

## KAPITEL 11

# Flugphysik

- Die Mechanik des Fliegens
- Kräfte
- Leitwerke und Ruder
- Fahrwerk
- Steuerorgane – Flugverhalten
- Trimmung
- Flugfiguren

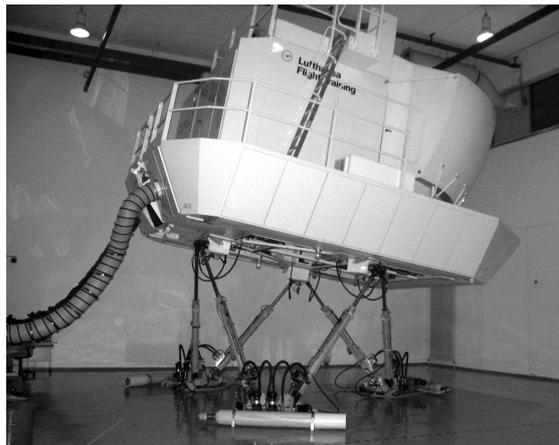
## 11.1 Die Mechanik des Fliegens

Es ist schon verwunderlich, dass ein tonnenschweres Flugzeug überhaupt fliegen kann. Fast noch unglaublicher ist es, dass es sich dabei auch noch präzise steuern lässt. Die möglichen Bahnen und Bewegungen des Flugzeugs hängen von vielen Faktoren ab – darunter die aerodynamischen Kräfte, der Triebwerksschub und die Masse des Flugzeugs. Daher ist es auch ein großer Unterschied, ob man eine einmotorige Cessna fliegt oder einen Airbus A380.

Für die flugmechanische Entwicklung eines neuen Flugzeugs werden vor allem Versuchsergebnisse aus Flugsimulatoren benutzt. Eine Flugsimulation stellt den Flug wirklichkeitsgetreu nach. Flugsimulatoren wurden ursprünglich zur Ausbildung der Besatzungen entwickelt, sind aber heute auch als Computerspiele erhältlich.



Flugsimulatoren stellen einen Flug wirklichkeitsgetreu nach. Entweder zu Hause am PC zur Unterhaltung ...



... oder im professionellen Rahmen zum Training der Besatzung.

Die folgenden Lerneinheiten vermitteln mit Übungen die verschiedenen Aspekte der Flugphysik: Von den Kräften, die auf ein Flugzeug wirken, über die Funktionen der verschiedenen Leitwerke und Ruder bis zu komplexen Flugfiguren.

## 11.2 Kräfte und Bewegungsphasen

In der einfachsten Kräfterdarstellung bei einem Flugzeug unterscheidet man vier Kräfte, die während eines Horizontalflugs an einem Flugzeug angreifen:

- Schwerkraft
- Auftriebskraft
- Vortrieb oder Schub
- Luftwiderstand

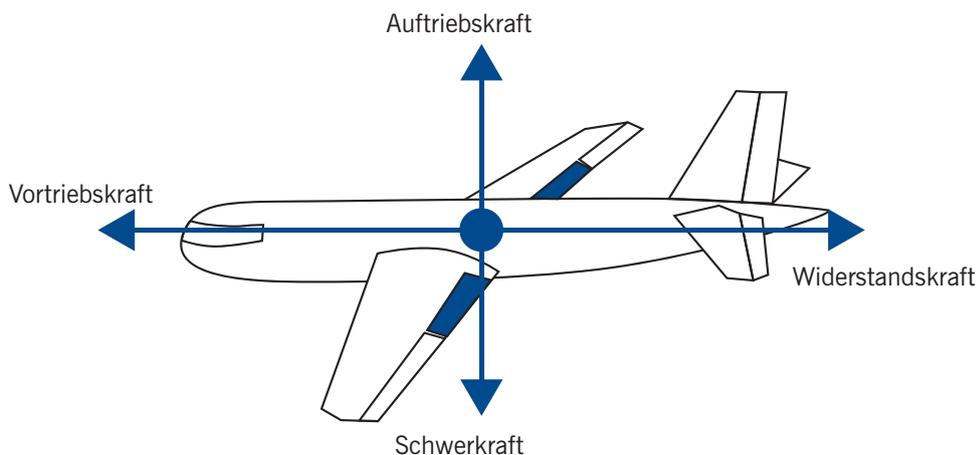
Dazu kommt noch die Bremskraft beim Rollen am Boden.

Die Vektorsumme dieser vier Kräfte, die resultierende Kraft, entscheidet über das Flugverhalten des Flugzeugs. Es gibt folgende Möglichkeiten:

- Ist der Auftrieb kleiner als die Schwerkraft, befindet sich das Flugzeug im Sinkflug – ist der Auftrieb größer, steigt das Flugzeug.
- Ist der Vortrieb kleiner als die Luftwiderstandskraft, wird das Flugzeug langsamer. Wird der Vortrieb – bei Düsenflugzeugen nennt man ihn auch Schub – größer, wird das Flugzeug beschleunigt.

### Aufgabe 11.2.1

a| Diskutieren Sie alle Kräfte, die am Flugzeug angreifen.



Die Kraftarten während eines Horizontalflugs

- b| In welchen Verhältnissen stehen hierbei die Schwerkraft, die Auftriebskraft, der Luftwiderstand und die Schubkraft bzw. Vortriebskraft der Düsen oder des Propellers?
- c| Welche Rolle spielt der Anstellwinkel für den Auftrieb einer Tragfläche? Wie ist der Anstellwinkel beim Start und bei der Landung?
- d| Welche Rolle spielt der Flächeninhalt der Tragfläche für den Auftrieb? Diskutieren Sie den Flächeninhalt beim Start und bei der Landung.
- e| Beim Start und bei der Landung liegt die Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Tragflächen weit unterhalb der Geschwindigkeit in 10.000 m Flughöhe. Diskutieren Sie in diesem Zusammenhang die Kraftresultierende auf die Tragflächen.

#### Kraftvektoren

Kräfte werden als Vektoren beschrieben: Vektoren haben einen Betrag (hier Kraftbetrag), einen Angriffspunkt und eine Richtung, in der die Kräfte wirken.

