

Modellflug-Didaktik

MODELLFLUG-DIDAKTIK	1
EINFÜHRUNG	1
BILDUNGSPLANBEZUG	2
MODELLFLUG	2
MODELLFLUG-DIDAKTIK	3
UMSETZUNG	4
ANHANG	8
IMPULS AM HELIKOPTER I	8
FRAGEN ZUM HELIKOPTER II	8
FRAGEN ZUM HELIKOPTER III	9
FRAGEN ZUM HELIKOPTER IV	10
PAPIERFLUGZEUG ANSPRUCHSVOLL	10
... INTERESSANTE FRAGEN	13
... HANDWERKLICHE TIPPS	13

Einführung

Fliegen ist ein faszinierendes Thema schon im Kindergarten, der Grundschule und in den unteren Klassen der weiterführenden Schulen. Leider wird diese Neugierde der Kinder im Bildungsplan der Schulearten nicht abgebildet. Obwohl die Bildungspläne einen großen Schwerpunkt in den Alltagsbezug der behandelten Themen legen, fehlen die Themen Strömungen, Aerodynamik, Fliegen, Flugzeug, Helikopter vollständig.



© Franzinger - A380 Sydney nach Singapur

Warum diese Thematik ein solches Stiefkind-Dasein führt, mag vielleicht an den jahrzehntelangen „Streitgesprächen“ in Didaktikzeitschriften liegen, in denen verschiedene „Erklärungsschulen“ vortrefflich darum gestritten haben, welche der vorhanden Erklärungen denn nur die „richtige“ ist. Um keine Missverständnisse aufkommen zu lassen: Es gibt wohl kaum ein Thema am Rande der Physik, das so heftig und so lange diskutiert wurde – und im Rahmen dessen so viel Unsinn in Schulbüchern geschrieben wurde.

Ein kurzer Überblick:

- **Impuls-Erklärung** Die Tragfläche eines Flugzeuges lenkt Luft mit einer Kraft *actio* nach unten, die *reactio* (betragsmäßig gleich groß, am „Verursacher angreifend“, in die entgegen gesetzte Richtung gerichtet) wirkt auf die Tragfläche als „dynamische Auftriebskraft“.

- **Bernoulli-Erklärung** Man betrachtet die Strömung um eine Tragfläche als „geschlossene Strömung“, in der die Tragfläche in gewissem Sinne eine „Verengung“ des Strömungsquerschnittes darstellt. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Flügels im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit unterhalb des Flügels resultiert an der Oberseite der Tragfläche ein Unterdruck im Vergleich zur Unterseite. Dieser Unterdruck führt zur „dynamischen Auftriebskraft“ auf die Tragfläche.
- **Zirkulations-Erklärung** In dieser Theorie kann man den dynamischen Auftrieb an einer Tragfläche über die Kutta-Joukowski-Gleichung berechnen. Diese Gleichung kann man schon in der Mittelstufe in Teamarbeit von Schülerinnen und Schülern intuitiv auf qualitativer Stufe „erfinden“ lassen. Die Zirkulation, in der die Profiltiefe, die Profilform, der Anstellwinkel usw. eingeht, ist in exakter Form allerdings erst in der Kursstufe zu berechnen, da hierfür das mathematische Werkzeug „Integral“ notwendig ist.

Diese drei Erklärungsmuster, die z.T. kontrovers diskutiert werden, sind korrekt in dem Sinne, dass sie bei der gleichen Tragfläche und gleichen Randbedingungen zum gleichen dynamischen Auftrieb führen. Sie können in der Kursstufe des Gymnasiums sogar deduktiv auseinander hergeleitet werden.

Leider gibt es aber auch viel Unsinn ... so z.B. das am weitesten verbreitete Auftriebsmärchen:

Heirathshypothese Die Luftströmung teilt sich vor der Tragfläche – und weil der Weg oberhalb der Tragfläche länger ist als unterhalb, muss die Luft oben „schneller“ strömen. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit stellt sich ein Unterdruck ein.

Wenn man diese Erklärung liest, muss man sich schon sehr wundern, wie „blind“ die Schulbuchautoren vieler Generationen diese Erklärung voneinander abgeschrieben haben ... vermutlich weil sie so „einleuchtend“ klingt. Überprüft man diese Behauptung im Experiment, kann man leicht feststellen, dass sie unsinnig ist. Markiert man Luftpakete, die vor der Tragfläche zusammen liegen, kann man in der Simulation (<http://www.youtube.com/watch?v=6UIsArvbTeo> ODER http://www.diam.unige.it/~irro/profilo1a_e.html) leicht feststellen, dass die Luft oberhalb der Tragfläche wesentlich früher am Ende der Tragfläche ankommt als die Luft unterhalb der Tragfläche. UND schon aus logischen Gründen muss man sich fragen: Welchen Grund soll denn die Strömung oberhalb der Tragfläche haben, um exakt so zu strömen, dass sie am Ende der Tragfläche wieder mit den Strömung unterhalb der Tragfläche zusammen trifft – schließlich sind diese Strömungen „nicht verheiratet“ – so die Anmerkung eines Schülers aus der Klasse 9.

Bildungsplanbezug

Wenn man sich ein wenig bemüht, könnte man die Physik-Bildungsstandards am Gymnasium von Baden-Württemberg so interpretieren, dass man diese Themen als motivierender Alltagsbezug behandeln kann. Dort findet man z.B.

- Strom-Antrieb-Widerstand
- Strukturen und Analogien
- Energie, Energieerhaltung und mechanische Energieströme
- Impuls, Impulserhaltung, Zusammenhang Impulsänderung und Kraft
- Drehimpuls – qualitativ
- Kreisbewegung - qualitativ

In keinem Impulsunterricht der Klasse 7/8 oder 9/10 sollte die Funktionsweise eines Helikopters fehlen. Für 30 Euro kann man ein Zimmer-Helikopter-Modell erwerben, das nach wenigen Minuten „Flugtraining“ von jeder Physiklehrkraft sicher gesteuert und im Unterricht vorgeführt werden kann.

Eine didaktische Variante, diesen Helikopterflug im Unterricht einzusetzen findet man im Anhang

Auch wenn die Physikbildungspläne – Schulcurricula – diese Thematik ausklammern, werden die Schülerinnen und Schüler spätestens in der Biologie mit der „Aerodynamik“ konfrontiert – z.B.:

- Vogelflug
- Gleitflug – Rüttelflug
- Insektenflug
- Flugsamen ... usw.

Ich wage nicht zu entscheiden, wie „professionell diese Erklärungen“ sind.

Modellflug

Diese Thematik wirkt nicht nur auf Kinder motivierend und macht sie neugierig – auch Erwachsene sind vom Fliegen und der „kleineren Variante“, dem Modellflug, so begeistert, dass die Modellbaugeschäfte einen rasanten Absatz verzeichnen.

Neben der hohen Motivation dieser Thematik spielt die Preisfrage natürlich eine entscheidende Rolle. Wenn vor 40 Jahren ein Modellhelikopter noch 6 Monatsgehälter einer durchschnittlichen Lohngruppe kostete, kann man Zimmerhelikopter inzwischen im Internet oder in Spielzeugläden für wenig Geld erwerben.

Leider hat diese Entwicklung aber auch Nachteile. Eltern kaufen ihren Kindern zu den üblichen Festen ein Modellflugzeug oder einen Modellhelikopter, die Kinder freuen sich auf den „Erstflug“ und sind dann bitter enttäuscht, wenn das Geschenk nach wenigen Sekunden schon beim ersten Abheben abstürzt und kaputt ist.

