

Schwerelosigkeit, Fallturm und Parabelflug

Dies ist eine Zusammenstellung aus dem Internet ergänzt durch eigene Gedanken zum Thema.

1 Schwerelosigkeit

Wo herrscht Schwerelosigkeit?

You might think that astronauts are weightless because they are far from the Earth. So you might ask, "What height above the Earth must astronauts reach to achieve weightlessness?" But it's not any particular height or altitude that makes them weightless. Gravity is almost as strong at the height of the International Space Station as on the surface of the Earth – only a few percent weaker. (<http://ataridogdaze.com/weightless/outer-space.shtml>)

Rechnen Sie selber nach:

$$r_{earth} = 6.371 \cdot 10^6 \text{ m} = 6.371 \cdot 10^3 \text{ km} = 2.090 \cdot 10^7 \text{ ft}$$

$$g = g_0 \cdot \left(\frac{r_{earth}}{r_{earth} + h} \right)^2 \quad g_0 = 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

In 400 km Höhe (der Höhe der Internationalen Raumstation, ISS) ist $g/g_0 = 0,885$.

Wie entsteht Schwerelosigkeit?

It's not the height, but the motion of the spacecraft that causes weightlessness. Any object that is falling freely is weightless, no matter where it happens to be. This can be the International Space Station at a height of 200 miles, a NASA reduced-gravity airplane at a height of several thousand feet, a drop tower at several hundred feet, or you jumping off a chair at 3 feet ... a spacecraft becomes weightless when the engines are shut off, irrespective of the altitude. (<http://ataridogdaze.com/weightless/outer-space.shtml>)

Wenn wir auf einem Stuhl sitzen, dann übt der Stuhl eine Kraft N auf uns aus, um die Gewichtskraft W zu kompensieren.

$$N - W = m a \quad , \quad \text{weil} \quad N = W \quad \text{ist, ist dann auch} \quad a = 0 \quad .$$

Wenn keine Kraft mehr an uns angreift (außer der Gewichtskraft), wenn wir nicht mehr gehalten werden müssen (wenn also N wegfällt), dann fühlen wir uns schwerelos.

$$W = m g = m a \quad \Rightarrow \quad a = g \quad .$$

Wir fallen oder falls wir nach oben geschossen wurden wird diese Geschwindigkeit reduziert. Allgemein ausgedrückt: Wir sind nur noch der Erdbeschleunigung g ausgesetzt. Die Erdbeschleunigung integriert ergibt

$$v = g t + v_0 \quad v_0 \text{ ist die Geschwindigkeit bei } t = 0 \quad .$$

Aus der Integration der Geschwindigkeit v :

$$s = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t + s_0 \quad s_0 \text{ ist die Strecke bei } t = 0 \text{ bezogen auf irgendeinen Nullpunkt.}$$

g, v, s in Richtung des Erdmittelpunkt positiv abgetragen.

Wohin fällt eine Kanonenkugel?

Sir Isaac Newton hatte sich Gedanken gemacht wohin eine Kanonenkugel fliegt, die mit sehr großer Geschwindigkeit horizontal von einem Berg abgeschossen wird.

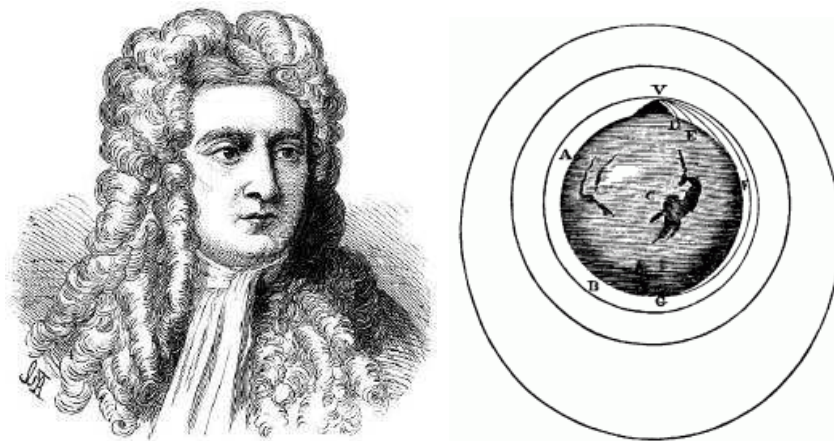


Bild 1: Sir Isaac Newton and his orbit diagram
(<http://ataridogdaze.com/weightless/outer-space.shtml>)

If you go to the top of a tall mountain and fire a cannon horizontally, the cannon ball falls to the ground in a curved path. The more powerful the cannon, the faster the cannon ball, the straighter the path, and the farther the cannon ball travels before it hits the ground. If you could shoot the cannon ball with sufficient speed, the curvature of its path would match the curvature of the Earth, and it would travel endlessly in a circular orbit around Earth.

(<http://ataridogdaze.com/weightless/outer-space.shtml>)

Wohin fällt eine Raumstation?

If the International Space Station is falling freely without power, why doesn't it fall back to Earth? The answer is that it is in orbit around the Earth. It is falling freely toward Earth, but it is traveling so fast that the curvature of its path matches the curvature of the Earth. It's the same reason that the Moon doesn't fall to Earth, and the Earth doesn't fall into the Sun. (<http://ataridogdaze.com/weightless/outer-space.shtml>)

Nun, dass ist *eine* Erklärung. Eine andere gleichwertige Erklärung ist diese: Ein Körper behält ohne äußere Krafteinwirkung seine Geschwindigkeit und Richtung bei. Ein Körper fliegt nur dann auf einer Kreisbahn, wenn es eine Kraft gibt, die den Körper ständig zum Kurvenmittelpunkt hin zieht. Diese Kraft wird Zentripetalkraft¹ genannt.

$$m g = m \omega^2 r = m \frac{v^2}{r} = m V \omega \quad (1)$$

So kann z. B. die Umlaufzeit der ISS mit Daten von oben berechnet werden.

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{r}} = \sqrt{\frac{g}{r_{earth} + h}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r_{earth} + h}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{6771000 \text{ m}}{0.885 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2}} = 5549 \text{ s} = 1,54 \text{ h} = 1 \text{ h } 32 \text{ min}$$

Wollen Sie Schwerelosigkeit selbst erfahren?

Tabelle 1 zeigt Möglichkeiten wie man Schwerelosigkeit erfahren kann.

Tabelle 1: Unterschiedliche Möglichkeiten um Schwerelosigkeit zu erfahren

Möglichkeit	Dauer (ca.)	Preis (ca.)	Link
Sprung vom <i>Tisch</i>	1/2 s	kostenlos	–
Aktion im <i>Fallturm</i>	5 s	20 €	http://en.wikipedia.org/wiki/Drop_tower
Parabelflug im kleinen <i>Propeller- flugzeug</i>	10 s	100 €	–
Parabelflug im <i>Jet</i>	22 s	5000 US\$	http://www.gozerog.com
Gast in einer <i>Raum-</i>	12 Tage	40 MUS\$	http://en.wikipedia.org/wiki/Space_tourism #List_of_flown_space_tourists

¹ Die Zentripetalkraft zeigt zum Mittelpunkt des momentanen Krümmungskreises. Nur bei einer reinen Kreisbewegung ist die Zentripetalkraft eine Zentralkraft, die immer auf den gleichen Punkt gerichtet ist, den Kreismittelpunkt. Die Gegenkraft zur Zentripetalkraft ist die Fliehkraft. Die Fliehkraft wird nicht genutzt, wenn man (wie hier) die Bewegungsgleichung als $F = m a$ schreibt.

station

Sprung vom Tisch

Das kennt jeder. Die Sprungdauer hängt ab von der Sprunghöhe s .

$$s = \frac{1}{2} g t^2 \Rightarrow \text{Dauer der Schwerelosigkeit: } t = \sqrt{\frac{2s}{g}}$$

$$\text{Aufprallgeschwindigkeit: } v = g t = g \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{2g s}$$

Der Fallturm und der Parabelflug werden in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben.

