Wie fliegt ein Gleitschirm

Über den Nonsens der Aerodynamik

Die älteren unter uns, die noch eine PC-freie Erziehung genossen, kennen das noch: den Papierflieger. Die Eltern gaben uns ein Stück A4-Papier, zeigten die Falttechnik und schon schwebte das weisse Teil sekundenlang durchs Wohnzimmer. Bei Windstille ging es raus. Oder vom Balkon aus liessen wir die einfachen Geräte schweben. *HEW*

Die Flieger waren und sind es noch: einfach im Aufbau. Gerade Tragflächen, ein langer Rumpf, manchmal angedeutete Seitenruder aussen. Mehr nicht. Und vor allem eines: Sie hatten kein Profil oder besser: keine oben und unten gewölbten Flächen. Dennoch flogen sie perfekt, zeigten keinerlei Tendenz zum Strömungsabriss. Und besassen grosses Pitch.

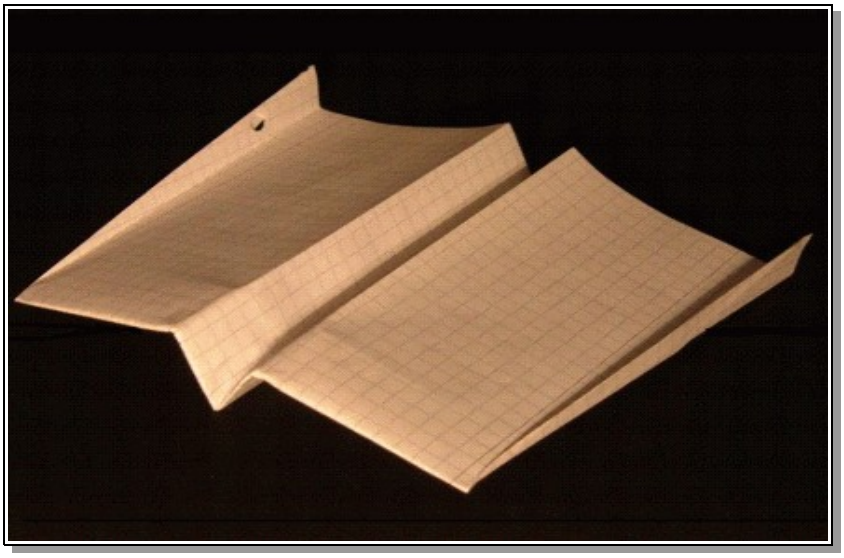
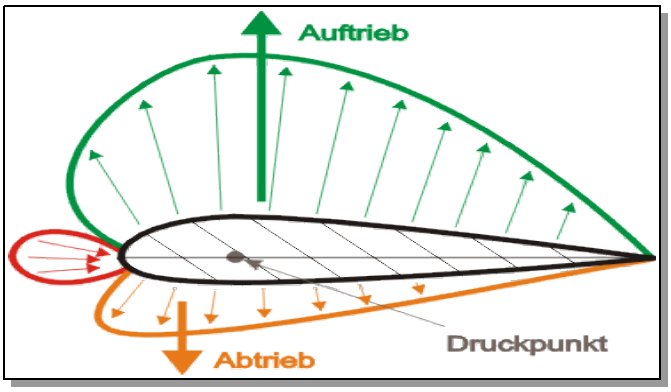


Abb: Das aktuelle Modell des japanischen Weltmeisters.

Zeitensprung: Mitte der 80er ging es in die Flugschule. Und eines wurde als erstes erklärt: Warum kann ein Gleitschirm fliegen. Das theoretische Modell war einfach: Die Luft wird durch die Wölbung um das Profil verdrängt, muss einen weiteren Weg zurücklegen, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Nach dem Gesetz der Strömungslehre (Bernoulli Gleichung*) führt die Geschwindigkeitszunahme zu einer Reduktion des Drucks.



Es entsteht auf der Oberfläche des Flügels ein Sog. Da die obere und untere Seite des Profils eine unterschiedliche Wölbung aufweisen, wird auch ein unterschiedlicher Sog erzeugt im Verhältnis 1:2. Das Gesetz von Bernoulli leitet sich aus dem Energieerhaltungssatz ab. Sonst gäbe es ja das Perpetuum Mobile.
So sei es auch beim Gleitschirm. Aha! Weiter hiess es: Kein Flugzeug könne ohne ein solches Profil – also Wölbungen – fliegen. Es würde abstürzen. Weil es ja keinen Auftrieb hätte. Zudem sei eine plane Fläche sehr turbulent umströmt. Ein Profil (alleine der Terminus ist schon nahezu sinnfrei) aber würde die Strömung lange an sich halten und erst hinten abreissen lassen. Und hinten am Flügelende träfen die Luftteilchen wieder zusammen.
Spätestens da wusste ich, dass mein Lehrer nicht gerade ein Wissender in Sachen Aerodynamik war. Meine Frage, warum aber ein Papierflieger mit Planofläche und ca 1/5mm Papierstärke abrissfrei und weit fliege, konnte er nicht beantworten. Aber er beriefe sich auf seine Ausbildung als