Die Gründe für diesen Misserfolg sind vielfach – eine kleine Auswahl an möglichen Gründen

- Häufig genug sind die Flugzeug- oder Helikopter-Modell – meist **Billigprodukte** u.a. aus China – selbst für einen geübten Modellflieger nur mit Mühe zu beherrschen. In der Hand von „Anfängern“ führen diese Modell mit Sicherheit zu „Bruch“, Frustration und Demotivation.
- Anspruchsvollere Modelle – mit „Stabilisierungselektronik“ (z.B. Gyrosysteme) versehen –, die sinnvoll zu handhaben sind, benötigen aber dennoch ein gewisses Maß an **Hintergrundwissen**. Die Bedienungsanleitungen – meist schlechte Übersetzungen – sind in keinem Falle hilfreich, Anfänger die Kunst des Modellfluges einzuführen.
- Nicht zuletzt ist das **Gefährdungspotenzial** nicht zu unterschätzen. Ein Schüler bekommt zu Weihnachten einen Helikopter mit einem Rotordurchmesser von 60 cm geschenkt. Der Flug im Freien, der in der Bedienungsanleitung mit folgendem Kommentar empfohlen wird: „... *Flugen im Freien ist mehr zu empfehlen* ...“, verbietet sich bei einer dicken Schneedecke und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, denn in der Bedienungsanleitung steht: „... *wollen starke Akku-Laufzeiten, dann hohe Temperatur notwendig* ...“. Der Schüler startet das Modell also im Wohnzimmer der Eltern. Man kann sich leicht vorstellen, wie die Glasvitrine – einen Meter vom Modell entfernt – nach wenigen Sekunden ausgesehen hat. Dass dabei keine Menschen verletzt wurden, war ein wahres Wunder.

Selbstverständlich hat der Physikunterricht keine Verpflichtung, in die Kunst des Modellfluges einzuführen. ABER es würde einem modernen Physikunterricht gut zu Gesicht stehen, wenn die Physiklehrkraft mit Blick auf den Alltagsbezug des Impulses, Drehimpulses oder bei der Energiethematik „Modellhelikopter“ und „Modellflugzeuge“ einsetzt und auf drei wichtige Regeln hinweist:

- Bevor ihr euch ein Modell kauft, beschäftigt euch mit dem Hintergrundwissen, das man zum Beherrschen solch eines Modells benötigt. Vielleicht gibt es in eurer Umgebung einen Modellflugverein mit einem Modellflugplatz und liebenswerten Menschen, die immer bereit sind, dem Nachwuchs zu helfen, die Faszination ihres Hobbys sanft und vor allem „billig“ zu entdecken. In diesem Zusammenhang sind die Modellflieger in Rommelshausen (<http://www.modellflieger-rommelshausen.de/>) ein Beispiel!
Sicher gibt es natürlich in anderen Gegenden ähnlich hilfsbereite Vereine und liebe Menschen, die ein Herz für die „Modellflug-Jugend“ haben.
- Wenn ihr euch so ein Modell kauft, orientiert euch an vertrauenswürdigen Fachleuten, die euch beraten können, damit jeder auf seiner „Könerstufe“ das Modell kauft, das ihm auch Freude macht. Die erste Adresse „vertrauenswürdiger Fachleute“ sind z.B. die „alten Hasen“ in einem Modellfliegerverein. Oder ihr recherchiert im Internet die Adresse eines „Modellflugladens“, der „hauptsächlich“ Modellflugzeuge oder Helis vertreibt. Ein Spielzeuggladen in der Großstadt, der „nur unter anderem“ auch Modellflugzeuge vertreibt, ist nicht immer die „beste Adresse“. Im Raum Waiblingen gibt es z.B. die Firma <http://www.motec-online.de/>, bei der man eine gute Beratung und vor allem einen guten Reparaturservice bekommt, wenn man trotz aller Vorsicht eine „Bruchlandung“ gebaut hat.
Sicher findet man im Internet eine Adresse eines „Ladens seiner Wahl“ – ganz wesentlich ist hierbei der persönliche Kontakt und das persönliche Gespräch, in dem der Verkäufer auf den Kunden eingeht, seine Fähigkeiten erfragt und im Gespräch herausbekommt, welches Modell für den Kunden – mit Blick auf seine fliegerische Können und seinen Geldbeutel – passt. Das alles ist in einem „Internetkontakt“ nicht zu haben.¹

Modellflug-Didaktik

Die ideale Lösung wäre natürlich ein „Modellflug-AG“ an der Schule, in der die Kids in sinnvollen Schritten das Hintergrundwissen UND das fliegerische Fingerspitzengefühl lernen, die Modelle so zu fliegen, dass sie möglichst lange Freude an den Modell haben.

Aber bei aller Betreuung sollten die Kinder UND die Eltern wissen: Modellflug heißt basteln!

Wenn man an diesem Hobby „tragfähige Freude“ haben will, dann besteht dieses Hobby aus drei Pfeilern:

- **Physikalisches Hintergrundwissen** – also Theorie der Aerodynamik, Flugzeug oder Heli-Bau usw.
- **Handwerkliche Fähigkeiten** – also die Freude und das Talent, mit Werkzeugen z.T. „feine Arbeit“ auszuführen.

¹ ... Als Beispiel eine persönliche Erfahrung: Die Internetrecherche führt dazu, dass ich ein Modell bei einer Firma bestelle – Gründe: Das Helikoptermodell ist um 10% billiger als die Parallelanbieter und die Lieferung wird innerhalb drei Tage versprochen. Dass ich mit Vorkasse zahlen muss, ist dabei üblich und macht mich noch nicht stutzig. Nach der Bestellung warte ich 10 Tage – noch immer keine Lieferung. Nach mehrmaliger Reklamation kommt ein Anruf einer deutschen Speditionsfirma, dass bei ihnen ein Helikoptermodell liegt, dass der Zoll noch nicht freigegeben hat ... nach mehreren Telefonaten, Formularen usw. wird der Helikopter angeliefert. Allerdings kostet der Helikopter - nachdem die Zollgebühren und die Bearbeitungsgebühren von Zoll und Speditionsfirma entrichtet sind – genau das doppelte! Also sicher kein Schnäppchen!

- **Flugtraining** – also die Fähigkeit das Modell in der Luft mit der Fernbedienung intuitiv zu steuern.

Theorie

Die Theorie zur Aerodynamik von großen „richtigen Flugzeugen“ und von „kleineren Modellen“ findet man in dem LS-Heft (Hefte des Landesinstituts für Schulentwicklung) NwT 15: Fliegen

Flugtraining

Das Erlernen dieser Intuition ist ein wesentlicher Faktor, den man nur in kleinen Schritten auf sanfte Weise erlernen kann. Selbst wenn man das ganze Hintergrundwissen über die Aerodynamik, das Flugverhalten eines Modells und seine Steuerungsmöglichkeiten kognitiv beherrscht, kann man das Modell noch lange nicht fliegen. Denn die „Laufzeit innerhalb des menschlichen neuronalen Netzes“ sind viel zu lange, wenn man bei jedem Steuerungsmanöver zuerst „überlegen“ muss, was mache ich denn, wenn der Heli durch eine Windböe zu rollen beginnt ... wenn die Reaktion nicht intuitiv geschieht, führt in der Mehrzahl der Fluglagen relativ schnell zum Absturz. Eine weitere Hürde ist die Steuerung eines Modells, wenn man nicht in „Cockpit-Ansicht“ fliegt, wenn man also nicht auf das Heck des Modells sieht. Bewegt sich

Umsetzung

Die ideale Vorgehensweise ist natürlich nach einer hinreichenden Theorieausbildung der Selbstbau eines Modells. Selbstverständlich gibt es hier ganz unterschiedliche Zugeweisen, die auch für die Schule passen. So z.B. könnte man folgende Schritte gehen:

- Die Motivation z.B. am Tag der offenen Türe für die Grundschüler, die das Gymnasium kennen lernen, könnte der Bau von Papierflugzeugen nach Faltvorschriften sein. Eventuell kann die Lehrkraft hier schon grundlegende Funktionen des Flugzeuges erklären ... aber immer mit Blick auf die Vorgaben, die auch in den Naturphänomenen des Gymnasiums gelten: Vom Phänomen ausgehend ... nicht die Theorie steht im Vordergrund!
- In den Naturphänomenen könnte man ein anspruchsvolleres Papiermodell bauen und hierbei die Funktionen der einzelnen Teile eines Flugzeuges - am Phänomen ausgerichtet - einführen. Möglicher Weg → siehe Anhang
- In einer späteren Klasse wäre die Einrichtung einer AG angezeigt, in der die Schülerinnen und Schüler Holzmodell bauen ...
- Wenn in Klasse 7 die Grundlagen zu den notwendigen physikalischen Größen vorliegen, kann man in den Helikopterflug einführen → möglicher Weg siehe Anhang.
- In der AG steht nach dieser Theorie das Helikopter-Flugtraining an ... eventuell in folgenden Schritten:
Wichtig bei allen folgenden Schritten ist das Erlernen des „intuitiven Fliegens“, das schon angesprochen wurde. Das Erlernen des Modellfluges ist mit dem Erwerb des Führerscheins gut zu vergleichen. Ein Autofahrer, der überlegen muss, wie man die Gangschaltung, die Kupplung, die Bremse, das Gaspedal, das Lenkrad, den Blinker, den Scheibenwischer usw. bedient und dann noch den umgebenden Straßenverkehr beobachten muss, wird mit Sicherheit schon nach kurzer Zeit eine „Bruchlandung“ hinlegen. Exakt in dieser Weise verlaufen häufig die ersten Flugversuche, wenn man ein Modell unter dem Weihnachtsbaum findet und in fünf Minuten im Wohnzimmer fliegen will. Ganz wesentlich ist hierbei, dass alle Abläufe – wie beim Autofahren – „automatisiert“ und damit intuitiv ausgeführt werden. Nur wenn man auf das Flugverhalten der Modelle intuitiv – gewissermaßen reflexartig – reagieren kann (und das in dosierter, passender Weise) wird man die Modell starten und heil landen können.

Im Gegensatz zum Auto und dem realen Piloten in einem Flugzeug muss der Modellpilot noch eine zusätzliche Hürde nehmen: Wenn z.B. bei einem Helikopter das Heck zum Modellpiloten zeigt, befindet er sich in der gleichen Sichtweise wie der „reale Pilot“ ... d.h. wenn er den Heli nach rechts steuern will, dann bewegt er den entsprechenden Steuerhebel an der Fernbedienung nach rechts ... usw. Wenn das Modell aber auf den Modellpiloten zufliegt und er will das Modell nach rechts steuern, muss der den Steuerhebel nach links legen – also exakt in die andere Richtung! Und es gibt nicht nur die Heck- und die Frontalansicht ... es gibt beliebig viele Winkel, unter denen der Pilot sein Modell in verschiedenen Fluglagen sehen kann. Der Modellpilot muss also – ausgehend von der aktuellen Fluglage seines Modells – sich in die Lage des Piloten im Cockpit versetzen und dann den korrekten Steuerbefehl ausführen ... und das auch noch intuitiv ... denn jede „explizite Überlegung“ führt beim Modellflug in der Regel zu einer Bruchlandung oder einem unkontrollierten Flugmanöver, weil die „Denkzeit“ viel zu lange ist, um das Modell in einem sicheren Flugzustand zu halten ... weil wir Menschen leider zu langsam denken ...

Das Training dieser Intuition ist ein ganz wesentlicher Schwerpunkt bei den folgenden Trainingsschritten!

Und leider gibt es noch eine Schwierigkeit, die der Autofahrer und der reale Pilot in einem Verkehrsflugzeug nicht hat, nämlich die „Fluglagenerkennung“. Bei kleinen Zimmerhelikopter wird man erstaunlicher Weise feststellen, dass die Größe des Modells relativ unabhängig von der Entfernung zwischen Modell und Modellpilot immer gleich groß ist. Hier greift ein Phänomen unseres Gehirns, das man „Größenkonstanz“ nennt. Man kann es ganz einfach demonstrieren: Wenn man die Hand bei angewinkeltem Arm etwa 30 cm vor das Gesicht hält, erscheint die Hand in der gleichen Größe, wie wenn man sie mit ausgestrecktem Arm etwa 60 cm entfernt betrachtet – oder wenn man die Hände von anderen Schülerinnen und Schülern in noch größerer Entfernung ansieht ... obwohl das Bild auf der Netzhaut in der doppelten Entfernung nur halb so groß auf der Netzhaut erscheint. Unser Gehirn weiß, wie groß eine menschliche Hand ist und gleicht diese „Verkleinerung durch größere Entfernung“ automatisch aus. Aus dem gleichen Grunde erscheint der auf- oder untergehende Mond am Horizont zwischen Bäumen oder Häusern so ungeheuer groß. Bei den Flugübungen in einem Zimmer hilft diese „Größenkonstanz-Reaktion“ unseres Gehirns in idealer Weise das Modell im „gleich groß“ zu sehen und damit die Fluglage des Modells (in welche Richtung zeigt die Achse des Modells, unter welchem Winkel steht die Längs- und die Querachse usw.) gut zu erkennen.

Wenn wir aber in späteren Schritten mit den Modellflugzeugen oder Helikoptern ins Freie gehen und größere Distanzen zwischen dem Modell und dem Modellpiloten bestehen, wirkt diese „Größen-Konstanz-Reaktion“ unseres Gehirns nicht mehr ... das Flugmodell erscheint erstaunlich klein am Himmel und die Erkennung der Fluglage ist eine ganz knifflige Sache ... mit entsprechenden Folgen, wenn man nicht mehr weiß, ob das Heck des Modells auf den Modellpiloten zeigt oder von ihm weg gerichtet ist.

- (a) Man beginnt mit einem einfachen, leichten Koaxialhelikopter ohne Taumelscheibe; diese Geräte haben eine Dreikanal-Fernsteuerung. Ein Kanal steuert die Rotationszahl² – der zweite Kanal steuert die Differenz in der Rotationsgeschwindigkeit der beiden koaxialen Hauptrotoren³ und der dritte Kanal steuert die Rotationsgeschwindigkeit eines horizontal! angeordneten Heckrotors⁴

Dieses Modell kann sich nicht in allen drei Raumdimensionen bewegen ... es kann sich vorwärts/rückwärts, nach oben/unten bewegen und es kann sich um die eigene Achse drehen. Nicht möglich ist eine seitliche Bewegung des Modells. Diese Bewegung ist erst auf der nächsten Modellstufe möglich. Diese Beschränkung hat aber seinen „methodischen Sinn“, denn damit muss der Anfänger weniger Freiheitsgrade steuern und ist damit am Anfang nicht eventuell überfordert.

- (b) Die nächste Modellvariante wäre ein Koaxialheli mit Taumelscheibe, der keinen Heckrotor besitzt - ein 4-kanal-Modell. Ein Kanal steuert die Rotationsgeschwindigkeit der beiden Hauptrotoren (siehe oben → Steigen, Schweben, Sinken). Der zweite Kanal steuert die Differenz in der Rotationsgeschwindigkeit der beiden Hauptrotoren (siehe oben → Drehung um die Hochachse). Der dritte Kanal verdreht die „Taumelscheibe“ am Helikopter so, dass die im Schwebeflug vertikal gerichtete Auftriebskraft der Hauptrotoren entweder nach vorne oder nach hinten gekippt wird und damit die horizontale Bewegung des Helis gesteuert wird⁵. Der vierte Kanal verdreht die Taumelscheibe am Helikopter so, dass die Auftriebskraft der Hauptrotoren nach links oder rechts gekippt wird und damit eine horizontale seitliche Bewegung des Helikoptermodells möglich wird – ganz analog zur Vor- oder Rückwärtsbewegung. Dieses Helikoptermodell kann sich also in allen drei Raumdimensionen bewegen und es kann sich um seine Hochachse drehen.