2 Fallturm

A drop tower ... is a type of amusement ride, based around a central structure or tower. Drop towers vary in height, passenger capacity, lift type, and brake type. Many are custom made, although there are some mass-produced designs. Riders experience free-fall initially, followed by rapid heavy deceleration. With most drop towers, a gondola carrying riders is lifted to the top of the vertical structure, then released to free-fall down the tower. Brakes activate to slow the gondola as it approaches the bottom of the ride. (http://en.wikipedia.org/wiki/Drop_tower)

Der höchste derartige Fallturm ist 120 m hoch. Das ergibt 5 s Schwerelosigkeit.

Ein Fallturm kann aber auch genutzt werden, um wissenschaftliche Versuche zu machen. Diese Aufgabe hat der Fallturm in Bremen (<http://www.zarm.uni-bremen.de/drop-tower.html>).

Der Fallturm Bremen ist ein in Europa einzigartiges Großlabor, das Wissenschaftlern aus aller Welt die Möglichkeit zu erdgebundenen Experimenten unter kurzzeitiger Schwerelosigkeit bietet. Im Gegensatz zur orbitalen Mikrogravitationsforschung besteht hier eine permanente und kostengünstige Nutzungsmöglichkeit. Seit Inbetriebnahme im September 1990 steht das 146m hohe Betonbauwerk auf dem Gelände der Universität Bremen zur Verfügung und ist eine wichtige Ergänzung zu den bestehenden und geplanten Laboreinheiten der orbitalen und suborbitalen Schwerelosigkeitsforschung. Seither werden kontinuierlich ca. 400 Experimentabwürfe im Jahr durchgeführt. Mit der Anlage ist es möglich, bis zu dreimal täglich für jeweils 4,74 Sekunden den Zustand der Schwerelosigkeit zu erreichen. Im Dezember 2004 wurde eine Katapultanlage in Betrieb genommen, die im ZARM entwickelt wurde und weltweit einzigartige Forschungsbedingungen schafft. Die Dauer eines Fallexperiments kann nun verdoppelt werden, wenn statt des einfachen Falls ein „senkrechter“ Parabelflug durchgeführt wird. (http://www.zarm.uni-bremen.de/fileadmin/images/droptower/downloads/ZARM-Brosch%C3%BCre_Fallturm.pdf)

Der Katapult muss das Versuchsobjekt auf die Geschwindigkeit $v_0 = -\sqrt{2g s}$ beschleunigen. Das Minuszeichen steht für die Richtung der Geschwindigkeit: positiv ist eine Geschwindigkeit

keit nach unten. Wenn ein Körper senkrecht nach oben mit einer Geschwindigkeit $-v_0$ abgeschossen wird, dann kommt er genau mit der Geschwindigkeit v_0 unten wieder an. Die Flugzeit hat sich verdoppelt.

Video:

<http://www.guardian.co.uk/science/video/2011/mar/18/weightless-bremen-microgravity-tower>

3 Parabelflug

Im Internet gibt es verschiedene Beschreibungen des Parabelfluges. Von allen diesen Beschreibungen kann man verschiedenes lernen

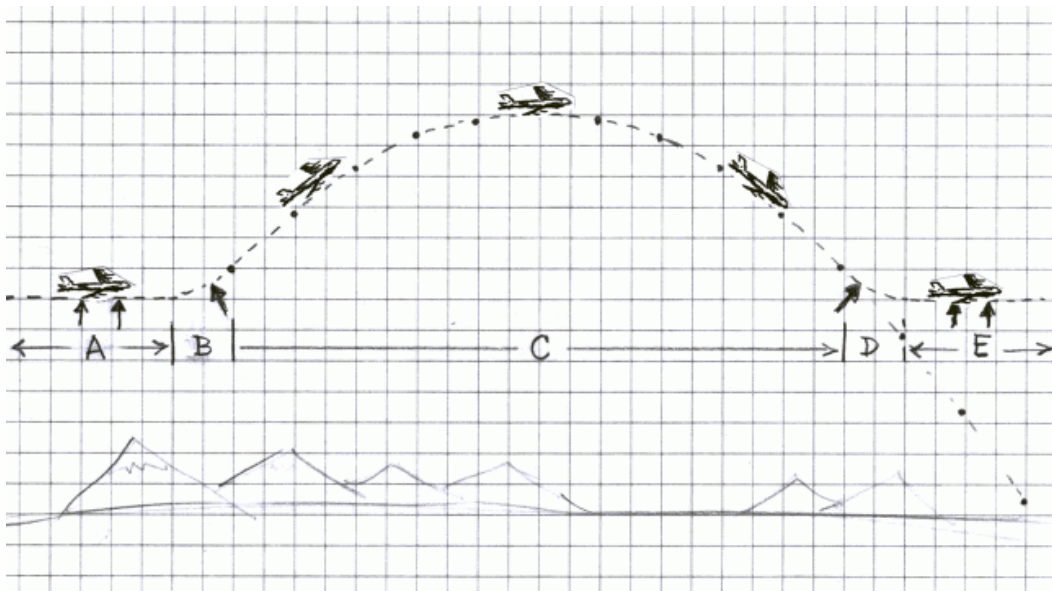


Bild 2: Erklärung des Parabelfluges
(<http://ataridogdaze.com/weightless/parabolic-flight.shtml>)

Let's consider the path of the zero-G airplane. There are five phases, labeled A through E in the diagram.

During phase A, the airplane travels horizontally at a constant speed. The force of lift on the wings holds up the airplane. The airplane is held steady (not falling freely), so the passengers feel normal weight.

During phase B, the pilot pulls back on the control stick, forcing the airplane upward against gravity. The strong aerodynamic force against the wings pushes up the airplane, This changes the direction of motion from horizontal to diagonal-upward, causing the passengers to feel greater-than-normal gravity, or "Gs" of force. The amount of G-force depends on the curvature of the airplane's path. The tighter the curve, the greater the G-force.

During phase C, the airplane flies freely, without any external forces acting against it, except for wind (aerodynamic drag). The pilot can exactly cancel the effects of drag by keeping the engines running at just the right level. The passengers are weightless during this part of the ride.

During phase D, the pilot pulls back on the control stick, forcing the airplane upward against its downward path. The strong aerodynamic force against the wings pushes up the airplane from its

downward path, just like the ramp in the previous example. This changes the direction of motion from diagonal-downward to horizontal, causing the passengers to feel greater-than-normal gravity. As with the first upward change in path, the amount of G-force depends on the curvature of the airplane's path.

During phase E, the airplane travels horizontally at a constant speed, just like phase A. The force of lift on the wings holds up the airplane and the passengers feel normal weight.

If the airplane starts its ascent at a speed of 550 miles per hour (885 km/hr) at an angle of 45 degrees, it will achieve a height of about 5,000 feet (1500 meters) above the "ramp," providing about half a minute of weightlessness in the parabolic flight path. If you need some additional weightlessness time, you can allow the plane to continue falling along the parabolic path shown below the letters D and E.

(<http://ataridogdaze.com/weightless/parabolic-flight.shtml>)

Was ist der Unterschied zwischen den horizontalen Flugphasen A und E gegenüber C?

You might notice that the airplane is flying horizontally during both phase A and at the exact middle of phase C. So why do the passengers feel normal weight in the former case and weightlessness in the latter case, even though the direction of travel is exactly the same?

The answer lies in what happens just before and after the point in question. During phase A, the motion of the airplane is steady and unchanging. In the middle of phase C, the direction of travel is changing -- before the airplane it traveling upward, then level, then downward; it is following the path of a freely falling cannon ball. Freely falling objects don't travel in a straight horizontal line.

(<http://ataridogdaze.com/weightless/parabolic-flight.shtml>)

Wenn man es genau nimmt, dann sind die Phasen B und D deutlich länger und hinter B und vor D ist jeweils noch eine Transitionsphase eingeschoben. Lesen wir noch einmal eine andere Beschreibung (<http://de.wikipedia.org/wiki/Parabelflug>):

Die Maschine fliegt zuerst horizontal mit Höchstgeschwindigkeit.

