

Das mit der Schwerelosigkeit ist nicht so leicht....

Immer wieder trifft man auf die Annahme, dass man im Weltall schwerelos ist, da dort die Erdanziehungskraft keinen Einfluss hat. Das ist aber falsch. Die Gravitation der Erde wirkt auch in z. B. 400 km Höhe (in dieser Höhe befindet sich die ISS). Immerhin beträgt die Gravitationskraft auf dieser Höhe noch 88 %. Ein Mensch mit einer Masse von 100 kg übt auf der Erdoberfläche eine Gewichtskraft von ca. 1000 N aus ($N = \text{Newton} \rightarrow$ Maßeinheit für die Gewichtskraft). In einer Höhe von 400 km über der Erdoberfläche würde seine Gewichtskraft bei einer Masse von 100 kg nur noch ca. 880 N betragen (also 88% seiner Gewichtskraft auf der Erdoberfläche). Die Gravitation der Erde reicht nämlich weit über die Erdoberfläche bis zum Mond und darüber bis ins Unendliche hinaus. Die Erdanziehungskraft nimmt nach Newton mit dem Quadrat der Entfernung ab. Aber warum stürzt dann die ISS oder der Mond nicht einfach auf die Erde? Und warum sind Astronauten in der ISS auch während eines Fluges zum Mond schwerelos?

Isaac Newton hat sich in einem Gedankenexperiment überlegt was passiert, wenn eine Kanonenkugel horizontal abgeschossen wird. Je schneller die abgeschossene Kugel ist, desto weiter fliegt sie (A und B in Bild 1). Ist sie schnell genug fliegt sie um die Erde herum (c und d in Bild 1). Im Fall c und d gleicht sich die Zentrifugalkraft und die Erdanziehungskraft aus. Die Kugel fliegt schwerelos um die Erde herum (der Geschwindigkeitsverlust durch den Luftwiderstand wird bei diesem Gedankenexperiment außen vorgelassen).

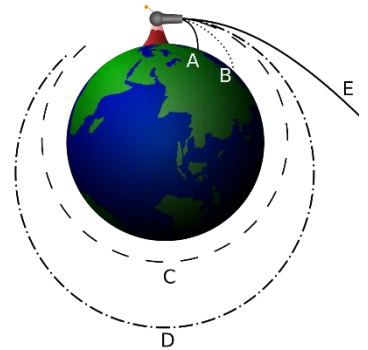


Bild 1: Newtonsche Gedankenexperiment

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Schwerelosigkeit#/media/Datei:Newton_Cannon.svg
user: Brian Brondel - Eigenes Werk CC BY-SA 3.0

Das Phänomen der Schwerelosigkeit ist also weniger ein Problem des Abstands zur Erde, sondern vielmehr ein Problem der Aufhebung zweier wirkenden Kräfte (Gravitationskraft gegen Zentrifugalkraft). Die Zentrifugalkraft ist proportional zur Geschwindigkeit. Ist Ihnen bei Fernsehaufnahmen aufgefallen, dass Raketen bei Ihrem Start zuerst nach oben steigen und dann einen seitlichen Kurs einschlagen? Ziel bei einem Raketenstart ist es eine bestimmte Kreisbahnhöhe über der Erdoberfläche bei gleichzeitig einer bestimmten Kreisbahngeschwindigkeit zu erreichen. Das Erreichen der Höhe hängt von der Endgeschwindigkeit der Rakete nach dem Start ab. Je höher die Geschwindigkeit desto höher die erreichte Bahnhöhe der Rakete bzw. des Satelliten. Erst wenn die Höhe zur Kreisbahngeschwindigkeit passt, fliegt die Rakete, ohne auf die Erde zurückzufallen, schwerelos um diese herum. Genügt die erreichte Geschwindigkeit nicht, fällt die Rakete zur Erde zurück. Man kann also auch einen Meter über der Erdoberfläche schwerelos sein, man muss nur schnell die Erde umkreisen. Da die Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn um die Erde so elementar wichtig ist, versucht man die Raketenstartplätze in Äquatornähe zu errichten. Durch den Start der Raketen in Richtung Osten addiert sich die Geschwindigkeit der Erdrotation (in Äquatornähe ist sie mit 465 m/s am größten) ohne Brennstoffeinsatz dazu.

Aber auch beim freien Fall ist man schwerelos. Hier gleichen sich die Gravitationskraft ($F = m \cdot g$) und die Trägheitskraft ($F = -m \cdot g$) aus, solange man sich in einem beschleunigten System befindet. Ohne Beschleunigung gibt es keine Trägheitskraft so, dass wir beim Stehen auf der Erde nur die Gravitationskraft verspüren.

