

# Fliegen – mit vereinten Kräften

PAULA, AGLAS  
PAULA.AGLAS@AGLAS.AT

## Zusammenfassung

In diesem Dokument wird die Physik des Fliegens beschrieben. Um ein Flugzeug in der Luft halten zu können, braucht es eine Tragfläche. Die unterschiedlichen Phänomene, die an einer solchen Tragfläche auftreten, werden erklärt. Da bei allen Flugzeugen die gleichen Prinzipien zur Anwendung kommen, werden die Eigenschaften eines Papierfliegers vorgestellt. Außerdem folgt eine Anleitung zum Bau des bestmöglich gefalteten Papierflugzeugs.

## 1 Faszination Fliegen

Seit Daedalus und Ikarus träumt die Menschheit vom Fliegen. Leonardo Da Vinci entwarf Flugmaschinen, die nicht zufriedenstellend funktionierten, Otto Lilienthal gilt als Begründer des Segelflugs und die Gebrüder Wright können den ersten offiziellen Motorflug für sich verbuchen. Vom ersten Passagierflugzeug 1919 bis heute hat sich die Flugzeugindustrie rasch weiterentwickelt.

Die Frage warum das Fliegen so interessant für die Menschheit war und ist, kann nicht vollends beantwortet werden - sei es die Faszination der Menschen für Vögel, der Gedanke lange Strecken oder Hindernisse in kurzer Zeit zu überwinden, oder einfach nur die Neugierde Unbekanntes zu entdecken. Im darauffolgenden Artikel wird erklärt, warum Flugzeuge fliegen und wie mit einfachen Papierfliegern gezeigt werden kann, dass kleine Unterschiede im Aufbau eines Flugzeugs große Auswirkungen auf die Flugeigenschaften haben können.

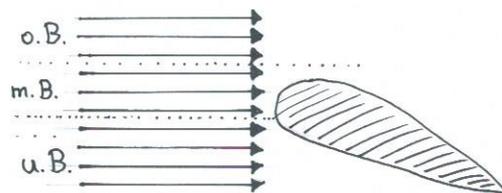
## 2 Die Physik des Fliegens

Auf jedes fliegende Flugzeug, ob Segelflieger, Passagierflugzeug oder Papierflieger, wirken vier Kräfte: die Auftriebskraft, die Schwerkraft, die Schubkraft und die Reibungskraft, die zwischen Luft und Flugzeug entsteht.

Um ein Flugzeug in der Luft halten zu können, braucht es eine Tragfläche.

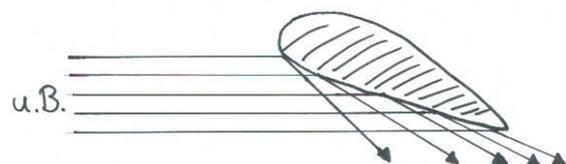
Als dynamischer Auftrieb wird die Kraft bezeichnet, die die Tragflächen nach oben drückt. Die Kraft, die die Tragflächen nach hinten drückt, ist der Luftwiderstand. Drei Effekte treten an jeder Tragfläche auf und führen zum Auftrieb. (vgl. Werner, 2005)

Wir betrachten den Querschnitt einer Tragfläche und den Luftstrom, der mit Hilfe von Stromlinien dargestellt wird. Dieser wird in drei Teile geteilt: o.B. = oberer Bereich, m.B. = mittlerer Bereich, u.B. = unterer Bereich. (siehe Abb. 1)



**Abb. 1** - Querschnitt einer Tragfläche mit Luftstrom (nach Werner, 2005)

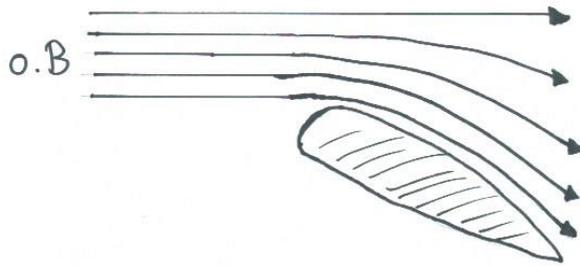
Die Luftteilchen, die auf die Unterseite der Tragfläche treffen, prallen aufgrund elastischer Stöße ab und drücken die Tragfläche nach oben beziehungsweise nach hinten. Dies geschieht nur, wenn der Anstellwinkel, der Winkel zwischen Tragfläche und Luftstrom, positiv ist. (siehe Abb. 2) (vgl. Werner, 2005)