#### Schwerpunkt

Ein Flugzeug hat eine nicht zu übersehende Ausdehnung. Für einige physikalische Betrachtungen kann man den Körper auf seinen Schwerpunkt reduzieren. Betrachtet man das Flugzeug in seinem Schwerpunkt vereinigt, dann sieht man von allen Kräften ab, die zu einer Drehung des Flugzeugs führen können. Bei der Schwerkraft, der Auftriebskraft, Vortriebskraft und dem Luftwiderstand genügt diese „Schwerpunktsbetrachtung“, weil diese Kräfte im Regelfall zu keiner Drehung des Flugzeugs führen – also kein sogenanntes Drehmoment erzeugen.

## 11.3 Leitwerke und Ruder

### Rollen

Unter dem Rollen eines Flugzeugs oder eines Hubschraubers versteht man die Bewegung um die Längsachse. Hierbei sinkt die linke Tragfläche, während die rechte nach oben geht – oder umgekehrt.

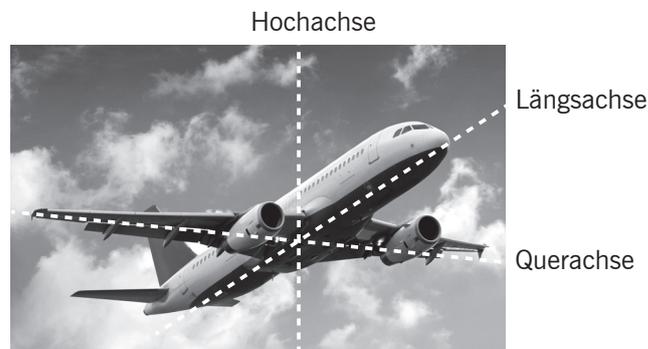
### Gieren

Unter dem Gieren eines Flugzeugs oder eines Hubschraubers versteht man die Bewegung um die Hochachse. In der Alltagssprache würde man das als Links- oder Rechtsbewegung bezeichnen.

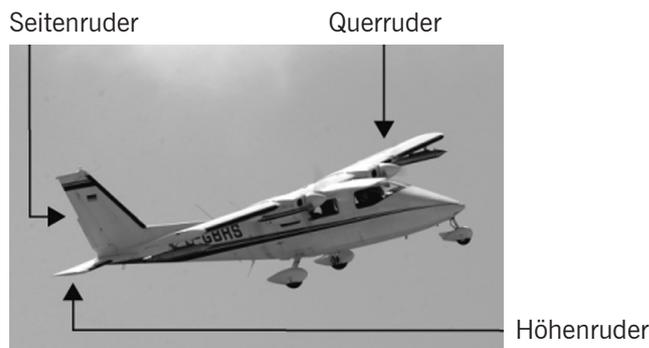
### Nicken

Unter dem Nicken eines Flugzeugs oder eines Hubschraubers versteht man die Bewegung um die Querachse. Hierbei hebt oder senkt sich die Nase des Flugzeugs.

Unter der primären Flugsteuerung – oder Hauptsteuerung – versteht man die Steuerung des Flugzeugs um seine drei Achsen: Um die Längsachse, die Querachse und die Hochachse. Für diese Steuerung werden die Querruder, Höhenruder und das Seitenruder eingesetzt.



Ein Flugzeug wird um drei Achsen gesteuert.



Drei verschiedene Ruder erfüllen diese Aufgabe.

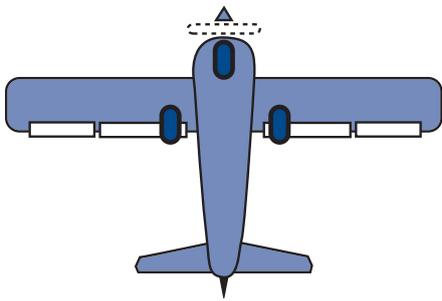
Die Steuerruder eines Flugzeugs haben die Aufgabe, das Luftfahrzeug in allen Flugzuständen sicher zu steuern. Mit dem Querruder steuert man die Drehung des Flugzeugs um seine Längsachse; man spricht auch vom „Rollen“ des Flugzeugs. Mit dem Seitenruder veranlasst man die Drehung des Flugzeugs um seine Hochachse, das „Gieren“ des Flugzeugs. Mit dem Höhenruder bestimmt man die Drehung des Flugzeugs um seine Querachse; das nennt man „Nicken“ des Flugzeugs.

Mit den Trimmrudern kann man ein Luftfahrzeug ausbalancieren. Bei großen Flugzeugen erfolgt die Trimmung u. a. durch das Umpumpen des Treibstoffs in verschiedene Tanks in den Tragflächen, im Rumpf oder unter dem Höhen- oder Seitenleitwerk.

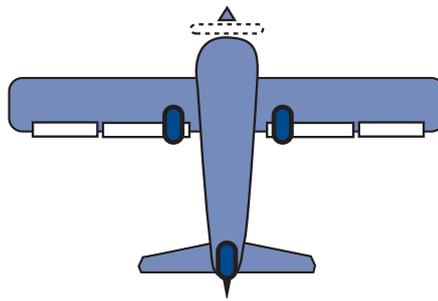
## 11.4 Fahrwerk

Das Fahrwerk eines Flugzeugs hat folgende Zwecke: (a) Rollen am Boden (engl.: taxi), (b) Starten und (c) Landen. Die Flugzeuge rollen bei Start und Landung mit eigener Kraft. Bei der Bewegung im Flughafenbereich werden sie teilweise von speziellen Fahrzeugen (Flugzeugschlepper) geschoben oder gezogen (engl.: pushback).

Um den Luftwiderstand im Flug zu reduzieren, haben, zumindest die größeren Flugzeuge, sogenannte Einziehfahrwerke (eng.: retractable gear). Je nach der Anordnung der Räder bei den Fahrwerken unterscheidet man z. B. folgende zwei Typen:



Bugradfahrwerk, engl.: tricycle gear



Spornradfahrwerk, engl.: conventional gear

Spornradfahrwerke finden vor allem bei Modellflugzeugen Verwendung, weil die Verbindung des Seitenruders und des Spornrads konstruktiv leicht zu lösen ist. Zusammen mit dem Seitenruder wird das Spornrad gedreht und das Flugzeug kann so leicht gesteuert werden. Bei Verkehrsflugzeugen wird diese Konstruktion kaum genutzt, denn der Rumpf steht hierbei vorne wesentlich höher als hinten – d. h. der Pilot hätte beim Start nach vorne eine sehr eingeschränkte Sicht und die Passagiere bewegten sich beim Ein- und Aussteigen auf einer schiefen Ebene. Beim Abbremsen besteht beim Spornradfahrwerk die Gefahr, dass das Flugzeug einen „Kopfstand“ macht.

