

# **PHYSIK, PAPIER und FLIEGER**

Der  
Papierfliegerwettbewerb

*Mit Papierfliegern können wichtige Eigenschaften der Aerodynamik anschaulich vermittelt werden: ein Blatt Papier, ein paar Faltungen und schon kann man experimentieren. Allerdings sind beim Trimmen des Fliegers einige Punkte zu beachten. Besonders wichtig ist die Y-Stellung der Flügel, die ihm Flugstabilität verleiht. Ist der Flieger fertig, dann gilt es, die dem Modell am besten angepasste Wurftechnik herauszufinden. Dazu variiert man Wurfgeschwindigkeit und Abwurfwinkel. Den Boden kann ein Papierflieger auf vier prinzipiell verschiedenen Flugkurven erreichen: Optimal ist die Gerade, dann fliegt er am weitesten.*

## Der Traum vom Fliegen

Der Mensch kann nicht fliegen - aber es war einer der größten Träume der Menschheit sich in die Lüfte zu erheben, der Knechtschaft zu entfliehen, die Seele baumeln zu lassen oder einfach nur die Erde aus einer anderen Perspektive beobachten zu können.



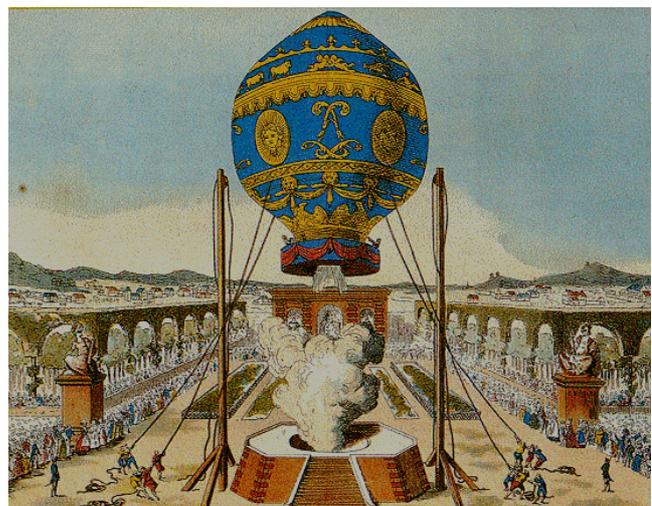
**Dädalus und Ikarus**, die Helden einer griechischen Sage, versuchten durch die Luft der Gefangenschaft zu entfliehen. Der Sage nach, hatte sie König Minos gefangengenommen, nachdem Dädalus das Labyrinth für das Stier-Menschenwesen Minotaurus gebaut hatte. Dädalus fertigte für sich und seinen Sohn Flügel aus Federn und Wachs und sie erhoben sich in die Freiheit. Bei dem Flug kam Ikarus der Sonne zu nahe, das Wachs schmolz und er stürzte ab.

Es ist nur eine Sage und es war für die Menschheit ein beschwerlicher Weg voller Irrtümer und Tragödien bis zum ersten Flug. Auch wenn die technischen Möglichkeiten lange nicht gegeben waren, so beflügelte die Phantasie vom Fliegen die Menschen.

Schon **Aristoteles** (4. Jahrhundert vor Christus) meinte, dass das Element "Feuer" schwerer sei, als das Element "Wasser". Damit war die Idee geboren, mit sogenannten Feuerschiffen durch die Luft zu reisen. Wenn ein Objekt leichter als die Luft ist, dann kann es darin schwimmen, beziehungsweise in der Luft fliegen. Wie aber kann man das Feuer so bändigen, dass man es für den Flug nutzen kann. Die Antwort konnte erst 2100 Jahre später gegeben werden.

An einem kühlen Novemberabend machte **Michel-Joseph de Montgolfier** eine Entdeckung, die ein Genie von einem Normalsterblichen unterscheidet. Er saß vor dem Kamin und beobachtete wie die Rosteilchen des Feuers durch die heiße Luft nach oben getrieben wurden. Dabei kam ihm der Gedanke, dass man doch die heiße Luft in einen Behälter einfangen könnte. Dieser Behälter könnte sich dann vom Boden lösen und fliegen. Man müsste nur an dem Behälter einen kleinen Korb befestigen und schon könnte sich eine Person in die Luft erheben.

Mit seinem Bruder **Etienne Jacques de Montgolfier** experimentierte er mit leichten Stoff- und Papiersäcken, die sie mit heißer Luft füllten. Sie erkannten bald, dass der Behälter - ein Heißluftballon - sehr groß sein müsste, damit er einen Menschen tragen konnte. Nach vielen



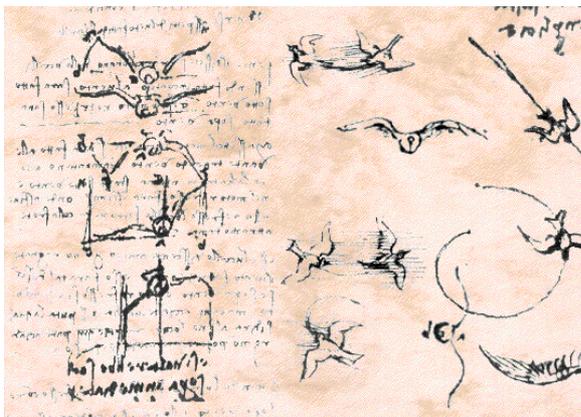
Experimenten konstruierten sie einen unbemannten Heißluftballon, der sich am 4. Juni 1783 in die Lüfte erhob. Er war aus Leinwand gefertigt, mit Papier gefüttert, und mit einem Hanfnetz überzogen. Im August wurde ein Ballon mit Tieren in die Luft geschickt und abermals klappte das Experiment. Endlich, am **21. November**

**1783** startete ein bemannter Heißluftballon der Gebrüder Montgolfier mit Menschen an Bord. Der Mensch hat seine ersten Schritte in die Luft gemacht.

Im 5. Jahrhundert vor Christus experimentierte man in China mit Bambusstäben und Stoff, um flugfähige Apparate zu bauen. Diese Drachen erhoben sich aber nur bei starkem Wind. Sie waren auch noch an Leinen befestigt. Der chinesische Feldherr **Han Hsin** ließ Drachen über die feindlichen Festungen treiben und aus der Länge der Schnur konnte er den Abstand zur belagerten Stellung ermitteln. In Japan baute man Riesendrachen. Mit diesen Drachen wurden Menschen als Kundschafter oder fliegende Bogenschützen in die Lüfte geschickt. In der frühen Heian Ära (782-1184 n. Chr.) wurden kleine Papierflieger aus Holz und dünnem Papier mit scharfen spitzen Nasen gebaut. Nach Meinung einiger Historiker wurde eine große Anzahl dieser Flieger in Schlachten verwendet.



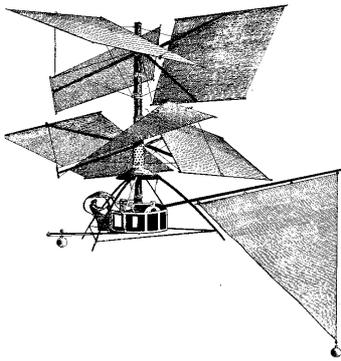
Der Erfinder **Leonardo da Vinci** (1452-1519) konstruierte verschiedenste Fluggeräte. Sie waren wohldurchdacht, aber leider berücksichtigten sie nicht immer die Gesetze der Physik. Die meisten der Apparate sollten mit der Kraft der menschlichen Arme bewegt werden. Der tatsächliche Kraftaufwand überschreitet aber die Möglichkeiten der besten Athleten. Trotzdem waren seine Ideen bahnbrechend. So stellte er Studien über den Vogelflug an, um sich über das Fliegen zu "informieren". Leider schenkte er mehr dem Flugverhalten der Vögel Bedeutung, als den Flügeln - in denen das Geheimnis des Fluges verborgen ist. Er vermutete, dass der entscheidende Punkt beim Flug das Schlagen der Flügel eines Vogels ist - unter den flatternden Flügeln soll ein Gebiet komprimierter Luft entstehen, das den Vogel trägt. Trotzdem war es Leonardo da Vinci, der entdeckte, dass die Luft der Bewegung eines festen



Körpers einen Widerstand entgegensetzt. Er stellte sich gegen die damalige Lehrmeinung, dass Menschen nicht fliegen können. Der Ausspruch "*Wenn Gott gewollt hätte, dass der Mensch fliegt, hätte er ihm Flügel gegeben*", war für ihn mehr Ansporn als Abschreckung. Er dachte über Menschen-betriebenes Fluggerät, über den Hubschrauber und über Fallschirme nach. Leider fehlten ihm damals geeignete Materialien, um selbständig Experimente durchführen zu können. Vielleicht wäre es ihm dann möglich gewesen, mit den Experimenten, ein flugtaugliches Gerät zu entwickeln. Eine Idee funktionierte aber tatsächlich. Sein von ihm entwickeltes Fallschirm wurde im Jahr 2000 nachgebaut und erfolgreich getestet.

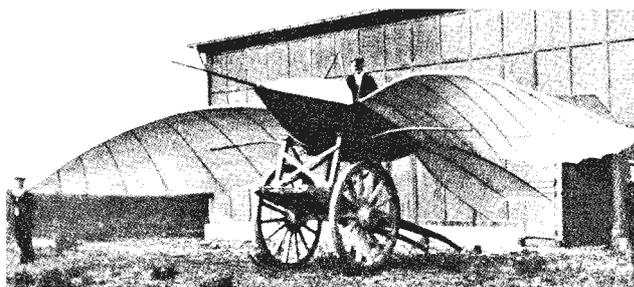
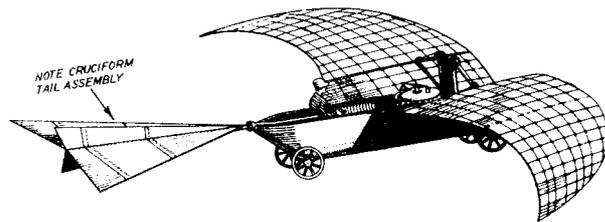
Der Physiker Galilei konnte den Luftwiderstand erstmals experimentell nachweisen und der niederländische Physiker Huygens konnte ein interessantes Gesetz finden: Der Widerstand der Luft ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit des (fliegenden) Objekts. Newton kam aufgrund mathematischer Ableitungen zum selben Schluss. Newton war es auch, der die ersten aerodynamischen Gesetze

aufstellte, aber es war noch ein weiter Weg, bis ein Mensch tatsächlich fliegen konnte.