**Abb. 2** - Darstellung des unteren Bereichs des Luftstroms (nach Werner, 2005)

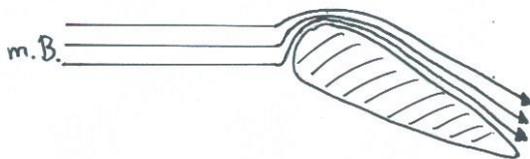
Die Luft strömt über die Tragflächenoberseite. Es entsteht ein Unterdruck, der dazu führt, dass die Tragfläche nach oben gezogen und der Luftstrom nach unten abgelenkt wird. Je näher sich eine Luftportion an der Tragfläche befindet,

desto stärker wird sie abgelenkt. (siehe Abb. 3) (vgl. Werner, 2005)



**Abb. 3** - Darstellung des oberen Bereichs des Luftstroms (nach Werner, 2005)

Im mittleren Bereich der Luftströmung wirkt die Bernoulli-Gleichung. Die Formel ist hier nur näherungsweise gültig, da Luft kein ideales, sondern ein komprimierbares viskoses Fluid ist. Dies ist jedoch ausreichend für die Beschreibung. Das Gesetz von Bernoulli besagt: je größer die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids, desto geringer ist der statische Druck. Unter dem statischen Druck versteht man hierbei den senkrecht zur Strömung gemessenen Druck. Der Luftdruck vor der Tragfläche entspricht dem Umgebungsdruck. Treffen die Teilchen nun auf die Vorderseite der Tragfläche müssen sie nach oben ausweichen. Dadurch wird der Abstand zwischen den Stromlinien kleiner, die Geschwindigkeit der Luftportionen steigt, der Staudruck wird größer und der statische Druck geringer. Der entstandene Unterdruck im Bereich der größten Verengung zieht die Tragfläche nach oben. (siehe Abb. 4) (vgl. Tipler, 2015; Werner, 2005)

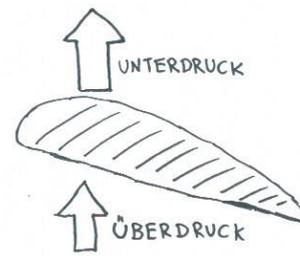


**Abb. 4** - Darstellung des mittleren Bereichs des Luftstroms (nach Werner, 2005)

Der Auftrieb findet nun aufgrund des Druckes auf die Tragflächenunterseite, des Unterdrucks auf die Tragflächenoberseite und des Bernoulli-Effekts statt. (siehe Abb. 5)

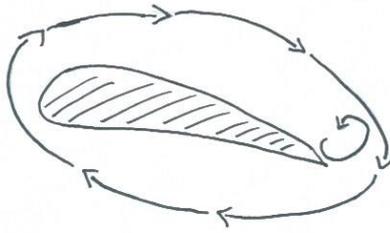
Je schneller sich das Flugzeug bewegt, desto stärker wird es steigen. Der Auftrieb ist somit

auch geschwindigkeitsabhängig. (vgl. Werner, 2005)



**Abb. 5** - vereinfachte Darstellung aller Bereiche des Luftstroms (nach Werner, 2005)

Oftmals wird für die Erklärung des Auftriebs nur der Bernoulli-Effekt verwendet, wobei davon ausgegangen wird, dass die Luftströme ober- und unterhalb der Tragfläche zur selben Zeit hinter der Tragfläche ankommen. Dies ist jedoch nicht der Fall, die Luft strömt an der Oberseite der Tragfläche schneller als an der Tragflächenunterseite, da sie eine gewisse Viskosität besitzt. Die Luftportionen, die sich vor der Tragfläche trennen, treffen sich nicht wieder hinter der Tragfläche. Die obere Luftportion ist immer schneller, auch, wenn der Flügel einen symmetrischen Querschnitt aufweist, sodass Ober- und Unterseite gleich lang sind. Bewegt sich die Luft sehr rasch, kommt es zur Wirbelbildung an der hinteren Kante des Flügels. Die Reibung mit der Oberfläche lässt die Luft unmittelbar in der Nähe des Tragflügels langsamer strömen. Die Luft kann dem Flügel ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr folgen und löst sich ab. Die weiter außen liegende Luft ist einer geringeren Reibung ausgesetzt und kann der Bewegung um die Kante folgen. Somit entstehen hinter und am Rand der Tragfläche Wirbel. Wirbel treten nach dem Gesetz der Drehimpulserhaltung immer paarweise auf, wodurch als Gegenwirbel der Zirkulationswirbel entsteht und dieser die Zirkulationsströmung um die Tragfläche ausbildet. (siehe Abb. 6) (vgl. ASKÖ Flugsport Weiz; Werner, 2005)



**Abb. 6** - Wirbel am hinteren Rand der Tragfläche und Zirkulationsströmung (nach ASKÖ Flugsportclub Weiz)

### 3 Schülervorstellungen

Lernende haben meist gewisse Vorstellungen von Vorgängen in der Physik, die zu Missverständnissen führen können. Diese sollen im Unterricht bestmöglich geklärt werden. Zu manchen Teilbereichen existieren jedoch intuitiv richtige Vorstellungen.

