

# Das Schüler-Fluglabor:

## Einführung in die Grundlagen des Fliegens

Autoren: Helmut Schneider, Heinrich Eder, Gerhard Wöbbeking

Das Fluglabor besteht aus

- Einführung in die Grundlagen Heinrich Eder
- Bauplan, Bauanleitung und Baustufenfotos Studiengleiter „Centaur“ Heinrich Eder
- 3 Arbeitsblätter für die Experimente Helmut Schneider, Heinrich Eder, Gerhard Wöbbeking

### Zielsetzung

Das Flugzeug ist heute zum allgemeinen Verkehrsmittel geworden. Die meisten wissen jedoch nicht, wie das Fliegen im Medium Luft überhaupt funktioniert und wieso ein Flugzeug stabil in der Luft liegt. Warum fällt es nicht herunter, nach dem Motto „Luft und Wasser haben keine Balken“?

Das Fluglabor versucht durch Experimente mit einem Basisgleiter dies zu verdeutlichen. Dabei werden erste Begriffe, wie *Auftrieb (A)*, *Schwerpunkt (SP)*, *Einstellwinkeldifferenz (EWD)* und *Neutralpunkt (NP)* erläutert und durch Versuche erarbeitet. Dies sind wichtige Kenngrößen, die für einen stabilen bzw. instabilen Flug entscheidend sind.

Didaktik: Die Darstellung entspricht der 9./10. Jahrgangsstufe. Alle kursiv gedruckten Begriffe sind im Anhang erläutert

### Der Basisgleiter „Centaur“ (Abb. 1)

Ein mit einfachen Mitteln aufzubauender Gleiter aus allgemein erhältlichen Leicht- Materialien (1 mm Depronplatte, 4 mm Balsaholzbrettchen) dient als Experimentiermodell. Die Materialkosten eines Gleiters liegen unter 2 Euro. Das Modell verfügt über Verstellmöglichkeiten für den Schwerpunkt sowie für den Einstellwinkel des Höhenleitwerks.

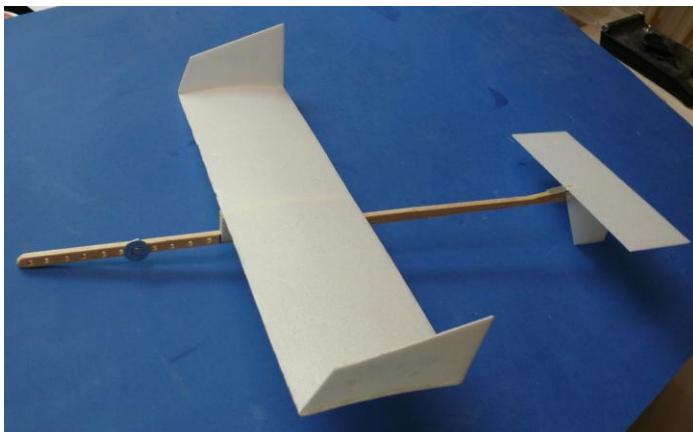


Abb. 1 Der Basisgleiter „Centaur“

## Einführung in die Grundlagen der Flugphysik

Zunächst muss man einige Grundlagen der Flugphysik verstehen. Luft hat wichtige Eigenschaften, die den Auftrieb einer Tragfläche, also den Flug eines Flugzeugmodells erst ermöglichen. Dieser Zusammenhang zwischen Luftdichte und Auftrieb wird im folgenden erläutert

### Wie entsteht Auftrieb?

Luft hat unter Normalbedingungen (15 Grad, Luftdruck 1013 hPa) eine Dichte von  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Ein Kubikmeter Luft wiegt also rd. 1,2 kg.

*Aufgabe: berechne die Masse der Luft in deinem Klassenzimmer in kg (Hinweis: berechne erst das Volumen und dann die Masse durch Multiplikation mit der Dichte). Könntest du das Gewicht dieser Luftmasse heben?*

Um oben zu bleiben, muss ein Flugzeug sekundlich eine bestimmte Masse Luft nach unten ablenken. Erst durch die relativ hohe *Dichte* der Luft ist Fliegen überhaupt möglich! Die Ablenkung des Luftstromes wird über die Flügelfläche bzw. das Flügelprofil erreicht (Abbildung 2). Das Ablenken der Luftmasse nach unten kann man sich auch als Stoß vieler Luftteilchen (wie bei Billardkugeln) vorstellen. Entsprechend dem Gesetz *actio gleich reactio* – wird aus der Ablenkung eine entgegengesetzte Kraft nach oben erzeugt, die Auftriebskraft.

Die Umlenkung des Luftstromes über das *Flügelprofil* muss möglichst effizient und mit wenig Widerstand erfolgen. Dazu haben sich je nach Fluggeschwindigkeit und Einsatz verschiedene Profilformen als günstig erwiesen. Das Profil besitzt für diesen Zweck oben eine konvexe und unten eine konkave Wölbung bzw. auch eine gerade Unterseite. Hierdurch wird die Luftströmung, – ähnlich einer Schaufel – effizient nach unten abgelenkt.

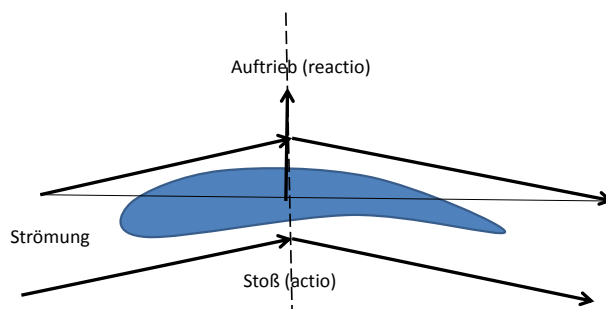


Abb. 2 Ablenkung der Strömung nach dem Stoßgesetz

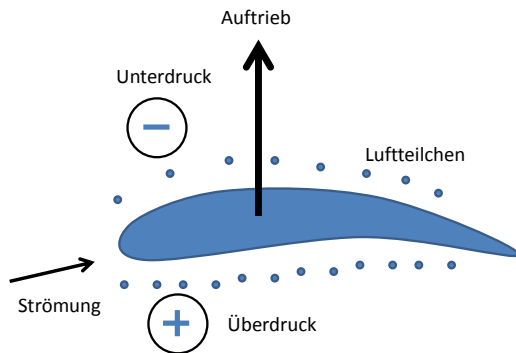


Abb. 3 Auftrieb = (Druck Unterseite - Druck Oberseite) x Flügelfläche

Die Auftriebsentstehung kann neben der oben dargestellten Erklärungsweise auch wie folgt verstanden werden (Abbildung 3):

Der Luftstrom auf der Oberseite des Profils hat wegen der konvexen Wölbung einen größeren Weg zurückzulegen. Dadurch wird die Zahl der Luftteilchen pro Laufstrecke (Teilchen pro Volumen) geringer als in der umgebenden Atmosphäre. Eine geringere Teilchendichte entspricht einem Unterdruck (Vakuum). Damit entsteht oben eine Saugkraft (Abbildung). Auf der Profilunterseite nimmt die Teilchendichte zu: es entsteht Überdruck. Das Profil wird also sowohl nach oben gesaugt als auch nach oben gedrückt. Dieses Phänomen lässt sich einfach mit dem in Abbildung 3 dargestellten Versuch demonstrieren. Eine genauere Erklärung liefert die *Profiltheorie*.

**Versuch** (Abbildung 4): Mittels 2 Papierstreifen, die an Kugelschreibern o. ä. aufgehängt sind, kann man die Saugkraft bei Querschnittsverengung (höhere Geschwindigkeit der Luftteilchen) demonstrieren, indem man in den Zwischenraum hineinbläst: die beiden Papierstreifen nähern sich - entgegen der Erwartung - an!