Sie geht dann mit einem Bahnneigungswinkel von 45° in einer **1. Phase** in einen Steigflug über. Während dieser Phase herrscht in der Maschine ca. doppelte Erdbeschleunigung.

In der normalerweise ca. 5 Sekunden andauernden **2. Phase**, der Transitionsphase, werden die Triebwerke gedrosselt, sodass der Schub nur den Luftwiderstand ausgleicht. In dieser Phase kann man eine deutliche Schwerkraftabnahme spüren..

In der **3. Phase**, der eigentlichen Schwerelosigkeitsphase, die im englischen Sprachraum mit „microgravity“ genauer beschrieben wird, steigt die Maschine weiter, indem sie einer Wurfparabel folgt. Sie erreicht am höchsten Punkt, abhängig vom Flugzeugtyp, etwa 7000 bis 8500 m (23000 ft ... 28000 ft). Die Vertikalbewegung ist jetzt so wie ein freier Fall. Die Zeitdauer der Schwerelosigkeit beträgt im Durchschnitt ca. 22 s.

In der **4. Phase** (einer weiteren Transitionsphase) leitet der Pilot bei einem Bahnneigungswinkel von ca. -45° die Schwerelosigkeit gleichmäßig aus. Dabei kommen in der Kabine alle Personen sanft auf den Boden zurück

In der **5. Phase** wird die Maschine nun durch Ziehen des Höhenruders abgefangen, die Triebwerke werden wieder hochgefahren. Hierbei herrschen wiederum ca. 2 g. Dieser Vorgang dauert 20 Sekunden.

Nach einer Pause von etwa 2 Minuten im Horizontalflug wird dann die nächste Parabel begonnen.

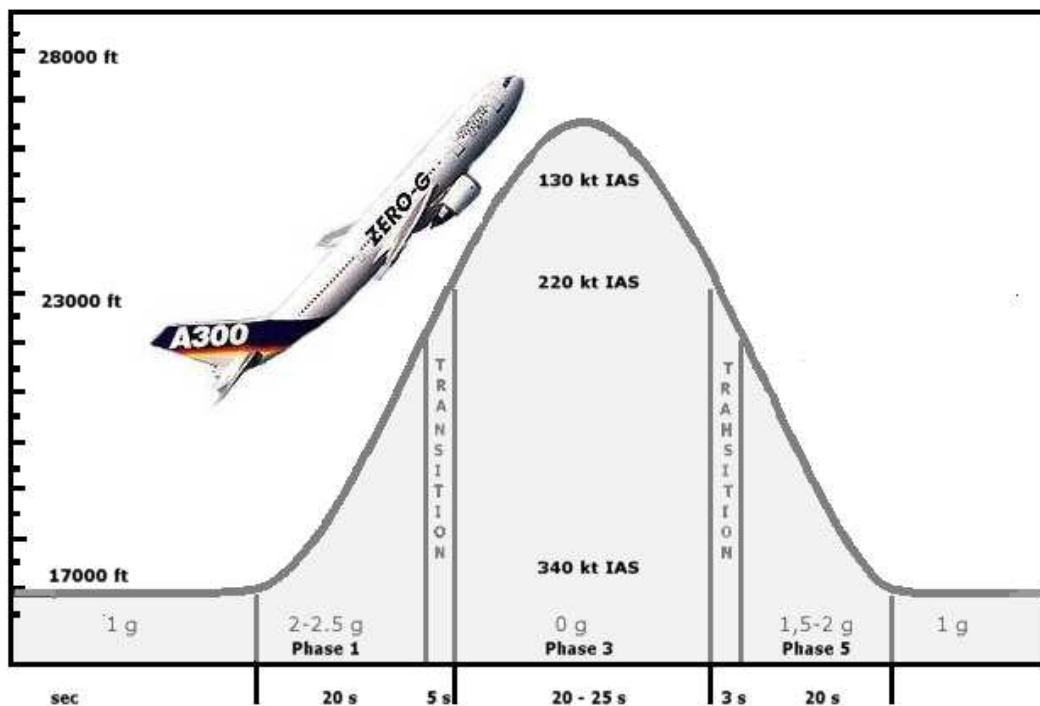


Bild 3: Phasen des Parabelfluges (<http://de.wikipedia.org/wiki/Parabelflug>)

Auch die folgende Beschreibung (<http://www.novespace.fr/fr,vol,technique.html>) ist interessant (nicht nur wegen der Sprache!). Der Text gibt noch etwas mehr Einblick in die Aktionen im Cockpit.

Manœuvre de pilotage

Ressource d'entrée en parabole

A partir d'une situation de vol en palier stabilisé à une altitude de 20000 pieds (6 km d'altitude), le pilote cabre l'avion (facteur de charge = +1,8 g) pendant vingt secondes jusqu'à atteindre une assiette positive de +45° et une altitude de 24000 pieds (7,5 km).

Injection en parabole

Le pilote procède alors à la manœuvre d'injection en parabole en poussant le manche jusqu'à annuler la portance exercée sur les ailes (incidence de portance nulle), pendant que l'ingénieur navigant réduit la poussée des moteurs afin d'équilibrer la traînée exercée sur l'avion.

Trajectoire parabolique – apesanteur

A l'issue de cette transition qui dure moins de cinq secondes, l'avion n'est plus soumis qu'à la seule force de gravitation terrestre et l'ensemble de ses occupants se retrouve en situation de chute libre pendant environ vingt-deux secondes. La trajectoire ainsi suivie est un arc de parabole semblable à la trajectoire des gouttes d'un jet d'eau pointé vers le ciel. Au sommet l'avion atteint une altitude de 28000 pieds (8,5 km).

Ressource de sortie de parabole

Quand l'avion se retrouve de nouveau à l'altitude de 24000 pieds en descente, le pilote redresse l'avion (facteur de charge = +1,8 g) pendant vingt secondes afin de revenir à une situation initiale de vol en palier stabilisé, permettant une nouvelle manœuvre de vol parabolique.

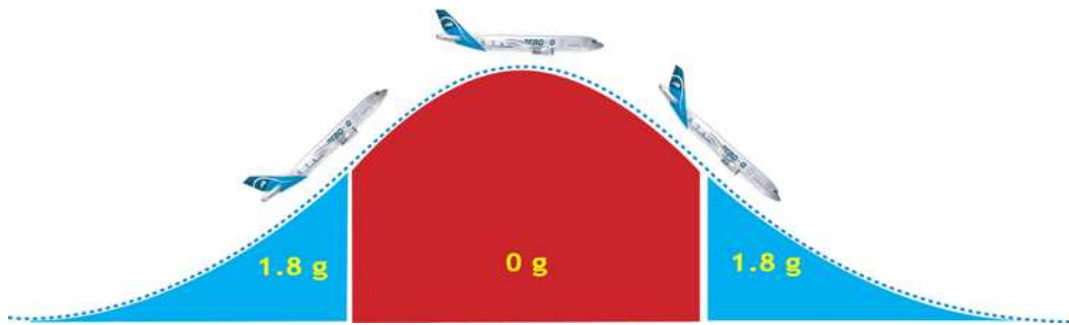


Bild 4: Phasen des Parabelfluges (<http://www.novespace.fr/fr,vol,technique.html>)



Bild 5: Simulation des Parabelfluges (<http://www.novespace.com/fr,popup,parabole.html>)