Es entstanden einige sehr interessante Konstruktionen von einer Vielzahl von Erfindern. So entwickelte der Italiener **Vittorio Sarti** 1828 ein Fluggefährt - eine Mischung aus Hubschrauber und Segelflieger - mit gewaltigen Papierflügeln. Das Gebilde sollte die Kraft von Windböen ausnutzen. Es wurde nie gebaut.

**Werner Siemens** baute im Jahr 1847 das erste mit Schießpulver betriebene Flugzeug. Leider konnte es nur kurze Hüpfen über dem Boden machen.



Das Segelflugzeug von Le Bris wurde beim Start von galoppierenden Pferden gezogen. Abgehoben ist es nicht. Man unterschätzte das Gewicht des Flugzeuges und die Gesetze der Aerodynamik wurden auch nicht berücksichtigt. Die Flügel sehen zwar den Vogelflügeln ähnlich, aber sie besitzen kein Tragflächenprofil.

Der Flugpionier **Otto von Lilienthal** wurde von fliegenden Störchen inspiriert. Schon mit 14 Jahren experimentierte er mit hölzernen Flügeln, um den Vogelflug zu imitieren. Seine Modelle wurden immer größer. Dann kam ihm die Idee, dass



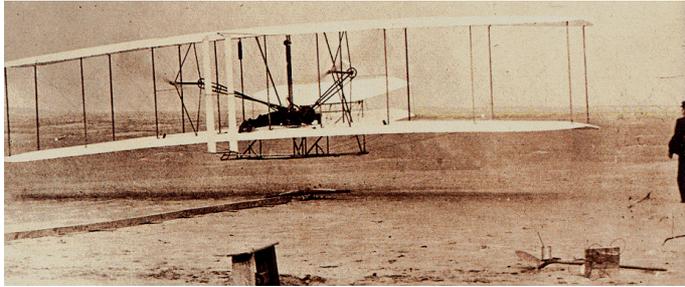
das Profil der Tragflügel wichtig ist. Er entwickelte einen neuen Gleiter, der über eine gewölbte Tragfläche verfügte - diese Idee war der Durchbruch. Im Jahr 1891 startete er mit seinem Gleiter - ein paar Holzverstrebungen mit Papier verkleidet - und er segelte rund 25 Meter durch die Luft. Das war der

Beginn für viele Experimente und Modifikationen an seinen neuen Gleitern, die tatsächlich flogen. Mit den Gleitern gelangen ihm 400 Meter weite Flüge. Er kam auf insgesamt 2000 Flüge. Wenn man bedenkt, dass er für jeden einzelnen Flug, der nur ein paar Sekunden - höchstens ein bis zwei Minuten - dauerte, auf einen Hügel mit dem sperrigen Gleiter klettern musste, dann ist dies aus sportlicher Sicht schon eine beträchtliche Leistung. Am 9. August 1896



starb der Flugpionier, der den Begriff Flugzeug geprägt hatte, an den Folgen eines Absturzes.

Auch **Wilbur und Orville Wright** entdeckten die Leidenschaft für das Fliegen in ihrer Jugend. Als Kinder bekamen sie ein Flugmodell mit Gummimotor geschenkt, das sie nachbauten und verbesserten. Sie waren davon besessen, einen Flieger zu konstruieren, der sich mit Motorkraft - alleine, ohne die Kraft des Windes - in der Luft bewegen konnte. Zuerst bauten sie die Gleiter von Lilienthal nach. Sie mussten aber erkennen, dass die Wölbung der Lilienhalschen Tragfläche nicht



optimal war. So konstruierten sie den ersten Windkanal der Welt, um die Tragflächen zu verbessern. Mit diesen verbesserten Tragflächen konnten sie einen viel stabileren Gleiter bauen. Leider gab es zur damaligen Zeit keinen Motor, der leicht und gleichzeitig leistungsfähig genug gewesen

wäre, um den Gleiter in die Luft zu bringen. Also engagierten sie einen Motortechniker und entwickelten in nur 6 Monaten einen 12 PS- Vierzylindermotor, der weniger als 100 Kilo wog. Am **17. Dezember 1903** begannen die Versuche mit dem ersten motorgetriebenen Flugzeug der Welt. Beim ersten Versuch blieb der Flieger 12 Sekunden in der Luft, die beiden nächsten Versuche endeten mit Bruchlandungen. Im vierten Anlauf klappte es: 260 Meter weit und 57 Sekunden in der Luft - der erste echte motorisierte Flug eines Menschen.

**Damit begann die Eroberung der Luft.**

## **Aerodynamik**

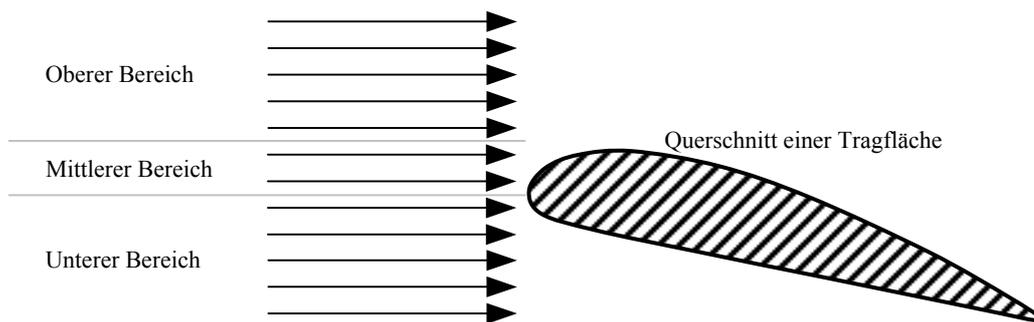
Wenn man aus einem fahrenden Auto die Hand hinaus hältst, dann wird man einen interessanten Effekt beobachten. Die Hand wird leicht nach oben und nach hinten gedrückt. Besonders stark wird die Hand nach hinten gedrückt, wenn man sie quer zur Fahrtrichtung stellt. Hältst man die Hand flach, dann wird sie nur ganz wenig nach hinten gedrückt. Wenn man die Hand leicht schräg hält, wird sie nach hinten und nach oben gedrückt. Genau das selbe passiert beim Fliegen.

Damit sich ein Flugzeug in die Lüfte erheben kann, bedarf es einer Tragfläche. Bei dem Experiment mit dem fahrenden Auto war die Hand die Tragfläche. An dieser Tragfläche treten drei verschiedene Effekte auf, die in unterschiedlicher Weise auf das Fliegen einen Einfluss haben. Diese drei Effekte führen zum Auftrieb – der Kraft die ein Objekt, zum Beispiel die Hand, zum Fliegen bringt.

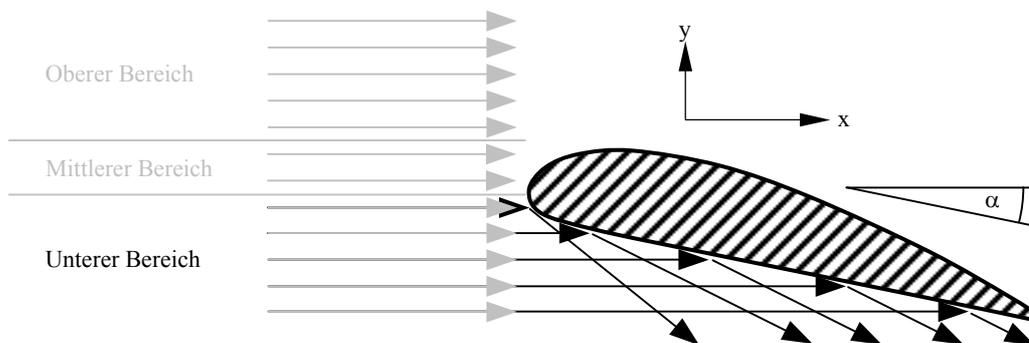
**Die Kraft, welche die Tragfläche nach oben drückt, wird als dynamischer Auftrieb bezeichnet.**

**Die Kraft, welche die Tragfläche nach hinten drückt, wird als Luftwiderstand bezeichnet.**

Betrachten wir den Querschnitt einer Tragfläche mit dem dazugehörigen Luftstrom. Unterteilen wir den Luftstrom in drei verschiedene Bereiche: den unteren, den mittleren und dem oberen Bereich.

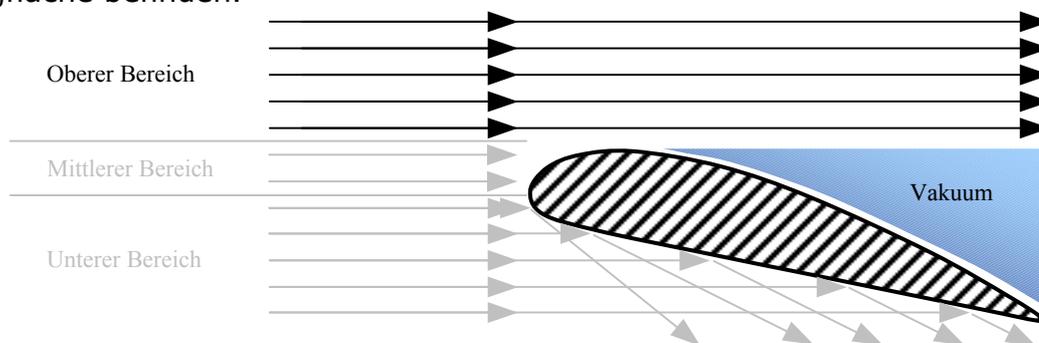


**1. Effekt:** Betrachten wir die Luft, die auf die Tragflächenunterseite trifft. Die Luftteilchen prallen auf die Tragflächenunterseite und drücken die Tragfläche nach oben und nach hinten. Deshalb muss jede Tragfläche einen sogenannten Anstellwinkel besitzen. Der Anstellwinkel ist der Winkel zwischen dem Luftstrom und der Tragfläche. Wenn dieser Winkel  $0^\circ$  ist, dann können keine Teilchen reflektiert werden. Jede Tragfläche benötigt einen positiven Anstellwinkel !

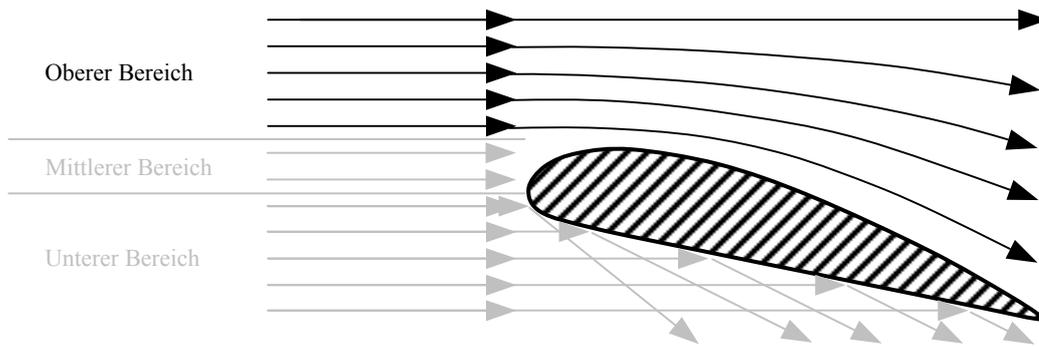


Aufgrund elastischer Stöße werden die Luftmoleküle auf der Tragflächenunterseite reflektiert.