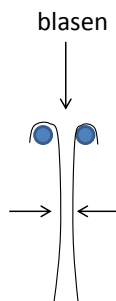


Abb. 4 Darstellung der Saugkraft bei Verengung des Querschnittes mittels 2 Papierstreifen

## Schwerpunkt und Gewicht

Es genügt nicht, dass ein Flugzeug fliegt, es muss auch eine gewisse Flugstabilität haben. Der wichtigste Begriff um die Stabilität zu verstehen, ist der Schwerpunkt. Die Auftriebskraft muss im Horizontalflug das Gewicht des Flugzeugs gerade kompensieren (Abbildung 5). Die Masse des Flugzeugs kann man sich in einem Punkt konzentriert vorstellen – dem *Schwerpunkt*. Die Bewegungen um alle Achsen des Flugzeugs erfolgen in der Regel so, dass der Drehpunkt im Schwerpunkt liegt. Um das Flugzeug zu tragen, muss der Auftrieb im Normalflug in der Nähe des Schwerpunktes angreifen. Der Auftrieb entspricht dem Gewicht des Flugzeugs.

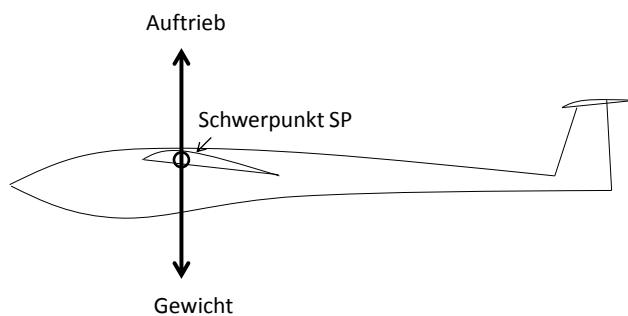


Abb. 5 Der Auftrieb und das Gewicht des Flugzeugs sind gleich groß

## Die Achsen des Flugzeugs

Für die Erklärung der Stabilität ist eine Kenntnis der Achsen eines Flugzeuges, des Schwerpunktes und des Neutralpunktes notwendig. Wir bezeichnen die Achsen gemäß Abbildung 6.

Die *Längsachse* ist die Achse durch den Schwerpunkt in Richtung des Rumpfes. Die *Querachse* verläuft durch den Schwerpunkt parallel zum Flügel und die *Hochachse* beschreibt die Achse durch den Schwerpunkt senkrecht zur Rumpf- bzw. zum Flügelachse.

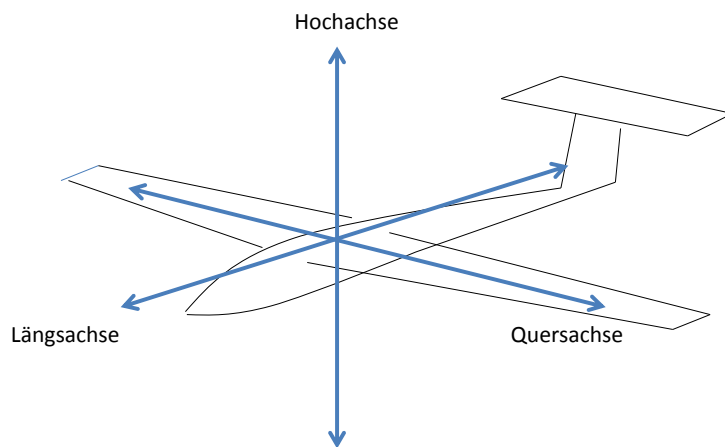


Abb. 6 Achsen des Flugzeugs

### Querstabilität

Gemeint ist hier die Stabilität um die Längsachse. Wenn das Flugzeug z. B. infolge einer Böe in eine Schräglage kommt, sollte es sich von selbst wieder aufrichten. Dazu dient die V-Form des Flügels. Bei Schräglage liefert eine Flügelhälfte mehr Auftrieb als die andere, da die vertikal projizierte Fläche auf einer Seite größer und auf der anderen Seite kleiner wird. Somit entsteht ungleicher Auftrieb zwischen den Flügelhälften und damit das erforderliche aufrichtende Drehmoment (Abb. 7). Fehlt die V-Form entsteht kein aufrichtendes Drehmoment.

Bei Flügeln mit Winglets, wie beim „Centaur“ nimmt die senkrecht projizierte Fläche auf einer Seite ebenfalls zu und es entsteht dort mehr Auftrieb.

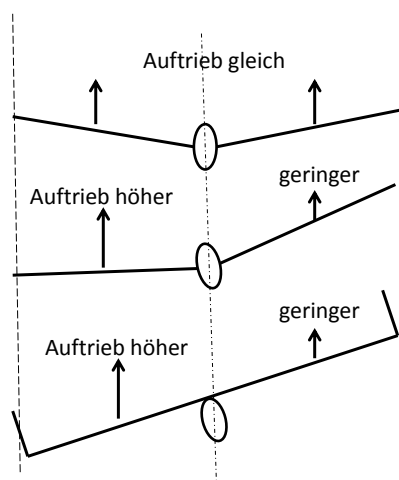


Abb. 7 Querstabilität: Bei Schräglage erhält eine Flügelhälfte mehr Auftrieb

## Längsstabilität

Würde die Auftriebskraft, genau wie die Schwerkraft im Schwerpunkt auf das Flugzeug wirken, wäre die Flugstabilität einfach erklärt. Bei Störungen wandert jedoch der Angriffspunkt des Auftriebs (Druckpunkt) entlang des Profils. Das macht die Sache erheblich komplizierter.

Für die Stabilität um die Querachse (Längsstabilität) ist es erforderlich, dass das Flugzeug bei einer Kippung nach vorne oder nach hinten von selbst wieder in die Normallage zurückkehrt. Man spricht von einem stabilen Gleichgewicht. Eine solche Kippung könnte durch Böen verursacht werden.

Die verschiedenen Formen von Gleichgewicht zeigt Abb.8.

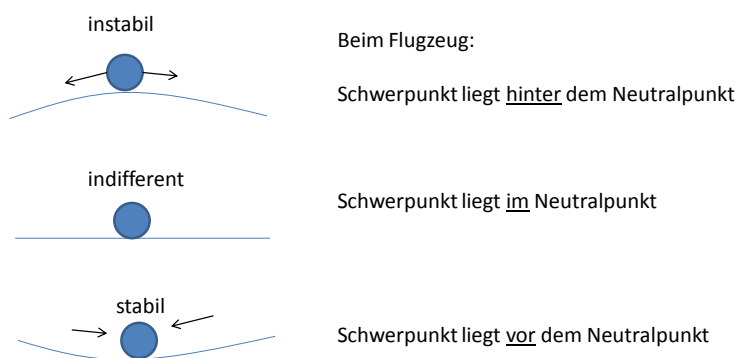


Abb. 8 Verschiedene Gleichgewichtslagen

Kippt z. B. die Nase des Flugzeugs nach unten, ist ein aufrichtendes *Drehmoment* (Kraft x Hebelarm) erforderlich. Das Drehmoment wird vom Höhenleitwerk (HLW) erbracht, indem der Auftrieb dort abnimmt oder sogar negativ wird. Umgekehrt würde der Auftrieb am HLW zunehmen wenn die Rumpfnase nach oben kippt (Abb. 9).

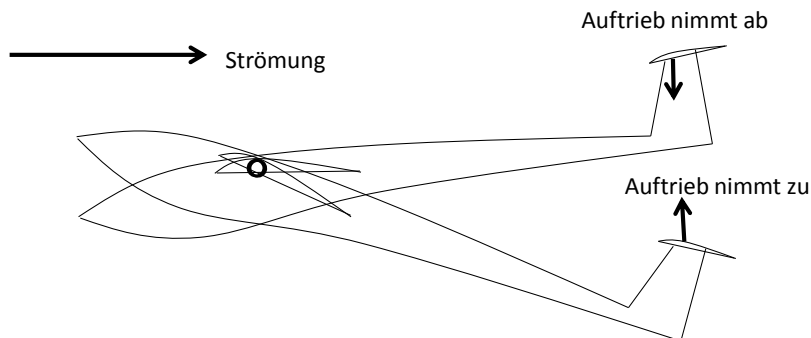


Abb. 9 Das Höhenleitwerk erzeugt ein korrigierendes Drehmoment

### Neutralpunkt

Wird der Schwerpunkt ausgehend von 25 % der Flügeltiefe immer weiter nach hinten verlegt, ist das Flugzeug ab einer bestimmten Schwerpunktrücklage trotz dem entgegen wirkendem Drehmoment des Höhenleitwerks nicht mehr fähig, sich aufzurichten und würde abstürzen.

Diese Schwerpunktlage wird *Neutralpunkt* des Gesamtflugzeugs bezeichnet.