Bei einem Bugfahrwerk, ebenfalls eine „Dreiradkonstruktion“, befindet sich am Bug des Flugzeugs ein Bugrad (engl.: nose gear) und im mittleren Bereich des Flugzeugrumpfs das Hauptfahrwerk (engl.: main landing gear). Der Schwerpunkt des Flugzeugs liegt etwas vor dem Hauptfahrwerk. Bei Bugfahrwerken befindet sich das Flugzeug während des Rollens in waagerechter Lage. Das Bugrad nimmt eine relativ kleine Last auf, ist demzufolge relativ schwach ausgelegt und kann bei fehlerhafter Landung brechen. Das Hauptfahrwerk nimmt 85 Prozent der Last auf und muss, abhängig von der Masse des Flugzeugs, so ausgelegt werden, dass die Bodenbelastung der Landebahn den vorgeschriebenen Bereich nicht überschreitet.



Kleinflugzeuge haben in der Regel drei starre Räder.

### Aufgabe 11.4.1

Bei einem Airbus A380 werden die Räder in der Luft, also vor dem Bodenkontakt, in Rotation versetzt, so dass sie die anschließende Rollgeschwindigkeit erreichen. Welchen Vorteil bringt die Maßnahme bei einem A380, dass die Räder schon vor dem Aufsetzen der Maschine aktiv angetrieben werden?

#### Einziehen des Fahrwerks

Nach dem Start wird das Fahrwerk relativ schnell eingezogen, weil sich damit der Luftwiderstand der Maschine verkleinert. Da der Pilot das Fahrwerk seines Flugzeugs nicht sehen kann, wird der Zustand des Fahrwerks im Cockpit, „ausgefahren“ und „eingerastet“, angezeigt. Nach dem Betätigen des Fahrwerkhebels erscheinen die Signale „rot“ = Funktionsstörung, „orange“ = Fahrwerk wird gerade ein- bzw. ausgefahren, „grün“ = Fahrwerk ausgefahren und verriegelt oder „aus“ = Fahrwerk eingefahren und verriegelt.

#### Ausfahren des Fahrwerks

Bei der Landung überwacht der Tower die Maschine ab dem Überfliegen des „Final Approach Fix“ (FAF) – etwa zehn Meilen von der Piste entfernt. Beim Überfliegen des „Outer Marker“, etwa vier Meilen vor dem Aufsetzen, muss das Fahrwerk spätestens ausgefahren und verriegelt sein. Das Überfliegen des Outer Marker wird im Cockpit optisch und akustisch angezeigt. An verkehrsreichen Flughäfen bleibt das Fahrwerk möglichst lange eingefahren, um eine hohe Anfluggeschwindigkeit bei möglichst geringer Leistung fliegen zu können. Dies dient sowohl dem effizienten Verkehrsfluss als auch dem Schutz der Umwelt vor unnötigem Fluglärm und Abgasen.



Große Passagierflugzeuge haben Fahrwerke, die eingezogen und ausgefahren werden, um den Luftwiderstand im Flug zu verringern.

Sollte der Pilot das Fahrwerk vergessen haben, wird er rechtzeitig vor dem Aufsetzen durch eine Computerstimme noch einmal gewarnt „PULL UP! GEAR!“ Dazu ist eine Überwachung der Flughöhe per Radarhöhenmesser erforderlich. Bei der Landung übernimmt der Tower die Überwachung und Einweisung der Maschine – der Übernahmezeitpunkt wird „Final Approach Fix“ (FAF) genannt. Das Fahrwerk muss spätestens bis zu diesem Zeitpunkt ausgefahren und verriegelt sein. Der FAF liegt im Regelfall drei bis vier Minuten vor dem Aufsetzen. Bei kalter Witterung werden die Fahrwerke möglichst spät ausgefahren, um die Vereisung der Bremsen zu vermeiden. In modernen Flugzeugen sorgt das FMS (Flight Management System) dafür, dass das Flugzeug nicht mit eingefahrenem Fahrwerk landet. Das FMS warnt den Piloten, indem es die Motorleistung und die Bodenhöhe überwacht.

### Aufgabe 11.4.2

Bei manchen Flugzeugen (z. B. einer Boeing B-52) kann das Hauptfahrwerk schon im Flug gedreht werden. Diese Konstruktion ist relativ aufwendig zu realisieren und man findet sie nur bei sehr großen Maschinen. Welchen Vorteil hat sie?

## 11.5 Steuerorgane – Flugverhalten

Unter den Steuerelementen versteht man unter anderem die Hebel und Pedale, die in der Pilotenkanzel vom Piloten betätigt werden können, um Steuerfunktionen auszuführen. Wesentliche Elemente sind hierbei:



Blick in das Cockpit eines Verkehrsflugzeugs mit Steuerhorn

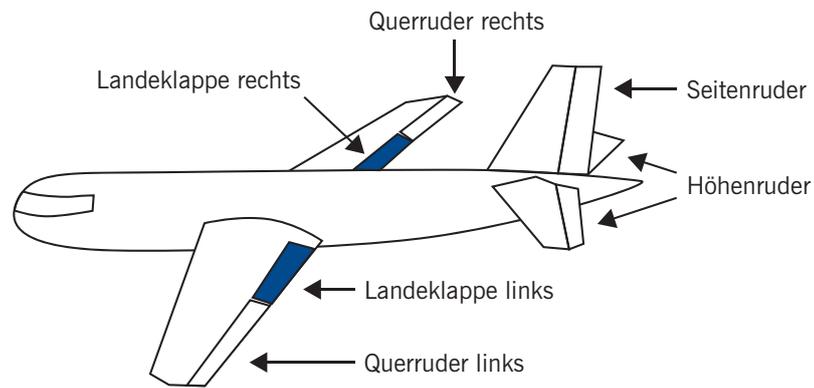
- Bei älteren Maschinen findet man noch einen Steuerknüppel oder ein Steuerhorn. Bei neueren Modellen wird das Flugzeug durch einen sogenannten Sidestick gesteuert, der eine ähnliche Funktion hat, aber mit nur einer Hand bedient wird. Drückt man den Steuerknüppel nach vorne, wirkt er auf das Höhenruder – damit kann man den Sinkflug einleiten. Durch Ziehen oder Drücken steuert man das „Nicken“ des Flugzeugs. Neigt man den Steuerknüppel nach rechts oder links, wirkt diese Bewegung auf das Querruder des Flugzeugs und führt zu einer Rollbewegung der Maschine nach rechts oder links. Zusammen mit dem Seitenruder, das man über Pedale mit den Füßen bedienen kann, erreicht man einen Kurvenflug.
- Seitenruderpedale: Mit diesen Pedalen steuert der Pilot die Stellung des Seitenruders und des Bugrads. Befindet sich das Flugzeug am Boden, kann er mit den Seitenruderpedalen die Bremsen am Fahrwerk bedienen.
- Trimmrad: Mit dem Trimmrad oder dem Trimmhebel werden die Trimmklappen so eingestellt, dass der fiktive Kraftangriffspunkt (Druckpunkt) in den Schwerpunkt wandert, so dass keine „Kopf“- oder „Schwanzlastigkeit“ auftritt. Mit der Seitentrimmung kann man z. B. bei mehrmotorigen Motorflugzeugen den Ausfall eines Motors kompensieren.

### Rollen des Flugzeugs

Die Längsachse (engl.: roll axis) des Flugzeugs läuft durch den Rumpf des Flugzeugs. Wenn es sich um diese Längsachse dreht, hebt sich die eine Tragfläche, während die andere absinkt. Der Boden im Inneren des Flugzeugs kippt dabei nach rechts oder links ab.

#### Längsachse

Die Längsachse eines Flugzeugs wird in der englischen Fachliteratur als roll axis bezeichnet.



Mit diesen Steuerelementen wird ein Flugzeug gelenkt.

Die Querruder sitzen am hinteren äußeren Rand der Tragflächen und schlagen an den beiden Tragflächen in entgegengesetzter Richtung aus: Wenn das linke Ruder nach oben geht, senkt sich das rechte nach unten oder umgekehrt.

Werden die Querruder betätigt, dann erfährt eine der beiden Tragflächen einen größeren Auftrieb – diese Tragfläche steigt (falls sich das Flugzeug in einer horizontalen Fluglage befindet), während der Auftrieb an der anderen Tragfläche abnimmt – diese Tragfläche sinkt. Das Drehmoment durch die Querruderaus schläge dreht (rollt) das Flugzeug um seine Längsachse.

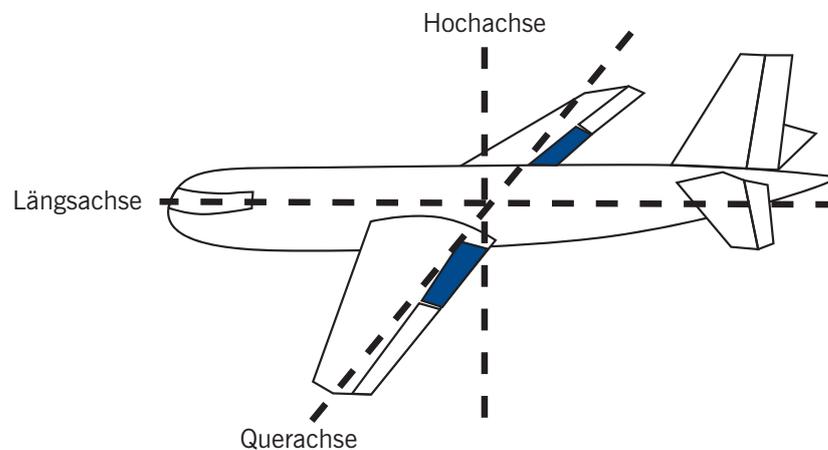
#### Hochachse

Die Hochachse eines Flugzeugs wird in der englischen Fachliteratur als yaw axis bezeichnet.

#### Gieren des Flugzeugs

Die Hochachse (engl.: yaw axes) kann man sich als eine vertikale Achse durch den Schwerpunkt des Flugzeugs vorstellen (falls sich es in horizontaler Fluglage befindet). Wenn sich die Maschine um diese Hochachse dreht, bewegt sich die Flugzeugnase relativ zur Flugrichtung nach links oder rechts.

Das Seitenleitwerk ist im Regelfall eine feststehende Flosse in vertikaler Lage. Am hinteren Rand des Seitenleitwerks befindet sich das sogenannte bewegliche Seitenruder. Durch den Ausschlag dieses Seitenruders erfährt das Flugzeug ein Drehmoment um seine Hochachse. Man nennt das Gieren.



Ein Flugzeug wird um drei Achsen gesteuert.

### Aufgabe 11.5.1

- a| Diskutieren Sie, welche Fluglage das Flugzeug einnimmt, wenn man bei neutralem Quer- und Höhenruder und bei horizontaler Fluglage das Seitenruder betätigt.
- b| Ändert sich hierbei die Flughöhe und die Geschwindigkeit der Maschine?
- c| Welche vorläufigen Folgerungen bezüglich eines „Kurvenflugs“ können Sie ziehen?
- d| Warum sind die Seitenruder im Vergleich zu den restlichen Dimensionen des Flugzeugs verhältnismäßig groß? Das ist besonders auffällig beim Spaceshuttle.

### Nicken des Flugzeugs

Die Querachse (engl.: pitch axis) bildet eine Achse parallel zu den Tragflächen im Schwerpunkt des Flugzeugs. Wenn es sich um diese Achse dreht, sinkt die Nase oder sie zeigt nach oben. Der Boden im Inneren neigt sich dabei nach vorne oder nach hinten. Als Passagier hat man dann den Eindruck, dass die Flugzeugsitze sich nach oben bzw. nach unten neigen.

#### Querachse

Die Querachse eines Flugzeugs wird in der englischen Fachliteratur als pitch axis bezeichnet.