Wenn Schüler und Schülerinnen aufgefordert werden, ein Stromlinienbild für die Umströmung einer Tragfläche zu zeichnen, werden die meisten das Wesentliche richtig aufzeichnen: die Verengung der Stromlinien an der Oberseite, die Erweiterung der Stromlinien an der Unterseite und das glatte Abströmen an der Hinterkante. Anhand dieses Bildes kann mithilfe der Bernoulli-Gleichung der Unterdruck an der Oberseite der Tragfläche und der Überdruck an der Unterseite anschaulich erklärt werden.

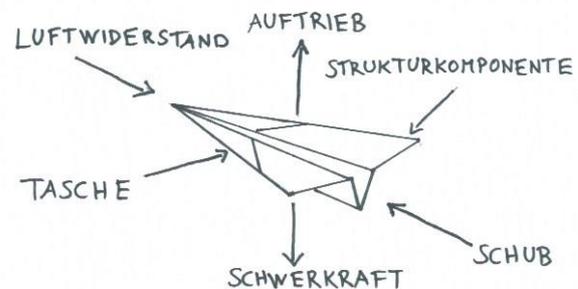
Schüler und Schülerinnen gehen oft davon aus, dass die Luft an der Unterseite der Tragfläche schneller strömt als an der Oberseite, da in den schematischen Abbildungen, die Oberseite länger als die Unterseite dargestellt ist. Die Luft an der Oberseite strömt jedoch aufgrund der Viskosität schneller als die Luft an der Unterseite. Dies trifft bei jedem Tragflügel zu, auch, wenn die Unterseite länger als die Oberseite ist oder beide Seiten gleich lang sind.

Für Lernende scheint es selbstverständlich, dass die Luft an der Hinterkante eines Tragflügels glatt abströmt. Wie oben angeführt, bilden sich an der Hinterkante Wirbel und im weiteren Verlauf Zirkulationswirbel, die den Auftrieb verursachen. (vgl. Wodzinski, 1999)

### 4 Papierflieger

Wie bereits erwähnt, fliegt ein Papierflieger aus den gleichen Gründen wie ein Segel- oder Pas-

sagierflugzeug. Als Besonderheit gilt, dass die Wölbung der Tragflächen keine Rolle spielt. Die Schubkraft muss größer als der Luftwiderstand und der Auftrieb größer als die Schwerkraft sein. Zu Beginn erhält das Papierflugzeug seine Beschleunigung durch den Wurfarm. Daraufhin bremst der Luftwiderstand den Papierflieger und seine Nase neigt sich nach vorne. Nun weist der Flieger die charakteristische Geschwindigkeit auf. Hat das Papierflugzeug gute aerodynamische Eigenschaften, gleitet es durch die Lüfte. Wenn der verursachte Auftrieb mit der Schwerkraft im Gleichgewicht ist, gleitet der Flieger auf gleicher Höhe. Durch den Luftwiderstand wird die Geschwindigkeit reduziert und der Flieger gleitet in Richtung Boden. Die charakteristische Geschwindigkeit ergibt sich aus dem Luftwiderstand und der Lage des Schwerpunkts. (siehe Abb. 7)



**Abb. 7** - Darstellung der Kräfte, die auf einen Papierflieger wirken und Bezeichnung der für den Antrieb wichtigen Teile des Fliegers (nach Werner, 2005)

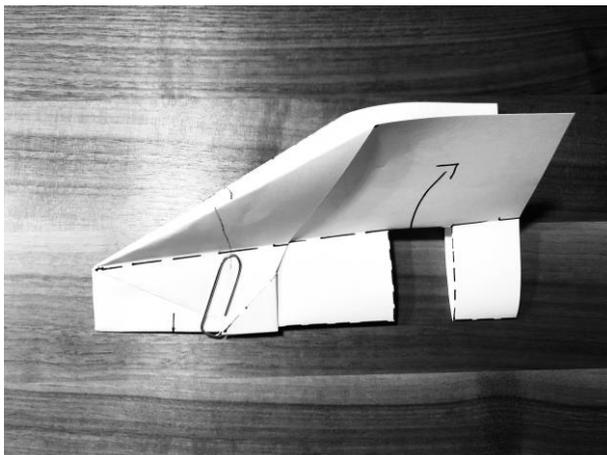
Wenn der Schwerpunkt zu weit vorne oder zu weit hinten liegt, stürzt der Papierflieger ab. Der Schwerpunkt soll sich knapp vor dem Auftriebspunkt, an dem der Auftrieb wirkt, befinden. Dies allein durch die Faltung des Papiers zu erreichen, gelingt selten, weshalb Papierflugzeuge nach dem Falten meist noch angepasst werden müssen. (vgl. Werner, 2005)