Das Gleichgewicht ist hier indifferent (unbestimmt) –s. Abb. 8. Der Neutralpunkt liegt – je nach Flugzeugauslegung - üblicherweise bei 40 bis 60 % der Flügeltiefe.

Wir definieren: Der Neutralpunkt ist diejenige rückwärtige Schwerpunktlage bei der kein stabiles Gleichgewicht mehr erreichbar ist.

Moderne Kampfflugzeuge haben den Schwerpunkt tatsächlich in der Nähe des Neutralpunkts und sind deswegen um alle Achsen sehr beweglich. Sie werden durch elektronische Flugregelung stabilisiert.

### Das Stabilitätsmaß

Der Abstand zwischen dem eingestellten Schwerpunkt und dem Neutralpunkt ist ein Maß für die Stabilität des Flugzeugs und wird kurz *Stabilitätsmaß* genannt. Je größer der Abstand des Schwerpunktes vor dem Neutralpunkt ist, desto größer die Stabilität um die Querachse. Bei normalen Flugzeugen liegt der Schwerpunkt ca. 5 bis 25% der Flügeltiefe *vor* dem Neutralpunkt (Abbildung 10)

*Gewichtsverlagerungen verursacht durch losgelöste Ladung oder Passagierwanderungen verschieben die Schwerpunktlagen, was Auswirkungen auf die Flugstabilität nach sich zieht.*

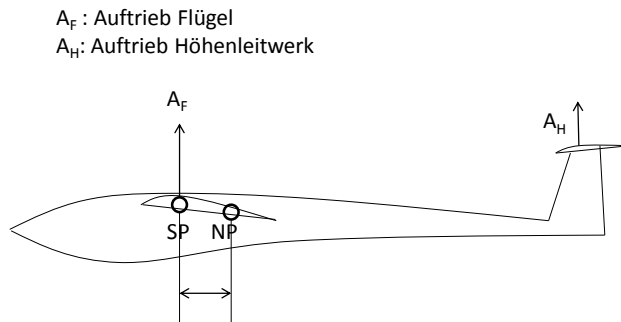


Abb. 10 Stabilitätsmaß = Abstand Schwerpunkt-Neutralpunkt

**Auswirkungen der Schwerpunktlage auf das Flugverhalten (Abb. 10)**

*Zu große Schwerpunktvorlage (hohes Stabilitätsmaß):* Das Flugzeug ist für den Piloten schwer steuerbar und neigt nach einer Störung zum Schwingen (Wellenflug) Es beruhigt sich meist nicht mehr von selbst.

*Zu große Schwerpunktrücklage (geringes Stabilitätsmaß):* Das Flugzeug ist für den Piloten leicht steuerbar, richtet sich nach einer Störung von selbst jedoch nur sehr langsam auf und verliert stark an Höhe.

*Richtige Schwerpunktlage (mittleres Stabilitätsmaß):* Das Flugzeug beruhigt sich nach ein bis zwei Schwingungen von selbst und fliegt stabil weiter.

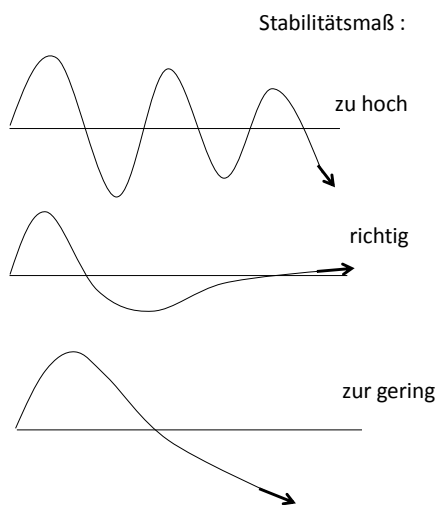
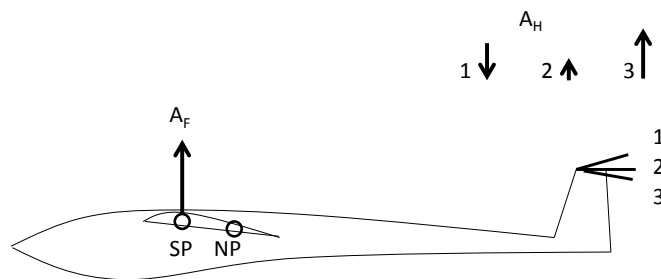


Abbildung 11 Auswirkungen der Schwerpunktlage auf die Schwingungsdämpfung

## Trimmung

Um gute Flugleistungen zu erreichen, muss das Flugzeug richtig getrimmt werden. D. h. es muss mit dem richtigen *Anstellwinkel* des Flügels gegen die Strömung fliegen um z. B. die weiteste Flugstrecke zu erreichen.

Die Trimmung kann über die Lage des Schwerpunktes und/oder die Einstellung des Höhenruders erfolgen. Da der Schwerpunkt auch die Flugstabilität beeinflusst (siehe oben), wird man in der Regel die hinsichtlich Stabilität günstigste Schwerpunktlage einstellen und nicht mehr verändern. Die Trimmung erfolgt dann ausschließlich mit dem Höhenruder. Wird dessen Einstellwinkel erhöht, entsteht hinten mehr Auftrieb und die Nase des Flugzeugs kippt nach unten (Tiefenruder). Wird der Einstellwinkel reduziert oder gar negativ entsteht Höhenruder (Abbildung 12).



1: Höhenruder 2: Normaltrimmung 3: Tiefenruder

Abb. 12 Trimmung: der Einstellwinkel des Höhenleitwerks verändert dessen Auftrieb

## Begriffserklärungen

**Schwerpunkt (SP):** Virtueller Punkt, in dem man sich die gesamte Masse des Flugzeugs vereinigt denken kann. Beim Centaur wird der SP in mm, gemessen von der Flügel-Vorderkante angegeben

**Neutralpunkt (NP):** Rückwärtige Schwerpunktlage bei der bei Abweichungen der Fluglage (z. B. durch Störungen) kein korrigierendes Drehmoment mehr auftritt, das das Flugzeug in die Normallage zurückbringt. Das Flugverhalten ist indifferent (unbestimmt).

**Achsen des Flugzeugs:** Querachse (=Flügelachse), Längsachse (=Rumpfachse), Hochachse (= vertikale Achse)

**Seitenleitwerk (SLW):** Leitwerksfläche, die der Richtungsstabilität und dem Kurvenflug dient (Drehungen um die Hochachse)

**Höhenleitwerk (HLW):** Flügel, der hinter oder vor dem Hauptflügel sitzt und der Stabilisierung um die Querachse dient. Der horizontale Flug sowie Tiefenruder und Höhenruder wird durch das Höhenleitwerk erst ermöglicht.

**Einstellwinkel:** Winkel des Flügels oder des Höhenleitwerks zur Richtung der Rumpflängsachse

**Anstellwinkel:** Winkel des Flügels oder des Höhenleitwerks zur ungestörten Strömungsrichtung

**Einstellwinkeldifferenz (EWD):** Geometrische Winkeldifferenz zwischen Flügel 1 (Tragflügel) und Flügel 2 (Höhenleitwerk).

**Luftdichte** Dichte = Masse/Volumen. Die Dichte der Luft ist bei Normalatmosphäre  $1,225 \text{ kg/m}^3$   
Die Luftdichte nimmt mit zunehmender Höhe ab. In 10.000 m Höhe ist sie nur noch rd.  $0,4 \text{ kg/m}^3$

**Actio= reactio** Newtonsches Gesetz, das besagt das bei Wechselwirkungen zwischen Körpern eine Kraft alleine nicht existieren kann. Es muss immer eine gleich große Gegenkraft geben, die auf den Verursacher zurückwirkt

**Flügelprofil** Querschnitt des Flügels, der so optimiert ist, dass möglichst viel Auftrieb bzw. ein geringer Luftwiderstand entsteht (je nach Flugaufgabe)

**Profiltheorie** theoretische Behandlung der Profilmströmung, wobei ein reibungsbehafteter Anteil nahe Profilwand und ein reibungsloser Anteil weiter entfernt von der Profilwand berücksichtigt wird

**Drehmoment** Kraft x Hebelarm (Nm). Bei Flügeln mit gewölbten Profilen tritt neben der Auftriebskraft ein Drehmoment auf, das bei der Berechnung der Längsstabilität (Neutralpunkt) berücksichtigt werden muss. Im Neutralpunkt ist das Drehmoment konstant (unabhängig vom Auftrieb).