Das Höhenleitwerk ist eine feststehende horizontal liegende Flosse, also eine kleine Tragfläche am hinteren Ende des Flugzeugs. Am Höhenleitwerk befindet sich am hinteren Rand das sogenannte bewegliche Höhenruder. Durch den Ausschlag dieses Höhenruders erfährt das Flugzeug ein Drehmoment um seine Querachse.

Schlägt das Höhenruder nach oben aus, dann führt das zu einem Drehmoment am Flugzeug. Dieses Drehmoment lässt die Nase nach oben kippen und ein Steigflug wird eingeleitet. Wenn die Motorendrehzahl konstant bleibt (und man davon ausgeht, dass bei dem veränderten Anstellwinkel die Luftwiderstandsänderung vernachlässigbar ist), kommt die steigende Lageenergie aus der reduzierten kinetischen Energie. Das heißt konkret, das Flugzeug wird langsamer.

Das Höhenruder beeinflusst also den Anstellwinkel des Flugzeugs. Bei einem größeren Anstellwinkel erhöht sich der Auftrieb an den Tragflächen und es wächst der Luftwiderstand des Flugzeugs. Dieser Effekt ist z. B. bei der Landung sehr wichtig: Hier ist ein großer Luftwiderstand von Vorteil, um die Geschwindigkeit auf die Landegeschwindigkeit zu reduzieren und gleichzeitig behält das Flugzeug bei einem größeren Anstellwinkel genügend Auftrieb. Der Anstellwinkel verändert sich auch durch das Ausfahren von Vorflügel oder Landeklappen und natürlich bei Windböen, die die Fluglage beeinflussen.

### Aufgabe 11.5.2

- a| Diskutieren Sie auf der Basis des Energieerhaltungssatzes den funktionalen Zusammenhang zwischen der Flughöhe und der Geschwindigkeit des Flugzeugs.
- b| Skizzieren Sie als Ergebnis der obigen Diskussion qualitativ ein h-v-Diagramm für den Steigflug.
- c| Skizzieren Sie qualitativ ein h-v-Diagramm für den Sinkflug.
- d| Welche Klappen kann man auf dem unteren Bild erkennen?
- e| Kann man aus dem Bild schließen, ob das Flugzeug startet oder gerade landet?



Welche Klappen sind hier zu erkennen?

### Strömungsabriss

Der Auftrieb an der Tragfläche existiert nur, solange sie von Luft umströmt wird. Führt eine Fluglage dazu, dass diese Strömung abreißt, d. h. dass die Luft, welche die Fläche umströmt, dem Tragflächenprofil nicht mehr folgen kann, dann verliert die Tragfläche ihren Auftrieb. Dieser Strömungsabriss kann für den Piloten überraschend eintreten. In harmlosen Fällen kündigt sich dieser Effekt durch eine weiche Reaktion des Ruders an. Dann nickt das Flugzeug nur über die Nase nach unten ab. In anderen Fällen kippt das Flugzeug über eine Tragfläche ab, da der Strömungsabriss fast nie gleichzeitig an beiden Flächen auftritt.

Jede Fluggeschwindigkeit verfügt über einen maximal möglichen Anstellwinkel. Wird dieser Grenzwert überschritten, bilden sich Wirbel, die sich von der Tragfläche ablösen. Damit bricht der Auftrieb an dieser Stelle zusammen. Eine mechanische Pfeife oder ein elektronisches System warnt den Piloten vor diesem Strömungsabriss.

## 11.6 Trimmung

Modellflugzeuge und Papierflieger fliegen am besten im stabilen Horizontalflug. Dazu muss man verschiedene Trimmungen, gewissermaßen die Grundeinstellungen, vornehmen:

- Trimmung um die Längsachse (Rollen): Wenn zwischen der linken und rechten Tragfläche Unsymmetrien auftreten, kann man das mit Zusatzgewichten an der richtigen Stelle ausgleichen. Hierbei empfiehlt sich ein Ausgleichsgewicht an den Flügelspitzen.
- Trimmung um die Querachse (Nicken): Wesentlich für stabile Horizontalflüge und korrekten Anstellwinkel bei neutralen Höhenrudern ist die Lage des Schwerpunkts. Durch Anbringen von Zusatzmassen möglichst weit vorne in der Nase des Modellflugzeugs kann der Schwerpunkt verändert werden. In anderen Fällen wählt man passende Einstellungen des Höhenruders.
- Trimmung um die Hochachse (Gieren): Asymmetrien, die zum Gieren des Flugzeugs führen, treten vor allem bei Papierfliegern auf und führen zum Kurvenflug. Durch Seitenruder-Ausgangsstellungen (falls vorhanden) oder Maßnahmen, die den Luftwiderstand auf einer Seite erhöhen, kann man diese Asymmetrie ausgleichen.

### Aufgabe 11.6.1

- a) In einem Flugzeug funktioniert die Trimmung in seiner Horizontallage, also um die Querachse, nicht mehr korrekt. Welche Anweisung müsste der Pilot über die Bordsprechanlage den Passagieren geben, wenn das Flugzeug mit der Nase nach oben zeigt?
- b) Können die Passagiere auch hilfreich sein, wenn die Trimmung um die Hochachse ausfällt?
- c) Wie muss der Pilot reagieren, wenn ein Triebwerk ausfällt? Welche „Nottrimmung“ muss er dann veranlassen, damit das Flugzeug noch geradeaus fliegen kann.
- d) Die Flugbegleiter verteilen das Essen, das zentral in einem Heckcontainer bzw. Frontcontainer gelagert war, auf die Passagiere. In welche Richtung wird sich jeweils der Schwerpunkt verändern?
- e) Geben Sie dem Piloten einen Tipp, in welche Richtung er den Anstellwinkel des Höhenleitwerks verändern soll, damit die Veränderung des Schwerpunkts wieder ausgeglichen wird.
- f) Erfahrungsgemäß gehen viele Passagiere nach dem Servieren des Essens und der Getränke auf die Toilette. In einem kleinen Passagierflugzeug befinden sich die Toiletten im Heck. Vor jeder Toilette bildet sich ein Stau. Wie müssen die Piloten im Cockpit reagieren, um die Veränderung des Schwerpunkts auszugleichen?
- g) Begründen Sie, weshalb die Konstrukteure nach Möglichkeit die Treibstoffbehälter in den Tragflächen unterbringen. Warum befindet sich auch im Höhenleitwerk ein Tank?