**2. Effekt:** Betrachten wir nun den oberen Luftstrom. Die Luft strömt über die Tragflächenoberseite. Man könnte erwarten, dass sich die Luft über der Oberseite der Tragfläche gerade weiterbewegt. Allerdings würde dann auf der Oberseite der Tragfläche ein Vakuum, beziehungsweise ein Unterdruck entstehen. Dieser Unterdruck führt dazu, dass die Tragfläche nach oben gesaugt und der Luftstrom nach unten abgelenkt wird. Die Ablenkung ist umso größer, je näher sich die Luftteilchen bei der Tragfläche befinden.

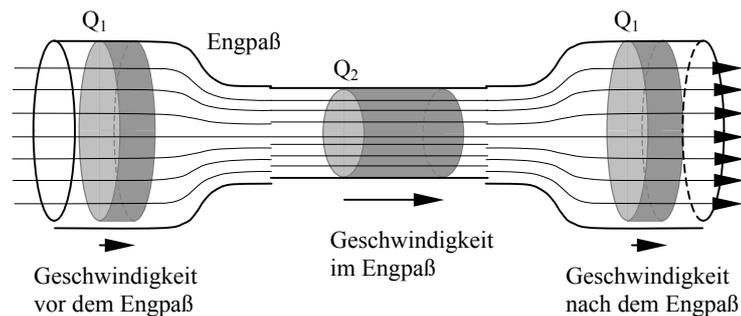


Dieser Unterdruck führt dazu, dass die Tragfläche nach oben und der Luftstrom nach unten abgelenkt wird. Natürlich werden die Luftteilchen, die sich in der Nähe der oberen Kante befinden, stärker abgelenkt als Teilchen, die eine größere Entfernung von der Tragfläche haben.



Natürlich könnte man auch mit der Impulserhaltung argumentieren. Da ein Strom von Teilchen, der sich horizontal bewegt, nach unten abgelenkt wird, muss nach der Impulserhaltung die Tragfläche nach oben „gezogen“ werden.

**3. Effekt:** Betrachten wir nun den mittleren Bereich der Luftströmung. In diesem Bereich wirkt vor allem das Gesetz von Bernoulli. Der Luftstrom aus dem mittleren Bereich trifft auf den vorderen Bereich der Tragfläche – ein Hindernis stellt sich in den Weg. Aus einem Stromlinienbild kann man die Geschwindigkeit der bewegten Teilchen leicht ablesen (zumindest relativ). An den Engpässen liegen die Stromlinien näher bei einander. Je enger die Stromlinien liegen, umso schneller bewegt sich das Gas. Wenn sich ein Volumen in einem Rohr bewegt, und dieses Volumen auf einen Engpass trifft, müssen sich die Teilchen des Gases schneller bewegen.

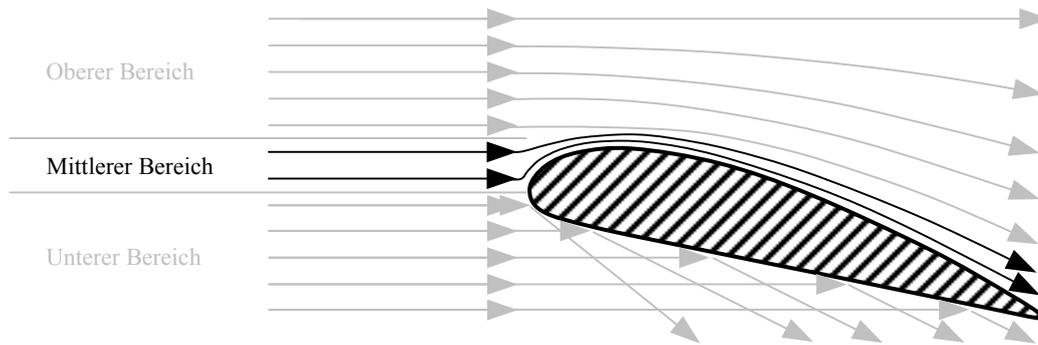


Da Flüssigkeiten und im wesentlichen auch Gase nicht komprimiert werden können (zumindest in dem Geschwindigkeitsbereich, der für Papierflieger wichtig ist), müssen die Teilchen ihre Geschwindigkeit steigern, damit das ganze Volumen, wenn es wieder aus dem Engpass herauskommt, die ursprüngliche Geschwindigkeit besitzt. Nehmen wir ein Volumen mit einem Querschnitt  $Q_1$ , der sich mit einer gewissen Geschwindigkeit  $v_1$  durch das Rohr bewegt. Im Engpass verkleinert sich der Querschnitt auf  $Q_2$ , aber die Geschwindigkeit steigt auf  $v_2$  an, das Volumen  $V$  muss über die ganze Zeit erhalten. Es können keine Teilchen hinzukommen oder wegfallen und aufgrund der Inkompressibilität bleibt das Volumen konstant. Daraus folgt:

$$Q_1 \cdot v_1 = Q_2 \cdot v_2 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Die Strömungsgeschwindigkeiten stehen also im umgekehrten Verhältnis zu den Querschnittsflächen.

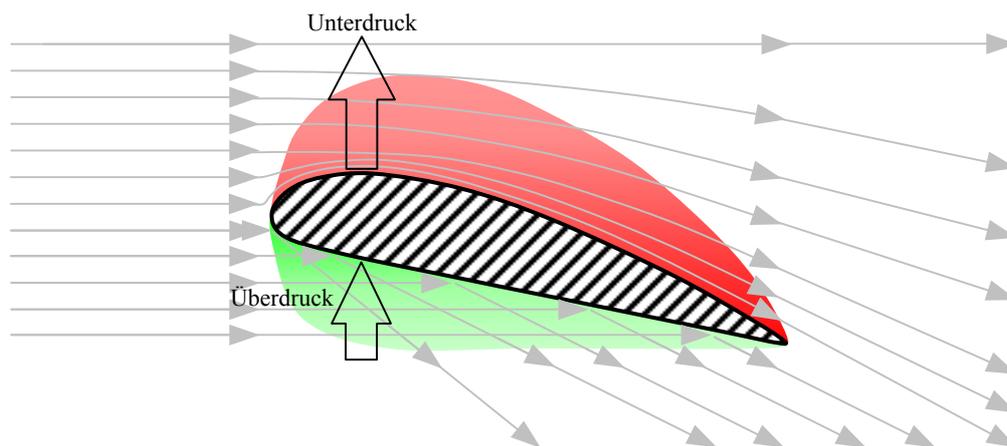
**Bernoullisches Prinzip: Trifft ein Gas auf ein Hindernis, so wird sich das Gas beim Hindernis schneller bewegen und es entsteht ein Unterdruck.**



Die Teilchen müssen den Weg über die Tragflächenoberseite nehmen. Durch das Hindernis müssen die Abstände der Stromlinien kleiner werden. Damit steigt die Geschwindigkeit der Luftteilchen, der Staudruck steigt, während der statische Druck sinkt. Im Bereich der größten Verengung entsteht ein Unterdruck (verminderter statischer Druck) und die Tragfläche wird nach oben gezogen.

Der Druck auf die Tragflächenunterseite, der Unterdruck auf die Tragflächenoberseite und der Bernoulli-Effekt führen zum Auftrieb, beziehungsweise zum Flug.

Wenn wir alle Kräfte betrachten, so erhalten wir folgende Darstellung:



**Je schneller sich das Flugzeug bewegt, umso stärker wird es steigen. Der Auftrieb ist geschwindigkeitsabhängig.**

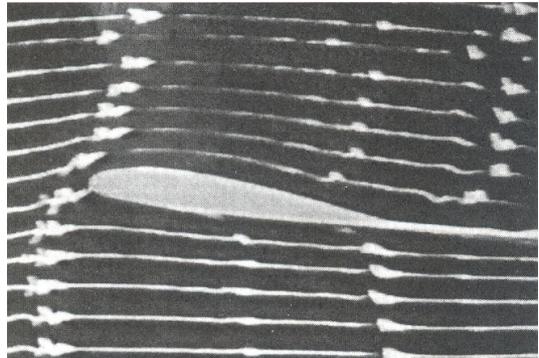
**Wenn sich der Anstellwinkel ändert, dann ändert sich der Auftrieb.**

Für jedes Flugzeug gibt es einen optimalen Anstellwinkel der Tragfläche für einen perfekten Flug.

## Vorurteile zum Fliegen – falsche Erklärungen

Häufig wird das Phänomen Fliegen NUR mit dem Bernoulli-Effekt erklärt. Oben bewegt sich der Luftstrom schneller über die Tragfläche als auf der Tragflächenunterseite und dadurch ...

Aber: Diese Erklärung implementiert, dass die beiden Luftströme hinter der Tragfläche wieder zur selben Zeit hinter der Tragfläche zusammentreffen. Dies ist falsch, wie das nebenstehende Foto zeigt. Damit ist der Lehrsatz von Bernoulli nicht anwendbar.



Die Wölbung der Tragfläche – so wie man sie in den meisten Lehrbüchern findet – ist mehr eine theoretische Angelegenheit. Praktisch findet man fast nur symmetrisch gewölbte Tragflächen. Das bedeutet, dass die Tragflächenunterseite genauso stark gewölbt ist, wie die Tragflächenoberseite. Die Wölbung hat nicht die Aufgabe den Auftrieb zu erhöhen, sondern ihn nicht zu verhindern. Bei höheren Geschwindigkeiten können hinter der Tragfläche störende Wirbel auftreten. Durch die Wölbung entstehen weniger Wirbel. Die Wirbelbildung würde den Unterdruck auf der Tragflächenoberseite zerstören.

Es gibt ein schönes Argument, warum die Tragflächenwölbung eine untergeordnete Rolle beim Fliegen spielt. Praktisch alle Flieger können auf dem Rücken fliegen. Der Rückenflug wirkt zwar sehr spektakulär, aber wenn der Pilot etwas Übung hat, muss er nur auf den richtigen Anstellwinkel achten und schon funktioniert dieses Meisterstück. Wäre die Wölbung von so großer Bedeutung, dann müsste der Flieger nach unten gesaugt werden.

