der Schwerpunkt des Flugzeugs liegen, damit es einen stabilen Horizontalflug ausführen kann?
- c| Welche Funktion haben die Querruder an den Tragflächen – bzw. die Start- und Landeklappen an den Tragflächen?
- d| Welche Funktion haben das Höhenleitwerk und die Höhenrunder?
- e| Welche Funktion haben das Seitenleitwerk und die Seitenrunder?

Tragflächen

Im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, dass der Hubschrauber mit seinen Rotorblättern ständig Luft nach unten schaufelt und damit Impuls über die Rotorblätter an die Luft abgibt.

Das Flugzeug lenkt, ebenso wie der Hubschrauber, Luft nach unten ab; allerdings nicht über kreisende Rotorblätter, sondern mithilfe seiner Tragflächen.

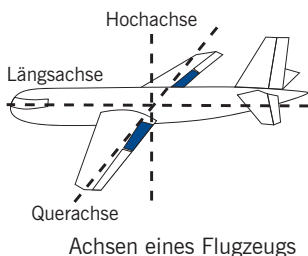
Verkehrsflugzeuge

Bei einer Temperatur von -50°C (üblich in ca. 10.000 m Flughöhe) beträgt die Schallgeschwindigkeit $299,8\text{ m/s}$
 $= 1.079,3\text{ km/h}$.

Ein Passagierflugzeug, das mit einer Reisegeschwindigkeit von Mach 0,85 unter diesen Bedingungen fliegt, hat eine Geschwindigkeit von $254,83\text{ m/s}$
 $= 917,39\text{ km/h}$.

Dynamischer Auftrieb

Die Form der Tragfläche und der Anstellwinkel sind entscheidende Faktoren dafür, welche Luftmenge eine Tragfläche nach unten ablenkt. Betrachtet man den vertikalen Impuls, der mit dieser Luftmenge verbunden ist, spielt die Fluggeschwindigkeit und die Dichte der Luft eine ganz wesentliche Rolle.



Flugzeugachsen

Wie beim Hubschrauber unterscheidet man auch bei einem Flugzeug drei Achsen:

Hochachse

Die Bewegung um die Hochachse nennt man Gieren.

Querachse

Die Bewegung um die Querachse nennt man Nicken.

Längsachse

Die Bewegung um die Längsachse nennt man Rollen.

Die Form der Tragflächen und der Anstellwinkel der Tragflächen entscheiden, welche Luftmenge welchen vertikalen Impuls nach unten bekommt. Im Horizontalflug muss das Flugzeug genau den vertikalen Impuls, den es über das Gravitationsfeld bekommt, über seine Tragflächen an die Luft nach unten abgeben. Weil diese Ablenkung der Luft nach unten nur im Flug, also dynamisch erfolgt, spricht man in diesem Fall von einem dynamischen Auftrieb.

Aufgabe 5.5.2

Ein A380, das derzeit größte Passagierflugzeug der Welt, startet mit einer Geschwindigkeit von 290 km/h , steigt auf 10.000 m Höhe und fliegt dort mit einer Geschwindigkeit von $0,95$ Mach, dem $0,95$ -fachen der Schallgeschwindigkeit. Beim Start und beim Streckenflug muss der vertikale Impuls auf die nach unten abgelenkte Luft pro Sekunde etwas größer oder gleich der Gewichtskraft des Flugzeugs sein. Wie ist dies beim Start und auf der Strecke jeweils möglich – bei wechselnden Fluggeschwindigkeiten und ganz unterschiedlichen Luftdichten?

Aufgabe 5.5.3

In Lerneinheit 5.3 wurde die Definition des Impulses p und der Zusammenhang zwischen der Impulsänderung Δp und der zugehörigen Kraft F in der Wirkungszeit Δt dargestellt: $\Delta p = F \cdot \Delta t$

Schätzen Sie die Dicke der Luftschicht ab, die eine kleine Propellermaschine, eine Cessna 172, bei ihrem Horizontalflug nach unten ablenken muss, damit sie einen Horizontalflug ausführen kann. Dieses Flugzeug hat eine Spannweite von rund 15 m bei einer Abflugmasse von rund 1.000 kg . Die Geschwindigkeit der Cessna liegt bei $v = 50\text{ m/s}$ und die Tragflächen haben einen Anstellwinkel von 5° .

Auftriebskraft

Flugzeuge lenken mit ihren Tragflächen Luft nach unten ab, um den Impuls Δp , der ihnen über das Gravitationsfeld zufließt, in der Zeit Δt abzugeben. Die Tragflächen erfahren damit die Auftriebskraft $F = \Delta p / \Delta t$. Zeigen Sie, dass die folgenden Proportionalitäten gelten:

- $F \sim \rho$; ρ ist die Dichte der Luft
- $F \sim A$; A ist der Flächeninhalt der Tragflächen
- $F \sim v^2$; v ist die Geschwindigkeit des Flugzeugs

Setzt man diese Proportionalitäten zu einer Formel zusammen, ergibt sich:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot c_A \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Hierbei nennt man c_A Auftriebsbeiwert. Der Faktor $\frac{1}{2}$ hat historische Gründe.

5.6 Wir bauen ein Flugmodell

Flugmodelle spielen in der Geschichte der Luftfahrt eine große Rolle. So bekamen die Kinder Wright 1878 von ihrem Vater, als er von einer Reise zurückkam, einen Gummimotor-Hubschrauber geschenkt, der ihre Neugierde für das Fliegen begründete. Orville und Wilbur Wright sollten 1903 mit dem ersten Motorflug Geschichte schreiben. Orville berichtete später, dass das Spielzeug von dem Franzosen Alphonse Pénaud entworfen worden war. Der französische Erfinder stellte 1871 ein schon sehr weit entwickeltes Flugmodell vor, das sich in der Luft selbst stabilisierte. Eine Technik, die Lilienthal bei seinen Flugversuchen noch nicht verwendete, weshalb es zum tragischen Absturz kam.

Aufgabe 5.6.1

Unter einem selbststabilisierenden Flugzeug versteht man ein Flugzeug, das bei einer Störung (z. B. durch eine Windböe) von alleine, also ohne Eingreifen des Piloten, die Störung ausgleicht und auf dem vorher eingeschlagenen Kurs weiterfliegt.

- a) Wo muss der Schwerpunkt bei diesem Flugzeug liegen?
- b) Welche Funktion hat das Höhenleitwerk?
- c) Welche Funktion hat das Seitenleitwerk?
- d) In welcher Weise wirkt die V-Form der Tragflächen bei einem Flugzeug selbststabilisierend?

