



# 1. Grundlagen der Aerodynamik

## 1.1 Fliegen und das Kräftegleichgewicht

### Situationsbeschreibung

Unsere Reise in die Aerodynamik beginnt ausnahmsweise direkt in der Luft. Jeder von uns Gleitschirmflieger\*Innen kennt sicher noch das einmalige Gefühl vom ersten Abheber mit einer bemerkenswerten zurückgelegten Strecke in der Luft: Ein Gefühl von Freiheit und Schwerelosigkeit, die weggeblasene vermeintliche Höhenangst und der leichten Enttäuschung, den Boden wieder berühren zu müssen. Der anschließende Wunsch, gleich und sofort noch mal abheben und schweben zu wollen. Der Beginn unserer Leidenschaft.

Warum fühlen wir uns auf einmal so unbeschwert und frei? Warum sind das die Momente, welche wir genießen können und uns immer wieder in diesen Schwebzustand sehnen?



**Abb. 1.1:** Das erste Mal abheben uns schweben

Die wesentliche Ursache ist, dass wir nach dem erfolgreichen Abheben keine Kräfte und keine Beschleunigung mehr spüren. Wir befinden uns im Gleitflug in einem Zustand, welcher völlig im Gleichgewicht ist und wir damit

äußerlich, wie innerlich auch. Wenn wir überhaupt was spüren, dann ist es der Fahrtwind unserer relativen Bewegung durch die Luft auf unserer Nase.

Erschrecken würde uns jetzt nur eine Beschleunigung. Ganz unangenehm wäre diese Beschleunigung in Richtung des Erdbodens – mit dem Gefühl des Fallens.

Genau das ist auch der Unterschied zu einem Absprung aus einem Turm, von der Brücke an der Bungee-Gummi-Schnur oder gar aus einem intakten Flugzeug ohne Fallschirm heraus: Im ersten Moment würde unser Körper eine Beschleunigung erfahren, welche uns nicht wirklich angenehm ist.

Wir würden das Gefühl des immer schnelleren Fallens haben, die Fallgeschwindigkeit erhöht sich dabei immer weiter. Uns wird jedoch die aktuelle Situation und die vorhersehbaren Folgen wahrscheinlich unangenehm sein: Der Erdboden kommt sichtbar und unausweichlich schnell auf uns zu. Das Ende ist ohne rettende Maßnahmen in Form eines sich öffnenden Fallschirms/Rettungsschirms für den weiteren Gang einer fliegerischen Laufbahn eher unvorteilhaft.

Mit einem geeigneten Gleitsegel (Gleitschirm, Hängegleiter, Segelflugzeug, Motorflugzeug mit ausgefallenem Motor,...) haben wir das geschilderte Problem mit einem potentiell schmerzvollem Ausgang dank der Physik und der aerodynamischen Einfluss-faktoren glücklicherweise nicht: Alle auf uns einwirkenden Kräfte heben sich auf. Unsere nach unten wirkende Gewichtskraft wird durch die Auftriebskraft an unserem Flügel nach oben eliminiert, die nach hinten wirkende Widerstandskraft wird durch die in Flugrichtung entlang des Gleitpfades gerichtete Vortriebskraft kompensiert.

Ein ähnlich beschreibbares Gleichgewicht entsteht auch in einem motorisierten Flug. Jeder Passagier eines Linienflugzeuges kennt diesen Zustand sehr genau: Der Urlauber hat die Reiseflughöhe erreicht, die Anzeichen gehen aus, die Stewards und Stewardessen kommen mit dem O-Saft vorbei und wir genießen die Aussicht nach draußen.

Hier spüren wir eben auch keine Beschleunigung mehr, alles hat sich in einen Ruhezustand eingependelt. Der O-Saft wird nicht ausgeschüttet, außer wir rempeln unsern Nachbarn an.

Nur am Anfang der Startphase und dann beim Abbremsen nach der Landung verspüren wir Beschleunigungskräfte. Hingegen in der Luft in Reiseflughöhe, aber auch im gleichmäßigen Steigflug und im ebenso gleichmäßigen Sinkflug ist es eher angenehm ruhig, außer wenn der Pilot uns durch Turbulenzen fliegt. Genau hier sind es wieder die Beschleunigungskräfte durch diese Turbulenzen, welche bei uns ein innerliches Unwohlsein verursachen können.