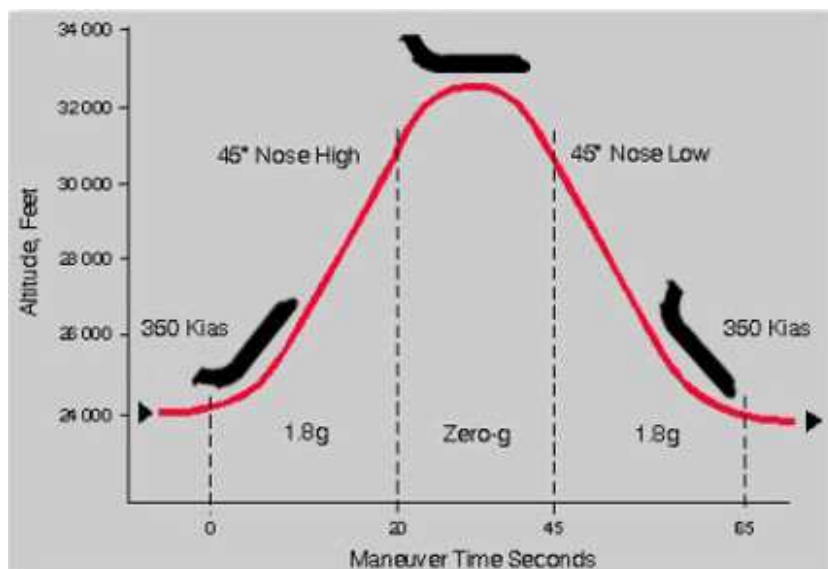


Bild 6: Phasen des Parabelfluges (http://en.wikipedia.org/wiki/Reduced_gravity_aircraft)

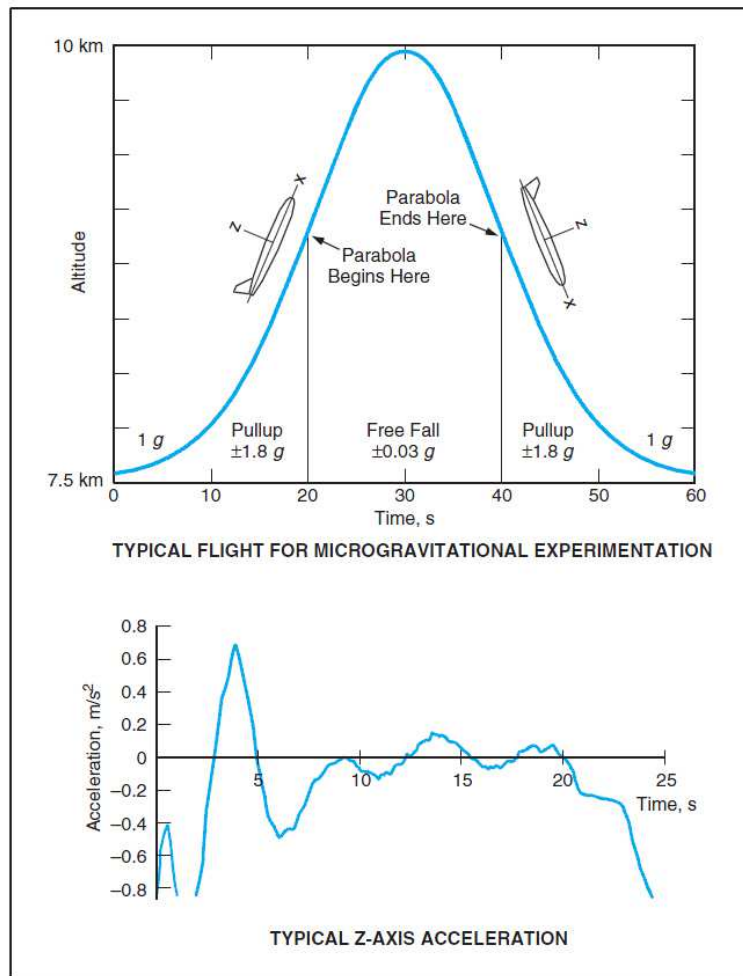


Bild 7: Phasen des Parabelfluges und Restgravitation (Residual Gravity) in der Schwerelosigkeitsphase.

Quelle: David W. Robinson (Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland): Prolonging Microgravity on Parabolic Airplane Flights – Techniques for Improving the Approximation of Free Fall. NASA Tech Briefs, November 2003, p. 19

Auch dieser Bericht ist interessant. Eine Parabel geflogen mit einer ...

... NASA C-9B. ... The C-9 begins the parabola by accelerating to 350 knots indicated airspeed (KT IAS) while level around 24000 ft (7300 m). This is equivalent to 510 knots true airspeed (KT TAS), 265 m/s or Mach 0.83. (Indicated airspeeds and pitch angles provided by NASA Aircraft Commander Terry Pappas ...).

After the aircraft reaches this maximum speed, a slow climb is initiated while at full thrust to produce vertical speed without reducing airspeed, producing a g level of approximately 1.5 g.

Next, a steeper climb further increases vertical velocity and pitch angle, while reducing airspeed, producing a g level of approximately 1.8 g. As pitch angle increases there is a small aftward acceleration (typically less than 0.2 g) of the occupants because the aircraft's longitudinal acceleration is larger than the component of gravity in this direction.

At approximately 225 KT IAS (360 KT TAS, 185 m/s, Mach 0.61), when the aircraft is pitched nose-up 45°, the pilots commence the 0 g parabola. They push forward on the control yoke ("push over") to lower the angle of attack of the wings, which reduces wing lift, and simultaneously reduce power to a level just sufficient to overcome drag. At this point the aircraft's movement approximates that of a ballistic mass rather than that of an aerodynamic craft. The airspeed when

the aircraft reaches the top of the parabola, at approximately 34000 ft (10000 m), is 140 KT IAS (245 KT TAS, 130 m/s, Mach 0.43). This is approximately 20 KT below the unaccelerated stall speed of the aircraft, the speed below which the wings cease to produce lift in 1 g flight, because as speed decreases the required angle of attack increases, causing separation of the airflow from the wing. The actual stall speed is equal to the unaccelerated stall speed scaled by the square root of the load factor (load supported by the wings divided by total aircraft weight), which means that in 0 g a stall does not occur at any speed since the wings are not supporting any weight. However, in an abort situation a parabola could not be halted and level flight entered until the downward portion of the parabola had started and the aircraft had sufficient airspeed to produce lift.

After 25 seconds, at the end of the parabola, when the nose is pitched down 45° and airspeed is close to 350 KT IAS, the pilots pull up (pull back on the control yoke) and increase thrust to change the aircraft's downward velocity into upward velocity, and restart the cycle.

Typically, a set of 10 parabolas is performed in sequence, followed by a 180° turn, and this is repeated four times for a total of 40 parabolas.

...

Pitch angular velocity of the aircraft is less than 3°/sec, barely at the human threshold of detection. Thus despite the aircraft's large changes in pitch angle relative to the earth, the occupants of the aircraft experience a changing g level along their vertical axis (perpendicular to the floor of the aircraft), with a barely perceptible rotation.

Quelle: KARMALI, Faisal; SHELHAMER, Mark: The dynamics of parabolic flight: flight characteristics and passenger percepts. In: *Acta Astronaut.* 2008 September ; 63(5-6): 594–602. doi:10.1016/j.actaastro.2008.04.009. – <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2598414/>

Beachte: Das Flugzeug nickt von +45° auf -45° in 22 s. Das sind dann sogar 4.1°/s!

Wie bekommt man die längste Zeit der Schwerelosigkeit aus einem praxismgerechten Parabelflug?

An interesting question is what criteria determine and constrain the amount of time spent in free-fall. The most important criterion is the earth-vertical component of airspeed at push-over, which is calculated as $V_v = V \cdot \sin(\theta)$. Thus, to increase the earth-vertical component of airspeed, either the total airspeed can be increased, or the pitch angle of the aircraft can be increased. As described above for the C-9B, at push-over the airspeed is 360 KT TAS and the nose is pitched up 45°, which means that vertical speed is 255 KT TAS or 185 m/s. The total airspeed is dependent on the airspeed at the bottom of the trajectory and the loss of airspeed during the pull up. Increasing airspeed at the bottom of the trajectory is not possible since the aircraft is near its maximum airspeed at this point, which is set by structural limitations as a subsonic aircraft approaches the speed of sound. The loss of airspeed during pull-up is dependent on the thrust limits of the engines and the rate at which the pitch angle changes. With a more aggressive pull-up, the pitch angle could be changed in less time and with less altitude gain, so that the total airspeed and the pitch angle would be higher at the push-over transition to 0 g. However, this would increase the loading on the aircraft and thus the occupants. The aircraft structural limit is +2.5 g so some additional loading is possible. For occupants, the g level would be larger, and would be oriented at an angle to the floor, with an increased aftward longitudinal component just before the start of the parabola. This would impose additional safety risks and requirements. Another criterion is the altitude range of the aircraft. Since distance traveled in freefall is proportional to the square of time, each additional second would require a disproportionate increase in altitude excursion. Although airspeed is likely to be the limiting factor in subsonic aircraft, other considerations are the aircraft ceiling and the repetitive stress on the fuselage from changing air pressure.