Die Funktionsweise der Taumelscheibe findet man im „LS-Heft - Hefte des Landesinstituts für Schulentwicklung - NWT 15: Fliegen“

Schöne Simulation findet man dazu unter: <http://www.youtube.com/watch?v=ooX7-ITSU00>

² bei festem Anstellwinkel der Rotorblätter wird damit die dynamische Auftriebskraft gesteuert – also ob der Heli steigt, schwebt oder sinkt

³ wenn die beiden Hauptrotoren mit gleicher Drehzahl und entgegen gesetztem Drehsinn arbeiten, dann ist der Drehimpulserhaltungssatz erfüllt – es ist kein Heckrotor zum Ausgleich des Drehimpulses des Hauptrotors notwendig – und der Heli dürfte keine Drehung um die Hochachse ausführen. Leider ist es nicht ganz so einfach, denn die Luftströmung, die der obere Rotor erzeugt, trifft auf den darunter liegenden, gegenläufig arbeitenden Rotor und damit bestehen keine symmetrischen Verhältnisse zwischen den beiden Hauptrotoren. Zudem führen schon kleine Luftströmungen zu einer unkontrollierten Verhalten – Drehung - um die Hochachse ... Deshalb empfiehlt es sich nur solche Helis dieses Typs zu kaufen, die eine elektronische Stabilisierung um die Hochachse besitzen, so dass der Modellpilot von der Aufgabe entbunden ist, ständig die Drehung um die Hochachse zu korrigieren ... ständig ein „indifferentes Kräftegleichgewicht“ auszusteuern.

⁴ wenn dieser Heckrotor eingeschaltet wird, dann erzeugt er durch seine horizontale Lage eine Kraft nach oben oder unten. Dreht sich dieser horizontal angeordnete Heckrotor so, dass die Kraft nach oben wirkt, dann kippt das Heck nach oben, die Nase des Helis kippt nach unten, die Auftriebskräfte der beiden Hauptrotoren kippt nach vorne und hat damit eine Komponente in horizontaler Richtung, die den Heli nach vorne beschleunigt. Gleichzeitig wird durch das Kippen die vertikale Komponente kleiner als in der horizontalen Stellung, so dass der Heli dabei absinkt, wenn man nicht durch Erhöhen der Rotationszahl des Hauptrotors dafür sorgt, dass das Kräftegleichgewicht zwischen der Schwerkraft und der vertikalen Komponente der Auftriebskraft des Hauptrotors erhalten bleibt.

⁵ Wird die Taumelscheibe so verdreht, dass die Auftriebskraft nach vorne gekippt wird, geht die Nase des Helis nach unten, das Heck nach oben und die horizontale Komponente dieser Auftriebskraft beschleunigt die Hubschrauber nach vorne – bzw hält ihn entgegen dem Luftwiderstand im Flug auf einer konstante Geschwindigkeit. Will der Pilot abbremsen, muss die Taumelscheibe so gekippt werden, dass die Auftriebskraft nach hinten kippt und eine Komponente in horizontaler Richtung nach hinten hat – diese führt zur Abbremsung des Helikopters, wenn er im Vorwärtsflug ist – oder man kann den Heli aus dem Schwebeflug nach hinten fliegen lassen.

- (c) Der dritte „Modellschritt“ wäre ein Helikopter mit nur einem Hauptrotor mit einer Taumelscheibe, einer Paddel-Stange⁶ und einem Heckrotor. Ein Kanal steuert die Rotationsgeschwindigkeit des Hauptrotors (siehe oben → Steigen, Schweben, Sinken). Der zweite Kanal steuert die Rotationsgeschwindigkeit des vertikal angeordneten Heckrotors und damit die Drehung um die Hochachse⁷. Der dritte Kanal verdreht die „Taumelscheibe“ am Helikopter so, dass die im Schwebeflug vertikal gerichtete Auftriebskraft des Hauptrotors entweder nach vorne oder nach hinten gekippt wird und damit die horizontale Bewegung des Helis gesteuert wird (siehe oben). Der vierte Kanal verdreht die Taumelscheibe am Helikopter so, dass die Auftriebskraft des Hauptrotors nach links oder rechts gekippt wird und damit eine horizontale seitliche Bewegung des Helikoptermodells möglich wird (siehe oben). Dieses Helikoptermodell kann sich also ebenfalls in allen drei Raumdimensionen bewegen und es kann sich um seine Hochachse drehen.
- (d) Spätestens jetzt, wenn man die „Zimmermodelle“ verlassen und sich „größeren Modellen“ zuwenden will, ist es ganz wesentlich, ein Helikopter-Flugtraining am Simulator einzuschieben. Auf dem „Internet-Markt“ gibt es hier ganz unterschiedliche Modelle, die aber zum Teil nur bedingt für ein „zielführendes Training“ eingesetzt werden können.

So z.B. gibt es im Internet „freie Flugsimulatoren“ (<http://www.freeware.de/flugsimulator/>), die man umsonst herunter laden kann, die aber leider nicht bei allen Computern und Graphikkarten problemlos laufen. Oder man bezieht für 40€ den Flugsimulator EasyFly 3 (komplett mit Software und Fernbedienung). In dieser Grundversion besitzt der Simulator wenige Flächenmodelle (Modellflugzeuge) und Helis und wenige Szenarien. Diesen Simulator kann man nur mit der Fernbedienung fliegen, die im Set mitgeliefert wird.

Besser wäre es, wenn man sich einen Simulator zulegt, bei dem man als Fernsteuerung genau die Fernsteuerung benutzen kann, die man auch später beim „realen Modell“ verwendet – UND wenn man das Simulatormodell in den Spezifikationen (Abmessungen, Masse, Motorkraft usw.) an das spätere „reale Modell“ anpassen kann ... also wenn der Simulator die späteren Randbedingungen so gut wie nur möglich „realitätsgetreu simulieren“ kann. Eine aus meiner Sicht gute Lösung ist der „Reflexsimulator“ (<http://www.simwerk.de/reflex-flugsimulator/>) ... allerdings muss man aktuell 169,00 € anlegen und man benötigt eine Fernbedienung – z.B. Futaba FF06 oder FF10 oder FX30 oder ähnliche Geräte, die mit dem Reflexsimulator kompatibel sind.

- (e) Die bisherigen Schritte beschreiben das Training und den Flug von „Monokoptern“ (eigentlich besitzt jeder Helikopter mindestens zwei Rotoren⁸), die in der Handhabung mehr Fingerspitzen- und Feingefühl verlangen. Die Alternative sind sogenannte Quadro-, Hexa- oder Oktokopter, die vier, sechs oder acht Rotoren besitzen. Diese Gefährte kann man zwar in der Anfangsphase schneller beherrschen, wenn eine entsprechende Elektronik für stabile Fluglagen sorgt, aber an einer intuitiven Steuerung und an der Problematik der Fluglagenerkennung führt auch diese Variante nicht vorbei.

Eine erstaunlich billige, elektronisch sehr gut ausgestattete und damit gut beherrschbare Variante eines Quadropters – genannt „ar.drone“ – kostet ca. 300,00€ und wird mit einem iPhone, iPad oder iPod gesteuert (<http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/de/>) ... dieses Modell hat zwei mitgelieferte Ausführungsformen: Eine „Zimmervariante“ mit einem Styroporummantelung, die „möbelschonend“ wirkt und einer „Freiflugvariante“, die leichter und weniger windanfällig ist.

- (f) Nach diesen Schritten – und hinreichenden Simulationsstunden - kann an den Flug von „größeren Helis“ denken - z.B. den Innovator MD350 ... oder gar den Trex 500 ohne Paddel-Stange, die man nur im Freien fliegen kann und bei denen eine „Lehrer-Schüler-Fernbedienungskombination“ dringend angeraten ist.⁹

⁶ Die Paddelstange hat folgende Funktion: Durch die Endmassen der Paddelstange hat diese Anordnung einen relativ großen Drehimpuls. Entsprechend dem Drehimpulserhaltungssatz bleibt der Drehimpuls – und damit die Rotationsebene der Paddelstange – auch beim Kippen des Helis nach vorne oder hinten – bzw. zur Seite – konstant (stabil im Raum). Wenn der Heli also z.B. nach vorne kippt, führt ein Gelenk, das die Aufhängung der Paddelstange mit der Taumelscheibe verbindet, dazu, dass das Kippen des Helis ausgeglichen wird. Störungen durch Windböen / Luftzug werden damit ausgeglichen. Diese Paddelstange führt zu einer leichter beherrschbaren stabilen Fluglage.