**Stabilitätsmaß** Abstand des Schwerpunktes vom Neutralpunkt

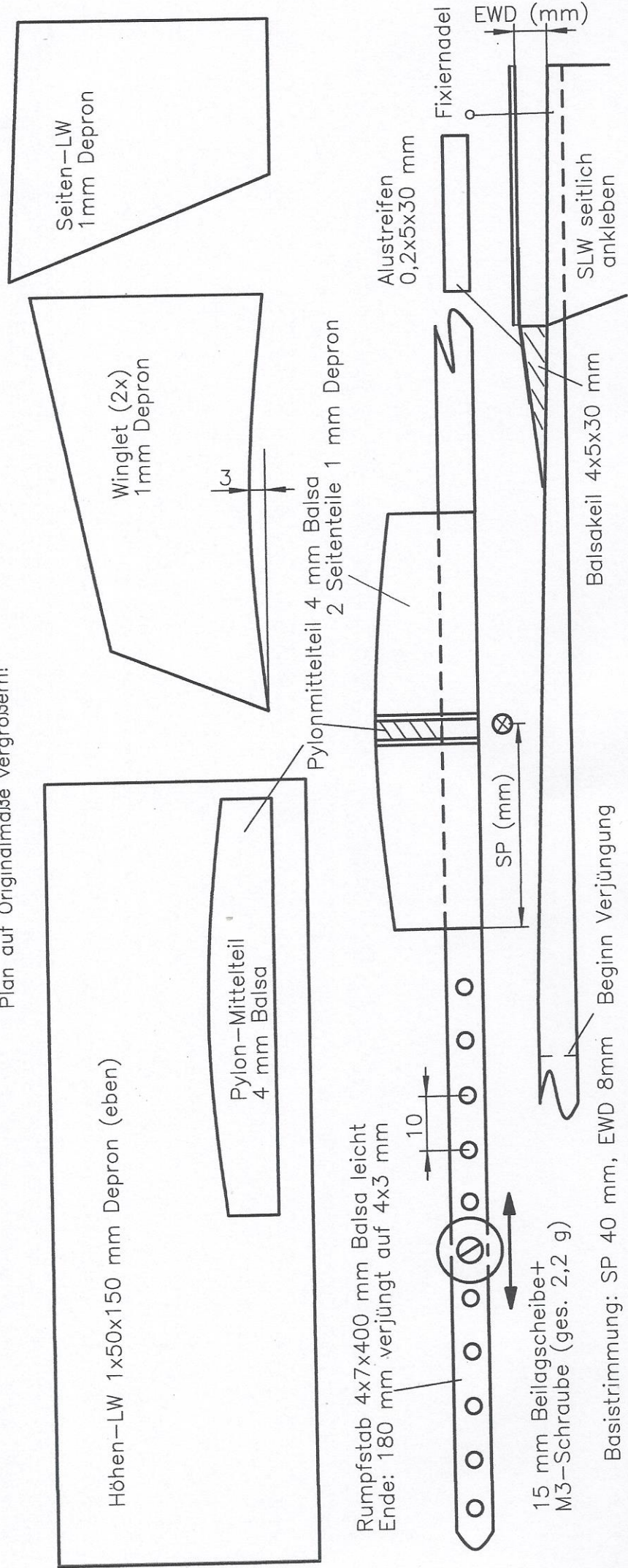
# "Centaur"

Demogleiter für den Physikunterricht  
 H. Eder, 2014  
 Flugmasse 7 Gramm  
 Kleber: UHU por

Flügel 1x80x295 mm Depron  
 gleichmäßig über Flasche mit D ca. 70 mm biegen  
 Wölbung Unterseite 3mm

Winglets von oben aufsetzen!

Plan auf Originalmaße vergrößern!



# Bauanleitung Studien-Modellgleiter „Centaur“

Das Modell wurde für Schulprojekte zum Thema Fliegen/Flugphysik konzipiert und ist aus einfachen Materialien aufzubauen.

Der Bauplan wird auf 1:1 Maß vergrößert. Die Spannweite von 295 mm entspricht gerade einem DIN 4 Blatt (297 mm). Den Drucker ggf. auf die Option „randlos“ einstellen. Ansonsten kann auch auf A3 kopiert werden.

## **Baumaterial:**

Als Baumaterial dient eine handelsübliche 1 mm Depronplatte in DIN A 4 Größe, wie sie z. B. für Dämmzwecke oder Architekturmodelle benutzt wird. Dazu kommt ein Stab aus leichtem Balsaholz mit Abmessungen 4x7x400 mm. Der Stab soll höchstens 1 Gramm wiegen. Dies wird mit Balsaholz einer Dichte von höchstens 100 kg/m<sup>3</sup> erreicht. Auch der Mittelteil des Pylon besteht aus 4 mm Balsa und sollte aus dem gleichen Brettchen wie der Rumpfstab gefertigt werden. Das Höhenleitwerk ist beweglich. Dazu dient ein ca. 5 mm breiter, dünner Alustreifen als Gelenk (z. B. aus Deckel einer Fischdose).

## **Kleber:**

Als Kleber wird UHU Por verwendet.

## **Werkzeuge:**

Minicutterklinge (nicht benutzen Teil mit Klebeband abkleben), 40 cm Stahllineal, Zeichendreieck

## **Rumpfherstellung:**

Mit der Minicutterklinge wird ein 7 mm breiter Streifen mit 400 mm Länge von einem geeigneten 4 mm dicken Balsabrett abgeschnitten (Bezugsquelle z. B. [www.balsawood.de](http://www.balsawood.de)). Die hinteren 18 cm werden auf der Oberseite gleichmäßig auf 4x3 mm verjüngt. Die Bohrungen für das Kopfgewicht werden mit einem 3 mm Bohrer wie im Bauplan angegeben, gebohrt und von vorne durchnummeriert. Zusätzlich wird ein Keil 4x5x30 mm benötigt. Der zugeschnittene Keil wird als Auflage für das HLW-Gelenk (Alustreifen) auf den Rumpfstab oben aufgesetzt. Der Alustreifen 5 x 30 mm wird zur Hälfte auf die Oberseite des Keiles aufgeklebt: Beide Stellen mit Kontaktkleber bestreichen und ca. 10 Minuten (!) trocknen lassen. Die Klebung ist dann absolut zuverlässig. Die andere Hälfte des Alustreifens wird mit dem Höhenleitwerk verklebt – und zwar mit der Unterseite des Leitwerks!

## **Flügelherstellung**

Depronblatt 80 x 295 mm mit der Cutterklinge/Stahllineal ausschneiden (Hinweis: ein Ausschneiden mit der Schere kann zur Verformung des Materials und damit zum Verzug führen). Um das Kreisbogenprofil zu erhalten, wird das Depronblatt gleichmäßig um eine Flasche mit ca. 65 mm Durchmesser (z. B. Bierflasche oder Spraydose) gebogen indem es mit beiden Händen mehrere Male auf die Dosenform „aufmassiert“ wird. Die Wölbung der Unterseite sollte dann ca. 3 mm betragen.

### **Pylon/Wingletherstellung**

Pylon-Mittelteil aus 4mm Balsa (gleiches Material wie Rumpfstab) anfertigen. Zwei Seitenteile aus 1 mm Depron ausschneiden und mit Kontaktkleber mit dem Mittelteil exakt deckungsgleich verleimen. Der Pylon muss straff auf den Rumpfstab passen, sich aber noch verschieben lassen.

Sodann wird auf der Flügel-Unterseite die Mitte rechtwinklig angerissen und der Pylon mit Kontaktkleber von unten aufgeklebt. Auch hier Kleber wieder 5 bis 10 Minuten ablüften lassen. Der Kleber muss sich fast trocken anfühlen.

Die 2 Winglets werden aus 1mm Depron ausgeschnitten. Die konkaven Unterseiten der Winglets werden auf die schmalen Enden des Flügels oben aufgeklebt. Hierdurch ergibt sich die exakte Profilform. Auf gleiche Orientierung der beiden Winglets achten (hohe Seite hinten, niedrige Seite in Flugrichtung gesehen vorne).