Allgemein würde man vermuten, dass eine Rakete geradlinig von der Erde zum Mond fliegt (Luftlinie, kürzester Weg). Aufgrund der Bewegung des Mondes um die Erde geht dies nicht so einfach. Man könnte zwar auf einer Geraden fliegen, wenn man zusätzlich die Mondbewegung einschließt (jeder Jäger kennt das Problem des Vorhaltens beim Schießen auf sich bewegendes Wild). Das wird so aber nicht gemacht, da die Triebwerke dabei durchgängig brennen müssten (viel zu großer Energieverbrauch). Die Astronauten wären dabei auch nicht schwerelos, sondern würden durch den permanenten Antrieb eine Beschleunigung erfahren und durch die dabei wirkende Gewichtskraft in die Sitze gedrückt. Vielmehr ist es so, dass die Rakete/Raumkapsel zuerst in eine Erdumlaufbahn gebracht wird (1 in Bild 2). Nun wird der Antrieb der Raumkapsel nochmal kurz (einige Minuten) unter einem bestimmten Winkel (90°) gezündet. Die Raumkapsel schwenkt damit in eine elliptische Umlaufbahn um die Erde ein (2 in Bild 2), die die Mondbahn um die Erde dort schneidet, wo hoffentlich der Mond sich zu diesem Zeitpunkt befindet. Die ökonomischste, der so genannte Hohmann-Ellipse/Hohmann-Transferbahn, hat Ihren entfernten Scheitelpunkt im Zielorbit (3 in Bild 2). Andere Hohmann-Ellipsen schneiden die Bahn des angeflogenen Himmelskörpers.

Bild 2: Hohmann-Transferbahn

Am Ziel angekommen zündet man die Triebwerke erneut, um die Ellipsenbahn um die Erde zu verlassen und in den Zielorbit um den Mond einzuschwenken. Will man in einen kleineren Orbit muss die Geschwindigkeit reduziert werden, will man in einen größeren Orbit muss man die Rakete beschleunigen also die Geschwindigkeit erhöhen. Will man den Zielorbit verlassen und wieder zur Erde zurückkehren, so muss die Rakete auf die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit vom Mond beschleunigt werden und in eine Ellipse ähnlich dem Hinflug einschwenken. Um auf der Erde zu landen ist dann die Geschwindigkeit wieder zu drosseln bzw. auf Null zu bringen. Auch auf einer elliptischen Umlaufbahn ist man schwerelos. Beim Flug auf einer Ellipsenbahn gibt es nun aber eine Kombination aus einem Ausgleich zwischen Gravitationskraft und Zentrifugalkraft (dieser Anteil ist umso größer je mehr die Ellipsenform einer Kreisbahn ähnelt) und einem Ausgleich zwischen Gravitationskraft und Trägheitskraft (dieser Anteil ist größer je mehr die Ellipsenform in die Länge gezogen ist). Die Geschwindigkeit auf einer Ellipsenbahn nimmt während der Entfernung vom Scheitelpunkt in der Nähe der Erde bis zum zweiten Scheitelpunkt ab. Ab dem zweiten Scheitelpunkt nimmt die Geschwindigkeit bis zum ersten Scheitelpunkt wieder zu. Schwerkraft erfahren die Astronauten nur, während die Antriebe gezündet sind und die Rakete dadurch beschleunigt oder gebremst wird. Beim restlichen Flug sind die Astronauten schwerelos da sie immer auf einer Kreisbahn oder auf einer Ellipsenbahn entweder um die Erde oder um den Mond „herumfallen“. Selbst bei einer zwischenzeitlich geradlinigen Bewegung sind die Astronauten schwerelos, da sich hier wieder die Gravitationskraft und die Trägheitskraft ausgleichen. Die Geschwindigkeit der Rakete/Raumkapsel nimmt aber auch dabei ab.