Praktisch kann man aus einem schräg gestelltem Brett einen Flieger bauen.

## Die Physik des Papierfliegers

Am Anfang erhält der Papierflieger seine Beschleunigung von der Kraft des Wurfarms. Durch den Luftwiderstand wird das Flugzeug aber abgebremst und die Nase kippt nach vorne - das Flugzeug besitzt jetzt die charakteristische Geschwindigkeit. Jetzt zeigt es sich ob ein Papierflugzeug wirklich fliegen kann und aerodynamische Eigenschaften besitzt oder ob es einfach abstürzt. Wenn der durch die charakteristische Geschwindigkeit verursachte Auftrieb im Gleichgewicht mit dem Gewicht ist, dann gleitet der Flieger auf einer Geraden und verliert keine Höhe. Aufgrund des Luftwiderstandes nimmt die Geschwindigkeit aber ab, der Auftrieb sinkt und der Papierflieger sinkt zum Boden hin.

Wenn die Nase leicht nach unten kippt und die Schwerkraft das Flugzeug nach unten zieht und eine ausreichende Geschwindigkeit vorhanden ist, dann sollte das Flugzeug zum Gleiten beginnen. Die Geschwindigkeit und der Neigungswinkel ändern sich dann nicht mehr. Wenn das Flugzeug genügend Auftrieb besitzt dann

gleitet es über eine schöne lange Distanz bis es in Ruhe landet. Wenn der Auftrieb der charakteristischen Geschwindigkeit während des Fluges nicht mehr ausreicht dann stürzt das Flugzeug ab.

### **Stabilität, Schwerpunkt und Luftauftriebspunkt**

Im Prinzip ist ein Papierflieger einfach ein Blatt Papier, das schräg zur Luftströmung steht: Wozu muss es – bei manchen Modellen auch noch so aufwendig – gefaltet werden? Diese Faltung hat drei Aufgaben. Erstens gibt sie dem Blatt eine stabile Form und verhindert so, dass es in der Luftströmung flattert. Zweitens legt die Art der Faltung die Lage des Schwerpunkts und des Luftauftriebspunkts fest, also dem Punkt, an dem der Auftrieb geometrisch zusammengefasst werden kann. Bei manchen Modellen hat sie auch noch die dritte Aufgabe, die Tragfläche leicht nach oben zu wölben.

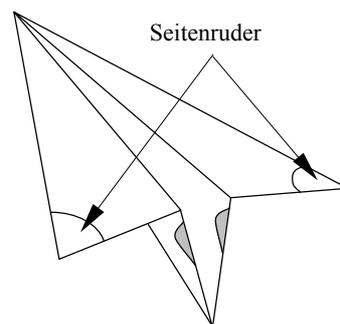
Für die Stabilität des Papierfliegers sorgen im Wesentlichen seine Längsfaltungen, vor allem der lange Knick zwischen Rumpf und Tragfläche. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Tragflächen in den Flieger hinein zu falten: parallel zum Rumpf oder in einem leicht schrägen Winkel zu ihm. Eine schräge Faltung verschiebt die Lage des Schwerpunkts relativ zum Luftauftriebspunkt: Zum Heck hin lässt diese Faltung die Tragflächen etwas kleiner werden, während die Höhe des Rumpfs wächst, das senkt auch den Auftrieb im hinteren Bereich des Fliegers.

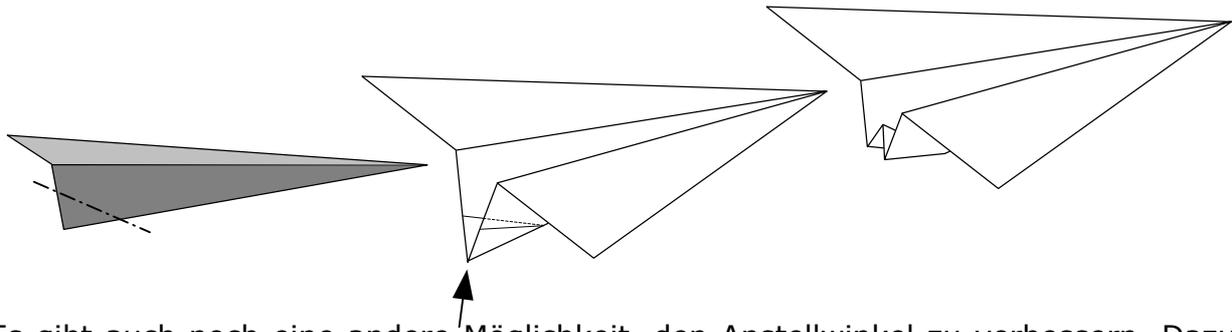
Für einen stabilen Flug muss sich der Schwerpunkt vor dem Luftauftriebspunkt befinden. Dadurch kippt der Papierflieger mit der Spitze nach unten, gewinnt durch die Erdbeschleunigung an Fahrt und damit an Auftrieb, der aber in der Gleitphase immer kleiner als die Schwerkraft bleibt. Liegt der Schwerpunkt aber zu weit vorne, dann bekommt der Flieger seine Nase nicht hoch und stürzt steil auf seine Spitze ab. In diesem Fall sollte der Schwerpunkt relativ zum Luftauftriebspunkt etwas nach hinten korrigiert werden.

Bei manchen Fliegern liegt der Schwerpunkt zu nahe am Luftauftriebspunkt. Dadurch zieht die Schwerkraft nicht mehr vor allem die Spitze des Fliegers nach unten, sondern ihn „als Ganzes“ parallel zum Boden. Das führt ebenfalls zu einem unkontrollierten Absturz. Mit einer Büroklammer kann man das verhindern, wengleich das unehrenhaft für einen echten Papierfliegerbauer ist. Dazu wird die Büroklammer in das vorderen Drittel des Rumpfes gesteckt und durch Probieren optimal positioniert.

### **Ehrenhaftes Feintuning**

Ehrenhafter unter Papierflugzeugkonstrukteuren sind Änderungen an der Konstruktion ohne Hilfsmittel aus Fremdmaterialien. Diese beeinflussen dann nicht den Schwerpunkt, sondern den Anstellwinkel. Dazu kann man zum Beispiel die hinteren Ecken der Tragflächen leicht hoch biegen. Diese Biegung sollte kaum sichtbar sein, um eine optimale Wirkung zu erzielen – unter gar keinen Umständen darf man die Ecken der Tragfläche richtig umknicken und man sollte auch keine „Luftklappen“ am Flügelende einreißen. Die hoch gebogenen Tragflächen erhöhen den Luftwiderstand und lassen den Flieger nach hinten kippen: Dadurch stellt er sich auf, sein Anstellwinkel wird größer und er gleitet dann meist auch besser. Allerdings müssen beide Flügelenden des Fliegers genau gleich stark gebogen sein, sonst macht er eine Kurve.





Es gibt auch noch eine andere Möglichkeit, den Anstellwinkel zu verbessern. Dazu knickt man ein Dreieck in das Rumpffende und faltet es in den etwas gespreizten Rumpf hinein. Auch dieses Dreieck erhöht den Luftwiderstand hinten am Flieger und bewirkt somit den gleichen Effekt wie die aufgebogenen Tragflächen. Nach Bedarf kann man die Größe des Dreieckes und seine „Aufstellung“ variieren.

Eine weitere Variante, den Luftwiderstand im hinteren Bereich des Papierfliegers zu erhöhen, besteht in der Verwendung von zwei parallelen Einschnitten von unten in den Rumpf hinein. Dabei entsteht eine Lasche, die man nach oben umklappt, sodass sie oben aus dem Flieger heraus ragt. Auch sie vergrößert als „Luftbremse“ den Anstellwinkel. Allerdings vermindert der Einschnitt in den Rumpf die Stabilität des Fliegers.

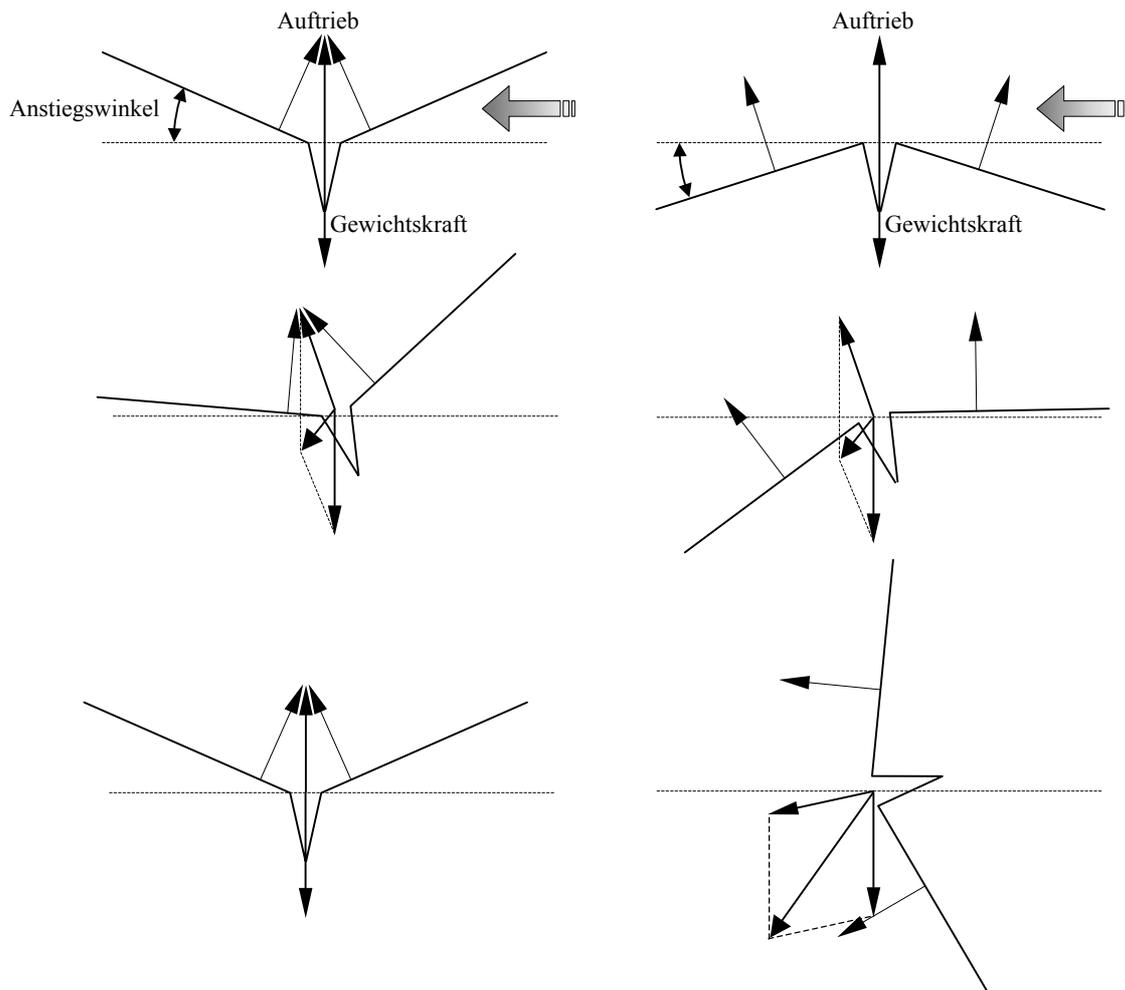
### Die letzte Faltung

Viele bauen einen perfekten Papierflieger, geben sich bei den oft komplizierten Faltanweisungen sehr viel Mühe – und vergessen dabei das Wichtigste: die letzte Faltung. Diese sollte den Tragflächen eine leicht nach oben gerichtete Stellung geben, sodass der Flieger von hinten betrachtet die Form eines Y bekommt (Abbildung 4, linke Spalte). Diese Y-Stellung (auch Dihedral-Stellung) verleiht ihm einen stabilen Flug durch die minimalen Luftturbulenzen, die überall auftreten.