Nun wird die Verzugsprüfung gemacht, indem man den Flügel am Pylon nimmt und genau in Flugrichtung durchvisiert. Flügelvorder- und Hinterkante müssen sich decken bzw. parallel sein! Andernfalls Flügel leicht gegensinnig verdrehen. Ein Modell mit verzogenem Flügel würde nicht geradeaus fliegen.

### **Leitwerke**

Seiten- und Höhenleitwerk werden aus 1 mm Depron mit der Cutterklinge ausgeschnitten. Das Seitenleitwerk wird seitlich an den Rumpf geklebt. Der Rumpf muss hinten als Keil auslaufen, damit das Höhenleitwerk genügend nach unten gebogen werden kann (Tiefenruder).

### **Basistrimmung**

Der Rumpf erhält ein Kopfgewicht in Form einer M3-Schraube, einer Mutter und einer Norm-Beilagscheibe (5,3 /15 mm i/aD), welches in Bohrung Nr.6 befestigt wird. Der Schwerpunkt wird am Flügel 40 mm hinter der Flügelvorderkante angezeichnet. Nun verschiebt man den Pylon so lange auf dem Rumpf, bis das Modell um den angezeichneten Schwerpunkt pendelt, wenn man es z. B. mit einer Gabel aus 1 mm Depron dort unterstützt.

Zu dieser Schwerpunktlage wird nun das Höhenleitwerk (HWL) durch Biegen des Alustreifens so eingestellt, dass die HLW-Hinterkante 8 mm über dem Rumpfeende liegt. Eine Nadel dient zur Fixierung der Höhe.

Jede Veränderung der Schwerpunktlage (Veränderung der Position des Nasengewichtes) muss einen Ausgleich mit dem Einstellwinkel des Höhenleitwerkes (EWD-Änderung) zur Folge haben um den getrimmten Flugzustand zu erhalten. Schwerpunkt nach vorne bedeutet: EWD vergrößern (= Leitwerkshinterkante höher stellen) und vice versa.

### **Fehlerquellen:**

Modell fliegt nicht geradeaus.

**Abhilfe:** Flügel hat wahrscheinlich einen Verzug. Visiertest machen (siehe oben). Flügel leicht verdrehen, so dass Flügel vorder- und Hinterkante parallel fluchten, und/oder: Leitwerke nicht parallel bzw. senkrecht zum Flügel, eine Flügelseite schwerer oder nicht symmetrisch.

# Die einzelnen Baustufen beim Bau des „CENTAUR“

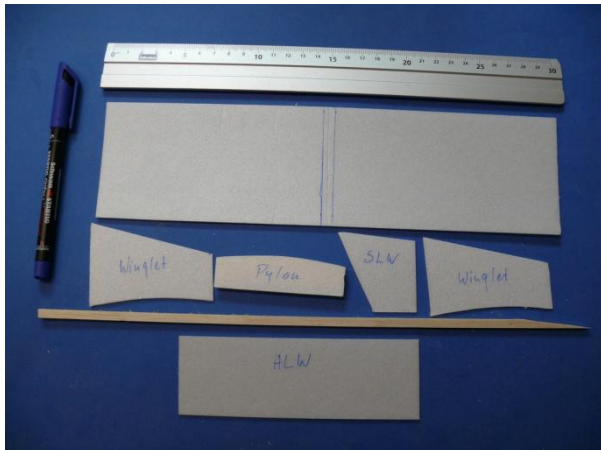


Abbildung 1 Die aus 1 mm Depron ausgeschnittenen Bauteile sowie der Rumpfstab aus leichtem Balsaholz



Abbildung 2 Das über einer Flasche gebogene Flügelprofil aus 1 mm Depron



Abbildung 3 Prüfen auf Verzug: Flügel Vorder- und -Hinterkante müssen parallel sein!

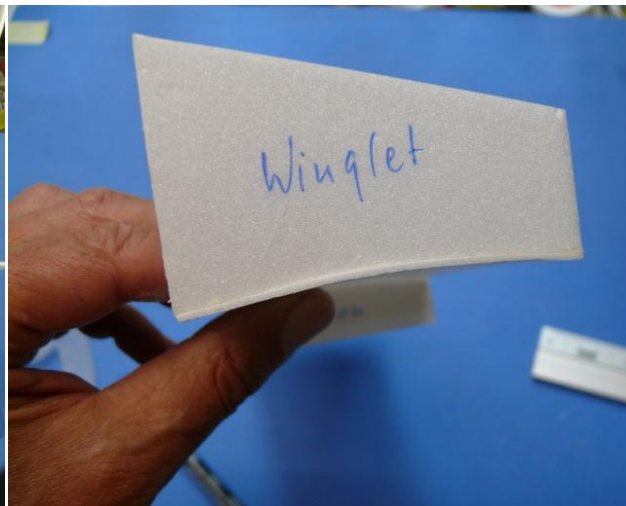


Abbildung 4 Die Winglets am Flügelende geben das Profil vor



Abbildung 5 Das Höhenleitwerk ist zur Veränderung der EWD mit einem biegsamen Gelenk (Alu-Dosenblechstreifen) versehen

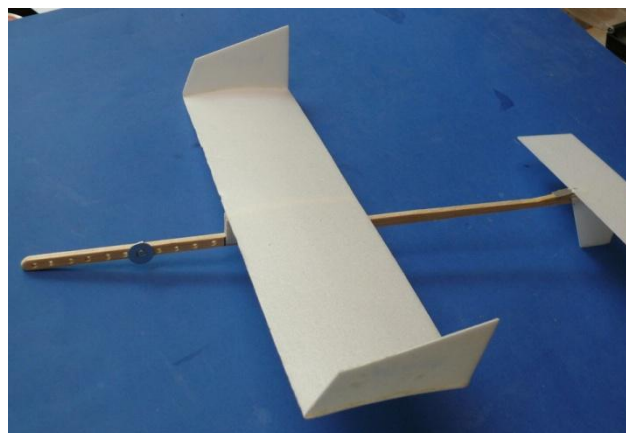


Abbildung 6 Der fertige Gleiter mit Bohrungen im Rumpfvorderteil und Trimmgewicht

---

## **Schüler Fluglabor: Der optimale Flug:**

### Teil 1: Bau des Flugmodells „Centaur“ mit Schwerpunktbestimmung

---

#### **Zielsetzung**

Aufbau des Modells mit den Leichtbaumaterialien Balsa und Depron. Optimierte Deinen „Centaur“ so, dass er die weiteste Flugstrecke zeigt. Hierfür musst Du die optimale Schwerpunktlage finden. Denn, der Schwerpunkt ist das Problem, das beherrscht sein will, wenn man erfolgreich fliegen will. Die Lage des Schwerpunktes bestimmt das Flugverhalten. Wie diese weiter optimiert wird erarbeiten wir in weiteren Arbeitsblättern.

#### **Daten des „Centaur“**

Fluggewicht 7 g, Spannweite 29,5 cm, Länge 40 cm, Material 1 mm Depronplatte, ein Stück Alublech 0,2x5x30 mm (z. B. Dosenblech), Rumpf: leichter Balsastab 4x7x400 mm nach hinten verzüngt auf 4 x 3 mm. Wichtig: Der Rumpfstab sollte nicht wesentlich mehr als 1 Gramm wiegen.

#### **Arbeitsanweisung**

Du arbeitest in Gruppen-

1. Baue Dein Flugmodell nach der Anleitung.
2. Baue eine Schwerpunktwaage aus Karton oder 1 mm Depron. Eine Skizze findest Du am Ende.
3. Stelle fest, wie das Flugverhalten deines Centaur beeinflusst wird, wenn Du den Schwerpunkt deines Flugzeuges veränderst.