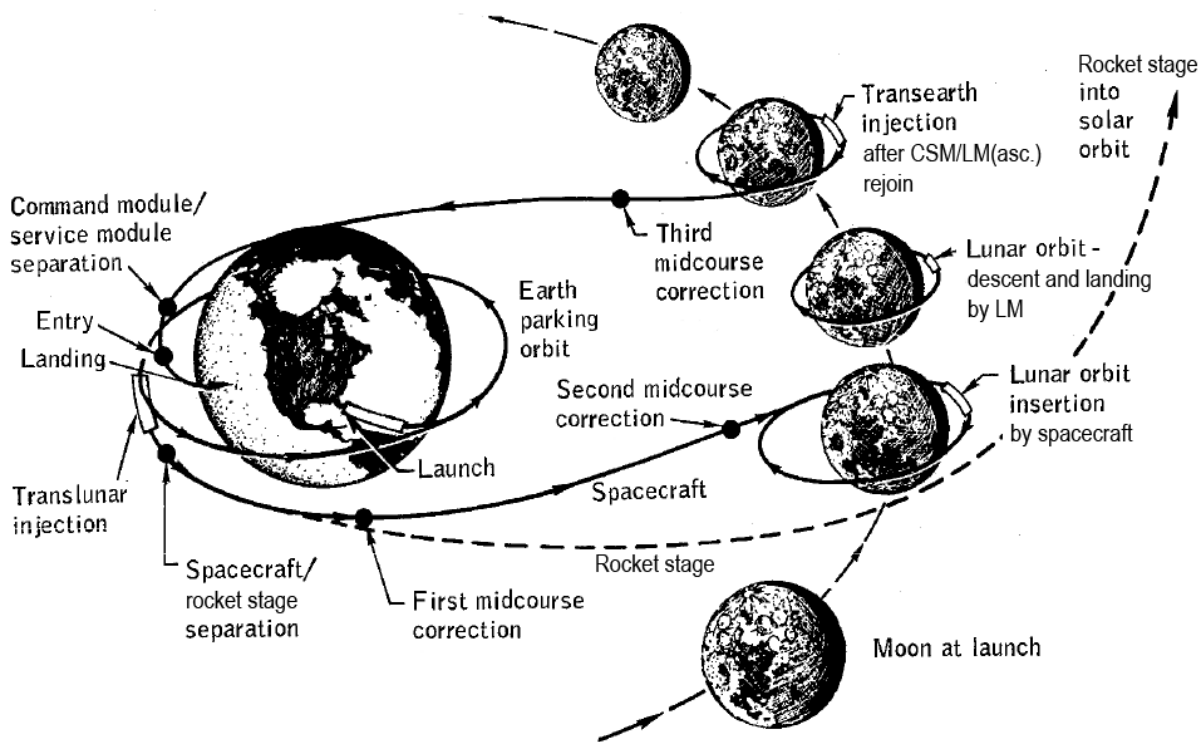
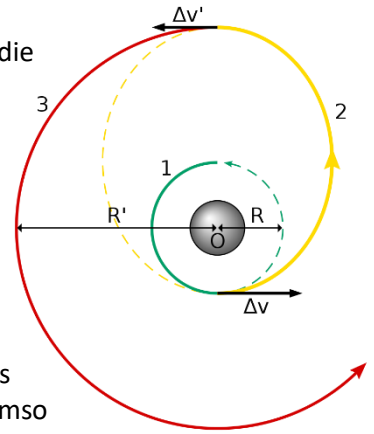


Bild 3: Flugbahn zum Mond

Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_program#/media/File:Apollo-Moon-mission-profile.png
 NASA - http://www.hq.nasa.gov/alsj/a410/A08_MissionReport.pdf Public Domain

Um auf einer Kreisbahn in Erdnähe um die Erde zu fliegen, ohne auf dieser herunterzufallen, benötigt man die sogenannte 1. Kosmische Geschwindigkeit. Diese beträgt 7,9 km/s. Um auf einer Kreisbahn in einer Höhe von 35.800 km um die Erde zu fliegen, bewegt man sich auf der Kreisbahn mit einer Geschwindigkeit von 3,07 km/s. Dies ist die Umlaufbahn von geostationären Satelliten. Aber die Endgeschwindigkeit der Rakete beim Abschalten der Triebwerke muss größer als 7,9 km/s, um den Transfer in die hohe Erdumlaufbahn zu schaffen. Um der Erdanziehung zu entkommen (E in Bild 1) ist die sogenannte 2. Kosmische Geschwindigkeit erforderlich. Diese beträgt 11,2 km/s (z.B. beim Flug zum Mars muss die Geschwindigkeit diesen Wert überschreiten). Aber man ist

im Einflussbereich der Sonne gefangen. Der Sonne entkommt man nur durch noch mehr Geschwindigkeit, nämlich mit der 3. Kosmischen Geschwindigkeit. Diese beträgt 16,7 km/s. Ein Beispiel sind die Voyager-Sonden, die irgendwann in einigen tausend Jahren dem Sonnensystem und der Anziehungskraft der Sonne entfliehen werden.

Quellen und weitere Infos

Hohmann-Transfer:

http://www.mabo-physik.de/hohmantransfer_info.pdf

Detaillierte Darstellung des Ablaufs eines Mondfluges:

<https://moon.nasa.gov/resources/348/apollo-mission-flight-plan-1967/>