Trifft eine solche Turbulenz den Flieger von der Seite, dann zwingt sie ihn zum Rollen, also einer Drehung um seine Längsachse. Die Y-Stellung wirkt diesem Effekt entgegen. Sie sorgt dafür, dass die Auftriebskräfte einerseits nach oben und andererseits zum Rumpf hin gerichtet sind.

Kippt der Flieger um seine Längsachse, dann entstehen an den beiden Tragflächen unterschiedliche Auftriebswerte. Die der Störung abgewandte Tragfläche hat einen kleineren Anstiegswinkel als die der Störung zugewandte Tragfläche. Infolgedessen ist auch ihre „effektive“ Fläche in der Projektion parallel zur Erdoberfläche größer und trägt somit mehr zum Auftrieb bei (Mitte links): Dadurch rollt der Flieger wieder in die ursprüngliche Lage zurück (links unten).

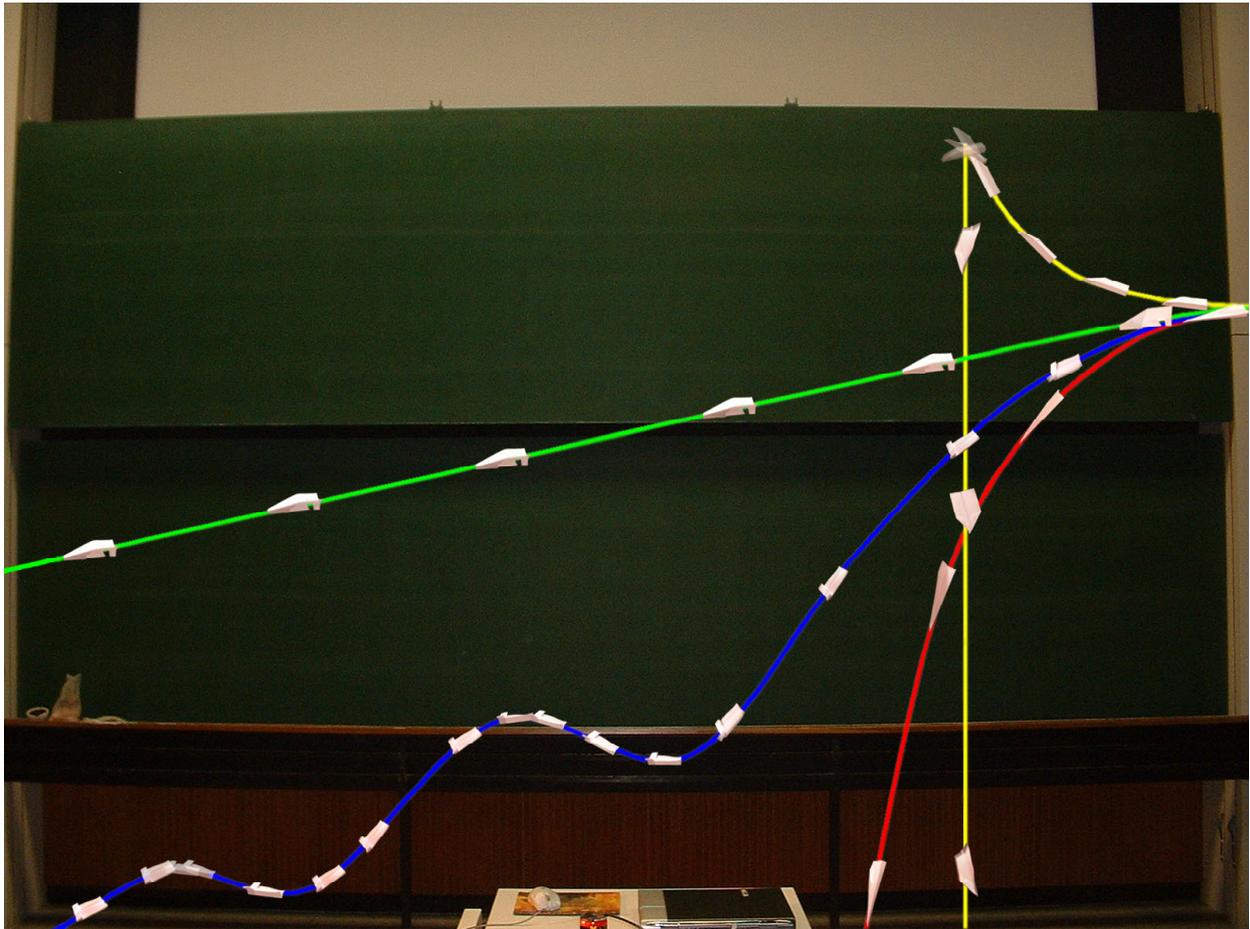
Alternativ könnte man auch eine negative Y-Stellung mit nach unten „hängenden“ Flügeln falten. Bei ihr würden dann die Auftriebskräfte nach oben und in seitlicher Richtung weg vom Rumpf wirken. Beim Rollen kehren sich nun die Verhältnisse um: Die Tragfläche, welche die Störung trifft, bekommt wegen des „günstigeren“ Winkels zur Erdoberfläche einen höheren Auftrieb als die andere Tragfläche (Mitte rechts). Das verstärkt nun die Rollbewegung, der Flieger trudelt und stürzt ab. Das erklärt übrigens auch, warum die letzte Faltung eine T-Stellung der Tragflächen unbedingt vermeiden muss. Nach dem Loslassen öffnet sich nämlich der Rumpf, die Tragflächen kippen nach unten, und so erhält man ungewollt eine negative Y-Stellung.



### Der richtige Wurf

Einen Papierflieger zu bauen ist eine Sache – ihn fliegen zu lassen eine andere. Viele Fehler passieren nicht beim Falten, sondern beim Abwurf. Leider ist es nicht einfach zu erklären, mit welcher Geschwindigkeit man einen Flieger in die Luft entlassen sollte. Der entscheidende Tipp besteht in der alten Weisheit: Übung macht den Meister. Versuchen Sie ruhig verschiedene Geschwindigkeiten und Startwinkel beim Abwurf. Vergessen Sie nicht, dass der Auftrieb eines Fliegers sehr stark von der Geschwindigkeit abhängt: Manche Flieger eignen sich eher für geringe Abwurfgeschwindigkeiten, während andere Flieger mit der ganzen Kraft des Arms in den Raum geschleudert werden müssen.

Den Boden erreicht ein Papierflieger im Prinzip über vier verschiedene Flugkurven, für die Abwurfgeschwindigkeit und der Abwurfwinkel die ganz wesentlich sind. Im einfachsten „Fall“ entspricht die Bahn einer Wurfparabel und der Flieger stürzt ab (Abbildung 5, rote Kurve). Entweder ist dann der Flieger vorne zu schwer, der Anstellwinkel zu klein oder die Abwurfgeschwindigkeit zu gering. Bringt eine Erhöhung der Wurfgeschwindigkeit kein besseres Resultat, dann probieren Sie es mit der Faltung eines Rumpfdreieckes oder biegen sie die hinteren Ecken der Tragflächen nach oben.



Es kann auch passieren, dass der Flieger nach dem Loslassen erst stark steigt, bis zum Höhepunkt seiner Flugkurve an Geschwindigkeit und Auftrieb verliert, dann überzieht und steil abstürzt. Für diesen Fall gibt es mehrere Lösungen. Man kann die Abwurfgeschwindigkeit stark reduzieren und den Flieger nur mit einem sanften Abwurf in die Luft entlassen. Damit ist der Auftrieb geringer und es kommt nicht zum Überziehen. Eine andere Lösung besteht darin, die hinteren Flügelecken nach unten zu biegen. Damit wird der Anstellwinkel kleiner, aber der Auftrieb sollte noch immer ausreichen. Die unehrenhafte Lösung wäre die Verwendung einer Büroklammer – wiederum im vorderen Drittel des Bugs.

Normalerweise kommt es aber zum Pendeln: Der Flieger sinkt zuerst stark, dabei steigt seine Geschwindigkeit und dadurch wächst sein Auftrieb, das lässt ihn wieder steigen, doch dabei verliert er Tempo und kippt schließlich mangels Auftrieb vornüber, sinkt erneut stark und wird wieder schneller. So geht es weiter, bis der Flieger landet. Das Pendeln verursacht eine zu starke Luftbremse am Heck, und damit ein zu großer Anstellwinkel. Diese Bremse muss man dann durch „Trimmen“ entschärfen, also je nach Konstruktion die hinteren Tragflächenecken zurück biegen oder das Rumpfdreieck verkleinern – oder ganz wegnehmen.

Man benötigt etwas Erfahrung und Zeit, um einen Papierflieger zu so trimmen, dass er einen absolut perfekten Gleitweg in Form einer Geraden nimmt. Dann erzielt man die größten Weiten.

## **Papier ist nur begrenzt geduldig**

Es gibt sehr viele Sorten von Papier, aber für den Bau von Fliegern gibt es nur ein Unterscheidungsmerkmal: geeignetes oder ungeeignetes Papier. Geeignetes Papier besitzt eine Knickstabilität, die Falze bleiben also beim Flug erhalten. Deshalb taugen weder Zeitungspapier oder Papierhandtücher. Auch Karton oder schweres Papier sollte man meiden, denn es lässt sich nur schwer falten und es besitzt keine Spannkraft: Die Falze sind sehr starr, federn nicht und der Flieger kann sich nicht an die Luftbewegungen anpassen.