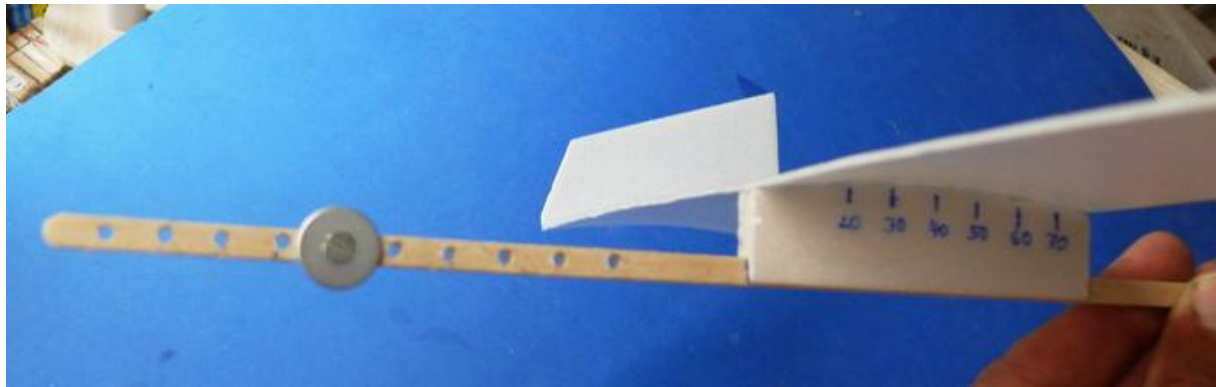
#### **Trimmung**

##### 1. Verzüge

Vor dem Aufstecken des Pylons Flügel und Leitwerk auf Verzüge prüfen: Flügel ca. 50 cm vor dem Auge halten und von vorne anvisieren (ohne ihn zu verdrehen). Die Vorder- und Hinterkante müssen parallel sein. Gleiches gilt für das Leitwerk. Bei einem Verzug den Flügel bzw. das Leitwerk leicht in die entgegen gesetzte Richtung drehen. Modelle mit Verzügen haben eine Kurventendenz. Die Leistung ist meist eingeschränkt. Gestreckte Gleitflüge sind kaum möglich.

##### 2. Festlegung des Schwerpunktes

Erstelle auf dem Pylon- beginnend von der Flügelvorderkante eine Längenskala in 10 mm Schritten (Abb. 1)



**Abbildung 1** Nasengewicht mit Löchern im Rumpfstab zum Verstellen des Schwerpunktes. Die möglichen Schwerpunktlagen am Pylon sind alle 10 mm markiert

Du hast 11 Bohrungen zur Fixierung des „Nasengewichtes“. Diese sind von der Nasenspitze ausgehend durchnummeriert. Fixiere das Gewicht in Bohrung 6.

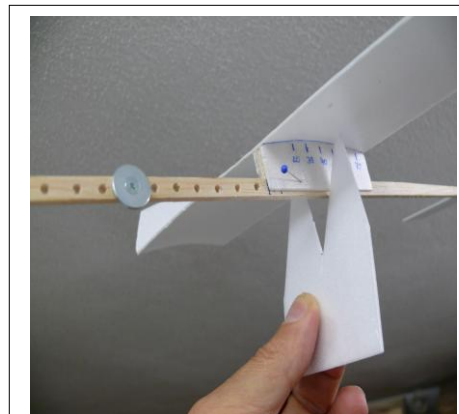
Setze den Pylon 12 cm von der Rumpfspitze so auf, dass er mit dem Rumpf vollständig Kontakt hat. Der Schwerpunkt soll in der Mitte des Pylones (Markierung 40 mm) liegen. Der Schwerpunkt des Flugzeuges ist der Punkt, an welchem es ausgewogen ist.

Wenn Du ein Flugzeug mit der Schwerpunktwaage ausbalancieren möchtest, musst du die Schwerpunktwaage genau am Schwerpunkt des Flugzeuges ansetzen (Abb. 2)

Setze die Waage 40 mm von der Flügel-Vorderkante unter dem Flügel an und verschiebe den Pylon ggf. etwas, bis das Modell um den 40 mm-Punkt pendelt. Markiere diese Pylonlage.

Mit schräg durchgesteckter Nadel den Pylon in dieser Lage fixieren. (Die Nadel soll wegen der Verletzungsgefahr nicht austreten!!!)

Flugfertiges Modell noch einmal bei aufgestecktem Pylon auf Verzug prüfen. . Das Höhenleitwerk muss ferner parallel zur Tragfläche stehen (andernfalls ergibt sich eine Kurventendenz). Das Seitenleitwerk senkrecht dazu.



**Abbildung 2** Ansetzen der Schwerpunktwaage

### 3.Einstellung des HLW



**Abbildung 3** Der Abstand der HLW Hinterkante vom Rumpfhinterende in mm entspricht y

Das Höhenleitwerk (HLW) wird so eingestellt, dass die HLW-Hinterkante 8 mm über dem Rumpfhinterende liegt. Diesen Abstand nennen wir EWD (Einstellwinkel-Differenz) und bezeichnen mit y, Abb. 3. Markiere dazu 8 mm auf einem Papiersteifen oder benutze ein Lineal.

Stecke eine Nadel zur Fixierung der Lage durch den hinteren Teil des HLW bis in den Rumpfstab und kontrolliere die EWD in mm noch mal.

## Flugversuche

### 1. Grundsätzliches zum Starten des Modells

Das Modell darf nicht geworfen, sondern muss beim Abflug sanft in die Flugrichtung geführt werden. Man stelle sich eine Schiene vor, die leicht nach unten geneigt ist, so, wie die Flugbahn des Modells. Falsches Starten führt immer zu einem Höhenverlust. Die Abfluggeschwindigkeit und – Richtung müssen ziemlich genau der Eigengeschwindigkeit bzw. Flugbahnneigung des Modells entsprechen. Die größte Flugstrecke wird nur bei einem einwandfreien Start erreicht (wer kommt am Weitesten?). Viel Gefühl ist hier notwendig.

Wenn die Trimmung durch verändern des Schwerpunktes verändert wird, verändert sich die Fluggeschwindigkeit. Das muss auch beim Startvorgang durch mehr oder weniger Fahrt berücksichtigt werden. Bei Schwerpunktvorlage kann man dem Modell etwas Überfahrt geben, die dann in Flugstrecke umgesetzt wird. Bei Schwerpunktrücklage ist das Modell sehr empfindlich hinsichtlich der Startgeschwindigkeit und der Startrichtung. Die Startgeschwindigkeit muss so weit reduziert werden, dass die Eigengeschwindigkeit des Modells erreicht wird.

### 2. Flugbeobachtungen

**Starte** das Flugzeug und **beobachte** sein Flugverhalten. **Wiederhole** dieses Verfahren zweimal, **notiere** die Daten in der Tabelle. **Zeichne** die Flugbahn auf.

**Verändere** nun die Schwerpunktlage indem du das Nasengewicht um eine Bohrung nach **vorne und dann nach hinten** versetzt. Bestimme die neue Schwerpunktlage in mm (Abstand von der Flügel-Vorderkante).

Diese Flugversuche musst Du anschließend mit weiteren Positionen für das Gewicht durchführen.

Position Gewicht	Flugstrecke:			Flugstrecke Durchschnitt	Flugbahn	Lage SP
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3			
Bohrung 6						
Bohrung 5						
Bohrung 7						

### Ergebnisse aus den Flugversuchen

1. **Gib** die optimale Position für das Gewicht und die entsprechende Lage des Schwerpunktes **an**.
2. **Vervollständige die Sätze:** Wenn die Lage des Gewichtes nach vorne verschoben wird, ändert sich die Lage

\_\_\_\_\_ .

Wenn die Lage des Gewichtes nach hinten verschoben wird, ändert sich die Lage

\_\_\_\_\_ .

## **Abkürzungen und Begriffe**

**Schwerpunkt (SP):** Virtueller Punkt in dem man sich die gesamte Masse des Modelles vereinigt vorstellen kann. Beim Centaur wird der SP in mm von der Flügel-Vorderkante angegeben

**Neutralpunkt (NP):** Schwerpunktlage bei der bei Abweichungen der Fluglage (z. B. durch Störungen) kein korrigierendes Drehmoment mehr auftritt, das das Flugzeug in die Normallage zurückbringt. Das Flugverhalten ist indifferent (unbestimmt).

**Achsen des Flugzeugs:** Querachse (=Achse längs des Flügels), Längsachse (=Rumpfachse), Hochachse (=senkrechte Achse zum Flügel und Rumpf)

**Seitenleitwerk (SLW):** Leitwerksfläche, die dem Richtungsstabilität und dem Kurvenflug (Drehungen um die Hochachse) dient

**Höhenleitwerk (HLW):** Flügel, der hinter oder vor dem Hauptflügel sitzt und der der Stabilisierung um die Querachse dient

**Einstellwinkel:** Winkel zur Richtung der Rumpf-Längsachse

**Anstellwinkel:** Winkel zur Strömungsrichtung weit vor dem Flugzeug

**Einstellwinkeldifferenz (EWD):** Geometrische Winkeldifferenz zwischen Flügel 1 (Tragflügel) und Flügel 2 (Höhenleitwerk). Beim Centaur wird nicht der Winkel sondern die Höhe der Hinterkante des HLW über dem Rumpfeende angegeben und mit  $y$  bezeichnet.