Quelle: KARMALI, Faisal; SHELFHAMER, Mark: The dynamics of parabolic flight: flight characteristics and passenger percepts. In: *Acta Astronaut.* 2008 September ; 63(5-6): 594–602. doi:10.1016/j.actaastro. 2008.04.009. – <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2598414/>

Phase 3: Die Zeit der Schwerelosigkeit im Parabelflug (Steigen und Sinken zurück zur Ausgangshöhe) kann berechnet werden aus der Vertikalkomponente der Anfangsgeschwindigkeit.

$$t = 2 \frac{V_v}{g}$$

Die Vertikalgeschwindigkeit ist abhängig von der Fluggeschwindigkeit und vom Bahnwinkel γ

$$V_v = V \sin \gamma$$

Bahnwinkel γ oder Nicklagewinkel θ ?

$$\theta = \gamma + \alpha \quad \text{also} \quad \gamma = \theta - \alpha$$

In dem Moment in dem die Schwerelosigkeitsphase eingeleitet wird, ist der Anstellwinkel α viel kleiner als der Nicklagewinkel θ . Daher kann α hier auch vernachlässigt werden. Damit ist

$$V_v = V \sin \gamma \approx V \sin \theta$$

Der Nicklagewinkel θ kann vom Piloten (etwas ungenau) vom künstlichen Horizont abgelesen werden. So hat der Pilot die Vertikalgeschwindigkeit über den Geschwindigkeitsmesser und den künstlichen Horizont im Blick.

Beispiel: Kleines Propellerflugzeug: Die Fluggeschwindigkeit sei 150 kt = 77 m/s. Die Schwerelosigkeitsphase der Parabel wird eingeleitet mit 45°.

$$V_v = V \sin \gamma = 77 \text{ m/s} \sin 45^\circ = 55 \text{ m/s}$$

$$t = 2 \frac{V_v}{g} = \frac{55}{9,81} \text{ s} = 11 \text{ s}$$

Mit einem kleinen Propellerflugzeug kann also eine Dauer der Schwerelosigkeit in der Parabel von 11 s erwartet werden. Würde man den Anfangsbahnwinkel auf 60° steigern, würde

sich die Phase der Schwerelosigkeit auf 13.5 s verlängern. Diese geringe Verlängerung rechtfertigt nicht unbedingt die ungewöhnliche Fluglage.

Phase 1: Die Zeit des Aufschwungs im Parabelflug

Beispiel Passagierjet: Passagierjets haben ein Schubgewichtsverhältnis von etwa 0.3 und eine Gleitzahl von etwa 18. Damit kann ein Bahnwinkel von etwa 14° bei gleich bleibender Fluggeschwindigkeit erreicht werden:

$$\sin \gamma = \frac{T}{W} - \frac{1}{E} \approx 0.3 - \frac{1}{18} = 14^\circ \quad .$$

Bei und kleinen Propellerflugzeuge ist dieser Winkel deutlich geringer.

Die Phase der Schwerelosigkeit bei einem Parabelflug wird typischerweise bei einem Bahnwinkel von 45° eingeleitet. In diesem Flugzeugzustand fällt die Fluggeschwindigkeit deutlich ab. Es ist daher wichtig, die Fluglage von 45° schnell und damit ohne großen Geschwindigkeitsverlust zu erreichen. Die Bewegung des Flugzeugs in der Phase 1 wird beschrieben durch

$$L - m g = m V \omega \quad \frac{L}{m g} - 1 = \frac{V \omega}{g} \quad n_z - 1 = \frac{V \omega}{g} \quad n_z = \frac{V \omega}{g} + 1$$

Die maximale Änderung der Nicklagewinkels ist damit abhängig vom maximalen Lastvielfachen n_z

$$\omega_{max} = (n_{z,max} - 1) \frac{g}{V}$$

und die Zeit zum Rotieren bis zum Erreichen des geplanten Nicklagewinkels ist

$$t_{rot} = \frac{\theta}{\omega_{max}} \quad .$$

Beispiel: Kleines Propellerflugzeug mit maximalem Lastvielfachen $n_{z,max}$ von 3.0 oder 2.0:

$$\omega_{max} = (n_{z,max} - 1) \frac{g}{V} = (3.0 - 1) \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{75 \text{ m/s}} = 0.26 \text{ rad/s}$$

oder

$$\omega_{max} = (n_{z,max} - 1) \frac{g}{V} = (2.0 - 1) \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{75 \text{ m/s}} = 0.13 \text{ rad/s}$$

Soll die Parabel mit $45^\circ = 0.79 \text{ rad}$ eingeleitet werden dann dauert der Aufschwung

$$t_{rot} = \frac{\theta}{\omega_{max}} = \frac{0.79 \text{ rad}}{0.26 \text{ rad/s}} = 3 \text{ s}$$

oder

$$t_{rot} = \frac{\theta}{\omega_{max}} = \frac{0.79 \text{ rad}}{0.13 \text{ rad/s}} = 6 \text{ s}$$

Den Geschwindigkeitsabfall in der kurzen Zeit von 3 s wollen wir vernachlässigen.

Die längste Zeit der Schwerelosigkeit wird also erreicht mit:

- **Horizontalflug mit maximaler Fluggeschwindigkeit:** VMO oder VNE. Um diese Geschwindigkeit zu erreichen muss sich das Flugzeug vorher im Sinkflug befinden, weil das Triebwerk diese Geschwindigkeit im Horizontalflug nicht erbringen kann. Es wäre dann sinnvoll eine Parabel an die nächste ohne Pause anzuhängen.
- **Einleiten der Phase der Schwerelosigkeit bei einem großen Bahnwinkel γ .** Aus Sicherheitsgründen sollte dieser Winkel nicht zu groß sein – insbesondere dann nicht, wenn sich Teilnehmer am Flug frei in der Kabine befinden. Es hat sich hier offensichtlich ein Winkel von 45° als sinnvoller Wert in der Praxis herausgestellt. Wenn die Teilnehmer angeschnallt sind könnte auch ein höherer Winkel gewählt werden.
- **Erreichen des Bahnwinkels γ in kürzester Zeit also mit maximalem praktikablem Lastvielfachen** um den Geschwindigkeitsabfall bis zum Beginn der Schwerelosigkeitsphase gering zu halten. Dabei sollte ein *Sicherheitsfaktor* eingehalten werden. Dieser scheint zu sein: $1.8/2.5 = 0.72$ bis etwa $2.0/2.5 = 0.8$. Mit Flugzeugen, die für ein höheres Lastvielfaches ausgelegt sind als 2.5 könnten entsprechend auch stärkere Lastvielfache geflogen werden. Z. B. $3.8 \cdot 0.8 = 3.0$ im Fall eines kleinen Propellerflugzeugs.

Die **horizontale Fluggeschwindigkeit im obersten Punkt der Parabel** ist nicht von Bedeutung, es sei denn, dass man sich die **Option** offen lassen möchte, die **Parabel im Scheitel abzubrechen** und dort in einen Horizontalflug überzugehen. Die Horizontalkomponente der Fluggeschwindigkeit ist in der Parabel konstant und wird über die Anfangsgeschwindigkeit und über den Bahnwinkel festgelegt. Die Horizontalkomponente der Fluggeschwindigkeit muss dann größer sein als die Überziehgeschwindigkeit für den Horizontalflug (1g).

$$V_H = V \cos \gamma > V_{S,1g} \quad \text{also} \quad \gamma < \arccos \frac{V_{S,1g}}{V}$$

mit V : Geschwindigkeit beim Einleiten der Schwerelosigkeitsphase

Eine Forderung, die Parabel im Scheitel verlassen zu können, scheint den Anfangsbahnwinkel im Parabelflug nicht zu begrenzen.

