

Wurde die Mondlandung in geheimen Filmstudios gefälscht?

von Burkard Steinrücken, Westfälische Volkssternwarte und Planetarium Recklinghausen
steinruecken@sternwarte-recklinghausen.de

Seit den abenteuerlichen Mondflügen der Amerikaner reißt die Behauptung nicht ab, die NASA habe die Mondlandungen in Filmstudios in der Wüste von Nevada gefälscht, um in der Phase des kalten Krieges mit der Sowjetunion der Weltöffentlichkeit einen Sieg im Wettlauf zum Mond vorzutäuschen. Diese Behauptungen kursieren heute im Internet und zwischen den Verschwörungstheoretikern und Wissenschaftlern werden dort erbittert Debatten ausgefochten. Das Thema eignet sich auch zur Behandlung der Fallgesetze im Physikunterricht. Mit der Analyse der Videofilme vom Mond lässt sich die Streitfrage entscheiden.

Einleitung

Der Vorwurf, die Mondlandung sei gefälscht worden, wird immer wieder heiß diskutiert. Fernseh- und Zeitschriftenredaktionen greifen ihn gerne auf, und sie erreichen mit diesem Thema viele Zuschauer und Leser. Im Internet gibt es zahlreiche Seiten von Vertretern und Gegnern der amerikanischen Mondlandung. Die bekannteste Seite mit einer ausführlichen Widerlegung der angeblichen Beweise für eine gefälschte Mondlandung stammt vom NASA-Astronomen *Phil Blait* und ist unter www.badastronomy.com zu finden. Von dort erreicht man auch die Internetseiten seiner Mitstreiter wie auch einiger Anhänger der Fälschungsbehauptung.

Wer im Bekanntenkreis herumfragt, wird schnell auch selbst auf den vage formulierten Verdacht stoßen, die Mondlandung sei gefälscht worden: „Ob das wirklich stimmt?“ oder „Früher habe ich geglaubt, das kann doch gar nicht sein, das haben die Amerikaner bestimmt nachgestellt.“, so kann man es hören. Auch bei jüngeren Menschen, die mit den Möglichkeiten der Medien- und Computertechnologie vertraut sind und aus gutem Grund kein Bild und keine Filmsequenz ohne kritische Betrachtung als historisches Dokument einzustufen bereit sind, erlebt man dies. „Das ist ja wohl *gefaked!*“ meinte z.B. ein junger Physiker angesichts der qualitativ sehr hochwertigen Videoaufnahmen der späten Apollo-Missionen.

Wie lässt sich das gesunde Misstrauen gegenüber dem bewegten und unbewegten Bild gewinnbringend im Physikunterricht einsetzen? - Dieser Frage wird im folgenden nachgegangen. Einen schlussendlichen Beweis für die Mondlandung wird man den kleinen Filmsequenzen von den Mondlandungen, die hier behandelt werden, nicht wirklich abringen können. Das ist aber auch nicht das Ziel dieser Arbeit. Im Vordergrund steht die Untersuchung der Fallvorgänge an interessantem Filmmaterial, welches mit den lebensweltlichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler konfrontiert werden kann. Im Beweisverfahren für die Richtigkeit der Mondlandungen nimmt es nur einen gewissen Teil ein. Wer noch schlagkräftigere Argumente sucht, sei nochmals auf die genannte Internet-Quelle verwiesen.

Die Untersuchungsstrategie

Die Fälschungsbehauptung stützt sich wesentlich auf das von der NASA veröffentlichte Bildmaterial von den Mondflügen, auf denen Anomalien zu sehen sein sollen, die auf eine Fälschung der Mondaufnahmen in irdischen Geheimstudios hindeuten sollen. Anomalien sollen z.B. das gänzliche Fehlen von Sternen auf den Bildern sein, unterschiedliche Schattenrichtungen, diffuse Lichtpunkte am Himmelshintergrund, mehrmals verwendete Hintergrundkulissen, Markierungen auf den Steinen der Mondkulisse, Sichtbarkeit von Gegenständen im Schatten, nicht vollständig sichtbare Fadenkreuze, die der Vermessung der Bilder dienen, u.v.m.. Alle diese Einwände lassen sich schnell entkräften, wenn man

aufnahmetechnische Fragestellungen wie Belichtung, Perspektive, Schattenwurf auf unebenen Flächen und Gegenlichteffekte behandelt, die jedem geübten Fotografen geläufig sind. Die Diskussion der von den Fälschungstheoretikern angeführten Fotografien soll hier nicht aufgerollt werden. Dazu sei auf die oben genannte Internetseite und die darin angegebenen Referenzen verwiesen.