Bei den meisten Papierfliegern entstehen durch die Faltung Taschen, die ein aerodynamisches Profil haben und die eigentliche Tragfläche bilden. Der Großteil der Papierflugzeuge (siehe Abb. 7) besitzt zusätzliche Strukturkomponenten um die Stabilität zu verbessern.

Bei einigen Ausnahmen werden keine Taschen gefaltet, das aerodynamische Profil wird auf eine andere Art gebildet. Beim Planarflieger (siehe Abb. 16) dienen Walzen als großes Hindernis und demonstrieren, dass der Satz von Bernoulli zutrifft.

Papierflieger stürzen aus verschiedenen Gründen ab. Wenn beispielsweise Symmetrie oder Stabilität nicht gegeben sind, ist der größte Auftrieb wirkungslos und der Flieger stürzt ab. Dies kann durch Nachjustierungen verändert werden. Voraussetzung dafür ist, zu wissen wie sich ein Flieger im Raum bewegt, um die richtigen Veränderungen vorzunehmen. Beim Rollen dreht sich das Papierflugzeug vollständig oder teilweise um die Längsachse. Das Nicken bezeichnet das Heben und Senken der Nase, während der Flieger beim Gieren im Kreis fliegt.

Um Nicken zu vermeiden, können die hinteren Strukturkomponenten leicht nach oben oder unten gebogen werden. Die Biegung soll mit freiem Auge kaum sichtbar sein, sonst nickt der Flieger in die entgegengesetzte Richtung und gleitet ebenfalls nicht. (keine Faltung!). Das Nicken kann auch durch eine Büroklammer verhindert werden, falls sich die Strukturkomponenten nicht richtig einstellen lassen. Die Büroklammer wird im vorderen Drittel befestigt (siehe Abb. 8).



**Abb. 8** - Büroklammer befestigt am Rumpf des Papierfliegers (nach Werner, 2005)

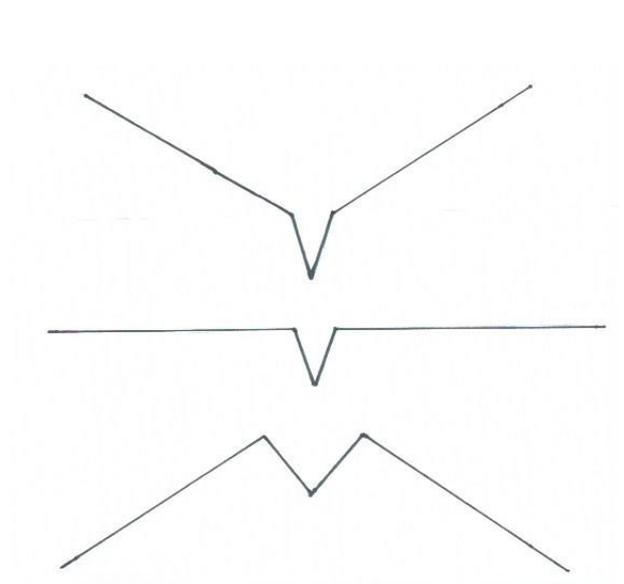
Leider folgen nur wenige Papierflieger einem geraden Kurs. Dies liegt an der Größe des Rumpfs. Je größer der Rumpf, desto kursstabiler ist das Papierflugzeug. Dadurch werden jedoch die Tragflächen kleiner und der Auftrieb geringer. Hier soll ein gutes Mittelmaß gefunden werden.

Eine weitere Variante, um den Luftwiderstand im hinteren Bereich des Fliegers zu erhöhen und somit Kursstabilität zu erreichen, ist mit zwei Einschnitten von unten in den Rumpf eine Lasche zu schneiden und diese nach oben zu

klappen, wie bei dem Papierfliegermodell „Adler“ (siehe Abb. 20).