Ein weiteres Beispiel ist die Fahrt in einem (schnellen) Fahrstuhl. Wenn wir oben einsteigen und der Fahrstuhl sich abwärts in Bewegung setzt, fühlen wir so etwas wie eine Gewichtsabnahme durch die Beschleunigung nach unten. Dann wird es langweilig aufgrund der gleichmäßigen Reisegeschwindigkeit. Wir sind in einem stationären Zustand. Erst beim Abbremsen kurz vor dem Erdgeschoss spüren wir wieder zunehmende Kräfte, da das Abbremsen physikalisch ebenfalls eine Beschleunigung nur mit anderem Vorzeichen ist.

### Hintergrund

Würde uns in großer Höhe der Boden unter den Füßen hinweggezogen, wäre unser Körper ohne aerodynamische Un-

terstützung der Erdanziehungskraft ungestützt ausgesetzt.

Diese Erdanziehungskraft zieht uns dabei aus der Höhe regelrecht auf den Boden der Tatsachen herunter und beschleunigt unsere Fallgeschwindigkeit mit jedem Meter, welchen wir uns zum Erdmittelpunkt bewegen. Es geht abwärts und das immer schneller: Die Fallgeschwindigkeit erhöht sich mit jeder Sekunde um knapp 10 m/s (36 km/h), nach 3 Sekunden werden wir schon mit mehr als 100 km/h nach unten rauschen.

Da wir nicht im luftleeren Raum schweben wird sich die Fallgeschwindigkeit Dank des entgegenwirkenden (Luft-)Reibungswiderstandes auf einem konstanten Wert einpendeln (ca. 200 km/h in Bauchlage, ca. 300 km/h kopfüber). Dies ist dann zwar auch wieder ein stationärer Zustand. Aber ziemlich schnell. Nützlich ist das nicht wirklich.

Nützlich hingegen sind zwei Faktoren: Ein Gleichgewichtszustand ohne Beschleunigung und ein damit verbundenes langsames Sinken.

In Abbildung 2 sieht man gerade den Abhebevorgang, bei dem der Gleitschirm-Pilot „schwerelos“ in die Luft gleitet.

Die Auftriebskräfte am Flügel haben genau die gleiche Kraft, mit der der Pilot aufgrund der Schwerkraft am Boden gehalten würde. Die Schwerkraft ist nun ausgeglichen. Diese Auftriebskraft wird durch die ausreichende Vorwärtsgeschwindigkeit der Einheit „Pilot und Gleitschirm“ erzeugt. Dabei wird Energie verbraucht – durch unser Eigensinken.

<sup>1</sup> Die Erdbeschleunigung beträgt im reibungsfreien Zustand 9,81 m/s<sup>2</sup>. Nach 3 Sekunden reibungsfreier Fall erreichen wir eine Geschwindigkeit von 9,81 m/s<sup>2</sup> \* 3 s = 29,4 m/s. Dies entspricht 105,9 km/h





Abb. 1.2: Grafik stationärer Flug: Gewichtskraft und resultierende Luftkraft sind identisch

Wir nutzen unbewusst in diesem Moment Höhenenergie (Potenzielle Energie), welche nun in Bewegungsenergie (kinetische Energie) umgewandelt wird. Die Höhenenergie haben wir uns durch eine längere Bergwanderung oder durch den Vereins-Shuttleservice erarbeitet. Für die langsame Umsetzung in kinetische Energiesorgt nun unser Gleitsegel. Und das in einem wunderbaren Gleichgewicht mit der Schwerkraft und dem selbst erzeugten Auftrieb. Wir fliegen „aerodynamisch“, ohne dabei zu fallen!

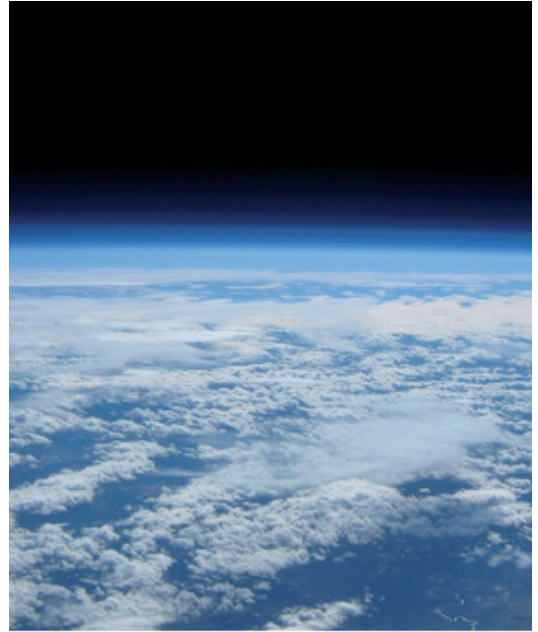
## Physikalische Vertiefung

Kräftegleichgewichte sind ein Grundbaustein in physikalischen und in speziell in diesen „mechanischen“ Betrachtungen:

Der Planet Erde hat einerseits mit seiner Erdanziehungskraft uns Menschen auf die Erdoberfläche gebannt. Andererseits verhilft uns die einzigartige Atmosphäre unseres Planeten mit seiner Zusammensetzung und Dichte zu Möglichkeiten, dieses Gasgemisch aus einer größeren Höhe unbeschadet zu durchschreiten. Die dünne Gasschicht – auch vereinfacht Luft genannt – hat „Balken“, an den wir uns bei geschickter Ausnutzung durch sinnvoll, den physikalischen Anforderungen angepassten Gerätschaften auch ohne den freien Fall allmählich aus größerer Höhe nach unten hangeln können. Hierbei kommt dem Thema der Strömungslehre eine große Bedeutung zu, welche in den nächsten Kapiteln tiefergehend betrachtet wird.

Bei der Kräftebetrachtung hingegen gehen wir erstmal vereinfacht davon aus, dass ein sinnvoll gestalteter Auftriebskörper bei einer entsprechenden Vorwärtsfahrt genauso viel Auftrieb erzeugt, welche der Gewichtskraft des Flugkörpers entspricht. Die Vorwärtsfahrt generiert den Auftrieb. Damit diese Fahrt nicht zum Erliegen kommt, muss der Flugkörper in Bewegung bleiben. Wenn wir eine Energiequelle mitführen würden, könnten wir sogar die Höhe halten oder auch ohne Aufwinde steigen.

Haben wir keine solche Energiequelle, bleibt uns nur der Weg nach unten – die Erdanziehungskraft wird dabei zu unserer aktuellen Energiequelle.



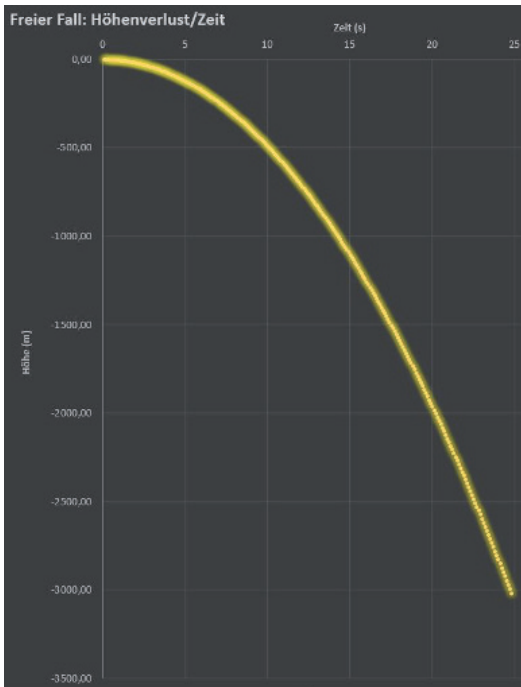
**Abb. 1.3:** Atmosphäre der Erde – Bild aus ca. 30 km oberhalb der Erdoberfläche.

Nochmal zurück zu Thema Fallen und Fliegen. Beides nutzt die Schwerkraft.

Wenn wir der Einfachheit halber zuerst mal den Auftrieb, die Luftreibung, die Zunahme der Gravitationskraft bei Annäherung an die Erde und der Folgen der Erdrotation (Corioliskraft) außer Acht lassen, fällt ein anfänglich in Ruhe befindlicher Körper senkrecht mit der konstanten Beschleunigung  $g$ , deren Wert etwa **9,81 m/s** beträgt. Wenn wir die Startlinie mit der Höhe aus der wir uns fallen lassen auf den Zeitpunkt „0“ setzen, vereinfachen sich die Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit und der dabei zurückgelegten Strecke auf diese Zusammenhänge:

$$v(t) = gt \quad \text{Fallgeschwindigkeit}$$

$$s(t) = \frac{1}{2} gt^2 \quad \text{Höhenverlust}$$



**Abb. 1.4:** Zunahme der Fallgeschwindigkeit pro Zeiteinheit (ohne Berücksichtigung von Reibungswiderständen).

In Abb. 5 kann man die Zunahme der Fallgeschwindigkeit erkennen: Nach 5 Sekunden des freien Falls sind ca. 100 Meter zurückgelegt, nach weiteren 5 Sekunden sind wir schon 500 Meter tiefer, nach 15 Sekunden sind es 1000 Meter, nach 20 Sekunden sind es beachtliche 2000 Meter.