Für eine Behandlung im Physikunterricht eignet sich das Thema insbesondere, wenn man im Zusammenhang mit den Fallgesetzen diejenigen Videofilme vom Mond einsetzt, auf denen fallende oder geworfene Gegenstände dokumentiert sind. Am Computer lassen sich solche Videosequenzen räumlich und zeitlich analysieren, indem man sie z.B. in Einzelbilder zerlegt. Aus der Weg-Zeit-Dynamik des freien Falls lässt sich die wirksame Fallbeschleunigung ermitteln. Auf dem Mond beträgt sie im Gegensatz zum irdischen Wert von $9,81 \text{ m/s}^2$ nur $1,62 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert lässt sich auch aus der Umlaufdauer eines den Mond umkreisenden Raumschiffs ermitteln und folglich ist seine Größe bekannt, unabhängig davon, ob eine Mondlandung stattgefunden hat oder nicht. Die aus den lunaren Fallvorgängen extrahierte Fallbeschleunigung muss innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Videoanalyse dem realen Wert entsprechen, wenn auf dem Mond gefilmt wurde. Dazu bestimmt man zunächst die Fallhöhe h und die Fallzeit t . Bei einem senkrechten Fall aus der Ruhe gilt für die im Fall zurückgelegte Strecke $s = 1/2 \cdot g \cdot t^2$. Die Fallbeschleunigung g erhält man durch Umstellung: $g = 2s/t^2$. Auf den Mondfilmen, von denen einige hier vorgestellt werden, sieht man desöfteren Fallvorgänge aus einer etwaigen Höhe $h = 1 \text{ m}$ und Fallzeiten, die etwas länger sind als 1 Sekunde, z.B. $t = 1,1 \text{ s}$ - $1,2 \text{ s}$. Damit erhält man einen Wert für die Fallbeschleunigung von $g_{\text{Mond}} = 1,4 \text{ m/s}^2$ bis $1,7 \text{ m/s}^2$, was dem erwarteten Wert innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Videoanalyse entspricht.

Diese Untersuchungsstrategie ist zwar eine lehrreiche Übung für das Verständnis der Newton'schen Mechanik, als unmittelbare Widerlegung der Fälschungsbehauptung kann sie jedoch keine Geltung beanspruchen. Den Fälschungstheoretikern ist das Problem der geringeren Mondanziehung natürlich bewusst, und sie behaupten, die Filme seien auf der Erde hergestellt und im Zeitlupentempo veröffentlicht worden. Der „Zeitlupenfaktor“, also der Faktor der zeitlichen Dehnung des Filmablaufs, sei gerade so gewählt, dass man bei der Untersuchung der Fallvorgänge in den Filmen auf den Wert der lunaren Fallbeschleunigung kommt.

Die richtige Untersuchungsstrategie lautet deshalb wie folgt. Die Richtigkeit der Fälschungsbehauptung wird zunächst vorausgesetzt. Die Konsequenzen dieser Behauptung werden auf mögliche Widersprüche untersucht. Treten Widersprüche auf, ist die Untersuchungshypothese zu verwerfen.

Sind die Filme auf der Erde entstanden, so werden fallende Gegenstände mit der irdischen Schwerkraft beschleunigt. Den veröffentlichten Filmen entnimmt man durch Bildauswertung den durch die Zeitlupe „vorgetäuschten“ Wert der lunaren Schwerkraftbeschleunigung. Man bestimmt dazu die angebliche lunare Fallzeit und vergleicht mit der realen irdischen im vermeintlichen Filmstudio.

Die lunare Fallzeit kann man aber auch aus dem Weg-Zeit-Gesetz der Mechanik berechnen. Man erhält aus $s = 1/2 \cdot g \cdot t^2$ für die Zeitdauer eines freien Falls eines zunächst ruhenden Gegenstandes aus 1 m Höhe:

$$t_{Erde} = \sqrt{2s / g_{Erde}} = \sqrt{2m / 9,81m / s^2} = 0,45 \text{ s} \quad (\text{auf der Erde})$$

$$t_{Mond} = \sqrt{2s / g_{Mond}} = \sqrt{2m / 1,62m / s^2} = 1,11 \text{ s} \quad (\text{auf dem Mond})$$

Der Zeitlupenfaktor, um den die Filme verlangsamt veröffentlicht sein sollen, berechnet sich dann zu $e = 0,45 / 1,11 = 1 / 2,46$.