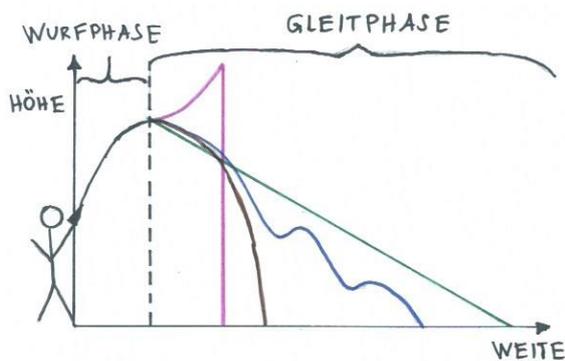
Entscheidend bei der Faltung von Papierfliegern ist die letzte Faltung der Tragflächen. Sie soll die Tragflächen in eine leicht nach oben gerichtete Stellung bringen. Der Flieger bildet nun von hinten betrachtet eine Y-Form. Diese Y-Stellung, auch Dihedral-Stellung genannt, verleiht dem Flugzeug einen stabilen Flug durch minimale Luftturbulenzen. (siehe Abb. 9)

Zu vermeiden ist eine T-Stellung, da diese beim Loslassen zu einer negativen Y-Stellung führt, die eine Rollbewegung unterstützt. Der Flieger kommt somit ins Trudeln und stürzt ab. (siehe Abb. 9)



**Abb. 9** – von oben nach unten: Y-Stellung und T-Stellung der Tragflächen, negative Y-Stellung beim Loslassen eines Papierflugzeugs in T-Stellung (nach Werner, 2005)

Es gibt grundsätzlich vier verschiedene mögliche Flugbahnen eines Papierfliegers. Der Flieger kann direkt abstürzen (braun), zuerst ansteigen und abstürzen (pink), lange gleiten und sanft in Ruhe landen (grün) oder torkelnd nach längerer Zeit abstürzen (blau). (siehe Abb. 10)



**Abb. 10** - Vier verschiedene mögliche Flugbahnen eines Papierfliegers (nach Werner, 2005)

Unterschätzt wird, dass die richtige Flugbahn stark mit der Art des Abwurfs zusammenhängt. Das bedeutet, die Abwurfgeschwindigkeit und der Abwurfwinkel sind entscheidend. Um die passende Geschwindigkeit und den perfekten Winkel zu finden, muss das Werfen jedes Papierfliegermodells immer wieder geübt und wiederholt werden. Für jeden Flieger existiert eine optimale Abwurfgeschwindigkeit und ein optimaler Abwurfwinkel. (vgl. Werner, 2005)

Tipps:

- Zum Gleiten gedachte Papierflieger mit stumpfer Nase mit langsamer Beschleunigung und in einem Winkel von 11° schießen
- Flieger mit spitzer Nase mit viel Kraft leicht schräg nach oben werfen
- Bei stabilen Konstruktionen hohe Startgeschwindigkeit einsetzen, sodass sich die Tragflächen nicht verbiegen

Hinweise zur Arbeit mit Papier:

- Zum Falten von Papierfliegern eignet sich am besten 80 g/m<sup>2</sup> Papier, was durchschnittlichem Kopierpapier entspricht
- Meist wird das Format DIN A4 verwendet
- Ein einfacher Falz mit dem Daumennagel pro Faltung genügt
- Auf fester Unterlage arbeiten, so werden die Faltungen exakter und stabiler
- Papier so wenig wie möglich angreifen (Schweißproduktion)
- Auf Ecken achten. Sie sollen unbedingt glatt sein und nicht gebogen, da dies die Flugeigenschaften beeinflusst
- Papier flach und in trockener Umgebung lagern

- Am besten funktionieren frisch gefaltete Papierflieger
- Die Aufbewahrung von Papierfliegern ist problematisch, da die Eigenschaften des Fliegers bei sich ändernder Luftfeuchtigkeit verloren gehen.

(vgl. Werner, 2005)

## 5 Papierfliegermodelle und deren Eigenschaften

### Modell „Hornisse“

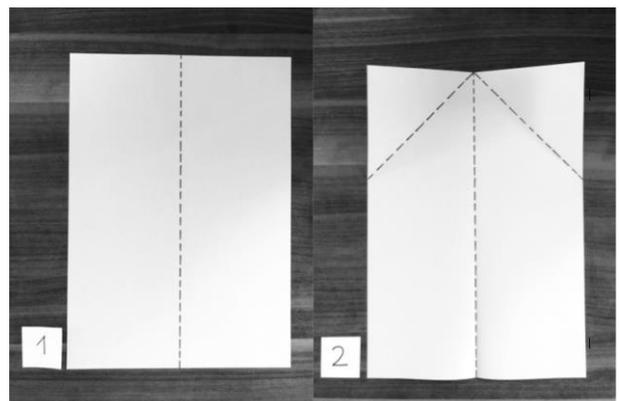
Richtig gefaltet und geworfen ist die Hornisse ein ausgezeichneter Gleiter, der seine Stärken bei hohen Geschwindigkeiten ausspielen kann.