Beispiel kleines Propellerflugzeug: $\gamma < \arccos \frac{55 \text{ kt}}{150 \text{ kt}} = 68^\circ$

Das bedeutet, dass ein „Ausstieg“ aus einer Parabel im Scheitel möglich ist, die mit einem Bahnwinkel unter 68° (also z. B. mit 45°) eingeleitet wurde. Bei einem Passagierjet liegt ein ähnliches Verhältnis vor aus Überziegeschwindigkeit und maximaler Geschwindigkeit, so dass sich ein ähnlicher Winkel ergibt.

Die **Flughöhe in der die Parabel geflogen wird** ist für das kleine Propellerflugzeug flugmechanisch von geringer Bedeutung. Wichtig ist hier, dass eine ausreichende Sicherheitsflughöhe eingehalten wird. Bei Passagierjets kann der untere Flugbereich der Parabel nicht unter 10000 ft liegen, weil dort die Fluggeschwindigkeit durch die Flugsicherung auf 250 kt (Indicated Airspeed) (534 km/h wahre Geschwindigkeit; Machzahl: 0,45) begrenzt ist. Da im unteren Flugbereich der Parabel aber deutlich höhere Fluggeschwindigkeit als 250 kt geflogen werden müssen, muss die Parabel einen Sicherheitsabstand zu den 10000 ft aufweisen.

Die Höhendifferenz in der Phase der Schwerelosigkeit (Phase 3) hängt von der Fallzeit t_v ab. Die Fallzeit ist die Hälfte der gesamten Dauer der Schwerelosigkeitsphase t . Das Flugzeug fällt ausgehend vom Scheitel der Parabel mit einer Anfangsvertikalgeschwindigkeit von

$$v_0 = 0. \quad s = \frac{1}{2} g t_v^2 + v_0 t_v = s = \frac{1}{2} g t_v^2 .$$

Beispiel kleines Propellerflugzeug: $t_v = 5.5 \text{ s} \quad s = \frac{1}{2} g t_v^2 = 150 \text{ m} = 500 \text{ ft}$

Beispiel Passagierjet: $t_v = 12.5 \text{ s} \quad s = \frac{1}{2} g t_v^2 = 770 \text{ m} = 2500 \text{ ft}$

Etwa die gleiche Höhendifferenz kommt noch einmal für den Aufschwung (Phase 1) dazu. Eine weitere kleine Höhendifferenz durch die Transitionsphase (Phase 2).

Tabelle 2: Flughöhen im Parabelflug mit einem Jet

Ausgangsflughöhe (Beginn Phase 1)	Flughöhe am Anfang der Schwerelosigkeit (Beginn Phase 3)	Flughöhe im Scheitel der Parabel	Höhendifferenz in der Parabel	Quelle
17000 ft	22000 ft	27000 ft	10000 ft	Bild 3
20000 ft	24000 ft	28000 ft	8000 ft	Novespace siehe oben
24000 ft	31000 ft	33000 ft	9000 ft	Bild 6
25000 ft	29000 ft	33000 ft	8000 ft	Bild 7
über 10000 ft	---	---	5000 ft	Abschätzung siehe oben

Tabelle 2 zeigt die Flughöhen beim Parabelflug mit einem Jet nach verschiedenen Quellen. Die Parabel wird also mit einem Jet deutlich über 10000 ft eingeleitet (zwischen 17000 ft und

25000 ft). Die Höhendifferenz in der Parabel ist in der Praxis deutlich größer als die theoretische Abschätzung. Der Faktor beträgt $8000 \text{ ft} / 5000 \text{ ft} = 1.6$. Für das kleine Propellerflugzeug wäre somit mit einer Höhendifferenz im Parabelflug von $2 \cdot 500 \text{ ft} \cdot 1.6 = 1600 \text{ ft}$ zu rechnen.

Die maximale Fluggeschwindigkeit (VMO) eines Jets kann in Flughöhen über ca. 20000 ft durch nicht erreicht werden und wird durch die maximale Machzahl (MMO) begrenzt. Dies stellt möglicherweise keine Begrenzung dar für den Parabelflug, weil die Fluggeschwindigkeit mit zunehmender Höhe der Parabel abnimmt. Falls die maximale Machzahl (MMO) eine Begrenzung darstellen sollte, so müsste die Parabel in geringer Flughöhe (aber über 10000 ft) begonnen werden.

Warum ist die Parabel eine Parabel?

Das Flugzeug fliegt mit einer konstanten horizontalen Geschwindigkeit und legt dabei eine Strecke zurück

$$x = V_H t \quad t = \frac{x}{V_H}$$

Setzen wir die Zeit im Scheitel der Parabel zu $0s$ und die Höhe zu y_0 . Dann ist die Höhe

$$y = y_0 - \frac{1}{2} g t^2 = y_0 - \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{V_H} \right)^2 = y_0 - \frac{1}{2} \frac{g}{V_H^2} x^2 \quad .$$

Diese Gleichung ist von der Form $y = a x^2 + c$ also eine Parabel.

Videos zum Parabelflug im WWW

Tabelle 3 zeigt Videos zum Parabelflug.

Tabelle 3: Videos zum Parabelflug – eine Auswahl

Land	Organisation	Flugzeug	Link
Frankreich / EU	Novespace	A300 ZERO-G	http://www.novespace.fr/ http://www.novespace.com/fr,popup,parabole.html
USA	zero G	B727	http://www.gozerog.com/
Italy	SpaceLand	?	http://www.spaceland.biz
Russia	Country of Tourism	Ilyushin IL-76	http://www.bestrussiantour.com/space/zerogravity_flight
Germany	HAW Hamburg	PA28	http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/materialFP/Parabelflug05-06.mpg



Bild 8: Schwamm in Schwerelosigkeit. Bild aus dem Video der HAW Hamburg (Tabelle 2)

Die Suche im WWW zu Flugzeugen, die Parabelflüge durchführen könnte hier beginnen:
http://en.wikipedia.org/wiki/Reduced_gravity_aircraft .

Wer hat den Parabelflug „erfunden“?

Heinz Haber (15. Mai 1913 in Mannheim; † 13. Februar 1990 in Hamburg) war ein deutscher Physiker, Raumfahrtmediziner, Schriftsteller und Fernsehmoderator.*

1946 siedelte er in die USA über und arbeitete bis 1952 an der Luftwaffenschule für Luftfahrtmedizin auf der Randolph Air Force Base, Texas. Unter der Leitung von Hubertus Strughold wurde hier 1948 die Flug- und Raumfahrtmedizin begründet, unter Beteiligung weiterer deutscher Wissenschaftler, darunter auch die Brüder Fritz und Heinz Haber. Sie arbeiteten als Berater der Fa. Litton Industries, die im Auftrag der US-Luftwaffe eine Unterdruckkammer zur Simulation von Weltraumbedingungen und den ersten Weltraumanzug entwickelte. Die theoretischen Grundlagen für den Parabelflug zur Erzeugung von Schwerelosigkeit stammen ebenfalls aus ihrer Feder.

Seine Grabstätte befindet sich auf dem Friedhof Blankenese (Hamburg).

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Heinz_Haber

Das Paper, in dem die Parabelflüge erstmals beschrieben wurden ist dieses:

HABER, Fritz; HABER, Heinz: Possible Methods of Producing the Gravity-Free State for Medical Research. In: Journal of Aviation Medicine 21 (1950) 395. –
<http://spacemedicineassociation.org/timeline/1950/21050395-1.pdf>

Das Paper ist hier angehängt und in den wichtigsten Passagen gekennzeichnet.