Bauanleitung für ein einfaches Flugmodell

Für den Bau eines einfachen Papiermodells benötigen Sie folgende Materialien:

- DIN A4-Bogen, 120 g. Das Papier sollte deutlich steifer sein als ein normales DIN A4-Papier.
- Schere
- Klammerhefter
- Aktenklammern 77 mm
- Papierklebstoff

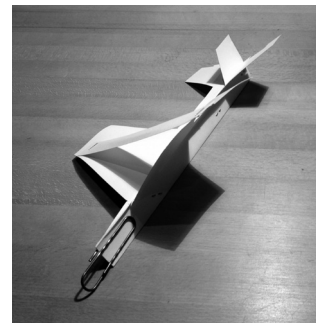
Zunächst faltet man den Papierbogen der Länge nach in der Mitte zusammen. Dann schneidet man den Rumpf, die Tragflächen und das Höhenleitwerk aus. Wichtig ist hierbei auch eine genügend lange „Nase“ am Rumpf – das ist der Teil vor der Tragfläche.

Im nächsten Schritt klammert man den Rumpf zusammen und faltet die beiden Tragflächen in einer V-Form auseinander. Damit die Tragflächen die gewünschte V-Stellung halten, bringt man mit dem Klammerhefter eine Querstrebe oberhalb der Tragfläche an. Wenn man dieser Querstrebe ein gewölbtes Profil gibt, wirkt dies zusätzlich als Auftriebselement.

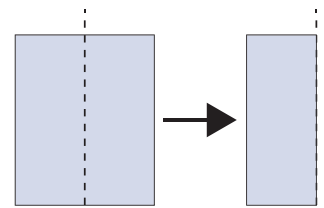
Der hintere Rand der Tragflächen wird leicht nach unten gebogen, damit sie einen Anstellwinkel bekommen.



Das Hubschraubermodell von Pénaud faszinierte 1878 die Kinder der Familie Wright – und Schüler auch heute noch.



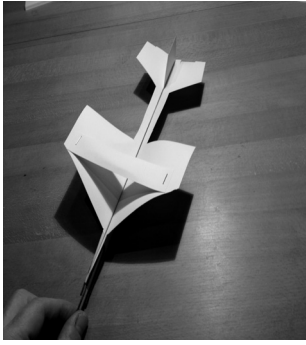
Ein einfaches Papiermodell



Dazu faltet man das Papier ...



... und schneidet Rumpf, Tragflächen und Höhenleitwerk aus.



Zur korrekten Einstellung des Schwerpunkts wird eine Büroklammer an der Nase befestigt.

Nun schneidet man ein Seitenleitwerk zurecht und befestigt es vertikal im Rumpf mit dem Klammerhefter.

Im letzten Schritt wird zur korrekten Schwerpunktseinstellung die Aktenklammer an der Nase befestigt. Legt man das Flugzeug mit der Mitte der Tragflächen zwischen den in V-Form gespreizten Zeigefinger und Daumen, sollte das Flugzeug stabil waagrecht aufliegen. Wenn das Flugzeug nach vorne oder nach hinten kippt, muss man die Klammer verschieben.

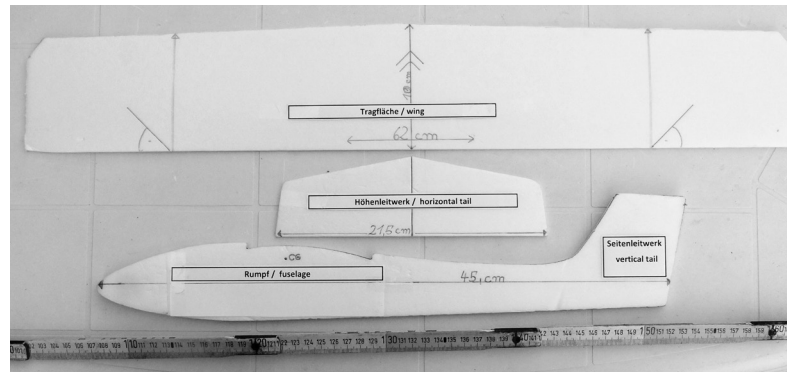
Einfliegen

Das Flugzeug wird nun mit mäßigem Schwung horizontal abgeworfen. Steigt es nach dem Abwurf steil nach oben, dann liegt der Schwerpunkt des Modells zu weit hinten und die Klammer muss nach vorne verschoben werden. Kippt das Flugzeug nach dem Abwurf nach unten, dann muss der Schwerpunkt nach hinten verlagert werden. Es empfiehlt sich, die aktuelle Position der Aktenklammer zu markieren, denn bei der Landung verschiebt sich die Klammer im Regelfall und man muss sie neu einstellen.

Ein großes Flugmodell aus dem Baumarkt

Aufgabe 5.6.2

Besorgen Sie für den Bau eines großen Flugmodells die folgenden Werkzeuge und Materialien: Lineal (mit Metallkante), Heißklebepistole, Unterlegscheiben, scharfe Messer, Geodreieck, Knetmasse, 3 mm Kunststoffplatten (Isolierplatten), Nadeln mit Kunststoffköpfen



Vergrößern Sie an einem Fotokopierer den Bauplan zum Maßstab 1:1.

Schneiden Sie den Rumpf aus Stabilitätsgründen mit einem scharfen Messer zweimal aus. Kleben Sie die ausgeschnittenen Formen mit einer Heißklebepistole deckungsgleich zusammen. Hinweis: Warten Sie mit dem Auftragen, bis der Klebstoff etwas abgekühlt ist. Schneiden Sie die Tragfläche und das Höhenleitwerk aus. Zeichnen Sie mit dem Geodreieck in der Mitte sowie jeweils von außen im Abstand von 12 cm je einen deutlichen Querstrich.

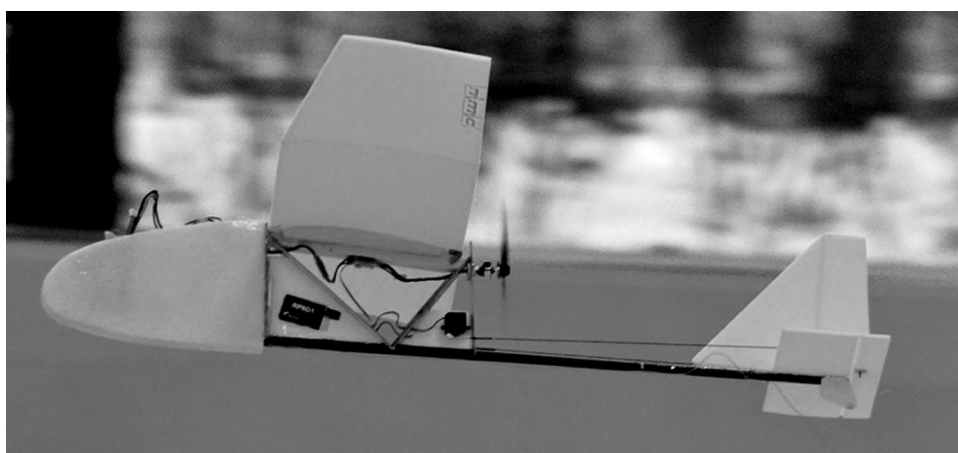
Biegen Sie die Tragfläche unter Druck über eine Tischkante. Damit erhält sie eine Wölbung, die den Auftrieb und das Flugverhalten erheblich verbessern wird. Achten Sie darauf, dass die Wölbung entsprechend dem Bauplan überall gleich ist.