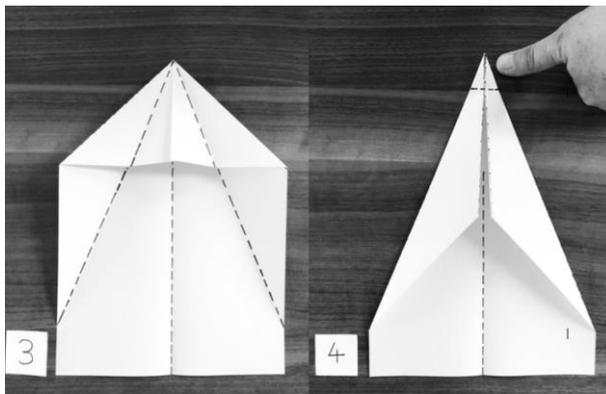
**Abb. 11** - Papierfliegermodell „Hornisse“

Hier wird ein DIN A4 Blatt Kopierpapier für die Faltung verwendet.

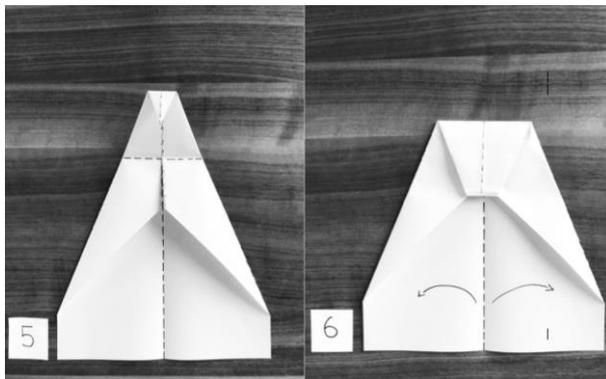
Anleitung zur Faltung des Papierfliegers:



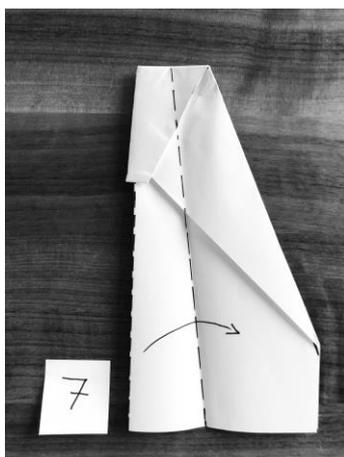
**Abb. 12** - (1) Das Blatt längs in der Mitte falten und wieder auffalten. (2) Die beiden oberen Ecken zur Mittellinie falten.



**Abb. 13** - (3) Die Seiten des oberen Dreiecks zur Mitte falten. (4) Die Spitze ca. ein bis zwei Daumen breit nach unten zur Mitte falten.



**Abb. 14** - (5) Die stumpfe Spitze zur Mitte falten, sodass die beiden Ecken mit den seitlichen Flächen abschließen. (6) Die beiden Seiten zusammenfalten, sodass die Faltungen außen sind.



**Abb. 15** - (7) Die Tragflächen leicht schräg falten.

Um die Flugeigenschaften zu verbessern sollen die seitlichen unteren Taschen glatt gestrichen werden. Die Y-Stellung der Tragflächen ist ausschlaggebend. Nun wird der Flieger mit aller Kraft in geringem Winkel nach oben geschossen.

### Modell „Planarflieger“

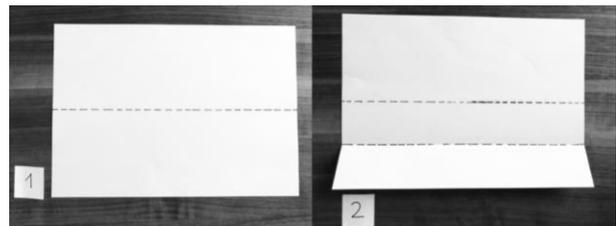
Der Planarflieger ist in Europa nicht sehr weit verbreitet, ist aber in den USA jedem Kind bekannt. Dieses Modell ist einfach zu bauen und hat gute Gleiteigenschaften.



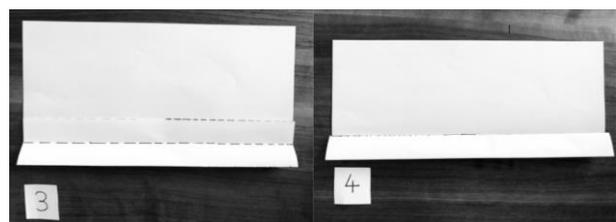
**Abb. 16** - Papierfliegermodell „Planarflieger“

Hier wird ein DIN A4 Blatt Kopierpapier für die Faltung verwendet.