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen einer statischen und einer dynamischen Trimmung:

**Statische Trimmung** erfolgt im Wesentlichen durch die Verschiebung des Schwerpunkts des Flugzeugs durch das Umverteilen von Massen. Dabei wird z.B. Treibstoff in verschiedene Trimm-tanks gepumpt oder es wird Ballast aufgenommen.

**Dynamische Trimmung:** Das Höhenleitwerk wird in seiner Grundstellung (in seinem Anstellwinkel) so eingestellt (getrimmt), dass das Flugzeug bei „Neutralstellung des Höhenruders“ mit dieser Einstellung einen Horizontalflug ausführt.

## 11.7 Flugfiguren

### Kunstflug

Kunstflieger arbeiten bewusst mit dem Strömungsabriss, um sogenannte „gestoßene Rollen“ oder „gerissene Rollen“ zu fliegen. Die dabei auftretende ungeheuer hohe Rollrate wird damit erreicht, dass die Strömung an einem der Flügel abreißt, während die andere Tragfläche noch weiter beschleunigt wird.

Der Strömungsabriss beginnt meist an einer Stelle der Tragfläche und breitet sich dann über den Flügel aus. Um dieses „Ausbreiten der Ablösewirbel“ zu verhindern, findet man bei Flugzeugen, die im Kunstflug eingesetzt werden – die sich also zwangsläufig in kritischen Flugsituationen befinden – sogenannte Rippen quer zur Tragfläche, die als Wirbelbarrieren dienen.

### Stall

Bei einem Langsamflug – z. B. bei der Landung – muss neben dem Ausfahren der Landeklappen auch der Anstellwinkel erhöht werden, damit der Auftrieb bei dieser kleinen Geschwindigkeit noch genügend groß ist. Wird die Geschwindigkeit zu langsam – der damit notwendige Anstellwinkel zu groß – reißt die Strömung eventuell ab. Wird der Anstellwinkel durch heftiges Ziehen am Steuerruder zu schnell verändert, kann der so genannte „high speed stall“ eintreten.



Änderungen der Auftriebskräfte an den Ruderflächen steuern ein Flugzeug.

Für die stabile Fluglage eines Flugzeugs sind folgende Aspekte wesentlich:

- Schwerpunkt des Flugzeugs
- Angriffspunkt des Auftriebs
- Wirkungsweise des Heckleitwerks

### Kurvenflug

Will man ein Flugzeug „in die Kurve legen“, dann müssen die beiden Querruder am linken und rechten Flügel in entgegengesetzten Positionen ausschlagen. Bei einer Linkskurve muss das linke Querruder nach oben ausschlagen (der Auftrieb muss sich verringern, die Tragfläche sinken), während das rechte Querruder nach unten ausschlägt (der Auftrieb wächst, die Tragfläche muss sich neigen).

Durch diese Querruderausschläge dreht sich das Flugzeug um seine Längsachse nach links. Da die Auftriebskräfte an den Tragflächen aber senkrecht zu den Tragflächen stehen, steht die Auftriebskraft unter einem Winkel zur Vertikalen. Die Auftriebskraft hat somit eine horizontale Komponente, die als Zentripetalkraft das Flugzeug in eine Kurve zwingt.

Ein Querruder, das nach unten ausschlägt, hat einen höheren Luftwiderstand, ein Querruder das nach oben ausschlägt, erfährt einen kleineren Luftwiderstand. Wenn das Flugzeug in eine Linkskurve gezwungen wird, führen diese Luftwiderstandsänderungen durch die Querruderausschläge dazu, dass sich das Flugzeug aus der Kurve „herausdreht“, sich also um seine Hochachse dreht. Dieses Verhalten wird als negatives Wendemoment bezeichnet.

Zur Vermeidung dieses negativen Wendemoments muss der Pilot bei der Einleitung des Kurvenflugs gleichzeitig mit der Querruderverstellung auch das Seitenruder einschlagen, im Falle einer Linkskurve nach links. Beim „idealen Kurvenflug“ muss sich das Flugzeug sowohl um die Längsachse als auch um die Querachse drehen. Das führt dazu, dass die resultierende Kraft senkrecht auf den Boden der Flugzeugkabine wirkt und die Passagiere von diesem Kurvenflug nur eine scheinbare Zunahme ihrer Gewichtskraft wahrnehmen.

### Aufgabe 11.7.1

- a| Warum kann man mit einem Modellflugzeug ohne Seitenruder eine Kurve fliegen?
- b| Warum kann man mit einem Modellflugzeug ohne Querruder eine Kurve fliegen?
- c| Bei Modellflugzeugpiloten, die den Kurvenflug lernen, kann man häufig beobachten, dass ihre Flugzeuge bei der Einleitung des Kurvenflugs leicht absinken. Woran könnte das liegen?
- d| Warum kann man mit einem Modellflugzeug ohne Höhenruder trotzdem Steig- und Sinkflüge durchführen?

### Schwerpunktfragen

Liegt der Schwerpunkt eines Flugzeugs, in Flugrichtung gesehen, hinter dem Angriffspunkt der Schubkräfte der Triebwerke (s. oberes Bild), dann ziehen die Triebwerke gewissermaßen das Flugzeug.

Liegt der Angriffspunkt der Schubkräfte, in Flugrichtung gesehen, hinter dem Schwerpunkt des Flugzeugs (s. unteres Bild), dann schieben die Triebwerke das Flugzeug.