Ritzen Sie an den Außenseiten im Abstand von 12 cm die Kunststoffplatte von unten leicht an und biegen Sie beide Seiten 45° nach oben. Füllen Sie die Schlitzte an drei Stellen der Schnittstelle mit etwas abgekühltem Heißkleber, verwenden Sie dazu ein Geodreieck als Hilfsmittel. Warten Sie unbedingt mit dem Weiterarbeiten, bis der Heißkleber vollständig abgekühlt ist. Es ist für einen Geradeausflug wichtig, dass beide Flügelohren den gleichen Winkel haben.

Kleben Sie nun mit vier Klebepunkten die Tragfläche auf den Rumpf und fixieren Sie die Tragfläche zusätzlich mit mehreren Nadeln. Kontrollieren Sie von vorne mit den Augen und mit dem Geodreieck, ob zwischen dem Rumpf und der Tragfläche ein rechter Winkel ist. Verkleben Sie nach etwa fünf Minuten die Kanten zwischen Rumpf und Tragfläche auf beiden Seiten mit weiteren Klebepunkten. Gehen Sie beim Ausschneiden und Aufkleben des Höhenleitwerks ebenso vor. Kleben Sie zwei bis vier Unterlegscheiben auf die Rumpfspitze.

Zum Einfliegen eignet sich ein Raum, der absolut windstill ist. Die Aula ist optimal. Wichtige Tipps hierzu finden Sie im Internet unter dem Suchbegriff „Modellflug“.

Mit wenig Aufwand lässt sich das Freiflugmodell zu einem ferngesteuerten Turnhallen-Flugmodell weiterentwickeln. Weitere Informationen hierzu finden Sie hier: <https://www.lvbayern.de/mitgliederservice/service-allgemein/verband/shop-und-pr-material/material-schule-jugend/>.



Kreatives Flugmodell: Aus einem Segelflugmodell wird ein mit Elektromotor betriebener und funkferngesteuerter Turnhallenflieger. Entwurf: Hans Langenhagen.



Biegen Sie die Tragfläche unter Druck über eine Tischkante.



Auf die Rumpfspitze werden zwei bis vier Unterlegscheiben geklebt.



Überprüfen Sie die Symmetrie.

5.7 Navigationssysteme (ILS) und Radar

ILS
Instrumentenlandesystem

1 NM = 1,852 km
Nautische Meile oder
Seemeile

Bodensysteme für die Nah- und Mittelbereichsnavigation

Zur Nah- bzw. Mittelbereichsnavigation zählen die Entfernungen von etwa 10 bis 200 NM. Die Navigationsanlagen im Mittelbereich dienen zur Streckennavigation, während der Nahbereich in der Regel für die Navigation im Flughafenbereich eingesetzt wird.

Ungerichtetes Funkfeuer (Non Directional Beacon, NDB)

Zu den ältesten technischen Funknavigationsmitteln zählt das ungerichtete Funkfeuer, das zu Beginn des letzten Jahrhunderts aufkam. Die Nutzer dieser Navigationshilfe erhalten durch Peilung eine relative Richtung zur Flugzeuglängsachse, die durch Kreuzpeilung zweier NDB's auch eine Standortbestimmung ermöglicht. Es ist ein Frequenzbereich von 190 bis 1.750 kHz vorgesehen. Das NDB hat sich bis heute gehalten, weil es durch seinen einfachen Aufbau preislich auch für kleinere Flugplätze erschwinglich ist. Im Grunde genommen handelt es sich um einen Radiosender im Lang- bzw. Mittelwellenbereich. Damit kann auch jeder Rundfunksender zur Peilung herangezogen werden, sofern sein Antennenstandort bekannt ist.

Im Flugzeug selbst befindet sich das automatische Funkpeilgerät (Automatic Direction Finder, ADF), auch Radiokompass genannt. Aufgabe des ADF ist es, mittels einer Antenne die Herkunftsrichtung der empfangenen elektromagnetischen Wellen zu bestimmen. Früher wurden dazu mechanisch drehbare, quadratische oder kreisförmige Rahmenantennen verwendet, die die Einfallsrichtung der elektromagnetischen Welle über eine Minimum- oder Maximumpeilung ermittelten. Heute erfolgt die Drehung des Peilantennendiagramms ausschließlich elektrisch.

UKW-Drehfunkfeuer (Very high frequency omnidirectional radio range, VOR)

Diese Navigationsanlage wird auch gerichtetes Funkfeuer genannt. Es arbeitet im UKW-Bereich zwischen 108 und 118 MHz und bietet 360 fliegbare Kurse (Radiale) an. Dabei kann der Flugzeugführer diese Radiale zur Bodenstation hin (TO the station, inbound), wie auch von der Bodenstation weg (FROM the station, outbound), nutzen. Der Begriff Drehfunkfeuer beschreibt anschaulich die gleichen Eigenschaften wie bei einem Leuchtfener. Hierbei sendet ein Rundumblitzlicht jedes Mal ein Blitzlicht aus, wenn der rotierende Scheinwerfer durch den magnetischen Norden dreht. Rotiert der Lichtkegel mit 360° pro Minute, dann kann mittels einer Stoppuhr die Zeit zwischen Blitzlicht und dem Standort, an dem der scharf gebündelte Lichtstrahl diesen anleuchtet, gemessen werden. Misst der Beobachter z. B. 15 s, so befindet er sich auf dem Radial 90° und damit östlich des Leuchtturms.

Das Blitzlicht wird auf das UKW-Drehfunkfeuer durch eine ungerichtete elektromagnetische Welle mit einer frequenzmodulierten 30 Hz-Schwingung

übertragen. Der umlaufende Lichtkegel wird durch eine gerichtete elektromagnetische Welle mit amplitudenmodulierter 30 Hz-Schwingung repräsentiert. Eine Phasengleichheit zwischen den beiden 30 Hz-Schwingungen liegt beim magnetischen Norden vor und wird stufenlos richtungsabhängig zwischen 0° und 360° verschoben. Damit ergibt sich bei einer Phasenverschiebung von 90° das Radial 90° und damit die Position östlich vom Drehfunkfeuer.

Im Cockpit können die Radiale mittels des OBS-Knopfs (Omni Bearing Selector) am Anzeigeinstrument vorgewählt werden und ein Ablagezeiger (Course Deviation Indicator) zeigt die Abweichung zum eingedrehten Radial an. Weiterhin erhält der Pilot die Information TO bzw. FROM Station. Neben dem UKW-Drehfunkfeuer (VOR) gibt es noch die sogenannte DVOR (Doppler-VOR), die den Doppler-Effekt ausnutzen. Hierbei wird das umlaufende und damit das gerichtete Signal durch 50 Antennen auf einem 13 m Kreis erzeugt. Eine 51. Antenne in der Kreismitte liefert das ungerichtete Signal. Dieser nicht unerhebliche Aufwand erhöht die Messgenauigkeit.