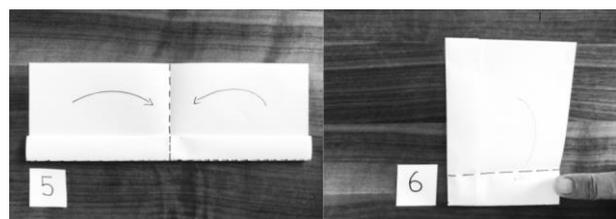
Anleitung zur Faltung des Papierfliegers:



**Abb. 17** - (1) Das Blatt quer in der Mitte falten und wieder auffalten. (2) Die untere Blattkante zur Mitte falten.



**Abb. 18** - (3) Neu entstandene untere Blattkante zur Mitte falten. (4) Entstandene Rolle über die Mitte falten.



**Abb. 19** - (5) Die beiden Seiten zusammenfalten. (6) Die Tragflächen rund ein bis zwei Daumen breit falten.

Die hinteren Ecken sollen sehr leicht nach oben gebogen werden. Wichtig ist auch hier die Y-Stellung. Dieser Flieger wird mit wenig Kraft leicht nach oben, leicht nach unten oder geradeaus geworfen.

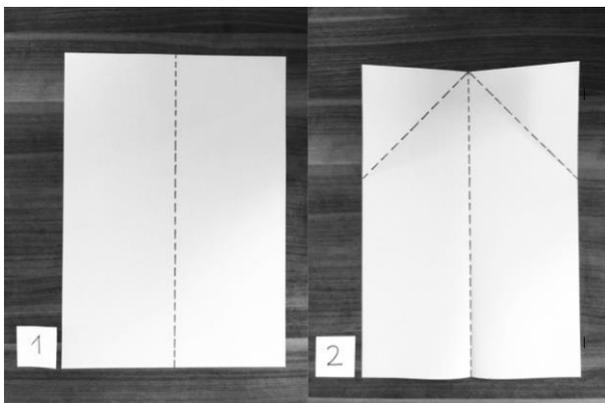
Modell „Adler“

Der Adler ist einfach zu bauen und besitzt hervorragende Flugeigenschaften. Ein großer Vorteil ist, dass er sehr leicht zu werfen ist.

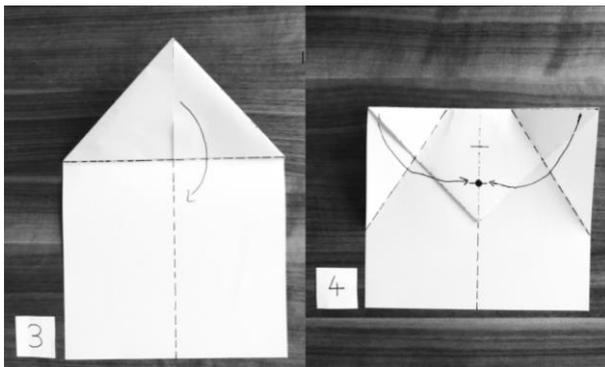


**Abb. 20** - Papierfliegermodell „Adler“

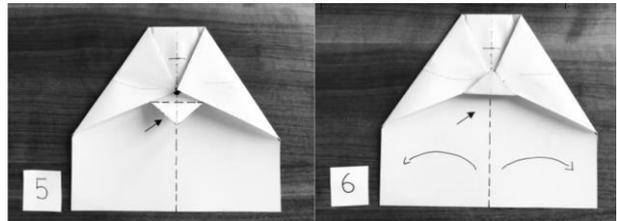
Hier wird ein DIN A4 Blatt Kopierpapier für die Faltung verwendet und eine Schere benötigt. Anleitung zur Faltung des Papierfliegers:



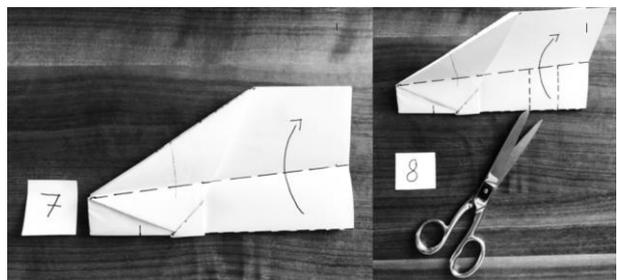
**Abb. 21** - (1) Das Blatt längs in der Mitte falten und wieder auffalten. (2) Die beiden oberen Ecken zur Mittellinie falten.