Die Mondfilme lassen sich jetzt im Computer im „ursprünglichen“ rekonstruieren, wenn man in einer Videobearbeitungssoftware (z.B. *Virtual Dub*) den Film mit einer um den Zeitrafferfaktor (=1/Zeitlupenfaktor) erhöhten Bildrate („*frame rate*“) abspeichert. Bei einer Bildrate von 25/s in den vorliegenden Filmen und einem Zeitrafferfaktor von 2,46 zeigt der mit einer Rate von 62/s abgespielte Film die Verhältnisse so, wie die Schauspielerastronauten die Mondspaziergänge im geheimen Filmstudio gespielt haben müssen, wenn alles gefälscht wurde.

Anhand dieser im Sinne der Fälschungsbehauptung rekonstruierten Filme muss bewertet werden, ob die dargestellten Vorgänge auf der Erde inszeniert werden können. Dabei können die Fallvorgänge und ggf. Parabelbahnen allein keinen Widerspruch aufzeigen, denn die Bewegungsabläufe des freien Falls führen bei beliebigen Zeitlupenfaktoren immer zu physikalisch sinnvollen Vorgängen wenn neben der Dehnung bzw. Stauchung der zeitlichen Abfolge auch die Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen entsprechend angepasst werden, wie im folgenden gezeigt wird.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das Weg-Zeit-Gesetz $s(t)$, welches sich aus einem konstanten Anteil s_0 , einen Anteil bezüglich der gleichförmigen Anfangsgeschwindigkeit v_0 und einem beschleunigten Anteil zusammensetzt. Es lässt sich in Komponenten zerlegen, in denen die Vertikal- und die Horizontalbewegung getrennt behandelt werden:

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (\text{Weg - Zeit - Gesetz})$$

$$x(t) = x_0 + v_{0x} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_x \cdot t^2 \quad (\text{Weg - Zeit - Gesetz, horizontal})$$

$$y(t) = y_0 + v_{0y} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2 \quad (\text{Weg - Zeit - Gesetz, vertikal})$$

Die Zeitdehnung bzw. Raffung um einen Faktor e wirkt sich nicht nur auf die Zeitkoordinate t aus, sondern auch auf alle Geschwindigkeiten v und Beschleunigungen a bzw. g , die sich unter Anwendung der zeitlichen Ableitungen auf den zurückgelegten Weg berechnen:

$$t \quad \rightarrow \quad e \cdot t \quad (\text{Transformation der Zeitkoordinate})$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{dx}{d(e \cdot t)} = \frac{1}{e} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{1}{e} \cdot v \quad (\text{Transformation der Geschwindigkeit})$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \rightarrow \quad \frac{d^2x}{d(e \cdot t)^2} = \frac{1}{e^2} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{e^2} \cdot a \quad (\text{Transformation der Beschleunigung})$$

Mit dem Zeitlupenfaktor werden alle von einem willkürlichen Zeitnullpunkt (z.B. zu Fallbeginn) gemessenen Zeitdifferenzen t zu $e \cdot t$ gedehnt. Die Geschwindigkeit v ist als die

erste zeitliche Ableitung des Weges x definiert; die Beschleunigung a erhält man durch zweifaches zeitliches Ableiten von x bzw. einfaches zeitliches Ableiten von v .

Demgegenüber sind die Größen $v_0 \cdot t$ bzw. $1/2 \cdot a \cdot t^2$ als Anteile der Anfangsgeschwindigkeit und der Fallbeschleunigung auf das Weg-Zeit-Gesetz invariant gegenüber einer zeitlichen Dehnungs- oder Stauchungstransformation, denn alle den Filmaufnahmen entnommenen Strecken ändern sich natürlich nicht, wenn man sie in Zeitlupe oder -raffer betrachtet:

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad \rightarrow \quad s_0 + \frac{v_0}{e} \cdot (e \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{e^2} \cdot (e \cdot t)^2 = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Dies gilt auch für den praktischen Fall einer Wurfparabel, wie nun noch gezeigt werden soll. Man erhält die Parabelbahn, wenn man den Horizontalanteil des Weg-Zeit-Gesetzes $x(t)$ nach t umstellt und damit die Zeitkoordinate im Vertikalanteil $y(t)$ eliminiert:

$$x(t) = x_0 + v_{0x} \cdot t \quad \Leftrightarrow \quad t = (x(t) - x_0) / v_{0x} \quad (\text{horizontal})$$

$$y(t) = y_0 + v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (\text{vertikal})$$

$$y(x) = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \cdot x - \frac{g}{2 \cdot v_{0x}^2} \cdot x^2 \quad (\text{Wurfparabel; mit } x_0 = y_0 = 0)$$