## **Bauanleitung: Schwerpunktwaage**

**Übertrage** die Schablone auf einen Karton oder 1 mm Depron und **schneide** die Schwerpunktwaage **aus**.

---

## Schüler Fluglabor: Der optimale Flug:

Teil 2: Trimmung durch Veränderung von Schwerpunkt und Einstellwinkeldifferenz beim Flugmodell „Centaur“

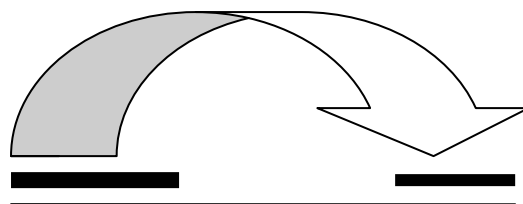
---

### Zielsetzung:

Optimiere im zweiten Schritt das Flugmodell so, dass dein Centaur die längstmögliche Flugzeit besitzt. Hierfür musst Du die optimale Tragflächenposition für verschiedene Winkeleinstellungen des Höhenleitwerkes (HWL) finden. An dieser Tragflächenstellung solltest Du nun die Position des Schwerpunktes feststellen. Denn, wie Du aus dem Teil 1 weißt, ist der Schwerpunkt das Problem, das beherrscht sein will, wenn man erfolgreich Modellfliegen will. Die Lage des Schwerpunktes bestimmt das Flugverhalten.

### Die Einstellwinkeldifferenz (EWD)

Der Einstellwinkel (EW) der Flügelflächen ist der Winkel zwischen der Längsachse des Rumpfes und dem Flügelprofil. Liegt die Tragflächenprofil parallel zur Längsachse des Rumpfes so beträgt der Einstellwinkel  $EW_{\text{Tragfläche}} = 0^\circ$ . Gleiches gilt für das HLW  $EW_{\text{Höhenleitwerk}} = 0^\circ$ .

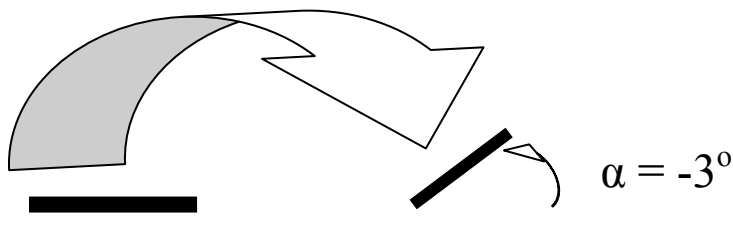


Tragfläche

HWL

Die Einstellwinkeldifferenz ergibt sich zu:  $EWD = EW_{\text{Tragfläche}} - EW_{\text{Höhenleitwerk}} = 0^\circ$ .

**Drehungen im Uhrzeigersinn werden positiv und gegen den Uhrzeigersinn negativ gerechnet.**



Tragfläche

HWL

Ist jedoch das HWL um einen Einstellwinkel  $\alpha = -3^\circ$  geneigt so ergibt sich eine Einstellwinkeldifferenz zu:  $EWD = EW_{\text{Tragfläche}} - EW_{\text{Höhenleitwerk}} = 0^\circ - (-3^\circ) = 3^\circ$

**Ersatzweise messen wir bei den Versuchen statt des Einstellwinkels des HWL den Abstand der HWL-Hinterkante (genauer: Unterkante) zum Rumpfe und bezeichnen den Abstand mit  $y$ .**

### **Daten des „Centaur“**

Fluggewicht 7 g, Spannweite 29,5 cm, Länge 40 cm, Material 1 mm Depronplatte, ein Stück Alublech 0,2x5x30 mm (z. B. Dosenblech), Rumpf: leichter Balsastab 4x7x400 mm nach hinten verzünkt auf 4 x 3 mm. Wichtig: Der Rumpfstab sollte nicht wesentlich mehr als 1 Gramm wiegen.

### **Arbeitsanweisung**

Du arbeitest in Gruppen-

1. **Bearbeite** Teil 1
2. **Stelle fest**, wie das Flugverhalten deines Centaur beeinflusst wird, wenn Du die Einstellwinkeldifferenz deines Flugzeuges veränderst.

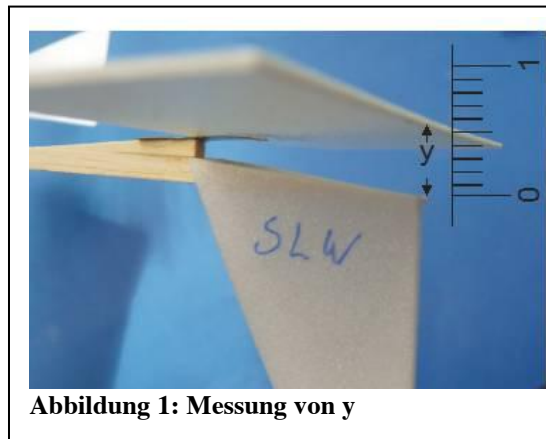
### **Fliegen:**

Das Modell darf nicht geworfen, sondern muss beim Abflug sanft in die Flugrichtung geführt werden. Man stelle sich eine Schiene vor, die leicht nach unten geneigt ist, so, wie die Flugbahn des Modells. Falsches Starten führt immer zu einem Höhenverlust. Die Abfluggeschwindigkeit und – Richtung müssen ziemlich genau der Eigengeschwindigkeit bzw. Flugbahnneigung des Modells entsprechen. Die größte Flugstrecke wird nur bei einem einwandfreien Start erreicht (wer kommt am Weitesten?)

Wenn die Trimmung durch verändern des Schwerpunktes verändert wird, verändert sich die Fluggeschwindigkeit. Das muss auch beim Startvorgang durch mehr oder weniger Fahrt berücksichtigt werden. Bei Schwerpunktvorlage kann man dem Modell etwas Überfahrt geben, die dann in Flugstrecke umgesetzt wird. Bei Schwerpunktrücklage ist das Modell sehr empfindlich hinsichtlich der Startgeschwindigkeit und der Startrichtung. Die Startgeschwindigkeit muss so weit reduziert werden, dass die Eigengeschwindigkeit des Modells erreicht wird.

### **Flugversuche**

**Aufgabe1)** Bei der in Versuch 1 erprobten Schwerpunktlage (40 mm, Gewicht in Bohrung 6, Abstand  $y = 8\text{mm}$ ) wird der Einstellwinkel am Leitwerk verändert bis die beste Leistung geflogen wird. Die EWD wird mit dem Lineal von der Hinterkante Leitwerk (untere Kante nehmen) bis zur Rumpfe gemessen (Abstand  $y$ ) und im Protokoll eingetragen.



**Abbildung 1: Messung von  $y$**

**Messe** zunächst die Höhe des HWL über dem Rumpfe (sollte von Teil 1 8 mm entsprechen) und **verstelle** dann durch biegen die Höhe in Millimeterschritten 3 Stufen nach oben und anschließend von dieser Position Millimeterschritten um 6 Stufen nach unten.

**Gib** in der Tabelle jeweils den neuen Wert für den Abstand  $y$  an.

Jedes Mal, wenn man die Bedingungen des Versuches auf diese Weise verändert hat **stellt** man im Verlauf von mehreren Messflügen die

Flugzeit **fest**, **zeichnet** das Flugverhalten und **bestimmt** die Lage des Schwerpunktes.

**Am besten erfolgen die Versuche durch Abwurf in der Turnhalle von der Empore!**

Die gemittelten Messzeiten der Versuchsreihe werden in ein Koordinatenkreuz **eingetragen**, so dass man schließlich ein Diagramm erhält. Nachdem alle Möglichkeiten der Trimmung ausprobiert worden sind, zeigt die ermittelte Kurve den Bestpunkt, der die Einstellwinkeldifferenz angibt, dem das Modell bei der vorgegebenen Schwerpunktlage seine geringste Sinkgeschwindigkeit erreicht.

	y	Flugzeit:			Flugzeit Durchschnitt	Flugbahn	Lage SP
		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3			
0							
+1							
+2							
+3							
+2							
+1							
0							
-1							
-2							
-3							

- Zeichne** das Diagramm Abstand y in mm gegen Flugzeit in Sekunden und bestimme die beste Einstellwinkeldifferenz.
- Gib** die optimale Schwerpunktlage an.