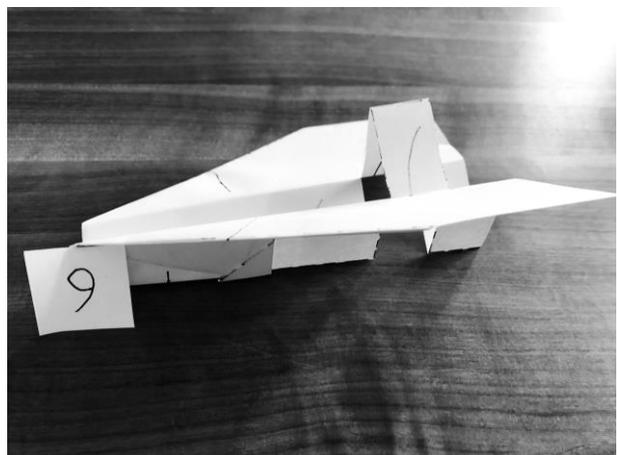
**Abb. 22** - (3) Das gesamte Dreieck nach unten zur Mitte falten. (4) Den Bereich des umgekehrten Dreiecks dritteln und die Ecken auf den Punkt falten. Eine stumpfe Spitze entsteht.



**Abb. 23** - (5) Das kleine Dreieck nach oben umfalten. (6) Das Papier zusammenfalten, mit den Faltungen nach außen.



**Abb. 24** - (7) Tragflächen leicht schräg falten. (8) Zwei Einschnitte in den Rumpf machen.



**Abb. 25** - (9) Entstandene Lasche nach oben falten.

Nun werden die Tragflächen in die Y-Stellung gebracht und der Flieger wird mit wenig oder viel Kraft leicht nach oben, leicht nach unten oder einfach geradeaus geworfen.

(vgl. Werner, 2005)

## 6 Zusammenfassung

Die Physik des Fliegens beruht auf der Auftriebskraft. Diese wird durch das Rückstoßprinzip, die Bernoulli-Gleichung und die Zirkulationswirbel erklärt. Bemerkenswert ist, dass diese Phänomene auf jedes Flugzeug anwendbar sind, ungeachtet der Größe des Fliegers. Eine geringe Nachjustierung an einem Papierflieger erzeugt bereits stark veränderte Ergebnisse. Das Werfen eines Papierfliegers verlangt viel Übung und Geschick, um zufriedenstellende Flugergebnisse zu erreichen.

## 7 Literatur

- ASKÖ Flugsportclub Weiz: Flugphysik. Warum fliegen Flugzeuge? Luftverkehr - Materialien für den Unterricht. Bezogen unter: [http://www.logw.at/custom/Inhalt/intern/daten/Ausbildungsunterlagen/Warum\\_fliegen\\_Flugzeuge.pdf](http://www.logw.at/custom/Inhalt/intern/daten/Ausbildungsunterlagen/Warum_fliegen_Flugzeuge.pdf) (Letzter Zugriff: 28.08.2018)
- Back, H. (Hrsg.) (2018): Theorie und Technik des Segelfliegers. DGFlugzeugbau. Bezogen unter: <https://www.dg-flugzeugbau.de/theorie-technik-segelfliegen> (Letzter Zugriff: 28.08.2018)
- Geyer M., Isola A. (2003): Physik des Fliegens. Entwicklung eines Unterrichtsvorschlages für ein „fast-vergessenes“ Teilgebiet im Mechanikunterricht der Oberstufe. Judenburg. Bezogen unter: [https://imst.ac.at/imst-wiki/images/3/3b/Langfassung\\_Physik\\_Geyer.pdf](https://imst.ac.at/imst-wiki/images/3/3b/Langfassung_Physik_Geyer.pdf) (Letzter Zugriff: 28.08.2018)
- Strahl, A. (2010): Auftrieb am Tragflügel. Vortrag. Kaiserlautern, 17.06.2010. Bezogen unter: [https://docplayer.org/storage/49/25854748/1535541462/0qW9EcAm\\_4IT4MTUVP0r3A/25854748.pdf](https://docplayer.org/storage/49/25854748/1535541462/0qW9EcAm_4IT4MTUVP0r3A/25854748.pdf) (Letzter Zugriff: 28.08.2018)
- Tipler P., Mosca G. (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- Werner G. (2005): Physik der Papierflieger. Aktualisierungsdatum: 21.06.2005. Bezogen unter: <https://brain.exp.univie.ac.at/vpapierflieger/papfs.htm> (Letzter Zugriff: 28.08.2018)
- Wodzinski R. (1999) Wie erklärt man das Fliegen in der Schule? In: PLUS LUCIS 2/99. S.18-22