⁷ Der in diesem Modell vorhanden Hauptrotor bekommt einen Drehimpuls, den er aus dem Gehäuse des Helis holt – das Gehäuse würde sich also – ohne weitere Maßnahmen – in die entgegen gesetzte Richtung so drehen, dass die Drehimpulssumme (Rotor und Gehäuse) wieder Null ergibt. Damit sich das Gehäuse aber nicht dreht, gibt der Heli den Drehimpuls des Gehäuses über den Heckrotor an die umgebende Luft ab. Weil der Heckrotor an einem „langen Hebelarm“ sitzt, kann er „so klein“ ausgelegt werden – in jedem Fall ist der Betrag des Drehimpulses des Hauptrotors gleich groß wie der Drehimpulsbetrag, den der Heckrotor an die umgebende Luft abgibt – und beide Drehimpulse sind einander entgegen gerichtet.

⁸ ... es gibt aber „reale Helikopter“ mit nur einem Hauptrotor. Diese Hubschrauber besitzen keinen Heckrotor. Das Abgas der Turbine wird am Heck seitlich abgeblasen – und entsorgt den Drehimpuls des Gehäuses auf diese Weise in die umgebende Luft.

⁹ In dieser Trainingsvariante steuert der erfahrene Lehrer das Modell und bringt es in eine sicherer Fluglage; erst dann übergibt er die Steuerung über einen Hebel an den Flugschüler. Der Fluglehrer kann dann in „Gefahrensituationen“ das Steuer übernehmen und auf diese Weise den Bruch des Modells verhindern.

Eine weitere Maßnahme bei Helikopter-Training ist die Montage einer Sicherheitsplattform an den Kufen des Helis. Eine Styrodurplatte – mit einer Fläche, die in etwa doppelt so groß wie die Heli-Maße sind, gibt eine Sicherheit beim Abheben und erleichtert die Steuerung, weil das Modell durch diese Platte „träger“ und damit leichter zu steuern ist. Allerdings muss man darauf achten, dass die „Motorisierung des Helis“ hoch genug ist, damit er mit der Platte überhaupt abheben kann. UND man muss darauf achten, dass dieser Sicherheitsfuß die Windabhängigkeit wesentlich erhöht. Ganz wichtig: Diese Zusatzlast verkürzt die „Akkulaufzeit“ des Helis – d.h. man muss darauf achten, dass man nicht in die Situation kommt, dass der Akku abschaltet und das Modell dann unkontrolliert abstürzt.

- Der nächste Schritt – nach hinreichendem Training und voller intuitiver Beherrschung des Heli-Fluges – wäre dann ein 3D-Fliegen ... d.h. die Beherrschung von Kunstflugfiguren (Rolle, Looping usw.)
- Mit Blick auf Modellflugzeuge wären weitere Schritte in der Ag der Selbstbau von Modellflugzeugen ...
- Und falls das Thema bei einigen Schülerinnen und Schülern zu einem „Hobby“ auswächst, empfiehlt sich der Eintritt in einen Modellflugverein ... oder in einen Segelflugverein ... und das Studium der Luft- und Raumfahrt – z.B. an der ausgezeichneten Universität – am IAG (Institut für Luft- und Raumfahrt an der Uni Stuttgart).

Anhang

Impuls am Helikopter I

Teamauftrag

Diskutieren und beantworten Sie mit Ihrem Team folgende Fragekette; gehen Sie hierbei folgendermaßen vor: Das Team bestimmt einen „Vortragenden“, einen Protokollführer und einen Zeitwächter. Die folgenden Fragen liegen nur dem „Vortragenden“ vor. Dieser liest die erste Frage vor – das Team diskutiert diese Frage und liefert eine Antwort, die der Protokollführer dokumentiert. Erst wenn die Antwort vorliegt, wird die nächste Frage vorgelesen ... der Zeitwächter achtet auf ein zügiges Verfahren innerhalb des Zeitfensters, das vorliegt.

- [01] Ein Körper wird in der Hand gehalten und dann losgelassen. Unzweifelhaft wird der Körper nach unten fallen und sein Impuls wird zunehmen. Der Impuls ist eine mengenhafte Größe, die einem Erhaltungssatz genügt. Wenn der Impuls des fallenden Körpers ständig zunimmt, muss der Impuls „irgendwoher“ kommen. Woher kommt dieser Impuls?¹⁰
- [02] Wie gelangt der Impuls aus der Erde in den fallenden Körper? ¹¹
- [03] Wenn das Gravitationsfeld die einzige „Verbindung“ zwischen der Erde und dem Körper ist, dann fließt der Impuls also über das Gravitationsfeld aus der Erde in den fallenden Körper. Wenn der Impuls, den der fallende Körper bekommt, der Erde fehlt, dann müsste die Erde ja dem fallenden Körper „entgegen fallen“. Warum kann man dieses „Entgegenfallen“ nicht feststellen? ¹²
- [04] Nun lassen wir einen Hubschrauber einen Schwebeflug ausführen. Auf diesen Hubschrauber wirkt immer noch das Gravitationsfeld der Erde – d.h. es fließt immer noch Impuls aus der Erde über das Gravitationsfeld in den Hubschrauber. Und trotzdem nimmt der Impuls des Hubschraubers nicht zu – warum? ¹³
- [05] Im nächsten Experiment lassen wir den Hubschrauber auf dem Tisch landen. Es wirkt immer noch das Gravitationsfeld auf den Hubschrauber. Es fließt aber immer noch Impuls über das Gravitationsfeld in den Hubschrauber. Und auch jetzt nimmt der Impuls des Hubschraubers – wie beim Schwebeflug – nicht zu. Wie „entsorgt“ der Hubschrauber jetzt den Impuls, der ständig zufließt?¹⁴

Fragen zum Helikopter II

- [01] Welche Form haben Rotorblätter? ¹⁵
- [02] Welche Wirkung hat die Vergrößerung des Anstellwinkels der Hubschrauberblätter? ¹⁶
- [03] Warum darf man den Anstellwinkel der Rotorblätter nicht über 14° einstellen? ¹⁷
- [04] Warum sind die Rotorblätter in sich um ca. 8° verwunden, so dass der Anstellwinkel außen um 8° kleiner ist als innen? ¹⁸
- [05] Welche Funktion hat ein Heckrotor? ¹⁹
- [06] Die Steiggeschwindigkeit eines Hubschraubers beträgt etwa 5 m/s bis 10 m/s.

¹⁰ ... der Impuls des Hubschraubers kommt aus der Erde

¹¹ ... dieser Impuls kommt über das Gravitationsfeld aus der Erde. Der Impuls, der „im Hubschrauber“ zunimmt, fehlt anschließend in der Erde ... oder vor dem Loslassen sei die Impulssumme Null, dann ist sie nach dem Loslassen ebenfalls Null, denn die Summe der Impulse des Hubschraubers nach unten und des daraus resultierenden Impulses der Erde nach oben ergeben wieder die Impulssumme Null.

¹² ... der Impuls ergibt sich nach der Formel $p = m \cdot v$... da die Masse der Erde um ein Vielfaches größer ist als die Masse des Hubschraubers, ist die Geschwindigkeit der Erde nach oben um ein Vielfaches kleiner als die Geschwindigkeit des Hubschraubers ... so klein, dass man sie nicht wahrnehmen kann.