Fluglehrer. Und darin würde das ja auch so gelehrt. Mein Interesse war dahin. Aerodynamik und Flugschule – geht nicht.

Um weiter in die Thematik einzusteigen, bedarf es erst mal der exakten Definitionen/Terminologie.

Erstes Axiom: Jeder Fluglehrer/DHV-Ausbildung behauptet, dass über und unter dem Flügel Luft strömt! Falsch! Nur der Flügel bewegt sich gegenüber der Luft! Der Bernoulli-Effekt ist ein Strömungseffekt und nur in einer absoluten Strömung möglich! Ein Flugzeug fliegt durch ruhende Luft (auch wenn sie grossflächig strömt). Ihr eine Strömung anzudichten, ist größtmöglicher Unsinn. Der Flügel bewegt sich durch die ruhende Luft, zerteilt diese und erteilt ihr eine Bewegung nach unten! Wie soll also ohne eigene reale horizontale Strömung der Luft der Bernoulli-Effekt eine tragende Rolle beim Flugvorgang spielen? Anm.: Der Windkanal ist durch das Verdrehen von Ursache und Wirkung eine von der Realität abweichende Simulation! Die Luftströmung darin stellt nur die nötige Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Flügel und Luft her, übernimmt also nur ersatzweise die Geschwindigkeit des Flügels!

Zweites Axiom: Die Luft bewegt sich schneller über dem Flügel auf dem dort längeren Weg, um gleichzeitig mit der Luft unter dem Flügel an der Hinterkante anzukommen! Falsch! Die Luftteile oben kommen deutlich und nachweisbar schneller am Achterliek an als jene von der Unterseite. Dies beweisen viele Testreihen diverser Universitäten (z.B. MIT, NASA), schon seit den 60ern ist das bekannt! Warum erzählen aber die Fluglehrer heute 2014 noch solch einen Unsinn, warum steht das noch in den DHV-Lehrbüchern? Eine Simulation dazu z.B.:http://homepages.hs-bremen.de/~kortenfr/Aerodynamik/script/node3.html *Oder mal unter NASA suchen.*

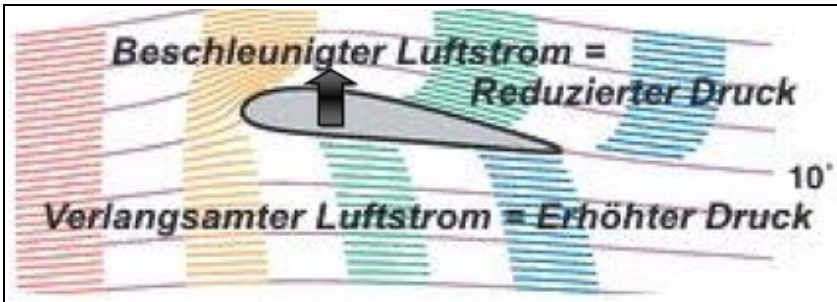


Bild 3: Luftströmung und Bernoulli-Effekt

Drittes Axiom: Ein Flügel darf nicht plano sein, sondern bedarf des Profils. Falsch! Die Hallenflugmodelle beweisen es. Sie haben plane Tragflächen, sind ultra-dünn und fliegen perfekt. Aber wenden wir uns einmal dem wohl extremsten Muster zu: der wundervollen F-104, genannt Starfighter.

Die Eck-Daten: Fläche 18,2 m²,
Startgewicht 6.400 kg,
Schub ohne Nachbrenner 46,48 kN,
mit Nachbrenner 70,95 kN.
Betrachten wir die Fläche von lateral im Schnitt: Fällt was auf? Sie ist plano, d.h. oben und unten parallel. Keine Wölbung. Und vorn ohne jedwede Rundung, sondern messerscharf *.
Wo entsteht hier laut des Fluglehrers Axiom Druck/Zug mit 1:2?