Entfernungsmesseinrichtung (Distance Measurement Equipment, DME)

Die DME basiert auf einem Impulslaufzeitverfahren zur Entfernungsbestimmung. Hierbei werden vom Flugzeug Impulse (Abfragegerät, Interrogator) ausgesendet, die am Boden (Antwortgerät, Transponder) empfangen und zurückgeschickt werden. Aus der Laufzeit wird die Entfernung zwischen Boden- und Bordstation ermittelt. Das Verfahren führt dazu, dass bis zu 100 Teilnehmer gleichzeitig Entfernungsmesswerte erhalten. Eine Anzeige gibt die Entfernung in nautischen Meilen an und je nach Ausstattung auch die Geschwindigkeit über Grund sowie die Zeit bis zur bzw. von der Station. Dabei muss berücksichtigt werden, dass hier eine Schrägentfernung, also der direkte Weg vom Flugzeug zur Bodenstation und nicht die eigentlich gewünschte Distanz über Grund gemessen wird. Je nach Entfernung und Flughöhe ist der angezeigte Wert also um den Schrägmessfehler verfälscht.

Tactical Air Navigation (TACAN)

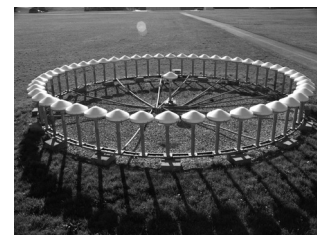
TACAN ist ein Funknavigationsverfahren für die militärische Luftfahrt. Dieses System besteht aus einer kombinierten Einheit zur Richtungs- und Entfernungsmessung. Während Richtungsinformationen nur militärischen Nutzern zugänglich sind, können die Signale der Entfernungsmesseinrichtung von zivilen wie auch militärischen Nutzern ausgewertet werden. Die Teilnehmeranzahl ist bei der Richtungsinformation unbegrenzt, während sie bei der Entfernungsmessung auf 100 begrenzt ist. Die Genauigkeit ist mit der DVOR vergleichbar. Da die Richtungsinformation des TACAN den zivilen Nutzern vorenthalten ist, befinden sich an manchen Standorten eine Kombination aus TACAN und VOR oder TACAN und DVOR.

Doppler-Effekt

Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Veränderung der Frequenz von Wellen, während sich Quelle und Beobachter relativ zueinander bewegen.



Doppler-Effekt (schematisch)



Doppler-VOR-Antennenanlage



DME-Antenne (vorne, der rot-weiß markierte Pfosten ist nur der Träger der Antenne), eine NDB-Antenne (Mitte) und eine TACAN-Antenne (hinten).



LOC-Antennenzeile



GP-Antennen



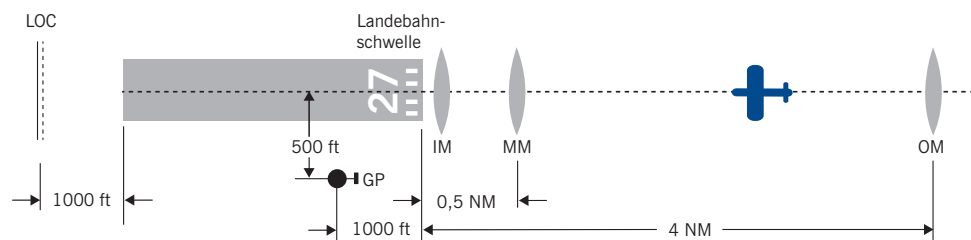
Kreuzzeiger gehörten schon vor 50 Jahren zur Ausstattung im Cockpit.

Bodensysteme zur Landeunterstützung

Hier kommt in der Regel das Instrumentenlandesystem (ILS) zum Einsatz. Das Instrumentenlandesystem sollte schon längst durch ein Mikrowellenlandesystem (MLS) ersetzt werden, doch in Erwartung erweiterter GPS-Funktionalitäten gab die FAA (Federal Aviation Administration) in den USA 1994 das Ende der Entwicklung eines MLS bekannt. Somit ist bis heute ILS das Landesystem erster Wahl.

Das ILS besteht aus bodenseitig unabhängig arbeitenden Systemen:

- dem Landekurssender (Localizer, LLZ oder LOC)
- dem Gleitwegsender (Glide Path, GP bzw. Glideslope, GS)
- und drei Einflugzeichen, den Markern (Outer Marker, OM; Middle Marker, MM und Inner Marker, IM).



Die Systeme eines ILS

Durch den Landekurssender erhält der Pilot über ein Anzeigeinstrument mit Kreuzzeiger die Führung. Hierbei zeigt der vertikale Zeiger des Instruments die Richtung an, in die der Pilot fliegen muss. Befindet sich der Zeiger in der Mitte, fliegt er genau auf die Landebahnmitte zu.

Der Gleitwegsender gibt einen 3°-Weg abwärts zur Landebahn an. Im gleichen Anzeigeinstrument mit Kreuzzeiger ermittelt der Pilot durch den horizontalen Zeiger, ob er sich noch auf dem Gleitweg befindet. Auch hier gibt der Zeigerausschlag an, ob er steigen oder sinken muss. Wenn sich beide Zeiger als Kreuz in der Mitte vereinen, passen Richtung und Höhe optimal zum Anflug. Im Abstand von 4 NM (Outer Marker) und 0,5 NM (Middle Marker) zur Landebahnschwelle kommen für einen kurzen Zeitraum akustische sowie optische Informationen von den Markern. Der Inner Marker sitzt unmittelbar vor der Landebahn, er ist nicht in allen Ländern gebräuchlich. Da die Marker nur einen Entfernungspunkt markieren, jedoch eine kontinuierliche Entfernungsanzeige zu bevorzugen ist, werden diese mehr und mehr durch eine Entfernungsmesseinrichtung (DME) ersetzt.

Hat das Flugzeug den ILS-Kurs erreicht und beginnt zu sinken, befindet es sich im Endanflugsegment. Hier entscheidet sich am Ende, ob das Flugzeug landen kann oder nicht. Zur Beurteilung werden drei Landekategorien (CAT I, II, III) definiert, von denen die letzte Kategorie noch drei Unterteilungen (IIIa, IIIb, IIIc) kennt.

Ausschlaggebendes Kriterium für den Anflug und die Landung sind die Entscheidungshöhe und die Pistensichtweite (Landebahnsicht). Mit der Entscheidungshöhe oder Decision Height (DH) wird die Höhe festgelegt, in der der Pilot die Landebahn sehen können muss. Hier entscheidet er, ob er landet oder durchstartet. Weiterhin muss eine bestimmte Sicht, die Runway Visual Range (RVR), an der Landebahn/Startbahn vorherrschen.