¹³ ... die Rotorblätter schaufeln ständig Luft nach unten – die Rotorblätter übertragen also im Schwebeflug exakt genau die Impulsmenge auf die Luft nach unten, die dem Hubschrauber über das Gravitationsfeld der Erde zufließt. Auf diese Weise bleibt die Impulssumme des Hubschraubers konstant – er schwebt, weil er keinen Impuls aufnimmt ... denn er gibt ebensoviel Impuls an die Luft weiter, die er von der Erde bekommt.

¹⁴ ... wenn der Hubschrauber auf dem Tisch steht, fließt der Impuls, den er über das Gravitationsfeld bekommt, über die Tischplatte wieder in die Erde zurück ... also no problem ☺

¹⁵ ... Die Rotorblätter haben im Prinzip eine Tragflächenform ... und erzeugen den Auftrieb ähnlich wie eine Flugzeugtragfläche.

¹⁶ ... Der Auftrieb an den Rotorblättern ist eine Funktion der Geschwindigkeit der Rotorblätter und eine Funktion des Anstellwinkels der Rotorblätter. Ein größerer Anstellwinkel führt zu einem größeren Auftrieb ... wie bei einer Flugzeugtragfläche

¹⁷ ... sonst würde die Strömung abreißen und die Rotorblätter würden keinen Auftrieb mehr erzeugen.

¹⁸ ... Die Geschwindigkeit der Rotorblätter ist außen viel größer als innen ... damit das Blatt gleichmäßig belastet wird, muss man den Anstellwinkel innen, an der Stelle, an der die Geschwindigkeit des Rotorblattabschnittes kleiner ist, vergrößern.

¹⁹ ... Der Motor wirkt mit einer Kraft (eigentlich mit einem Drehmoment) auf den Hauptrotor – die Gegenkraft (eigentlich das Gegendrehmoment) wirkt auf den Motor zurück ... Die Folge dieses Gegendrehmoments führt zu einer Rotation des Hubschraubers um seine Hochachse. Der Heckrotor sorgt für einen Gegendrehmoment, so dass der Hubschrauber in einer stabilen Lage stehen kann.

Eigentlich müsste man erwarten, dass ein Hubschrauber eine bestimmte Energiestromstärke P_{SCHWEB} benötigt, um im Schwebeflug zu stehen. Wenn ein Hubschrauber nun aufsteigen will, muss er die dafür notwendige Lageenergie aufbringen – also erwartet man, dass $P_{\text{AUF}} > P_{\text{SCHWEB}}$. In der Realität gilt aber $P_{\text{AUF}} < P_{\text{SCHWEB}}$... d.h. für den Aufstieg benötigt man eine kleinere Energiestromstärke als für den Schwebeflug ... Wie ist das möglich? ²⁰

- [07] Wie realisiert man bei einem Hubschrauber den Vorwärtsflug? ²¹ → siehe Bild 02
- [08] Wie fliegt der Hubschrauber einen Kurvenflug? ²²
- [09] Welche Probleme ergeben sich beim Vorwärtsflug? ²³
- [10] Erläutere die Funktion der Taumelscheibe ... siehe Bild 05
- [11] Welche Probleme entstehen, wenn man auf die schnell rotierende Drehachse mit Hauptrotor eine Kraft ausübt, die versucht, die Drehachse zu kippen ... z.B. durch Verstellen der Ebene der Taumelscheibe? ²⁴
- [12] Warum ist die für einen Horizontalflug notwendige Energiestromstärke kleiner als beim Schwebeflug? ²⁵
- [13] Wie bremst ein Hubschrauber? ²⁶
- [14] Wie muss ein Hubschrauberpilot reagieren, wenn der Motor ausfällt ... Was versteht man unter Autorotation? ²⁷
- [15] Welchen Zusammenhang kann man zwischen einem Ahornsamen und der Autorotation des Helikopters herstellen?

Fragen zu Helikopter III

Für den Strahlstrom nach unten gilt $A_{\text{Strahlstrom}} = \frac{1}{2} A_{\text{Rotorfläche}}$

Zeige, dass folgende Gleichung gilt → $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_s \cdot \pi \cdot R_0^2$

Ist die folgende Gleichung gültig? → $m_{\text{Hubschrauber}} \cdot g = \frac{1}{2} \rho \cdot (v_s)^2 \cdot \pi \cdot R_0^2$

Ist die folgende Gleichung korrekt? → $P = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) \cdot v_s^2$

²⁰ (a) ... Wenn der Hubschrauber nach oben steigt, dann wird der Massendurchsatz $\Delta m/\Delta t$ größer – also kann die vertikale Geschwindigkeit der Luft nach unten – die so genannte Strahlgeschwindigkeit – kleiner werden. Beim Flug nach oben haben wir die Verhältnisse wie beim Flugzeug, dass bei Gegenwind startet und deshalb schon bei einer kleineren Startgeschwindigkeit abheben kann. Für die Auftriebskraft der Rotorblätter gilt $F_A = dm/dt \cdot v_s$...

Für die Energiestromstärke gilt aber $P = dm/dt \cdot v_s^2$... d.h. eine reduzierte Strahlstromgeschwindigkeit macht sich „im Quadrat“ als Treibstoffeinsparung bemerkbar.

(b) ... Im Schwebeflug trifft ein Rotorblatt auf Luft, die sich schon nach unten bewegt ... das ist vergleichbar mit einem Flugzeug, das mit dem Wind startet ... Im Steigflug trifft das Rotorblatt aber auf Luft, die gewissermaßen noch in Ruhe ist – d.h. im Steigflug ist der Auftrieb damit größer als im Schwebeflug ... dieser Effekt reduziert die für einen Steigflug notwendige Energiestromstärke noch weiter.

²¹ Wenn man die Hochachse des Hubschraubers nach vorne kippt, kann man die Auftriebskraft der Rotorblätter in zwei Komponenten zerlegen – eine Vertikalkomponente gleicht die Schwerkraft aus – eine Horizontalkomponente beschleunigt den Hubschrauber in horizontaler Richtung. Das Kippen erreicht man mit der Taumelscheibe ... siehe Bild 05

Der Kippwinkel nach vorne beträgt maximal 10° ... und liefert 150 km/h Reisegeschwindigkeit ... Spezialhubschrauber erreichen Geschwindigkeiten bis 300 km/h

²² Mit dem Heckrotor kann man den Hubschrauber um seine Hochachse drehen ...

²³ Die Anströmgeschwindigkeit der Rotorblätter in Vorwärtsrichtung – und damit der Auftrieb in dieser Blattstellung – ist größer als auf die Rotorblätter, die sich in die Rückwärtsrichtung bewegen. Diese Ungleichheit wird durch periodische Verstellung des Anstellwinkels ausgeglichen → siehe Taumelscheibe – Bild 05

²⁴ Von einem Kreisel wissen wir, dass er einer Kippkraft auf seine Drehachse ausweicht ... diese Kraft wirkt senkrecht zur Drehachse und senkrecht zur Kraft, die den Kreisel zu kippen versucht. Der Hauptrotor wirkt wie ein Kreisel – und demzufolge treten ebenfalls Kippmomente auf, wenn man versucht, die Lage der Drehachse zu verändern. Auch diese Kräfte muss man durch Verstellen der Taumelscheibe kompensieren.

²⁵ ... (a) wie beim Steigflug ist der Massendurchsatz auch beim Vorwärtsflug höher ... also benötigt man eine kleinere Strahlgeschwindigkeit ... und (b) wie beim Steigflug treffen die Rotorblätter beim Horizontalflug auf Luftmassen, die noch nicht beschleunigt wurden ... gleichzeitig ist aber (c) beim Vorwärtsflug ein Luftwiderstand zu überwinden. Die Gewinne an Energiestromstärke im Vergleich zum Schwebeflug durch (a) und (b) ist größer als der zusätzlich notwendige Aufwand durch (c). Ein minimaler Treibstoffverbrauch ergibt sich bei den üblichen Hubschraubern bei 120 km/h.

²⁶ ... die Taumelscheibe wird so verstellt, dass der Auftrieb auf den Rotorblättern vorne größer ist als hinten, so dass der Hubschrauber nach hinten kippt ... die Nase des Hubschraubers angehoben wird ... also eine Vertikalkomponente nach hinten auftritt.