** Anm: Deshalb verletzten sich im ersten Jahr viele Monteure der Bodenmannschaft. Zu schweren Schädelspaltungen kam es gar. Man reagierte und musste sofort nach der Landung orangene Gummileisten vorn und hinten überziehen.*

Auch die F-104 benötigte Energie von aussen, also Flugbenzin. Sie flog mit bis zu 70kN Schub. Man dimensionierte die Zentraldüse so stark, dass bei nur 18m² Flügelfläche und sogar – man staune - einem neutralen Anstellwinkel der Tragflächen - die Maschine einfach über das Höhenruder oben blieb. Einen nicht unerheblichen Teil des Auftriebs lieferte der im Flug positiv angestellte Rumpf. Und selbst das Höhenruder war so scharf geformt und ultra flach, dass man damit dickes Gummi schneiden konnte; von der üblichen Wölbungsform der Ruder andere Jets Welten entfernt. Alles ganz einfach; Widerstandsminimierung wo nur möglich – aber endlos Schub (statt Höhenenergie, s.o.).

Jetzt höre ich wieder jene, die rufen: Und warum hiess sie dann 'Widowmaker'? Fielen doch in Deutschland alle runter. Ja, in Deutschland. Da muss ich kurz intervenieren. Das betraf nur die Muster F-104 G (German Version), die FJS seinerzeit so wollte.
Er liess – entgegen des Rates aller Lockheed-Ingenieure – die 104 G mit gut sechs Tonnen zusätzlich bestücken: Wingtanks, Underwingtanks & - bombs, zusätzlich drei schwere Bordkanonen etc.. Die Maschine mit ihren nachträglichen Modifikationen verkam vom Kurzstreckenabfangjäger zum Mittelstrecken-Bomber.
Damit wurde z.B. die Belastung pro m² von ursprünglich 350 kp auf über 730 kp hochgefahren! Und so – unter Berücksichtigung des zwar baubedingt (> Flügelfläche) kritischen (aber gemäss der Trainings-Vorgaben/ausserhalb der kritischen Fenster geflogen) sonst absolut beherrschbaren Musters – zeigte die G-Version heftige Abweichungen, wenn auch nur eine Bezugsgrösse marginal über- oder unterschritten wurde; die G riss sofort ab (> doppelte Flügelbelastung) schmierte weg, gierte (> vollkommen neue Aerodynamik an Rumpf, Flächen und Seitenruder, kritische Strömung an den Landeklappen rumpfnah). Das Rollverhalten war ein komplett anderes, im Kurvenflug drehte die G nach nur leichtem Überreissen sofort seitlich innen ab. Die neuen Trägheitsmomente (> Zusatztanks unter Tragflächen, Bomben) überforderten jeden. All das zusammen war selbst für Top-Piloten nicht mehr recoverbar. Da half auch das BLC (boundary layer control) an den hinteren Flaps nicht mehr. In den USA hingegen fielen zu dieser Zeit ebenso viele F-104 runter wie von den anderen Mustern der Konkurrenz. Sie war als sicheres Muster bei der US-Airforce hoch beliebt. Also Schluss mit dem Mythos des Witwenmachers per se. Es klagten weltweit auch nur die deutschen Witwen gegen Luftwaffe und FJS.
Dieser Appendix veranschaulicht wohl gut das Thema Wölbung und dessen Unwichtigkeit.

Viertes Axiom: Wir verbrauchen Energie. Falsch! Energie wird stets umgewandelt. Und nur! Auto-Benzin z.B. thermodynamisch und mit einem geringen Wirkungsgrad in Hitze, dann über eine mechanische Vorrichtung (Motor) via Räder in Vortrieb respektive Beschleunigung. Verbrauchen können wir ugs. nur Materie, deren Aggregatzustand erhalten bleibt (z.B. Taschentücher). Das muss man wissen, um das Fliegen zu verstehen. Und um sicher zu fliegen. Denn wer einen Parameter im Flug ausserhalb der kritischen Grenzen verändert (z.B. zu langsames Fliegen), erfährt schmerzhaft, wie sich die Höhenenergie (bis dahin im Gleiten) wandelt. Sie bleibt entropisch erhalten, muss aber irgendwo und -wie gewandelt werden. Also geht es senkrecht wohin? Runter. Autsch!

Zurück zur Ausgangsfrage, zum Flug: Wie kann also ein Gleitschirm überhaupt fliegen? Die einfache, einzige Erklärung ist folgende: Weil wir uns eine Liftkarte kaufen. Jetzt mag so mancher schmunzeln, aber dann hat er im Physikunterricht krankheitsbedingt gefehlt. Es gibt nämlich Lehrsätze, die weltweit anerkannt sind. Also kein Axiome wie oben. Ohne jene würde unser physisches Leben gar nicht funktionieren. Oder wir hätten die o.g. PerpMobs. Wir sprechen ergo von den *drei thermodynamischen Lehrsätzen*, über die kein Fluglehrer sinniert. Weil er sie auch nicht kennt. Oder ihm cognitiv der Zugang fehlt.