Geeignet ist jedes Papier mit  $80\text{g/m}^2$ . Kopierpapier ist am billigsten und erfüllt alle wichtigen Bedingungen. Papier, auf dem schon kopiert wurde, ist um sogar eine Spur besser, denn es wird durch das Kopieren steifer und fester. Das Papier kann sich in Textur, Tönung und Dicke unterscheiden. Für spezielle Origami-Modelle eignet sich  $40\text{g/m}^2$ -Papier ausgezeichnet, dann flattern ihre Flügel tatsächlich beim Fliegen. Leider funktioniert dieser Effekt nur einige Male, weil bei diesem dünnen Papier die Falze schnell an Spannkraft verlieren.

Wenn man schön bunte Modelle haben möchte, kann man auch Geschenkpapier verwenden – es ist ausreichend knickfest. Leider muss man es dann noch auf das A4-Format zurecht schneiden, das die meisten Modelle brauchen. Letztlich kann man aus den ungewöhnlichsten Papieren schöne Flieger bauen: Fahrkarten, Prospekte – oder Speisekarten, wovon aber in den meisten Restaurants abzuraten ist.

## **Probleme mit dem Flieger**

Anfänger vergessen gerne auf die Y-Stellung. Dies ist einer der am meisten gemachten Fehler. Überprüfen Sie das Flugzeug auf seine Symmetrie (Y-Stellung und Trimmung).

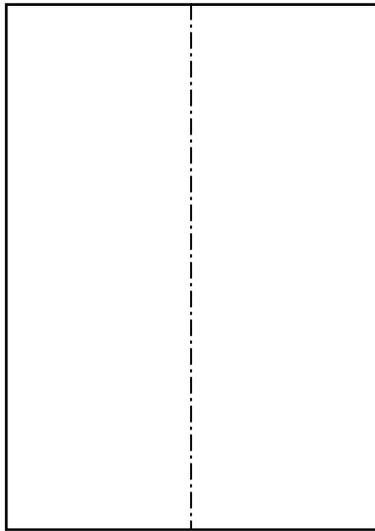
Manche Flieger baut man 10 mal und nur einer davon fliegt. Dies lässt auf ein Problem mit der Abwurftechnik schließen. Seien Sie nicht frustriert, wenn es nicht auf Anhieb klappt. Überlegen Sie sich eher warum der Flieger abstürzt, zur Seite rollt oder in Kurven fliegt. Man kann es meistens ändern. Es gibt aber auch den Fall, dass man den Flieger einfach nicht zum Fliegen bringt. Dies macht auch nichts - ein neues Blatt Papier und in ein paar Minuten ist ein neuer Flieger gebaut.

Bei manchen Fliegern entstehen durch die Faltungen Wölbungen. Diese Wölbungen sollte man mit der flachen Hand glatt streifen. Sollte der Flieger nicht schön gleiten, dann kann es sehr viel bringen, diese Wölbungen wieder herzustellen - sachte.

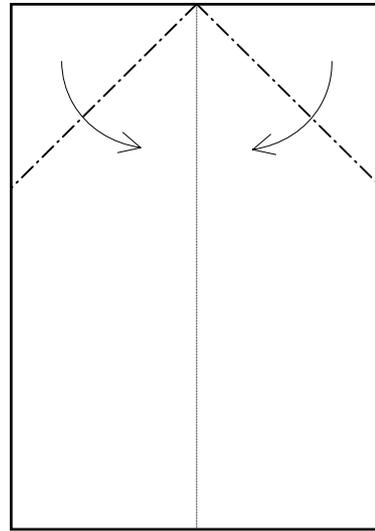
Machen Sie selbst Experimente mit Papier - und wenn es nichts wird, einfach ins Altpapier und mit einem neuen Flieger beginnen. Man kann selten so schöne ästhetische Experimente mit der Natur durchführen, die zugleich so billig und einfach sind. Papierflieger sind schnell gemacht und man kann sie überall fliegen lassen.

## Der Pfeil

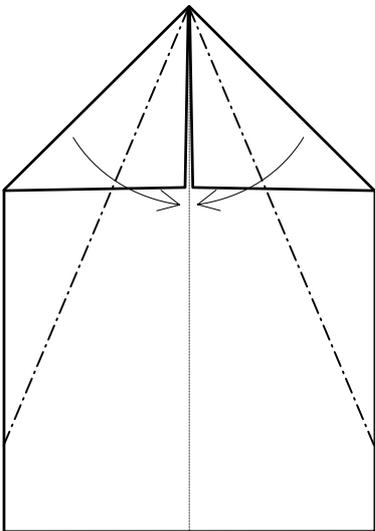
Dieser Flieger ist wohl das bekannteste Modell in Europa. Man kann sehr viele unterschiedliche Flieger aus dem Basismodell falten. Leider ist er kein besonders guter Gleiter, aber mit ein paar Tricks kann man das Problem in den Griff bekommen.



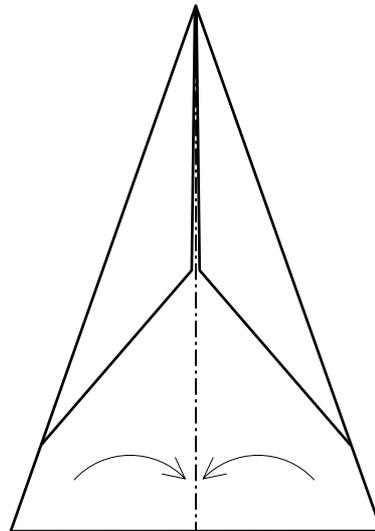
1) Man faltet ein Blatt der Länge nach und faltet es wieder auf.



2) Die beiden oberen Ecken werden zur Mitte hingefaltet.

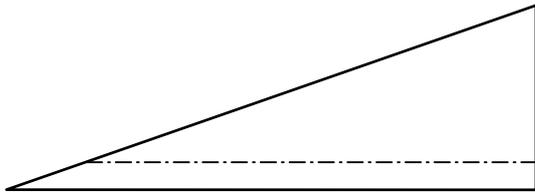


3) Die Seiten die das obere Dreieck bilden, werden zur Mitte hin

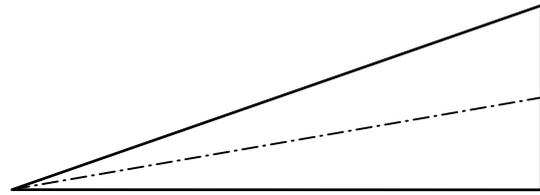


4) Die beiden Seiten werden zusammengefaltet.

Nun gibt es zwei Möglichkeiten, wie man die Tragfläche faltet. Man kann die Tragfläche parallel zum Rumpf falten – dies führt einer großen Tragfläche mit einem starken Auftrieb – oder man faltet die Tragflächen schräg – der Rumpf ist größer, womit die Kurvenstabilität höher wird, aber der Auftrieb ist geringer.

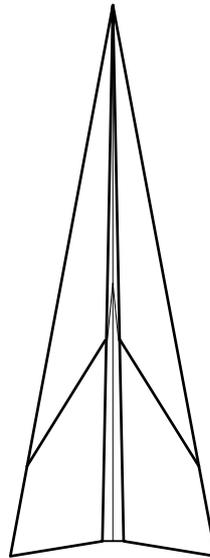
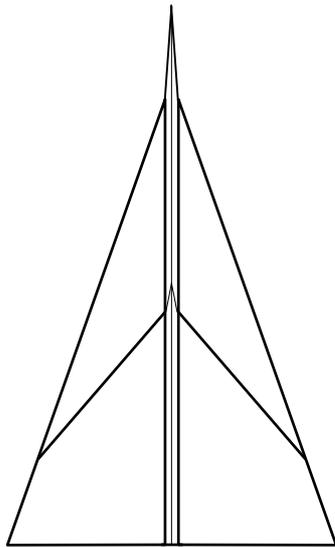


5a) Wenn man parallel faltet, sollte der Rumpf nicht größer als 1-2 Daumenbreiten sein.

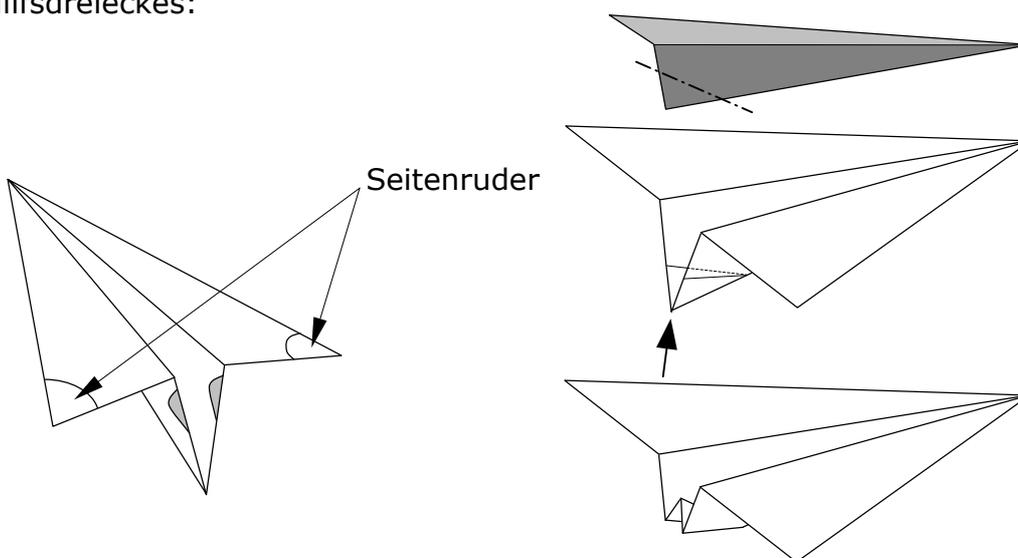


5b) Die obere Seite wird genau auf die untere Seite hingefaltet.

Dies muss auch für die andere Tragfläche durchgeführt werden. Auf Symmetrie achten. Man erhält dann von oben betrachtet einen der beiden Flieger:



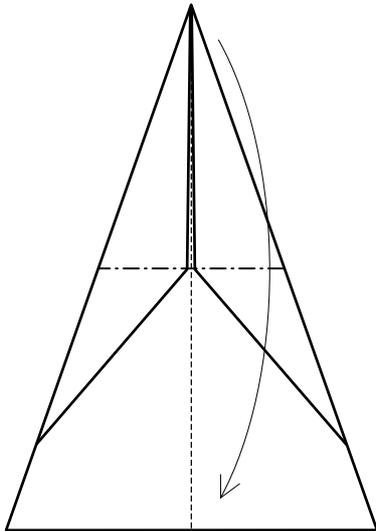
Um die Gleiteigenschaften zu verbessern, sollten die hinteren Ecken nach oben **LEICHT** aufgebogen werden. Die zweite Möglichkeit besteht in der Verwendung eines Hilfsdreieckes:



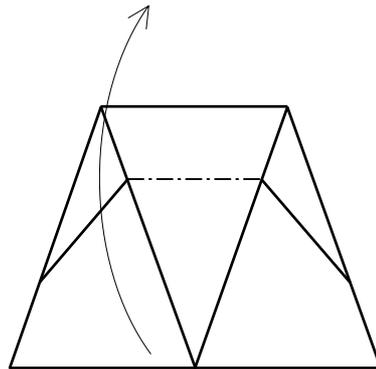
Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit aller Kraft leicht nach oben schießen.