²⁷ Die Rotorblätter werden ohne Antrieb durch den Luftwiderstand abgebremst ... der Pilot stellt die Rotorblätter auf einen negativen Anstellwinkel ... der Hubschrauber fällt nach unten ... die Luft, die nun von unten durch die Rotorblätter bei negativem Anstellwinkel nach oben strömt, lässt die Rotorblätter weiter rotieren ... der Hubschrauber fällt nun mit einer konstanten Fallgeschwindigkeit von 10 bis 20 m/s ... kurz vor dem Boden stellt der Pilot die Rotorblätter wieder auf positiven Anstellwinkel, so dass ein Auftriebskraft nach oben den Fall des Hubschraubers abbremst ... so dass er sanft aufsetzen kann

... diese Prozedur ist ab 140m Flughöhe möglich ... WENN der Pilot ein sehr guter Pilot ist!

Fragen zum Helikopter IV

Ein Hubschrauber habe eine Masse von 5t, Rotorblätterradien von 10m und eine Luftdichte von $1,3\text{kg/m}^3$

Zeige, dass die Strahlgeschwindigkeit folgenden Wert hat: $v_S = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot A}} \dots 16\text{m/s}$

Zeige, dass sich die notwendige Energiestromstärke für den Schwebeflug folgendermaßen ergibt:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot v_S \dots 400 \text{ kW}$$

Zeige, dass eine Rechnung mit einem Rotor-Radius von 5m eine notwendige Energiestromstärke von 800 kW liefert ... d.h. große Rotorblätter bei kleiner Strahlstromgeschwindigkeit sind „energiesparend“ ... ähnlich wie bei Düsentriebwerken, bei denen großer Massendurchsatz bei kleiner Strahlstromgeschwindigkeit bei großen Düsentriebwerksdurchmessern energie-günstig sind.

Wodurch sind die Rotordurchmesser begrenzt? ²⁸

Papierflugzeug anspruchsvoll

Selbstverständlich hat der Bau von Papierfliegern in bestimmten Situationen einen didaktischen Stellenwert. In der nächsten Stufe könnte man auf die Fragen interessierter Schülerinnen und Schülern eingehen und ein Papierflugzeug bauen, das nicht nur in dem „Nachfalten“ von „Papier-Flieger-Vorschlägen“ besteht ... sondern folgende Schritte geht:

1. Schritt: Aus welchen Bauteilen besteht ein Flugzeug
2. Schritt: Welche Form muss ein Flugzeug haben, damit es „selbststabil“ fliegt ... d.h. ohne „Rudermanöver“ einen möglichst geraden Kurs fliegt.
3. Schritt: Wie können wir dieses Wissen dazu verwenden, aus einem Karton ein Flugzeug zu bauen, das einen möglichst kleinen Gleitwinkel hat ... d.h. aus einer bestimmten Abwurfhöhe möglichst eine große Strecke fliegt, bevor es landet.

Infos & Arbeitsaufträge

Ein Flugzeug hat einen Rumpf, Tragflächen, ein Höhenleitwerk und ein Seitenleitwerk. An den Tragflächen sitzen die Querruder, am Höhenleitwerk sitzt das Höhenruder, am Seitenleitwerk das Seitenruder.

➤ Unser Papiermodell muss, wenn es stabil fliegen soll, alle wesentlichen Bauteile eines richtigen Flugzeuges haben ... also einen Rumpf, zwei Tragflächen, ein Höhenleitwerk und ein Seitenleitwerk.

➤ Um den Rumpf zu bekommen, falten wir den DinA4-Karton der Länge nach in der Mitte, dann parallel dazu, so das in etwa folgende Form entsteht – siehe Bild 01

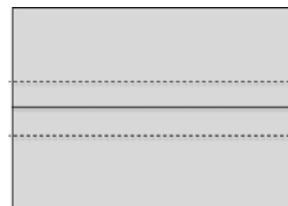


Bild 01

➤ Von vorne erscheint das Papier wie im Bild 02.



Bild 02

➤ Damit der „Rumpf“ stabil wird, kann man ihn mit einer Heftklammer zusammen klammern – oder mit ein wenig Klebstoff zusammen kleben.



Bild 03

➤ Mit diesem Rumpf hat unser Papierflieger automatisch ein Seitenleitwerk bekommen. Es wirkt eventuell etwas ungewöhnlich, denn bei einem normalen Flugzeug zeigt das Höhenleitwerk nach

Wenn eine Störung das Flugzeug seitlich auslenkt, dann trifft die Luft seitlich auf das Seitenleitwerk und dreht das Flugzeug wieder zurück in die vorige Flugrichtung.
Diese Funktion übernimmt der Rumpf in unserem Modell. Dass der Rumpf hierbei nach unten zeigt, während das Seitenleitwerk bei einem Flugzeug

²⁸ Große Rotorblätter bekommen eventuell Stabilitätsprobleme ... evtl. Materialprobleme ... große Zentrifugalkräfte bei großen Rotorradien ... Die Geschwindigkeit am Rotorrand muss unterhalb der Schallgeschwindigkeit bleiben (im Regelfall kleiner als 250 m/s) ... sonst treten Schockwellen auf, die die Rotoren zerstören können. Bei R=5m muss die Drehfrequenz unter 220/min liegen.

oben – bei unserem Papierflieger nach unten.

- ✚ Diskutiere mit deinem Team, welche Funktion das Seitenleitwerk an einem Flugzeug hat, wenn das Flugzeug durch eine Störung seitlich aus seiner Flugrichtung ausgelenkt wird.
- ✚ Das Seitenleitwerk stabilisiert das Flugzeug also gegenüber Drehungen um die Hochachse ... oder Stabilität gegenüber „Gieren“ um die Hochachse.

- Nun schneiden wir aus dem Papier die Tragflächen und die Höhenleitwerke aus. Gleichzeitig falten wir die vordere Tragfläche zu einer schrägen Form – siehe Bild 4

- ✚ Diskutiere mit deinem Team, welche Funktion das Höhenleitwerk an einem Flugzeug hat, wenn das Flugzeug durch eine Störung in seiner horizontalen Lage aus seiner Flugrichtung gekippt wird.
- ✚ Das Höhenleitwerk stabilisiert das Flugzeug also gegenüber Drehungen um die Querachse ... oder Stabilität gegenüber „Nicken“ um die Querachse.

- Nun biegen wir die Tragflächen in eine V-Form. Das Höhenleitwerk bleibt in etwa horizontal ausgerichtet.

- ✚ Wenn sich das Flugzeug um seine Längsachse dreht, dann spricht man vom „Rollen“ des Flugzeuges. Diskutiere mit deinem Team, warum ein Flugzeug, dessen Tragflächen in einer V-Form stehen, stabil gegenüber dem Rollen um die Längsachse des Flugzeuges ist.

- Wenn man das Modell im aktuellen Zustand abwirft, fliegt es nicht, sondern macht im besten Fall einen kurzen Steigflug, die Nase des Flugzeuges geht nach oben, dann wieder nach unten und das Flugzeug stürzt ab.

- ✚ Diskutiere mit deinem Team, welches Flugverhalten hat ein Flugzeug, dessen Schwerpunkt an der Flugzeugnase, am Flugzeugende sitzt.

- ✚ Diskutiere, warum die stabilisierenden Wirkungen der V-Form, des Seiten- und Höhenleitwerks nur wirken kann, wenn der Schwerpunkt des Flugzeuges unter den Tragflächen sitzt – also im vorderen Teil des Rumpfes liegt?

- Mit Heftklammern an der Nase des Modells stellen wir nun den Schwerpunkt des Modells so ein, dass es beim Abwerfen in einen geradlinigen Flug

nach oben zeigt, spielt dabei keine prinzipielle Rolle.