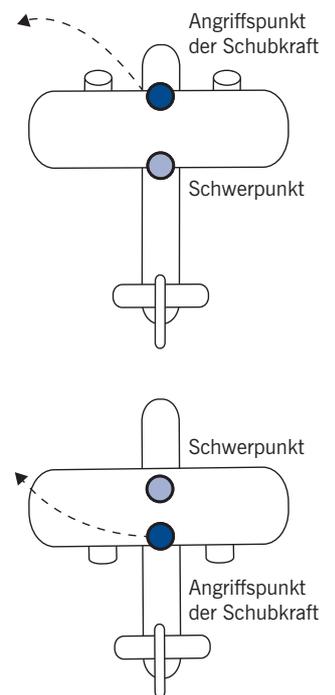
Silvesterraketen tragen einen langen Holzstab an der Seite, mit der man sie geschickt in eine Flasche stellen und leicht abschießen kann. Mit diesem Holzstab liegt der Gesamtschwerpunkt der Rakete hinter dem Angriffspunkt des Raketentreibsatzes; das heißt der Treibsatz zieht die Silvesterrakete. Es wäre sehr gefährlich, den Holzstab zu entfernen, denn eine Rakete, die geschoben wird, zeigt eine labile Fluglage.

Im Alltag findet man dieses Phänomen beim Ziehen oder Schieben eines Experimentierwagens. Kleine Störungen spielen dabei keine Rolle. Beim Schieben muss man aber ständig feinsteuern, weil jede Störung ohne eine passende „Nachsteuerung“ den Wagen schnell aus seiner Richtung dreht.

Zieht ein Pilot die Maschine aus dem Horizontalflug nach oben, wird der Anstellwinkel drastisch erhöht und das Flugzeug steigt mit abnehmender Fluggeschwindigkeit. In dieser Fluglage erreicht die Maschine zwangsläufig den Punkt, an dem der anwachsende Anstellwinkel bei abnehmender Fluggeschwindigkeit zu einem Abriss der Strömung führt.

Bei der Landung wird gezielt ein Strömungsabriss provoziert, damit das Flugzeug aus ganz geringer Höhe auf die Landebahn fällt, bzw. nach dem Aufsetzen nicht mehr abhebt. Dazu werden sogenannte Störklappen ausgefahren.

Kleine Störklappen erzeugen Wirbel, die sich von der Tragfläche ablösen und sich entlang der Tragfläche ausbreiten. Bei größeren Flugzeugen dienen die Störklappen nach der Landung zusätzlich als Bremsen.



Die relative Lage des Schwerpunkts und des Angriffspunkts der Schubkraft bestimmen, ob das Flugzeug gezogen oder geschoben wird.

## LÖSUNGEN

### Aufgabe 11.2.1

- a | An den Tragflächen greifen die Auftriebskräfte an. Die Schwerkraft greift im Schwerpunkt an. Die Luftwiderstandskraft wirkt gegen die Flugrichtung und die Vortriebskraft gleicht diese Luftwiderstandskraft aus.  
Die Kräfte am Querruder drehen das Flugzeug um seine Längsachse.  
Die Kräfte am Höhenruder drehen das Flugzeug um seine Querachse.  
Die Kräfte am Seitenruder drehen das Flugzeug um seine Hochachse.  
Im Windkanal kann man diese Kräfte mit Kraftmessern bestimmen.
- b | Im Horizontalflug gleicht die Auftriebskraft die Schwerkraft aus, und die Vortriebskraft gleicht die Luftwiderstandskraft aus.
- c | Bei wachsendem Anstellwinkel steigt die Auftriebskraft bis die Strömung abreißt.  
Bei Start liegt bei ausgefahrenen Starterklappen schon deshalb ein großer Anstellwinkel (= Landeklappen) vor, weil das Flugzeug für den anschließenden Steigflug die Nase anhebt. Bei der Landung sind die Landeklappen ausgefahren und das Flugzeug landet bei hohem Anstellwinkel, die Nase des Flugzeugs ist angehoben. Erst wenn die hinteren Räder des Flugzeugs den Boden berühren, sinkt die Nase und der Anstellwinkel nimmt ab – und damit auch die Auftriebskräfte an den Tragflächen.
- d | Beim Start und bei der Landung sind die Starterklappen ausgefahren, d.h. der Flächeninhalt der Tragflächen ist in dieser Phase besonders groß.
- e | Beim Start und bei der Landung herrscht zwar eine geringe Strömungsgeschwindigkeit, aber es gibt einen großen Anstellwinkel und eine große Tragfläche bei gleichzeitig hoher Luftdichte. Diese Parameter passen so zusammen, dass die Auftriebskraft sowohl in 10.000 m Höhe als auch am Boden ausreicht, um die Schwerkraft des Flugzeugs auszugleichen.

### Aufgabe 11.4.1

Beim Aufsetzen des Fahrwerks auf der Landebahn werden die Räder beim ersten Bodenkontakt in extrem kurzer Zeit vom Stillstand auf eine Rotationsgeschwindigkeit gebracht, die der Landegeschwindigkeit des Flugzeugs entspricht. Um diese extrem hohe Belastung der Reifen zu mindern, werden die Räder beim A380 schon in der Luft auf die passende Rotationsgeschwindigkeit gebracht.

### Aufgabe 11.4.2

Wenn man das Fahrwerk schon im Flug schwenken kann, besteht die Möglichkeit, dass bei Seitenwindlandung, bei denen die Längsachse des Flugzeugs nicht parallel zur Flugrichtung liegt, das seitliche Schieben der Maschine beim Aufsetzen ausgeglichen wird. Bei Flugzeugen ohne diese Einrichtung, muss der Pilot die Längsachse der Maschine bei Seitenwindlandungen ganz kurz vor dem Aufsetzen parallel zur Landebahn drehen.

### Aufgabe 11.5.1

- a | Das Flugzeug dreht sich hierbei um die Hochachse. Es fliegt horizontal – allerdings zeigt seine Längsachse nicht in die Flugrichtung.
- b | Die Geschwindigkeit nimmt eventuell ab, weil das Flugzeug, vor allem der Rumpf, einen höheren Luftwiderstand bietet.
- c | Mit dem Seitenruder alleine kann man eigentlich keine Kurve fliegen. Dazu muss zusätzlich zum Seitenruder noch das Querruder betätigt werden – nur dann liegt das Flugzeug so in der Kurve, dass die resultierenden Kräfte in Richtung des Kurvenmittelpunkts zeigen. Man darf aber nicht vergessen, dass die Drehung des Flugzeugs um die Hochachse durch das Seitenruder dazu führt, dass die Tragfläche, die in Richtung des Kurvenmittelpunkts zeigt, über eine geringe Relativgeschwindigkeit und damit über einen geringen Auftrieb verfügt. Die andere Tragfläche wird stärker angeströmt und erfährt deshalb einen größeren Auftrieb. Also kippt das Flugzeug, wie bei einer Querruderbetätigung, in die Kurve.
- d | Ein großes Seitenleitwerk oder Seitenruder führt dazu, dass für die notwendigen Lenkkräfte nur kleine Ruderausschläge notwendig sind und damit ein niedriger Luftwiderstand verbunden ist. Bei kleineren Ruderflächen wäre der Anstellwinkel entsprechend größer.