**Aufgabe 2): Wähle** nun andere Schwerpunktlagen von 30 bis 70 mm, indem Du das Gewicht in andere Bohrungen verschiebst und **führe** bei jeder Lage des Gewichts die Versuchsreihe erneut **durch**.

**Auswertung: Trage** die bei optimaler EWD gemittelten Flugzeiten und die zugehörigen Bohrungslagen des Gewichtes der Versuchsreihen in ein Koordinatenkreuz ein, so dass man schließlich ein Diagramm erhält. Nachdem alle Möglichkeiten der Trimmung ausprobiert worden sind, zeigt die ermittelte Kurve den Bestpunkt, der die Einstellwinkeldifferenz und die Schwerpunktlage angibt, mit dem das Modell seine geringste Sinkgeschwindigkeit erreicht.

---

## Schüler Fluglabor: Flugmodellen das Fliegen lehren

### Teil 3: Neutralpunkt und Schwerpunkt, zwei unterschiedliche Punkte

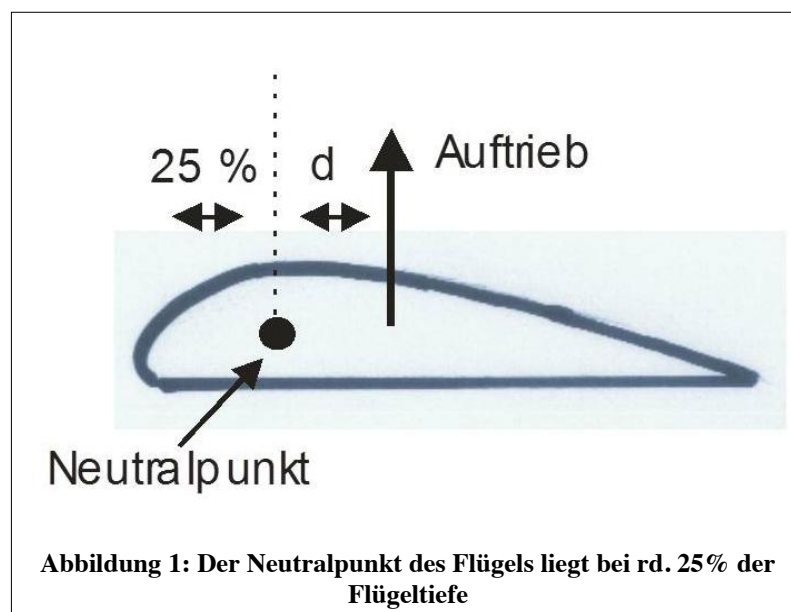
---

#### Zielsetzung:

Bestimme bei deinem Centaur die Lage des Neutralpunktes. Es ist wie im richtigen Leben: Es ist nicht einfach den Schwerpunkt zu finden. Beim Flugzeug hat seine Lage großen Einfluss auf das Flug und Steuerverhalten. Den **Schwerpunkt** kann man sich vorstellen, wenn man sich die gesamte Masse des Flugzeugs in diesem Punkt vereinigt denkt. An diesem Punkt greift die Schwerkraft an. Der Schwerpunkt ist aber nicht identisch mit dem Angriffszentrum der Luftkräfte und Drehmomente eines Flugzeuges. Dieses Zentrum heißt gemeinhin **Neutralpunkt**. Mit der Neutralpunkt-Theorie wurde schon in den 40er Jahren von der NASA ein Instrument entwickelt, aus Flügelgröße und -form wie aus Höhenleitwerksgröße und -abstand den Neutralpunkt des ganzen Flugzeuges zu ermitteln. Um einen stabilen Gleitflug zu erzeugen, soll der Schwerpunkt dann mehr oder weniger weit vor diesem Punkt liegen.

#### Ausgangspunkt: Neutralpunkte der Einzelflügel

Ausgangspunkte für den Gesamt-Neutralpunkt des Flügels sind dabei die Neutralpunkte der einzelnen Flügel: Jede Tragfläche besitzt seinen eigenen Neutralpunkt. Auf den Neutralpunkt einer Tragfläche wirkt unabhängig vom Anstellwinkel - d. h. von der Fluglage - immer das gleiche Drehmoment (Drehmoment ist Kraft  $\times$  Hebelarm). Der Angriffspunkt der Auftriebskraft  $A$  wandert nach vorn wenn der Anstellwinkel des Flügels höher wird und umgekehrt. Steigt der Anstellwinkel, verringert sich auch der Abstand  $d$ . Ludwig Prandtl fand heraus, dass sich der Neutralpunkt eines Profils - also der Punkt mit konstantem Drehmoment - immer ca. 25 % der mittleren aerodynamischen Flügelfläche von der Nase entfernt befindet.



## Neutralpunkt des gesamten Flugzeuges

Der Neutralpunkt des gesamten Flugzeuges resultiert aus den Neutralpunkten der beiden



**Abbildung 2 Lage von Auftrieb der Einzelflügel, Gesamtauftrieb und Schwerpunkt (Angriffspunkt Gewicht)**

Tragflächen sowie dem Abstand der Tragflächen und weiteren Größen. Im Praxistest lässt sich der Neutralpunkt wie folgt ermitteln:

Lässt man das Flugmodell von der Empore der Turnhalle mit der Nase nach unten senkrecht fallen, sollte es sich vor dem Boden in eine stabile Fluglage kommen. Wie schnell dies geschieht, hängt von der Lage des Schwerpunktes im Verhältnis zum Neutralpunkt ab. Liegt der Schwerpunkt weit vor dem Neutralpunkt, kommt das Flugmodell schnell in den gewünschte Lage pendelt jedoch kräftig um die Querachse (unruhiger Wellenflug). Hast Du die optimale Schwerpunktlage, so

wird das Flugmodell ohne langes Nachpendeln in die gewünschte Flugbahn übergehen. Aber es dauert etwas länger. Ist die Schwerpunkt Lage in der Nähe des Neutralpunktes so wird das Modell senkrecht nach unten fliegen und auf dem Boden aufschlagen – Absturz!

Auf diese Weise sind bereits Flugzeuge abgestürzt. Würden in einem Verkehrsflugzeug die Hälfte der Fluggäste aufstehen und gleichzeitig zur hintern Toilette gehen, würde es vermutlich abstürzen weil der Schwerpunkt zu nahe an den Neutralpunkt kommt. Der Pilot kann das nicht mehr aussteuern und das Flugzeug wird indifferent, d. h. orientierungslos. Das muss auch beim Beladen eines Transportflugzeuges beachtet werden.

Der Schwerpunkt muss genügend weit vor dem Neutralpunkt liegen, damit sich das Flugzeug nach einer Störung wieder aufrichtet und normal weiter fliegt.

### **Flugversuche**

Du hast in Teil 1 und Teil 2 deinen „Centaur“ optimal getrimmt und die optimale Schwerpunktlage festgestellt. Für jede Lage des Nasengewichtes hast du einen EWD Wert notiert, der zu einem stabilen Flug führt. Stelle diese beide Werte zusammen ein und lasse Deinen „Centaur“ nun senkrecht nach unten gleiten (am Ende festhalten und nur senkrecht hängend los lassen), beobachte das Flugverhalten und zeichne dies in die Tabelle ein. Verändere nun wieder die Lage des „Nasengewichtes“ indem Du die Position des Gewichtes in andere Bohrungen verlegst und die EWD entsprechend deiner Tabelle aus Teil 2 nachjustierst.

<b>Position Gewicht</b>	<b>Schwingungen:</b>	<b>Flugbahn</b>	<b>Lage SP</b>
Bohrung 1			
Bohrung 2			
Bohrung 3			
Bohrung 4			
Bohrung 5			
Bohrung 6			
Bohrung 7			
Bohrung 8			
Bohrung 9			
Bohrung 10			
Bohrung 11			

Gib die Lage des Neutralpunktes an und begründe Deine Wahl.