## Moskito (einfache Version)

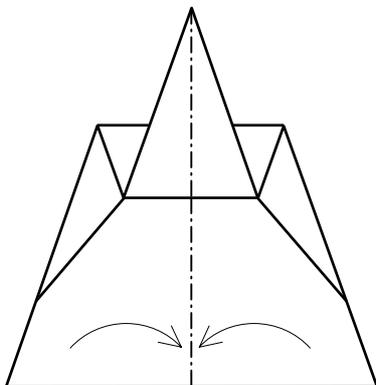
Der Moskito ist eine Abwandlung aus dem vorherigen Pfeil. Mit zwei zusätzlichen Faltungen ändert sich das Flugverhalten und das Aussehen beträchtlich. Diese beiden Faltungen können bei sehr vielen Fliegern angebracht werden. Wir beginnen beim Ende von Schritt 3 (Pfeil ):



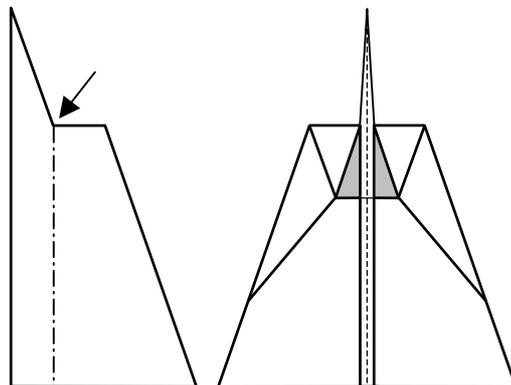
4) Die Spitze wird zur Mitte nach unten hingefaltet.



5) Dort wo sich das große Dreieck und die beiden seitlichen Flächen treffen, faltet man wieder zurück.



6) Danach faltet man die rechte und linke Seite wieder zusammen.



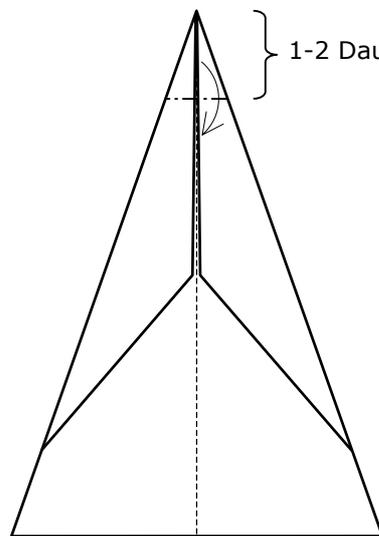
7) Die Tragfläche sollte gerade gefaltet werden – dort wo sich die Spitze des Rumpfes und flache Seite des Tragflügels treffen. **ACHTUNG:** Man muss hinein greifen und auch die inneren Faltungen mitfalten. Im gefalteten Zustand sollten dann 2 Dreiecke entstehen.

Dieser Flieger ist kein perfekter Gleiter. Um die Gleiteigenschaften zu verbessern, sollten die hinteren Ecken nach oben **LEICHT** aufgebogen werden.

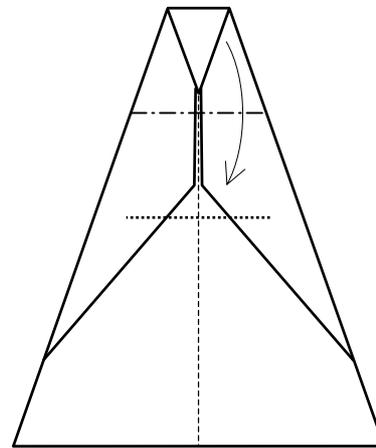
Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit aller Kraft leicht nach oben schießen.

## Hornet

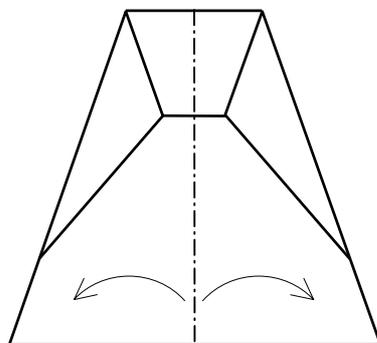
Die Hornet ist ein wunderbarer Gleiter, der auch im Hochgeschwindigkeitsbereich seine Stärke ausspielen kann. Wir beginnen beim Ende von Schritt 3 (Pfeil 4.1):



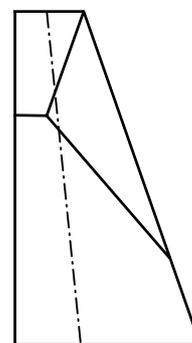
4) Die Spitze wird zur Mitte nach unten mit rund 1-2 Daumenbreiten hingefaltet.



5) Die stumpfe Spitze sollte zur Mitte so gefaltet werden, dass die beiden Ecken mit den seitlichen Flächen abschließen.



6) Die beiden Seiten werden so zusammengefaltet, dass die Faltungen auf der Außenseite sind und das Innere glatt ist.



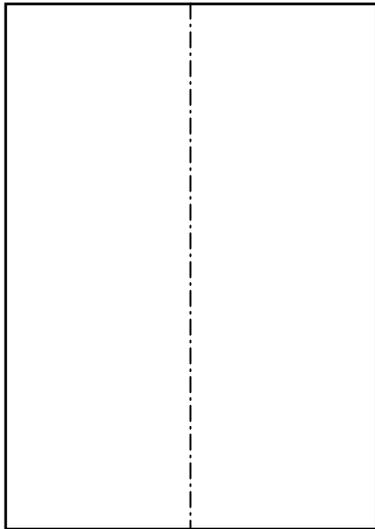
7) Die Tragflächen sollten leicht schräg gefaltet werden.

Dieser Flieger ist ein fast perfekter Hochgeschwindigkeitsgleiter. Um die Gleiteigenschaften zu verbessern, sollten man die seitlichen unteren Taschen flach streifen.

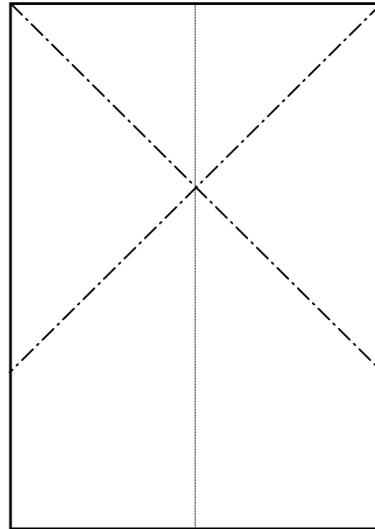
Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit aller Kraft leicht nach oben schießen.

# Phönix

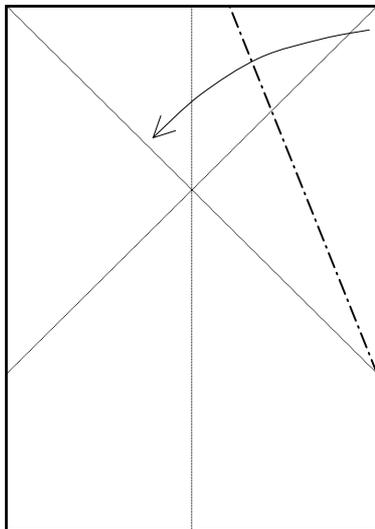
Dieser Flieger ist ein schöner Pfeilflieger, der gut austariert ist.



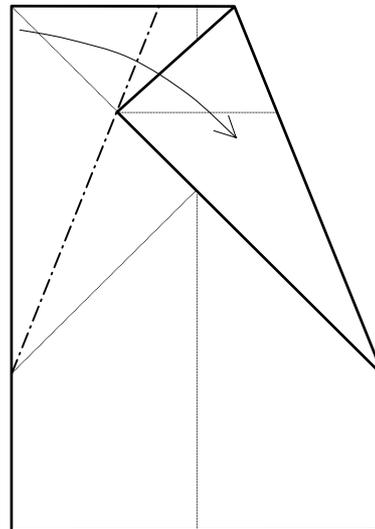
1) Das Papier wird der Länge nach gefaltet und wieder aufgefalt.



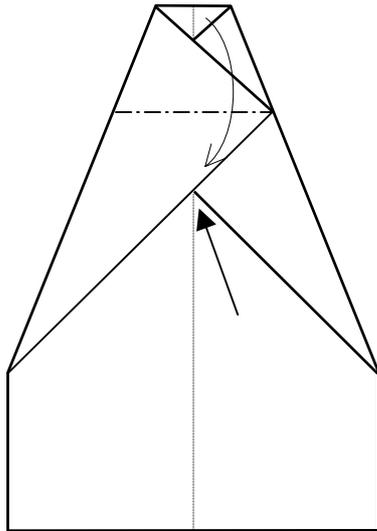
2) Die obere Seite wird auf die rechte Seite hingefaltet, wieder auffalten. Danach wird diese obere Seite auf die linke Seite hingefaltet. Es entsteht ein Kreuz.



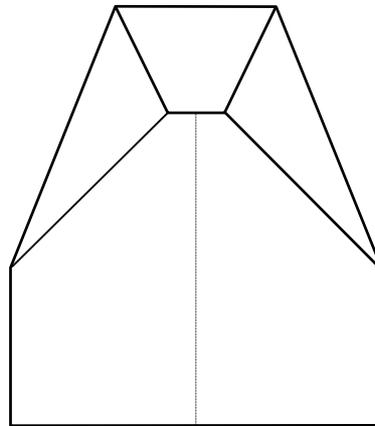
3) Die rechte Seite wird zur Diagonalen hingefaltet.



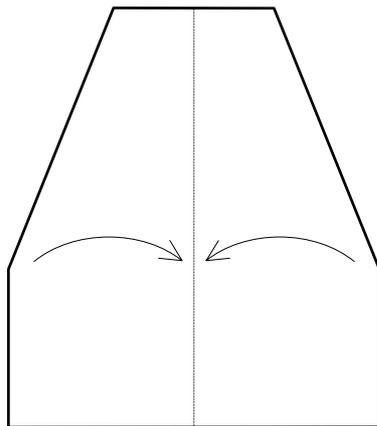
4) Die linke Seite wird ebenso zur Diagonalen des Sternes hingefaltet.