Bodensysteme für die Weitbereichsnavigation

Bei der Weitbereichsnavigation werden Entfernungen von 1.000 NM und mehr erreicht. Aus einer Reihe von Navigationssystemen, wie LORAN, DECCA und OMEGA, hat sich bis heute nur noch LORAN-C gehalten. Der Grund für den Niedergang dieser Anlagen ist das Aufkommen der Satellitenpositionssysteme (GPS, GLONASS, GALILEO), die sogar globale Positionsbestimmungen ermöglichen. Auch kann die LORAN-C-Navigationsgenauigkeit von einigen Hundert Metern nicht mit GPS konkurrieren. So bleibt LORAN-C eher als Notfallsystem noch weiter in Betrieb. Denn bei einem Ausfall von GPS gäbe es zum heutigen Zeitpunkt außer der Trägheitsnavigation keine technischen Navigationsalternativen, z. B. über dem Meer.

Satellitensysteme für die Globalnavigation

Das bekannteste System ist das „Global Positioning System“ GPS der USA. Es handelt sich hierbei um ein militärisches System, das auch zivil genutzt wird und dem US-Verteidigungsministerium (Department of Defense, DoD) unterstellt ist. Die Wurzeln sind in den 60er Jahren zu finden, wo erste Erfahrungen mit dem Vorläufer Transit gesammelt wurden. Mittels GPS konnten zum ersten Mal nahezu weltweit Positionsinformationen im Zehnmeterbereich (zivil) und im Meterbereich (militärisch) ermittelt werden. Dem Nutzer steht nicht nur Position, Geschwindigkeit, etc. zur Verfügung, sondern auch eine hochgenaue Zeitinformation ($<100\text{ns}$). Zu diesem Zweck werden mindestens 24 Satelliten benötigt, die auf einer Höhe von 20.000 km um die Erde kreisen.

Ein Gegenstück zum GPS ist das „Global Orbiting Navigation Satellite System“ GLONASS der russischen Föderation. Funktion und Aufbau ähneln dem des GPS stark, jedoch konnte aufgrund der bisher geringen Lebensdauer der russischen Satelliten erst Ende 2011 ein weltweit verfügbares System aufgebaut werden.

Mit GPS und GLONASS stehen zwei ausschließlich militärisch kontrollierte Satellitensysteme zur Verfügung. Um politisch unabhängig zu sein und um den europäischen Markt zu stärken, initiierte die Europäische Union ein eigenes Satellitenpositionierungsprojekt mit dem Namen GALILEO. Dieses System soll ausschließlich zivil kontrolliert werden und sich militärischen Interessen entziehen.



Für eine lückenlose Positionsinformation sind mindestens 24 Satelliten nötig, die auf einer Höhe von 20.000 km um die Erde kreisen.

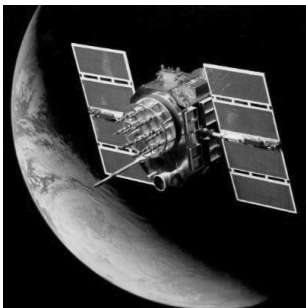
Systeme zur Unterstützung der zivilen Nutzung von GPS/GLONASS

Um die Genauigkeit zu erhöhen, aber auch um eine Aussage über die Zuverlässigkeit der empfangenen Daten treffen zu können, müssen die militärischen Systeme GPS und GLONASS durch zivile Einrichtungen überwacht und korrigiert werden. Dazu werden Netze aus Referenzstationen aufgebaut, deren Daten in Kontrollstationen verarbeitet werden. Hier werden Differenzialkorrekturen, präzise Bahndaten der Satelliten, ein atmosphärisches Modell, etc. berechnet. Von geostationären Satelliten erhält der Pilot Informationen, die eine Positionsgenauigkeit im Meterbereich ermöglichen. Insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen wie in der Luftfahrt sollen Landungen der ersten Landekategorie CAT I ermöglicht werden.

Für das Gebiet der USA ist dieses Zusatzsystem unter dem Namen „Wide Area Augmentation System“ (WAAS) bekannt. WAAS unterstützt ausschließlich GPS.

Das Gegenstück zu WAAS in Europa ist der „European Geostationary Overlay Service“ (EGNOS). EGNOS Referenzstationen sind mit GPS- und GLONASS-Empfängern ausgestattet.

Eine Unterstützung der Landekategorien CAT II und III, wie von den meisten Verkehrsflughäfen gefordert, können WAAS oder EGNOS nicht leisten, weil sie nicht genau genug sind. Deshalb arbeiten zurzeit verschiedene Flughäfen an einem „Ground Based Augmentation System“ (GBAS). Hierbei werden auf dem Gelände Referenzstationen aufgebaut und relevante Daten und Informationen zum Flugzeug übertragen.



NAVSTAR-Satellit aus dem
EGNOS-Programm

LÖSUNGEN

Aufgabe 5.2.1

Der Impuls (Schwung, Wucht) eines Körpers hängt von seiner Masse und seiner Geschwindigkeit ab. Ein langsamer Medizinball lässt also das Buch ebenso umfallen, wie ein heftig geworfener Tennisball. Ein Tischtennisball muss schon eine große Geschwindigkeit haben, damit er bei seiner kleinen Masse das Buch umwerfen kann.

Aufgabe 5.2.2

- a) Aus der Definition des Impulses folgt: $p = m \cdot v$; daraus folgt $p = 1 \text{ t} \cdot 108 \text{ km/h} \rightarrow p = 1.000 \text{ kg} \cdot 30 \text{ m/s} \rightarrow p = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ oder $p = 30.000 \text{ Hy}$
- b) Ein 100-Meter-Weltrekordläufer benötigt mit Start für 100 m in etwa 10 s. D.h. seine Geschwindigkeit beträgt etwas mehr als $v = 10 \text{ m/s}$. Sein Impuls ist deshalb etwas größer als $p = 90 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s} \rightarrow p = 900 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ oder $p = 900 \text{ Hy}$

c) Internetrecherchen liefern:

1	Luftgewehrkugel	$m = 0,5 \text{ g}$ $v = 150 \text{ m/s}$	$p = 7,5 \cdot 10^2 \text{ Hy}$ $p = 0,075 \text{ Hy}$
2	Tennisball	$m = 58 \text{ g} \rightarrow m = 0,058 \text{ kg}$ $v = 190 \text{ km/h} \rightarrow v = 52,8 \text{ m/s}$	$p = 3,06 \cdot 10^0 \text{ Hy}$ $p = 3,06 \text{ Hy}$
3	Eishockey-Puck	$m = 160 \text{ g}$ $v = 150 \text{ km/h} \rightarrow v = 41,7 \text{ m/s}$	$p = 6,67 \cdot 10^0 \text{ Hy}$ $p = 6,67 \text{ Hy}$
4	Fahrradfahren	$m = 50 \text{ kg}$ $v = 1 \text{ m/s}$	$p = 5 \cdot 10^1 \text{ Hy}$ $p = 50 \text{ Hy}$
5	100-Meter-Lauf	$m = 50 \text{ kg}$ $v = 7,7 \text{ m/s}$ 100 m in 13 Sekunden	$p = 3,86 \cdot 10^2 \text{ Hy}$ $p = 386 \text{ Hy}$
6	Motorrad innerhalb der Stadt	$m = 150 \text{ kg}$ $v = 50 \text{ km/h} \rightarrow v = 1,39 \text{ m/s}$	$p = 2,08 \cdot 10^3 \text{ Hy}$ $p = 2,080 \text{ Hy}$
7	PKW in der Fußgängerzone	$m = 2 \text{ t} \rightarrow m = 2.000 \text{ kg}$ $v = 7 \text{ km/h} \rightarrow v = 1,94 \text{ m/s}$	$p = 3,89 \cdot 10^3 \text{ Hy}$ $p = 3.890 \text{ Hy}$
8	Formel-1-Auto	$m = 600 \text{ kg}$ $v = 300 \text{ km/h} \rightarrow v = 83 \text{ m/s}$	$p = 5,00 \cdot 10^4 \text{ Hy}$ $p = 50.000 \text{ Hy}$
9	PKW Landstraße	$m = 2 \text{ t} \rightarrow m = 2.000 \text{ kg}$ $v = 100 \text{ km/h} \rightarrow v = 2,78 \text{ m/s}$	$p = 5,56 \cdot 10^4 \text{ Hy}$ $p = 55.600 \text{ Hy}$
10	Kampffjet	$m = 14 \text{ t} = 14.000 \text{ kg}$ $v = \text{Mach } 2 \rightarrow 700 \text{ m/s}$	$p = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Hy}$ $p = 9.800.000 \text{ Hy}$
11	ICE bei voller Fahrt	$m = 350 \text{ t} \rightarrow m = 350.000 \text{ kg}$ $v = 300 \text{ km/h} \rightarrow v = 83,3 \text{ m/s}$	$p = 2,92 \cdot 10^7 \text{ Hy}$ $p = 29.200.000 \text{ Hy}$
12	Airbus A380	$m = 400 \text{ t} = 400.000 \text{ kg}$ $v = 900 \text{ km/h} = 250 \text{ m/s}$	$p = 1,00 \cdot 10^8 \text{ Hy}$ $p = 100.000.000 \text{ Hy}$
13	Titanic	$m = 5,32 \cdot 10^7 \text{ kg} = 53.200.000 \text{ kg}$ $v = 21 \text{ Knoten} \rightarrow v = 10,8 \text{ m/s}$	$p = 5,75 \cdot 10^8 \text{ Hy}$ $p = 575.000.000 \text{ Hy}$

Recherche 5.3.1

Z.B. Billardspiel, Impulsänderungen bei Auffahrnfällen, Boxhiebe

Experiment 5.3.2

Wenn man sich von einem Experimentierwagen abstößt, kann man den Impulsübertrag an der Bewegung des Experimentierwagens sehen. Wenn eine Kraftplattform zur Verfügung steht, könnte man diesen Impulsübertrag exakt messen. In einem Modellversuch auf der Luftkissenfahrbahn kann man zeigen, dass zwei Wagen mit gleicher Masse, die durch eine Feder auseinander gestoßen werden, mit der gleichen Geschwindigkeit – also auch mit dem gleichen Impuls – auseinanderfahren.

Experiment 5.3.3

Die angeschnippte Münze trifft mit einem Impuls p auf die zweite Münze und überträgt diesen Impuls vollständig auf diese zweite Münze. Durch Reibungseffekte mit der Tischoberfläche verliert die zweite Münze ihren Impuls anschließend an den Tisch bzw. an die Erde.

Aufgabe 5.3.4

- a) Beim Anfahren haben die Fahrgäste zunächst keinen Impuls. Wenn der Zug also anfährt, werden die Fahrgäste zunächst in ihren Sitz gedrückt, wenn sie in Fahrtrichtung sitzen. Durch den Sitz werden sie auf die Zuggeschwindigkeit beschleunigt und haben dann einen Impuls entsprechend

$$p = m_{\text{Fahrgast}} \cdot v_{\text{Zuggeschwindigkeit}}$$

Beim Abbremsen haben die Fahrgäste zunächst den Impuls

$$p = m_{\text{Fahrgast}} \cdot v_{\text{Zuggeschwindigkeit}}$$

während der Zug seine Geschwindigkeit reduziert. Durch die Reibungskräfte zwischen Sitz und Fahrgast wird der Impuls des Fahrgasts bis zum Stillstand abgebaut. Hierbei kippen die Fahrgäste, wenn sie in Fahrtrichtung sitzen, eventuell mit dem Oberkörper nach vorne.

- b) Im Impulsbild: Ein Rasensprenger schleudert Wasser mit einem Impuls in eine Richtung. Der Rasensprenger erhält, entsprechend dem Impulserhaltungssatz, einen gleich großen Impuls in die entgegengesetzte Richtung.
Im Kraftbild: Das Wasser wird mit der Kraft F ausgeschleudert. Die Reactio wirkt betragsgleich in die entgegengesetzte Richtung auf den Rasensprenger.

Aufgabe 5.3.5

- a) Das Auto mit der Masse m wurde beim Beschleunigen durch die Motorkraft F auf die Geschwindigkeit v gebracht.
Nach der Formel $p = m \cdot v$ ergibt sich $p = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 30.000 \text{ Hy}$
- b) Das Auto hat einen Impuls von z.B. $+ 30.000 \text{ Hy}$, also muss die Erde einen Impuls von -30.000 Hy haben. Der Impuls des Autos kommt aus der Erde.
- c) Nach der Formel für die Impulsänderung $\Delta p = F \cdot \Delta t$ verliert das Auto durch die Bremskraft F in der Zeit Δt den Impuls Δp . Der Impuls ($30.000 \text{ Hy} = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$), den das Auto vor dem Abbremsen hatte, wird auf die Erde übertragen.
- d) Bei einer sanften Abbremsung wirkt eine kleine Kraft F eine lange Zeit Δt ; bei der Vollbremsung wirkt eine größere Kraft F in einer kürzeren Zeit Δt . Bei einem Auffahrnfall wirkt eine zerstörerisch große Kraft F in einer extrem kurzen Zeit Δt . Zwischen der Bremskraft F und der Impulsänderung Δp , bzw. Bremszeit Δt , gilt die Formel: $\Delta p = F \cdot \Delta t$.