Aus der Gestalt der Wurfparabel allein lässt sich kein Widerspruch ableiten, denn sowohl auf dem Mond als auch auf der Erde käme eine gleichartige Parabelbahn zustande, wenn die um den Faktor $1/e^2$ verringerte Mondschnere auch durch eine um den Faktor $1/e$ kleinere Abwurfgeschwindigkeit kompensiert wird. Denn unter der Transformation t nach et bleibt die Parabelbahn unverändert:

$$y(x) = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \cdot x - \frac{g}{2 \cdot v_{0x}^2} \cdot x^2 \quad \rightarrow \quad \frac{(v_{0y}/e)}{(v_{0x}/e)} \cdot x - \frac{(g/e^2)}{2 \cdot (v_{0x}/e)^2} \cdot x^2 = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \cdot x - \frac{g}{2 \cdot v_{0x}^2} \cdot x^2 = y(x)$$

Nur durch die Hinzuziehung weiterer Kriterien wie z.B. die in den schneller ablaufenden „Rekonstruktionsfilmen“ beobachtbare „Unnatürlichkeit“ menschlicher Bewegungsabläufe, die nicht allzu sehr von den Schwerkraftverhältnissen beeinflusst werden wie z.B. das schnelle Einhämmern der Flaggenstange, das Handhaben leichter Werkzeuge, die Geschwindigkeit des Umdrehens, Kopfnickens, Armschwenkens etc. kann ein Widerspruch offenbar werden. Die gemäß der als richtig vorausgesetzten Fälschungshypothese um den Faktor 2,46 erhöhte Geschwindigkeit aller Vorgänge führt zu Bewegungsabläufen, die unserer alltäglichen Erfahrung nicht entsprechen. Die physiologischen Vorgänge im menschlichen Körper (Reaktionszeiten, Muskelkontraktionszeiten, etc.) sind eben nicht invariant unter der Zeitraffer-Transformation.

Es bleibt zu klären, ob ein geübter Darsteller sich nicht vielleicht doch in der entsprechenden Weise bewegen kann, was durch eigene Versuche auf dem Schulhof oder in der Turnhalle ausprobiert werden kann.

Der freie Fall im Vakuum

Das Fallexperiment mit den zugleich aus identischer Höhe fallen gelassenen Probekörpern Falkenfeder und Hammer, das ein Apollo 15 – Astronaut auf dem Mond vorführte, verdeutlicht unmittelbar das von Galileo Galilei aufgestellte Fallgesetz, dass alle Körper unabhängig von ihrer Masse gleich schnell fallen. Die Schwerkraft $m \cdot g$ der Erde bzw. des Mondes bewirkt eine für alle Körper gleichermaßen geltende Beschleunigung g , denn der fallende Körper hat ein Beharrungsvermögen, welches proportional seiner Masse ist (genauer: proportional seiner trägen Masse). Der schwere Hammer erfährt gemäß $m \cdot g$ eine größere Schwerkraft als die leichte Feder. Wegen der größeren Massenträgheit wird er aber dennoch nicht stärker beschleunigt. Zur Überwindung seiner Trägheit ist nach Isaac Newton eine Kraft $m_t \cdot a$ erforderlich, die bei Fallvorgängen durch die Schwerkraft $m_s \cdot g$ gegeben ist:

$$m_t \cdot a = m_s \cdot g$$

Darin sind m_t bzw. m_s die träge bzw. schwere Masse. Wegen der Gleichheit der trägen und der schweren Masse fällt die Masse aus der Gleichung heraus, sie hat keinen Einfluss auf die Dynamik des Fallvorgangs. Bei Fallvorgängen auf der Erde sind diese Verhältnisse durch das Auftreten von Luftreibung gestört. Die Feder „schwimmt“ beim Fall auf der Erde auf einem Luftkissen „auf“ und wird gebremst. Diese bremsende Wirkung durch Luftreibung ist geschwindigkeits- und insbesondere lageabhängig. Lässt man eine Feder mit dem schweren Kielende nach unten senkrecht zu Boden fallen, so erreicht sie diesen früher als eine zugleich fallende waagerechte Feder, die in Fallrichtung dünn ist und damit im reibenden Luftmedium schnell an Fahrt verliert, und schließlich aufgrund der Umströmung Auftrieb erfährt und seitlich davonsegelt.