### Aufgabe 11.5.2

- a | In großer Höhe ist der Luftwiderstand wesentlich kleiner. Damit ist weniger Treibstoff für die gleiche Flugstrecke nötig. Gleichzeitig ist eine höhere Fluggeschwindigkeit möglich.
- b | Wenn das Flugzeug bei konstanter Vortriebskraft steigt, gewinnt es an Lageenergie auf Kosten der kinetischen Energie. Das Flugzeug wird langsamer, die Auftriebskräfte nehmen ab und das Flugzeug kippt in die Horizontale und geht in den Sinkflug über.
- c | Im Sinkflug nimmt die Lageenergie ab und die kinetische Energie steigt an. Das Flugzeug wird schneller und die Auftriebskräfte an den Tragflächen wachsen an. Das Flugzeug hebt seine Nase und geht aus dem Sinkflug in die Horizontale und anschließend in den Steigflug über.
- d | Man erkennt die Querruder am äußeren Rand der Tragfläche, die Landeklappen und die Störklappen. Die Störklappen führen beim Aufsetzen des Flugzeugs zum Abriss der Strömung, so dass das Flugzeug bei Bodenkontakt sicher auf der Landebahn bleibt.
- e | Die Störklappen werden nur bei der Landung ausgefahren. Also muss das Flugzeug gerade gelandet sein.

## LÖSUNGEN

### Aufgabe 11.6.1

- a) Der Pilot muss hinreichend viele Passagiere bitten, sich aus dem vorderen in den hinteren Teil des Flugzeugs zu setzen. Der Schwerpunkt des Flugzeugs wird damit nach hinten verschoben.
- b) Das ist nicht möglich. Eine Unsymmetrie des Flugzeugs bzgl. seiner Flugrichtung könnte man nur durch hinreichend große, äußere Kräfte ausgleichen – z. B. durch das Seitenruder oder durch unterschiedliche Schubstärken der Triebwerke.
- c) Wenn ein Triebwerk ausfällt, führt das zu einer seitlichen Schubkomponente der restlichen Triebwerke. Diese Kraftkomponente, die das Flugzeug um die Hochachse dreht, kann man durch eine entsprechende Seitenrudereinstellung ausgleichen.
- d) Im Fall, dass sich das Essen vor dem Verteilen im Heckcontainer befunden hat, verschiebt sich der Schwerpunkt nach vorne. Im anderen Fall nach hinten.
- e) Wenn sich der Schwerpunkt nach vorne verlagert, kann der Pilot durch einen Ausschlag des Höhenruders nach oben diese Schwerpunktverlagerung ausgleichen. Oder er muss mehr Treibstoff in den Tank im Höhenleitwerk pumpen.
- f) Die Piloten müssen den Höhenruderausschlag nach unten korrigieren oder Treibstoff aus dem Höhenleitwerk in die Tragflächen pumpen.
- g) Wenn sich die Treibstofftanks in den Tragflächen befinden, liegen sie in der Nähe des Schwerpunkts – sie sind gewissermaßen „schwerpunktneutral“. Die Tanks in den Höhenleitwerken können zur Trimmung des Schwerpunkts eingesetzt werden.

### Aufgabe 11.7.1

- a) Wenn man das Querruder betätigt, dann zeigt die Auftriebskraft, die senkrecht auf die Tragfläche wirkt, mit einer Kraftkomponente in Richtung des Kurvenmittelpunkts. Diese Kraftkomponente wirkt als Zentripetalkraft.
- Allerdings führen die Querruderausschläge zu einem unterschiedlichen Luftwiderstand an den beiden Tragflächen. Die kurveninnere Tragfläche erfährt bei einem Ausschlag nach oben einen kleineren Luftwiderstand, die andere Tragfläche einen größeren Luftwiderstand. Also dreht sich das Flugzeug um seine Hochachse aus der Kurve heraus.
- Wenn man also eine Kurve ohne Seitenruder fliegen muss, dann giert das Flugzeug bei der Einleitung der Kurve aus der Kurve heraus, bevor es in den Kurvenflug übergeht. Dieses Verhalten nennt man negatives Wendemoment.
- b) Wenn man das Seitenruder – z. B. nach links – betätigt, dann dreht sich das Flugzeug um seine Hochachse nach links. Durch diese Drehung wird die rechte Tragfläche schneller angeströmt als die linke. Wegen der schnelleren Anströmung der rechten Tragfläche erfährt sie einen größeren Auftrieb und geht nach oben, entsprechend erfährt die weniger angeströmte Tragfläche einen kleineren Auftrieb und kippt nach unten.
- Durch die Betätigung des Seitenruders und die Drehung um die Hochachse erfährt das Flugzeug indirekt eine Drehung um die Längsachse. Damit ist ein Kurvenflug alleine mit dem Seitenruder möglich.
- c) Wenn das Flugzeug um die Längsachse gedreht wird und die Auftriebskräfte nicht mehr in der Vertikalen stehen, sinkt der Betrag der vertikalen Auftriebskraftkomponente. Das heißt, das Flugzeug würde in einen Sinkflug übergehen. Also benötigt man eventuell auch noch eine Korrektur der Fluglage durch das Höhenruder.
- d) Bei ganz einfachen Modellen steuert man die horizontale Fluglage über die Motordrehzahl. Soll das Modellflugzeug an Höhe gewinnen, dann erhöht man die Motordrehzahl: Das Flugzeug beschleunigt (nimmt Fahrt auf), der Auftrieb an den Tragflächen nimmt zu, das Flugzeug steigt. Entsprechend führt eine Reduktion der Motordrehzahlen zum Sinkflug. Mit solch einfachen Modellen kann man aber natürlich keine dynamischen Flugfiguren fliegen.