Possible Methods of Producing the Gravity-free State for Medical Research

BY FRITZ HABER, PH.D., AND HEINZ HABER, PH.D.

*Department of Space Medicine, USAF School of Aviation Medicine,
Randolph Air Force Base, Texas*

MODERN AIRCRAFT may soon fly at velocities of over 2,000 miles per hour in stratospheric altitudes. Such data remind the flight surgeon of medical problems the centrifugal force arising from this "rotatory" movement of the aircraft. The same holds true for the pilot: his original 150 pounds, for instance, are reduced to $147\frac{1}{2}$ pounds. If the air-

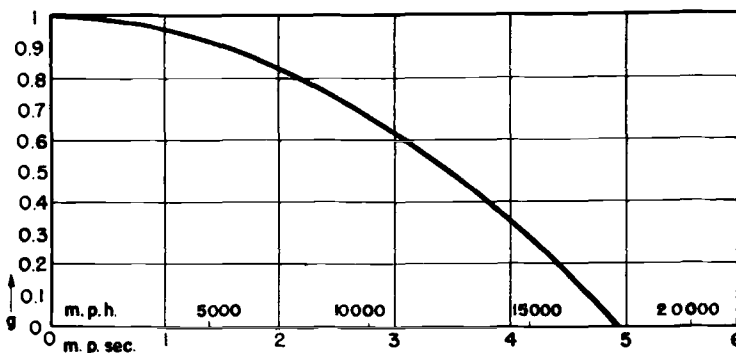


Fig. 1.

which chiefly center around acceleration during maneuvers, pressurized cabins and explosive decompression.

Yet, these data also form the source of another problem, however less obvious, for the flight surgeon, namely, the occurrence of reduced gravity. Let us consider an aircraft of the above-mentioned type which flies parallel to the ground at a velocity of one kilometer per second, i.e., 3 Mach. Then we see that this craft travels around the center of the earth in a circular course, and, a brief calculation shows that about one sixtieth of the aircraft's weight is counteracted by

craft's velocity would be tripled, the amount of this reduction of weight would become noticeable; it would amount to not less than 15 per cent. Figure 1 shows the relationship between velocity of the aircraft and the prevailing gravity under these circumstances.

It further becomes evident that the occurrence of reduced gravity in modern aircraft is favored also by the extreme altitudes in which these crafts cruise. This effect is not produced by the decrease of terrestrial gravitation with increasing altitude, as one might be led to believe. At an altitude of 100,000 feet, for instance, terrestrial gravity still amounts to more than 99

Presented at the twenty-first Annual Meeting of the Aero Medical Association, Chicago, Illinois, May 30, 1950.

per cent of its value at sea level. It is the density of the air at this altitude which is responsible for the effect now under consideration; for, at that height, the density of the air is only one hundredth of the corresponding value at sea level. As a consequence, an aircraft cruising at 100,000 feet will negligibly be disturbed in its free motion as soon as the drive is throttled. This means that the pilot will find himself in an almost ideal state of free fall in all maneuvers involving throttling of the drive. The state of free fall, however, is mechanically characterized by the fact that the resultant of all forces acting on the pilot vanishes. Consequently, the pilot is put into the gravity-free state, or at least into a state of sharply reduced gravity as soon as he dares throttle his engine.

The duration of such states of reduced or eliminated gravity are still short: They are of the order of one-half to one minute. But one must consider this phenomenon as a medical problem, chiefly for two reasons:

1. Gravity as a physical factor of environment has the outstanding property of being omnipresent and everlasting. Not a single individual has as yet been away from its influence for more than one to two seconds.

2. Zero-gravity and sub-gravity will greatly gain importance as environmental factors of man, since the development of rocket craft points toward a rapid increase of velocities and altitudes in the not too distant future.

In view of this development we must not fail to direct our attention to possible effects of sub-gravity and zero-gravity on man. It is the purpose of

this paper to present some theoretical considerations as to the procurement of means suitable for studying the medical phenomena associated with the lack of weight.

In medical research, the principle of simulation is almost exclusively applied for studies related to influences of physical environmental factors on the living organism. For this, the low pressure chamber and the human centrifuge are the most outstanding examples in aviation medicine. However, confronted with the necessity of producing states of sub-gravity and zero-gravity we must concede that all tricks of simulation fail. The means required for the elimination of gravity are quite involved, and, it is for this reason that no experiments have as yet been attempted to eliminate or even reduce gravity for the purpose of medical research.

Before entering the discussion on the possibilities of the elimination of gravity we are to concern ourselves with the various aspects of the phenomenon of weight. Within the gravitational field of the earth, a body derives its weight from the mechanical support that prevents it from falling freely. A body is weightless as soon as it is allowed to move freely under the influence of gravitation and of its own inertia. Every fashion of support, including frictional forces from the ambient air and propelling forces from an engine, restores the body's weight either partly or entirely. As a consequence, within the gravitational field of the earth, gravity can be reduced or removed by kinematic means only.

The simplest means to this end con-

sists of the realization of the state of **vertical free fall**. If a body moves vertically downward at an acceleration of 1 g, an upward acting force of inertia becomes effective which exactly compensates the body's weight. It is true, owing to the velocities soon to be reached by a free falling body, **strong frictional forces from the air will arise, so that the body's weight will soon be restored** because of the support from these frictional forces. Speaking in terms of kinematics, the acceleration of 1 g cannot be maintained for any appreciable length of time and the velocity of the falling body approaches a certain constant value. With the vanishing acceleration the force of inertia pulling upward expires also, so that the body's weight will be restored.

From these conditions it can be derived that friction from the air makes the exploitation of a free-fall-missile difficult for our purposes. At the least, it would be required to drop the missile from a balloon; for, the initial translatory motion of the missile, if dropped from an aircraft, would give rise to considerable frictional forces from the air resulting in considerable deceleration from the start. There are a score of other problems which stem from the necessity of braking the missile's fall by means of parachutes; the difficulties involved in the recovery of the missile; and the considerable preparations required for a single experiment.

The possibilities of utilizing the vertical motion, for our purpose, however, are not exhausted with the failure of the free-fall-missile. There is a means which permits reduction of a

body's support by a constant amount for a certain period of time, namely, **the elevator**. If the elevator is at rest, the weight of the elevator car is exactly equal to the tension of the rope. If the tension of the rope is decreased by a certain fraction of the suspended weight, the elevator car will be deprived of that same fraction of its support. According to the mechanical principles outlined above, the car and everything it contains will then be transposed into a state of sub-gravity. Speaking in terms of kinematics, the elevator car will move downward at a certain acceleration a , whence $a < g$. As long as these kinematic and dynamic conditions can be maintained, the passengers of the elevator car will find themselves in a state of sub-gravity of the amount $g-a$. **The durations of such states of sub-gravity which can be attained in this manner, depend chiefly upon the maximum permissible velocity of the elevator car.** Furthermore, **the height of the elevator shaft will be of importance, since longer braking distances and consequently higher velocities are permissible in long-shaft-elevators.**

From the laws of kinematics it can be followed that the acceleration only must be kept constant in experiments of this kind, i.e., **one is free to begin the motion of the elevator with any initial velocity desired.** Consequently one is able to **double the duration** of the various states of sub-gravity **by starting the experiment with the largest velocity the elevator car can attain in an upward motion.** A state of sub-gravity characterized by the value $g-a$ is produced by superimposing a downward acceleration " a " on the mo-

tion of the elevator car. This is done by decreasing the tension of the rope by a proper amount, and the passengers of the elevator remain in this

of experiments that can be carried out within a short time.