Bild 04

Wenn eine Störung dazu führt, dass die Flugzeugnase nach unten geht, dann trifft die Luftströmung auf das nach oben ragende Höhenleitwerk und dreht das Flugzeug wieder zurück in die horizontale Fluglage.



Bild 05

Die optimale Wirkung haben Tragflächen, wenn sie horizontal stehen. Würden sie vertikal stehen, hätten sie überhaupt keine Auftriebswirkung. Stehen sie in einer V-Form, dann erzeugen sie einen Auftrieb – aber nicht den maximal möglichen Auftrieb. Rollt das Flugzeug nun um seine Längsachse, dann drehen sich die Tragflächen ... eine Tragfläche kommt in eine „horizontale Lage“ und erfährt damit eine größere Auftriebskraft, die andere Tragfläche kommt in eine „steilere Stellung“ und verliert Auftriebskraft. Diese veränderten Auftriebskräfte führen dazu, dass das Flugzeug wieder in die vorige Flugstellung zurückgedreht wird.

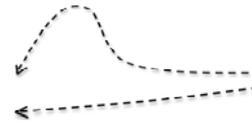
Der Schwerpunkt des Flugzeuges liegt an der völlig falschen Stelle. Warum die Lage des Schwerpunktes wichtig ist, liegt auf der Hand. Liegt der Schwerpunkt nämlich an der Spitze des Flugzeuges, würde das Flugzeug mit der Nase voran abstürzen. Würde der Schwerpunkt am Ende des Flugzeuges sitzen, würde es mit dem Ende voraus zu Boden stürzen. Würde der Schwerpunkt in der Mitte des Flugzeuges sitzen, dann würde bei einer Störung des Flugzeuges die Luftströmung nicht dazu führen, dass das Flugzeug in die vorige Lage zurückgedreht wird, sondern die Störung würde das Flugzeug eventuell sogar völlig aus seiner vorgesehenen Fluglage drehen.

Weil das Höhenleitwerk relativ weit hinter dem Schwerpunkt liegt, wirkt das sogenannte Hebelgesetz und kleine Kräfte des Höhenleitwerks führen zu der oben beschriebenen stabilisierenden Wirkung.

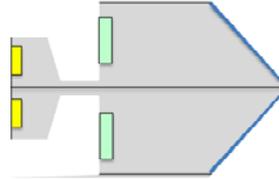


übergeht.

- ✚ Diskutiere mit deinem Team, welche Flugbahn sich einstellen wird, wenn (a) der Schwerpunkt zu weit vorne, (b) zu weit hinten oder (c) richtig liegt?
- Unser Modell hat zwar Tragflächen, Höhenleitwerk und Seitenleitwerk – aber keine Ruder.
- ✚ Diskutiere mit deinem Team die Wirkung des Höhenruders, des Seitenruders und der Querruder, die an der Tragfläche sitzen.
- ✚ Wie könnte man an dem Modell die Funktionsweise dieser Ruder demonstrieren?



Will man die Funktionsweise des Höhenruders demonstrieren, kann man das Höhenleitwerk rechts und links etwas einschneiden und damit ein Höhenruder simulieren ... wird es nach oben oder unten gestellt, kann man die Wirkung im Flug beobachten. In gleicher Weise kann man am hinteren Ende des Rumpfes durch Einschneiden ein Seitenruder simulieren ... oder durch Einschneiden an der hinteren Kante der Tragflächen die Querruder simulieren.



... interessante Fragen

- ✚ Wie leitet ein Pilot einen **Steigflug** ein?
- ✚ Wie leitet ein Pilot einen **Sinkflug** ein? Genügt die Betätigung des Höhenruders?
- ✚ Welche Wirkung hat „im Prinzip“ ein **Querruder**?
- ✚ Welche Wirkung hat „im Prinzip“ ein **Seitenruder**?
- ✚ Welche Wirkung hat „im Prinzip“ ein **Höhenruder**?
- ✚ Wie fliegt ein Pilot eine **Kurve**?
- ✚ Ganz einfache **Modellflugzeuge** haben „nur“ ein Seitenruder – kein Höhenruder und keine Querruder. Welche Flugmanöver kann man mit diesem Flugzeug fliegen?
- ✚ Andere einfache Modellflugzeuge haben „nur“ ein Seitenruder und ein Höhenruder – kein Querruder. Kann man mit diesem Flugzeug eine Kurve fliegen?
- ✚ Wieder andere Modellflugzeuge haben „nur“ ein Querruder und ein Höhenruder. Welche Flugmanöver kann man damit ausführen?

... handwerkliche Tipps

- ✚ Die Zusammenhänge bei einem Flugzeug sind komplex, denn man muss nicht nur den Impulserhaltungssatz (bzw. eine Kräftebetrachtung) beachten, sondern auch den Energieerhaltungssatz. Gleichzeitig ändern sich auch noch andere Flugparameter – so z.B. die Luftdichte.
- ✚ Wenn das Flugzeug durch das Verstellen des Höhenruders an Höhe verliert, gewinnt es gleichzeitig Fahrt – d.h. Lageenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt – das bedeutet aber eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit – und das wiederum bewirkt einen höheren Auftrieb an den Tragflächen – und das führt dazu, dass das Flugzeug steigt.
- ✚ Ein Sinkflug entsteht z.B. wenn man den Vorschub reduziert.
- ✚ Wenn man nur das Querruder bedient, dreht sich das Flugzeug zunächst um die Längsachse.
- ✚ Wenn man nur das Höhenruder bedient, dreht sich das Flugzeug um seine Querachse.
- ✚ Wenn man nur das Seitenruder bedient, dreht sich das Flugzeug um seine Hochachse.
- ✚ Leider ist es aber nicht so einfach ... Wenn man nämlich das Querruder betätigt, dann geht z.B. das linke Querruder hoch, während das rechte Querruder nach unten geht. Die linke Tragfläche erfährt also einen Abtrieb, während die rechte Tragfläche einen Auftrieb erfährt.
Aber gleichzeitig erhöht sich der Luftwiderstand der linken Tragfläche durch das nach oben stehende Querruder ... also dreht sich das Flugzeug um seine Hochachse nach links.
Betätigt man das Querruder, leitet man nicht nur ein Rollen des Flugzeuges um seine Längsachse ein, sondern das Flugzeug giert auch um seine Hochachse.
Man kann also ein Flugzeug auch „nur“ mit dem Querruder zu einem Kurvenflug bringen.
- ✚ Betätigt man das Seitenruder – z.B. nach rechts, dann dreht sich das Flugzeug um seine Hochachse nach rechts.
Diese Rechtsdrehung führt aber dazu, dass die linke Tragfläche eine höhere Anströmungsgeschwindigkeit erfährt als die rechte Tragfläche. D.h. die linke Tragfläche erfährt einen höheren Auftrieb als die rechte Tragfläche – also dreht sich das Flugzeug um seine Längsachse nach rechts ...
Man kann also ein Flugzeug auch „nur“ mit dem Seitenruder zu einem Kurvenflug bringen.
- ✚ Weill man einen „sauberen Kurvenflug“ einleiten, muss der Pilot das entsprechende Maß an Querruder und Seitenruder geben; wird das im richtigen Maße getan, dann steht ein in der Kanzel frei hängendes Lot so, dass es senkrecht auf den Boden des Flugzeuges zeigt und die Passagiere merken von dem Kurvenflug nichts, denn die resultierende Kraft wirkt senkrecht auf die Sitze – wie man das bei normalem Sitzen auch gewohnt ist ... eventuell spürt man eine geringe Zunahme der „scheinbaren Gewichtskraft“.
- ✚ UND zudem muss man beachten, dass bei einem Kurvenflug durch die „schräg“ in der Luft liegenden Tragflächen der Auftrieb auf die Tragflächen abnimmt ... d.h. wenn der Pilot einen Kurvenflug einleitet, muss er gleichzeitig in einem entsprechenden Maße „Höhenruder“ geben, wenn das Flugzeug eine horizontale Kurve fliegen soll.