Die Energie-Prinzipien unseres physischen Lebens:
0. HS: Stehen zwei Systeme jeweils mit einem dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht. Diejenige Zustandsgröße, die bei diesen Systemen übereinstimmt, ist die Temperatur.
1. HS: Die Energie eines abgeschlossenen Systems ist konstant.
2. HS: Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar.
3. HS: Der absolute Nullpunkt der Temperatur ist unerreichbar.

Ganz wichtig: die Entropie (*von gr. Wendung, Umwandlung*). Sie ist eine fundamentale, thermodynamische Zustandsgrösse, da sie mit dem zweiten und dritten Hauptsatz bestimmt, ob ein Prozess überhaupt stattfindet. Bei allen physikalisch möglichen Prozessen in abgeschlossenen Systemen bleibt die Entropie erhalten oder sie nimmt zu. Beim Gleitschirmfliegen sind die HS eins und zwei relevant. Die Dynamik, die ein Schirm nach einer Irritation entwickeln kann, beweist, wie die Entropie 'arbeitet': Im Ruhezustand (Startplatz) liegt die entropische Zustandsgrösse bei x Joule. Ab dem Start ändert sie sich im (geschlossenen) System Schirm-Pilot. Sie muss sich ändern, da der Prozess nicht reversibel verläuft. Der Flug ist so mit Energieverlusten verbunden, wodurch sich die Entropie erhöht. Eine Verringerung der Gesamtentropie in einem geschlossenen System ist nicht möglich.

Bionik und Ornithologie. Nun kommen wieder die Flieger, die einwenden: Aber ein Vogel hat doch auch gewölbte Flügel. Und der stellt ja wohl die perfekte Flugmaschine per se. Nun, da muss man schon was von Evolution wissen. Bioniker und Ornithologen sollten das studiert haben: Als die Fische - also die Knochenfische des Silur – vor gut 375 Millionen Jahren auf die Ufer traten und amphibisch lebten, entwickelten sich einige derer zu Reptilien, andere zu reinen Landgängern. Auf der Suche nach Nahrung mutierten die vorderen Extremitäten (bis dato mit einem Handskelett, gekrümmt zum Greifen fähig) zu Flügeln, um ab einem grossen stumpfen Winkel (ab 70°) leichter auf die Bäume zu gelangen. Und somit war vor circa 135 Millionen Jahren der Vogel geboren. Die gekrümmte Flügelform war also evolutions-technisch von der ursprünglich gekrümmten Form der vorderen Greif-Extremitäten bestimmt. Und war nur deshalb gewölbt.

Idee: Wäre dennoch interessant, mal einen Schirm plano zu konstruieren. Als SOL den true-one-liner vorstellte, wollte auch kein Unwissender glauben, dass er fliegt. Und wie der fliegt!

Ein Doppelsegel, 10cm dick über die gesamte Flügeltiefe, vorne verstärkt, Primärlast auf A, hinten dünn – das muss gehen. Sorry: fliegen.

Also wirklich nur Liftkarte?

Ja. Leider für die Anhänger der Verbalabsonderungen ihrer Fluglehrer: Wir fliegen, weil wir vorab ein Ticket erworben haben. Dafür stellt der Liftbetreiber Strom für die Anlage bereit. Mit der Energie können wir eine definierte Zeit (ohne Thermik) fliegen. Ist der Liftbetreiber-Strom verbraucht, stehen wir am Boden. Sorry Monsieur B! Wer jetzt sagt, er könne aber stundenlang oben bleiben, also gelte der zweite HS/die Liftkarte nicht: Wie sieht es dann mit der von aussen zugeführten Energie in Form von Wind oder Wärme aus? Dem Schirm muss immer im geschlossenen System (hier Basis: Luftraum ohne Bewegung) Energie zugeführt werden. Diese Energiemenge ist situativ exakt definiert. Wir können also mit dem Lift hochfahren und haben damit unseren Energieakkumulator gefüllt – dies nennt man Lage- oder Höhenenergie. Wir können auch hoch laufen. Oder wir können uns einen Motor anhängen. Aber ohne Energie-Input geht nie was. Sind wir einmal airborne und wird von aussen zusätzliche Energie zugeführt, fliegen wir länger. Aber diese exogene Energie steht im genauen Verhältnis zu dem, was unser Schirm dann 'mehr kann'. Wird der systemisch definierte Energie-Input überschritten, können wir gar steigen. Geht die Sonne dann unter, lässt der Wind nach, gehen wir auch runter. Und damit kommt der HS der Thermodynamik zur Anwendung. Das ist das ganze Geheimnis.