In directing our attention to the entire elimination of gravity we can state

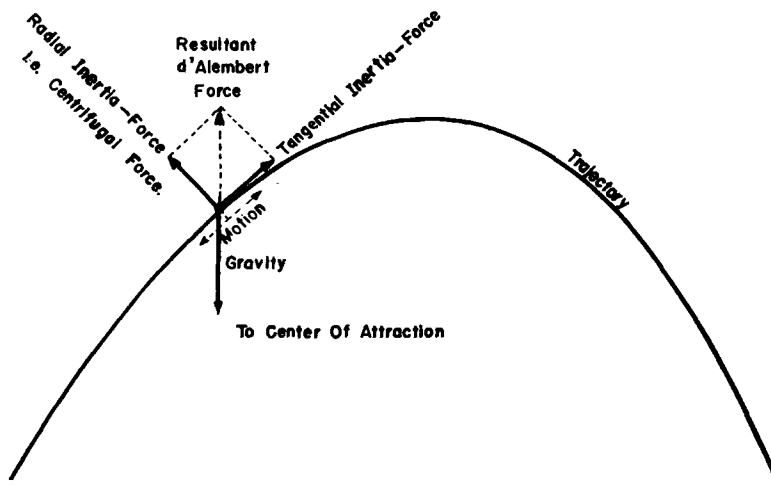


Fig. 2.

state of sub-gravity as long as these conditions of the rope's tension can be maintained. Under these conditions the motion of the elevator car is such that the upward velocity will gradually be consumed by the superimposed downward acceleration; after having reached the peak, the car starts to drop and reverses the pattern of motion in its downward course.

By applying this method states of sub-gravity between 0.9 g and 0.7 g can be produced for five to twenty-five seconds using long-shaft-elevators of skyscrapers. The durations obtainable with this means are short; yet, the elevator method appears to be worth while for a selected number of medical problems under sub-gravity conditions. This is especially true in view of the ease of access to elevators, the ease of operation and the number

the following requirements a means to this end must fulfill:

1. The means must be equipped with a controllable force in order to make it capable of overcoming and eliminating the support originating in friction from the air.
2. The means must be able to cope with high velocities which it must attain and subsequently break down.

The modern aircraft is such a means.

The aircraft, in contrast to the elevator, is not limited to a single dimension, namely the vertical, in its motion. Consequently, the initial component of velocity which can be superimposed to the component of acceleration, may assume any value regarding size and direction. A close examination of all factors involved shows that it is most profitable to select an initial

GRAVITY-FREE STATE—HABER AND HABER

velocity as large as possible at a large angle of climb. In order to eliminate gravity during such a flight, care must be taken that a constant downward ac-

verses its pattern. The horizontal component of velocity remains constant during the entire zero-gravity flight; it equals the aircraft's velocity

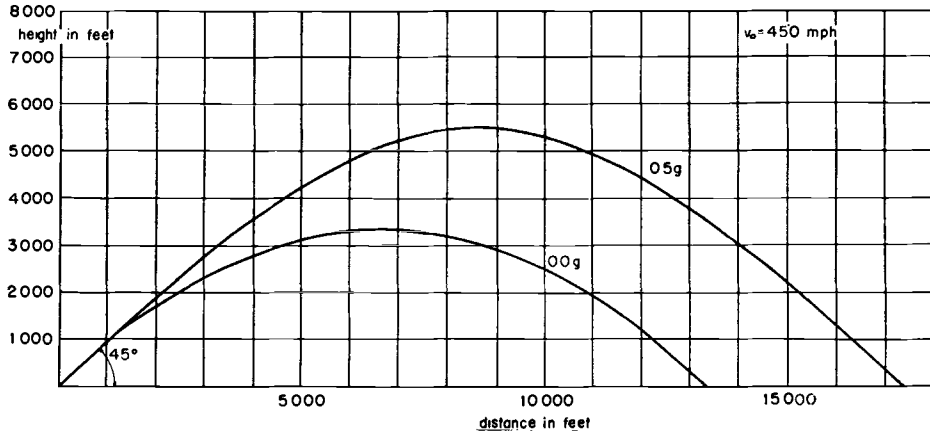


Fig. 3.

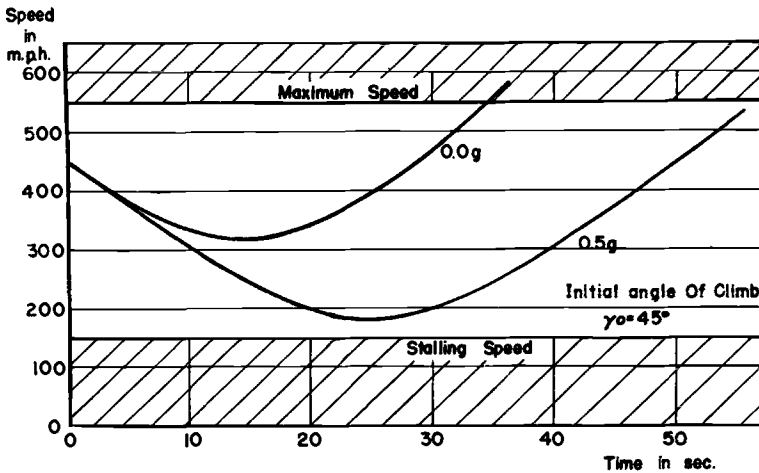


Fig. 4.

celeration of 1 g prevails during the entire flight. Similar to the case of the elevator, the upward vertical component of the aircraft's velocity will gradually be consumed by the downward acceleration; the vertical component of velocity vanishes at the peak of the trajectory and subsequently re-

at the start multiplied by the cosine of the angle of climb at that point.

The aforementioned characteristics of the trajectory reveal that it is a parabola with vertical axis. In other words, the aircraft simulates the motion of a body hurled obliquely upward, if there would be no friction

from the air. These are exactly the requirements for producing the gravity-free state. The body would move under the influence of terrestrial gravitation

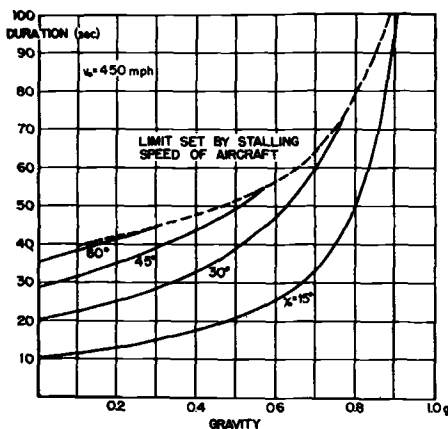


Fig. 5.

and of its own inertia only, undisturbed from any other outer force, it is then that it is weightless. In the case of the aircraft, the supporting force of friction from the air is eliminated by the power of the engines. Figure 2 demonstrates a scheme how the weight of a body moving along a vertical parabola is eliminated by the resultant of the forces of inertia.

Theoretically, the velocity of the aircraft has no part in the formation of sub-gravity and zero-gravity states; in our practical case, however, it plays a dominant role. Both the maximum permissible speed and the minimum stalling speed of the aircraft impose certain limitations on the duration of these states. The trajectories must be such that the velocities at the beginning and the end of the trajectory are not too large, and that the velocity at the peak of the trajectory is not too small.

The aircraft-method also affords the possibility of producing certain values of sub-gravity. As with the elevator, the motion of the aircraft must be characterized by a certain downward acceleration a , so that the passengers of the aircraft are exposed to an acceleration $g-a$. With this method, states of sub-gravity can be maintained for correspondingly longer periods of time.

The following figures demonstrate a number of numerical details as to zero-gravity and sub-gravity flights. Figure 3 shows the trajectories resulting from values of 0.0 g and 0.5 g, with a maximum velocity of 450 m.p.h., and an initial angle of climb of 45°. Figure 4 shows the corresponding velocities as a function of time exhibiting the limitations of the method caused by the maximum and minimum velocities. Figure 5 shows the duration obtainable as a function of the amount of sub-gravity desired for various initial angles of climb.

The last figure demonstrates that gravity can be removed, exploiting present means, for about ten to thirty-five seconds. The durations obtainable for states of sub-gravity are correspondingly longer. Admittedly, as in the elevator, the periods are still short, but we may consider these periods long enough for investigations concerning selected medical problems, since any other method, such as a parachute jump from a balloon, does not remove gravity for more than one or one and one-half seconds. In contrast to this, the zero-g-aircraft affords durations of the gravity free state more than twenty times as long.