LÖSUNGEN

Aufgabe 5.3.6

a) Aus $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ und $\Delta p = \Delta m \cdot v$ ergibt sich $\Delta m = \frac{F \cdot \Delta t}{v} \rightarrow \Delta m = 320 \text{ kg}$

b) Für die Ausströmgeschwindigkeit gilt: $v = \frac{F \cdot \Delta t}{\Delta m}$

Bei Verdopplung der ausgestoßenen Masse ergibt sich eine Halbierung der Ausströmgeschwindigkeit auf 500 m/s.

c) Nach dem Energieerhaltungssatz gilt für die pro Sekunde verbrannte Kerosinmenge:

$$\Delta E_{\text{Kerosin}} = \Delta E_{\text{kinGas}} \quad \text{mit} \quad \Delta E_{\text{kinGas}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2$$

Das heißt, eine Verdopplung der ausgestoßenen Masse Δm pro Sekunde bei halbiert Strahlgeschwindigkeit v führt zu einer Halbierung der eingesetzten Kerosinmenge $\Delta E_{\text{Kerosin}}$.

d) Die Reduktion der Austrittsgeschwindigkeit bei gleichzeitig größerem Massendurchsatz hat nicht nur den Vorteil einer reduzierten Kerosinmenge, sondern auch den Vorteil einer wesentlichen Lärmreduktion.

Aufgabe 5.3.7

a) Nach der Formel $p = m \cdot v$ ergibt sich: $p = 3,5 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ Hy}$

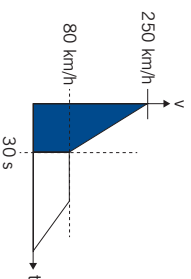
b) Bei 80 km/h hat der A380 noch einen Impuls von $p = 1,1 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1,1 \cdot 10^7 \text{ Hy}$.

Für die Bremszeit gilt: $\Delta t = \frac{\Delta p}{F_B}$; damit ergibt sich eine Bremszeit von

$$\Delta t = \frac{2,4 \cdot 10^7 \text{ Hy}}{4 \cdot 200 \text{ kN}} = 30 \text{ s}$$

c) Für die Verzögerung gilt: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{170 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{30 \text{ s}} = \frac{47 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{30 \text{ s}} = 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Das zugehörige v-t-Diagramm hat folgende Form:



Das Diagramm zeigt in den ersten 30 Sekunden den Bremsvorgang mit den Triebwerken im Umkehrmodus c, dann rollt das Flugzeug mit konstanter Geschwindigkeit und wird anschließend mit den Scheibenbremsen bis zum Stillstand abgebremst. Die Fläche unter dem v-t-Diagramm in den ersten 30 Sekunden liefert den Bremsweg in der ersten Bremsphase mit den „Umkehrtriebwerken“. Es ergibt sich eine Bremsstrecke von 1,4 km. Das ist etwas mehr als die Beschleunigung oder Verzögerung bei einer S-Bahn-Fahrt.

Aufgabe 5.4.1

a) Der Impuls, den der Körper beim Herunterfallen bekommt, kommt aus der Erde. Der Impuls des Körpers nach unten ist genauso groß wie der Impuls der Erde nach oben.

b) Die Erde ist von einem Gravitationsfeld umgeben. Der Körper erhält den Impuls nach unten über das Gravitationsfeld aus der Erde.

Im Kräftebild: Die Actio auf den Körper nach unten ist ebenso groß wie die Reactio auf die Erde nach oben.

c) Das „Entgegenfallen“ der Erde kann man nicht wahrnehmen, weil die Masse der Erde so groß ist, dass sich eine vernachlässigbar kleine Geschwindigkeit der Erde nach oben ergibt.

d) Im Schwebeflug übertragen die Rotorblätter des Hubschraubers pro Sekunde einen Impuls nach unten an die Luft (sie schleudern ständig Luft nach unten). Wenn der Hubschrauber mit seinen Rotorblättern genau so viel Impuls pro Sekunde an die Luft nach unten überträgt, wie er über das Gravitationsfeld von der Erde pro Sekunde erhält, dann bleibt der Impuls des Hubschraubers konstant und er schwebt in der gleichen Höhe. Der Hubschrauber entsorgt den Impuls, den er über das Gravitationsfeld bekommt über die nach unten geschleuderte Luft.

Im Kräftebild: Die Actio von den Rotorblättern auf die Luft nach unten ist ebenso groß wie die Reactio der Luft auf die Rotorblätter nach oben.

e) Wenn der Hubschrauber auf dem Boden steht, gibt der Hubschrauber über seine Kufen pro Sekunde genau so viel Impuls an den Boden und damit an die Erde zurück, wie er über das Gravitationsfeld von der Erde bekommt. Wie im Schwebeflug bleibt auch beim Stehen auf dem Boden der Impuls des Hubschraubers konstant. Der Hubschrauber „entsorgt“ den Impuls, den er über das Gravitationsfeld erhält über seine Kufen.

Im Kräftebild: Die Actio der Kufen des Hubschraubers auf den Boden ist ebenso groß wie die Reactio der Unterlage auf den Hubschrauber nach oben.

Aufgabe 5.4.2

a) Sicht Drehimpuls: Wenn der Motor die Hauptrotorblätter in Drehung versetzt, erhält das Hubschraubergehäuse nach dem Drehimpulserhaltungssatz einen gleich großen Drehimpuls in die entgegengesetzte Drehrichtung. Der Heckrotor entsorgt diesen Drehimpuls auf das Gehäuse an die umgebende Luft. Wenn der Heckrotor ausfällt, beginnt sich das Hubschraubergehäuse entgegen der Rotorrichtung um seine Hochachse zu drehen.

Sicht Drehmoment: Der Motor, der die Hauptrotorblätter in eine Drehrichtung antreibt, wirkt mit einem Actio-Drehmoment auf die Rotorblätter. Das Reactio-Drehmoment wirkt auf den Motor und das Gehäuse des Helikopters zurück und dreht ihn ohne Heckrotor in die andere Richtung. Der Heckrotor wirkt diesem Drehmoment auf das Helikoptergehäuse entgegen und gleicht es exakt aus.

b) Wenn der Pilot den Hubschrauber um seine Hochachse drehen will, dann reduziert er für kurze Zeit die Drehzahl des Heckrotors, oder er steigert die Drehzahl für eine Drehung in die andere Richtung.

Aufgabe 5.4.3

Die Summe aus $v_{\text{Rotor}} + v_{\text{Heli}}$ muss kleiner bleiben als die Schallgeschwindigkeit c. Für die Winkelgeschwindigkeit (Drehgeschwindigkeit) gilt $\omega = v_{\text{Rotor}}/R$; damit erhalten wir $\omega = (c - v_{\text{Heli}})/R$

Daraus ergibt sich: $\omega < (c - v_{\text{Heli}})/R \rightarrow \omega < 33,7 \cdot 1/\text{s}$
Über die Formel $f = \omega/2 \cdot \pi$ kann man berechnen, dass sich der Rotor damit nicht häufiger als 322 Mal pro Minute um die eigene Achse drehen darf.