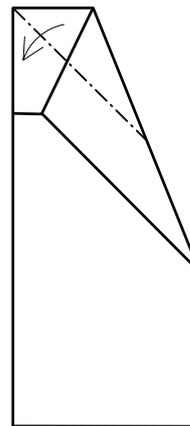
5) Die stumpfe Spitze wird umgefaltet.



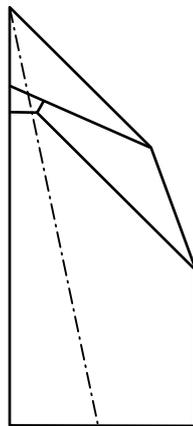
6) Das Papier wird umgedreht.



7) Die beiden Hälften werden zusammengefaltet.



8) Die stumpfe Spitze der oberen Lage wird so gefaltet, dass sie auf dem Rumpf zu liegen kommt. Dies muss für beide Tragflächen durchgeführt werden.

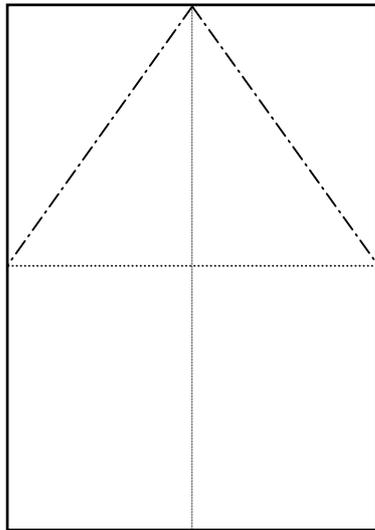


9) Danach faltet man die beiden Tragflächen – leicht schräg.

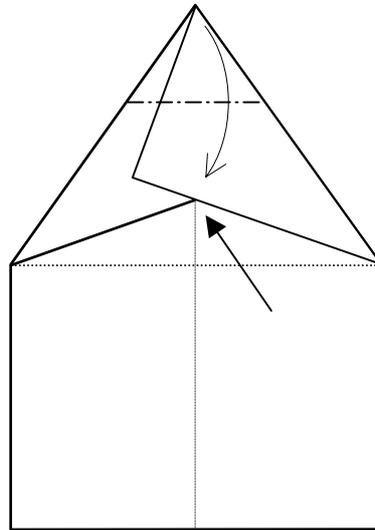
Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit viel Kraft leicht nach oben oder einfach geradeaus schießen.

## Bussard

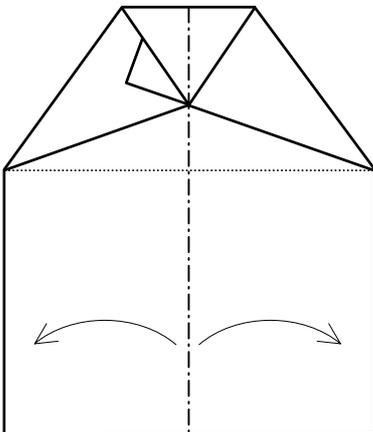
Dieser Flieger ist einer der ganz wenigen, der leicht asymmetrisch gebaut ist. Auch die Konstruktion der Spitze ist etwas ungewöhnlich. Seine Flugeigenschaften sind hervorragend.



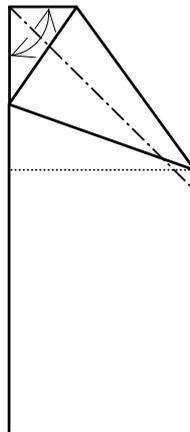
1) Zuerst wird das Papier der Länge nach und dann der Breite nach gefaltet. Auffalten nach jedem Schritt. Das linke obere Dreieck und dann das rechte obere Dreieck zur Mitte hin falten.



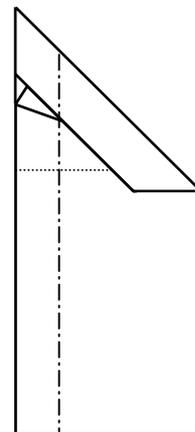
2) Die Spitze zur untern Spitze hin falten.



3) Das Papier umdrehen und zusammenfalten. Innen darf keine Faltung sein – die sind auf der Außenseite.



4) Die stumpfe Spitze der oberen Lage wird so gefaltet, dass sie auf dem Rumpf zu liegen kommt. Dies muss für beide Tragflächen durchgeführt werden.

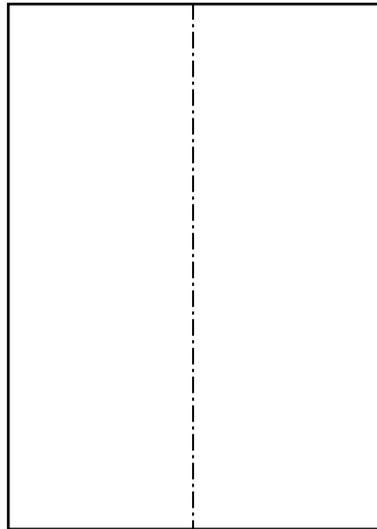


5) Danach werden die Tragflächen gerade gefaltet – rund 1-1.5 Daumenbreiten.

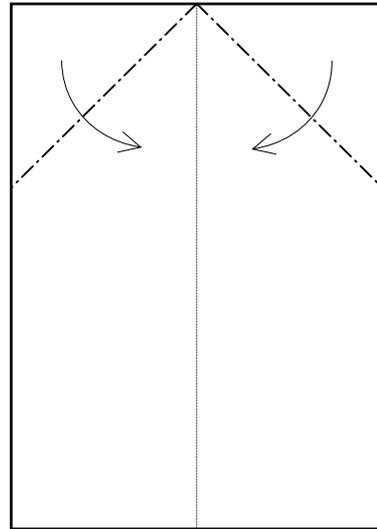
Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit viel Kraft leicht nach oben oder einfach geradeaus schießen.

# Adler

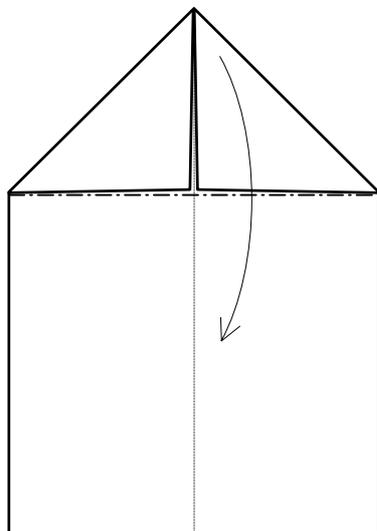
Mein persönlicher Lieblingsflieger – von den einfachen Modellen. Leicht zu bauen, hervorragende Flugeigenschaften und einfach zu werfen.



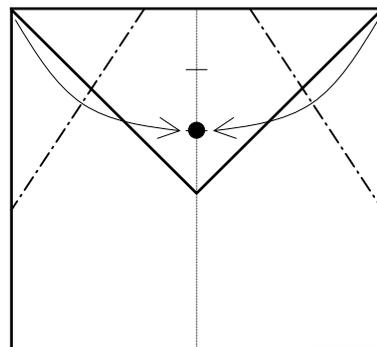
1) Man faltet das Papier der Länge nach und faltet es wieder auf.



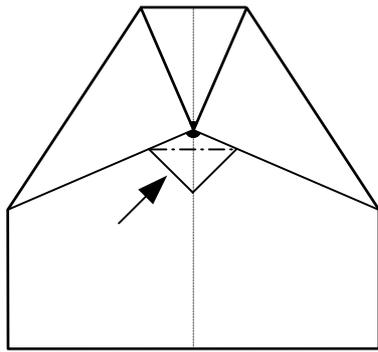
2) Es wird eine einfache Spitze hineingefaltet.



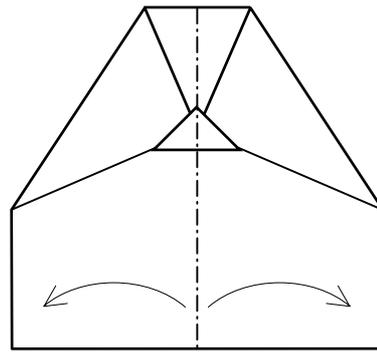
3) Das gesamte Dreieck wird nach unten zur Mitte hineingefaltet.



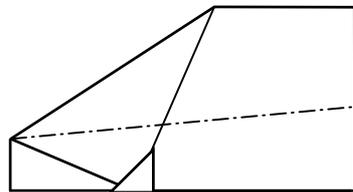
4) Man drittelt den Bereich des umgekehrten Dreiecks und faltet auf diesen Punkt die beiden Ecken hin. ACHTUNG: es entsteht eine stumpfe Spitze.



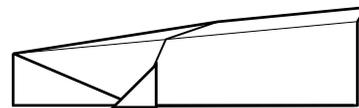
5) Das kleine Dreieck wird umgefaltet.



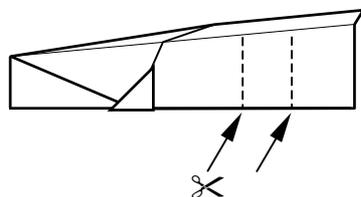
6) Das Papier umdrehen und zusammenfalten. Innen darf keine Faltung sein – die sind auf der Außenseite.



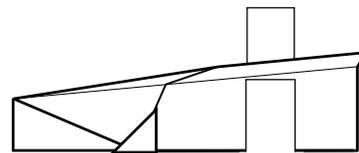
7) Die beiden Tragflächen leicht schräg falten.



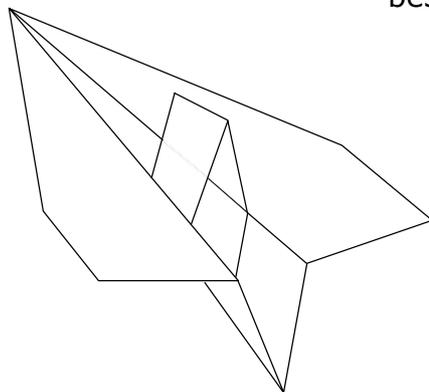
und eigentlich fertig.



Mit einem kleinen Trick wird der Flieger (meist) besser. 2 Einschnitte in den Rumpf und



die entstandene Lasche nach oben falten. Dadurch ändert sich der Anstellwinkel – der Gleitflug wird meist besser.



Auf die Y-Stellung nicht vergessen, mit wenig oder starker Kraft leicht nach oben, leicht nach unten oder einfach geradeaus schießen.