Die Abwärts- bzw. Sinkgeschwindigkeit nach diesen 20 Sekunden hat sich dabei schon auf beachtliche 713 km/h (~ 200 m/s) erhöht. Die Aufprallenergie wird sicherlich bemerkenswert sein – zumindest für außenstehende Beobachter.

In der Realität hilft uns der Luftwiderstand, diese Geschwindigkeit zu drosseln: Je nach Ausrichtung des Körpers wird sich dies abwärts gerichtete Geschwindigkeit auf 200-300 km/h einpendeln. Unsere Atmosphäre ist da also schon von der grundsätzlichen Auslegung her geeignet,

sozusagen schützend zu wirken. Bei zurückkehrenden Raumflugkörpern, abstürzenden Satelliten und insbesondere Meteoriten schützt es ja auch: Der zunehmende Luftwiderstand entwickelt gleichzeitig so viel Reibungswärme, welche sichtbar bis hin zum Verglühen des fallenden Körpers führen kann. Was als Sternschnuppe so lieblich ausschauen kann, ist trotzdem für uns als selbst fallender Körper nicht besonders angenehm. Daher wenden wir uns lieber dem aerodynamischen Fliegen zu:

Diese gerade beschriebene Luftreibung ist bei sinnvollerer Ausnutzung genau auch das Hilfsmittel, um die berühmten Balken in der Luft zu verankern. Da sie nicht nur in vertikaler Richtung, sondern auch in horizontaler (und in jede andere dazwischen liegende) Richtung entsteht, muss ein Fluggerät nur darauf achten, dass es in Bewegung bleibt – und das in weitgehend horizontaler Richtung. Fluggeräte und damit auch unser Gleitschirm können das.

Durch die Vorwärtsfahrt wird einerseits Auftrieb und andererseits Widerstand erzeugt. Die vektorielle Addition dieser beiden Kräfte entspricht der resultierenden Luftkraft, welche die Gewichtskraft kompensiert (Abbildung 5).

Die Höherenergie (potenzielle Energie) wird dabei gleichmäßig in kinetische Energie umgewandelt. Dies geschieht im Gegensatz zum freien Fall über einen deutlich längeren und damit angenehmeren Zeitraum.



Abb. 1.5: Kräftegleichgewicht am Fluggerät

Um einen Vergleich zum Fall-Bespiel zu machen nehmen wir einen Standard-Gleitschirm als Grundlage. Dabei nehmen wir hier an, dass die horizontale Fluggeschwindigkeit im getrimmten Zustand 36 km/h (10 m/s) beträgt. Die Sinkgeschwindigkeit liegt dabei bei 4,5 km/h (1,25 m/s).

Was sind nun die erlebbaren Unterschiede zum „freien Fall“:

Wenn wir überhaupt nichts tun, also die Steuergriffe an der Führungsrolle lassen, dabei in absolut ruhiger Luft uns gleitend dem Boden entgegen bewegen, werden sich die horizontale und die vertikale Geschwindigkeit nicht erhöhen. Wir sind in einem stationären, beschleunigungsfreien Bewegungszustand.

Die Dauer des Aufenthalts in der Luft wird sich auf 1600 Sekunden erhöhen (**2000 m / 1,25 m/s**), im Gegensatz zu den 20 Sekunden beim freien Fall. Das sind umgerechnet immerhin knapp 27 Minuten (**1600 s / 60 s**) des Genusses.

Und wenn wir nun schön geradeaus fliegen und keinen Gegenwind haben, legen wir dabei eine Strecke von 16 km (**1600 s \* 10 m/s = 16.000 m**) zurück, was auch deutlich mehr ist als die marginale kleine (0 Meter) horizontale Strecke beim freien Fall.

Während der frei fallende Körper nach 20 Sekunden den Boden berührt, haben wir im Gleitschirm gerade mal 25 Meter Höhe verloren (**20 s \* 1,25 m/s**) und noch 1975 Meter Fluggenuss unter uns.

Selbst wenn wir dann 27 Minuten später beim Landen alle guten Vorsätze mit Abfangen und Durchbremsen vergessen, wird der Aufprall einem Sprung aus ca. einem Meter Höhe entsprechen, was die meisten Körperteile prinzipiell unbeschadet überstehen könnten.

Aus nachvollziehbaren Gründen verdient der Gleitflug als eine sinnvolle Bewegungsart in der Luft daher in den folgenden Kapiteln mehr Beachtung....

Über den Autor:



Paul Seren ist Papillon-Fluglehrer, Dipl.Ing. der Luft- und Raumfahrttechnik, begeisterter Flugsportler, Tandempilot und Mitglied im DHV-Lehrteam.