LÖSUNGEN

Aufgabe 5.4.4

a) Will man einen Vorwärtsflug realisieren, dann muss die Auftriebskraft durch die Hauptrotorblätter in Flugrichtung nach vorne gekippt werden. Eine Komponente dieser Auftriebskraft wirkt dann als beschleunigende Kraft in Vorwärtsrichtung, die andere Komponente gleicht die Schwerkraft, die auf den Helikopter wirkt, aus. Die Taumelscheibe verändert den Anstellwinkel während einer Rotationsperiode so, dass der Anstellwinkel immer dann vergrößert wird, wenn das Rotorblatt hinten ist. Wenn das Rotorblatt vorne vorbeistreicht, wird der Anstellwinkel entsprechend verkleinert. Damit der resultierende Effekt in Flugrichtung sein Maximum erreicht, muss der Anstellwinkel phasenverschoben schon seitlich von der Flugrichtung verändert werden.

b) Der Rückwärtsgang entspricht genau der Umkehrung des Vorwärtsflugs. In diesem Fall wird die Auftriebskraft durch die Hauptrotorblätter nach rückwärts gekippt. Die Anstellwinkel der Rotorblätter sind damit vorne größer und hinten kleiner.

c) Die Bewegung in seitliche Richtung erfolgt durch Kippen der Auftriebskraft der Hauptrotorblätter nach links oder rechts relativ zur Flugrichtung. Die Taumelscheibe verändert die Anstellwinkel der Rotorblätter bei einer seitlichen Bewegung nach rechts, in dem die Anstellwinkel auf der linken Seite vergrößert und auf der rechten Seite verkleinert werden – analog erfolgt die Bewegung seitlich nach links.

Aufgabe 5.5.1

a) Die Tragflächen erzeugen den Auftrieb und tragen u. a. die Querruder und die Start- und Landeklappen.

b) Der Schwerpunkt des Flugzeugs liegt etwas vor dem Angriffspunkt der Auftriebskraft auf die Tragflächen. Das Höhenleitwerk liefert eine Abtriebskraft, die das Flugzeug in der Horizontal-lage hält. Bei dieser Konstellation werden Störungen, z. B. durch Windböen, selbstständig ausgeglichen.

c) Mit den Querrudern, die an den Tragflächen befestigt sind, kann man das Flugzeug um die Längsachse drehen.

d) Das Höhenleitwerk trägt das Höhenruder. Mit dem Höhenruder kann der Pilot das Flugzeug um die Querachse drehen. Damit kann der Pilot einen Steig- oder Sinkflug ausführen.

e) Am Seitenleitwerk sitzt das Seitenruder. Mit dem Seitenruder kann der Pilot das Flugzeug um seine Hochachse drehen.

Aufgabe 5.5.2

Beim Start des A380 sind die Startklappen ausgefahren und die Dichte der Luft ist am Boden höher als in 10.000 m Höhe. Im Streckenflug in 10.000 m Höhe sind die Tragflächen auf ein Minimum reduziert und die Luftdichte ist wesentlich kleiner – allerdings liegt die Geschwindigkeit bei 0,95 Mach. In beiden Fällen liefert die Tragflächeneinstellung einen Auftrieb, der die Schwerkraft auf das Flugzeug ausgleicht.

Aufgabe 5.5.3

Bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 5^\circ$ und einer Horizontalgeschwindigkeit von 50 m/s beträgt die vertikale Geschwindigkeitskomponente:

$$v_y = v_h \cdot \tan(\alpha) \rightarrow v_y = 4,37$$

Für die nötige Auftriebskraft $F_A = 10.000 \text{ N}$ benötigt man einen Massendurchsatz von:

$$\frac{F}{v_y} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} \approx 2300 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = 2300 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Das bedeutet, dass die Cessna bei einer Spannweite von etwa 15 m und $v = 50 \text{ m/s}$ pro Sekunde ein Luftpaket mit einer Grundfläche von etwa 15 m Breite und 50 m Länge beeinflusst.

Um den obigen Massendurchsatz in y-Richtung zu erhalten, benötigen wir eine Luftpaketdicke von etwa 3,0 m, die um 5° nach unten abgelenkt wird, wenn wir mit dem Impulserhaltungssatz rechnen.

Auftriebskraft

$$\begin{aligned} 1. \quad F &= \frac{\Delta p}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta p = \Delta m \cdot v_y & 4. \quad F &= A \cdot \rho \cdot v_y \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} ; \text{ mit } v_y \sim v \text{ folgt } F \sim A \cdot \rho \cdot v^2 \\ 2. \quad F &= \frac{\Delta m \cdot v_y}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta m = \Delta V \cdot \rho & 5. \quad F &= K \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 ; \text{ mit } K \text{ als Proportionalitäts-} \\ & & & \text{konstante} \\ 3. \quad F &= \frac{\Delta V \cdot \rho \cdot v_y}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta V = A \cdot \Delta s \end{aligned}$$

Aufgabe 5.6.1

a) Der Schwerpunkt des Flugzeugs liegt in der Nähe der Auftriebskräfte auf die Tragflächen, nur wenig nach vorne hin zum Bug verschoben.

b) Wenn der Schwerpunkt etwas vor dem Angriffspunkt des Auftriebs auf die Tragflächen liegt, müssen die Höhenleitwerke Abtrieb produzieren. Wird die horizontale Fluglage durch eine Störung so verändert, dass der Bug nach unten weist (Drehung des Flugzeugs durch diese Störung um die Querachse), dann erhöht sich der Abtrieb am Höhenleitwerk durch den nun vergrößerten Anstellwinkel des Höhenleitwerks und das Flugzeug wird um die Querachse wieder zurück in die horizontale Fluglage gedreht. Führt eine Störung dazu, dass die Nase des Flugzeugs angehoben wird, dann sinkt das Höhenleitwerk nach unten, der Anstellwinkel wird so verändert, dass am Höhenleitwerk nun Auftrieb entsteht und die Störung damit ausgeglichen wird.

c) Wenn eine Störung dazu führt, dass sich das Flugzeug um die Hochachse dreht, verändert sich der Anstellwinkel des Seitenleitwerks so, dass Kräfte auf das Seitenleitwerk das Flugzeug wieder zurückdrehen.

d) Tragflächen wirken maximal, wenn sie exakt horizontal liegen. Sind sie an einem Flugzeug in V-Form angebracht, dann wirken die resultierenden Kräfte nur mit einer Komponente in vertikaler Richtung. Wird das Flugzeug durch eine Störung um die Längsachse gedreht, dann dreht sich die Tragfläche, die hierbei abgesenkt wird, in die Horizontale und der Auftrieb an ihr wird größer – die andere Tragfläche steht dann noch steiler und ihr Auftrieb wird entsprechend kleiner. Beide Effekte führen dazu, dass das Flugzeug wieder in die Horizontale zurückgedreht wird.