Zu Energie und ihrem Potential: Die potentielle Energie - auch *Lageenergie* genannt - kommt dem Schirm durch seine Lage in einem Kraftfeld zu, sofern es sich um eine konservative Kraft handelt. Dies ist in unserem Fall des Fliegens das Schwerefeld der Erde. Bewegt sich der Schirm von einem Punkt (Startplatz), an dem er eine hohe potentielle Energie hat, zu einem Punkt (Landewiese), an dem diese geringer ist, leistet er genau so viel physikalische Arbeit, wie sich seine potentielle Energie vermindert hat. Diese Aussage gilt unabhängig davon, auf welchem Weg (z.B untersch. Gleitwinkel) der Körper vom einen zum anderen Punkt gelangt ist. Die potentielle Energie eines Körpers mit der Masse in einem Gravitationsfeld mit Gravitationsbeschleunigung ist proportional zur Höhe über dem Ursprung des Koordinatensystems: Beim Fliegen wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt, indem der Schirm auf eine Geschwindigkeit (Vx) beschleunigt wird. Der Schirm verhindert also nur den Fall nach unten (freier Fall), die Kraft wirkt resp. wird nach vorn (via Fläche und Anstellwinkel x) umgelenkt. Je grösser der Anstellwinkel, desto langsamer der Flug. Ob senkrecht oder mit Gleiten 9 – die Energieumwandlung ist rechnerisch immer gleich.
Aber wir können im Flug nicht alle 'getankte' Energie zu 100% umwandeln; ein Teil wird über Reibung in Wärme an Ober- und Untersegel aussen, an Leinen und am Piloten 'vernichtet'. Das weiss wohl jeder. Aber ein Hundertstel wird auch in Ton (Rauschen an Segel, Leinen, Helm et al.) umgewandelt. Wenn auch kaum spürbar, aber selbst dieser Verlust ist messbar und kostet Gleitleistung.

Nun könnte man noch auf viele weitere Details und Grössen eingehen, aber das gehört in die Uni, wird zu spezifisch und kompliziert. Fest steht: Wir fliegen nicht, weil der Schirm ein auftriebserzeugendes Profil hat. Sondern weil die (getankte) Energie – also Gewichtskraft – uns wieder nach unten zieht.

Nur ein einziges Faktum spricht für die gewölbte und vorn gerundete Fläche: Das Unterschneiden (primär der negative Anstellwinkel und dessen Folgen) wird stark minimiert; die Profilsehne hat positiv einen grossen, negativ einen annehmbaren und somit verzeihenden Winkel- und Arbeitsbereich. Sprich positiv kann man weit anstellen, negativ bleibt der Flügel auch länger klappresistent. Reason-why: Die Abrisszone und der Abrisszeitpunkt kann per Wölbung recht genau definiert werden, je nach Anforderung des langsamen (Schirm) oder schnellen Flügels (Jet). Ein Planoprofil mit einer scharfen leading edge reisst im Langsamflug unkontrolliert über die Flügelbreite ab, selbst die Schränkung hilft da wenig. Die Fläche in turbulenter Luft oder/und mit des Grobmotorikers Hand drehe also schnell nach hinten-seitlich weg oder wäre vorn öfters negativ angeströmt. So gesehen stellt die Form schon eine halbwegs sichere Lösung. Aber nur in diesem Punkt ist die gewölbte Form sinnvoll.

Conclusio finalis: Wir fliegen, weil wir zuvor Energie aufgebaut haben. Punktum! Und hätten die Fluglehrer und der Vorgaben-ausgebende Verband Profil (und Wissen), würden sie nicht solchen aerodynamischen Unsinn lehren.

Zur positiven Verifizierung und zur Entspannung: A4-Blatt rausholen (optimal: Kentpapier mit ca 200 g/m² – in D schwer erhältlich), im WWW Faltanleitungen suchen und auf zum Papierfliegerbau. Und back to childhood. Das kann so viel Spass bereiten! Und lernen kann man auch was draus. Positiver Effekt: Hunderte sinnfreie Kommentare zur Flugtechnik und Sicherheit im Forum entfielen.

Harald E. Wolf © 9/2014