Das Fallexperiment von Apollo 15 ist damit auch ein Nachweis fehlender Atmosphäre auf dem Mond bzw. im Filmstudio, wenn man der Fälschungshypothese anhängt.

Zu dieser Schlussfolgerung kommt man auch, wenn man die vom Mondauto aufgeworfenen Staubwolken betrachtet. In dieser Form sind sie unter irdischen Atmosphärenbedingungen nicht zu beobachten. Das Filmstudio, welches riesig sein muss, wie der Film mit der Mondautotestfahrt zeigt, ist demnach luftleer, was wiederum gegen die Fälschungshypothese spricht. Ein luftleeres Filmstudio der erforderlichen Größe ist nur mit einem ungeheuren technischen Aufwand zu realisieren, der alle technologischen Möglichkeiten der Filmindustrie der 60er Jahre gesprengt hätte.

Der vom Mondauto aufgeworfene Staub zeigt in etwa den Verlauf einer Wurfparabel. Das ist nicht ganz richtig, weil die Staubpartikel, die die Wurfbahn bilden von unterschiedlichen Orten geworfen wurden, denn das Auto bewegt sich ja weiter, während jedes Staubkorn seine eigene Wurfparabel durchläuft.

Aus der Scheitelhöhe der Wurfparabel und der Geschwindigkeit des Mondautos lässt sich wieder die Fallbeschleunigung ermitteln. Dazu wird die Nullstelle der ersten Ableitung der Wurfparabel nach x bestimmt. Bei der Nullstelle x_0 wird die maximale Wurfhöhe erreicht. Setzt man x_0 in die Funktionsgleichung der Parabel ein, so erhält man die maximale Wurfhöhe bzw. Scheitelpunktshöhe der Parabel:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} - \frac{g}{v_{0x}^2} \cdot x = 0 \Leftrightarrow x_0 = \frac{v_{0y} \cdot v_{0x}}{g} \quad (\text{Nullstelle der Wurfparabel})$$

$$y(x_0) = \frac{v_{0y}^2}{g} - \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{v_{0y}^2}{2g} \quad (\text{Scheitelpunkthöhe der Wurfparabel})$$

Den Mondauto-Videsequenzen entnimmt man eine etwaige Wurfhöhe $y(x_0)$ von 2 m, eine Mondautogeschwindigkeit v_0 von ca. 3 m/s und einen Abwurfwinkel α von $50^\circ - 60^\circ$ zur Horizontalen. Damit berechnet sich die vertikale Abwurfgeschwindigkeit zu $v_{0,y} = v_0 \cdot \sin \alpha$ und die Fallbeschleunigung g zu:

$$g = \frac{v_{0y}^2}{2y(x_0)} = \frac{(v_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2y(x_0)} \approx \frac{(3 \text{ m/s} \cdot \sin 60^\circ)^2}{2 \cdot 2 \text{ m}} \approx 1,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Auch dieser Ausdruck ist invariant unter der Zeitdehnungs-Transformation. Lässt man den Film mit 2,46-facher Geschwindigkeit ablaufen, so erhält man wieder die irdische Fallbeschleunigung, woraus allein kein Widerspruch zur Fälschungshypothese abgeleitet werden kann. Dieser kann sich nur aus der Beurteilung der Fahreigenschaften des Mondautos ergeben, was allerdings nicht so anschaulich ist, wie im Falle der hopsenden Astronauten der Vergleich mit den uns vertrauten menschlichen Bewegungsvorgängen auf der Erde.

Ausgewählte Videosequenzen vom Mond

Die geschilderten Untersuchungen und ihre Schlussfolgerungen basieren auf NASA-Videomaterial, welches die Mondastronauten selbst erstellt haben bzw. durch ferngesteuerte Kameras auf dem Mond eingespielt, die von den Astronauten einsatzfähig gehalten, aber von der Kontrollstation in Houston / USA gesteuert wurden.

Die verwendeten Videosequenzen sind im Dokument www.sternwarte-recklinghausen.de/astro/astronomie/apollo.html per Mausklick abrufbar. Zu jeder Sequenz wurde eine Zeitraffer-Variante erstellt, in der der Film 2,46-fach schneller abläuft, also so, wie er auf der Erde in geheimen Studios eingespielt hätte werden müssen, um bei einer verlangsamten Abspiegelung die lunare Fallbeschleunigung vorzutäuschen. Zum Abspielen und zum Bearbeiten der Videos muss der DivX-Video-Codec (ab Version 4.11) installiert sein, der unter www.divx.com kostenlos erhältlich ist.

Kopiervorlagen für den Unterricht

Im folgenden sind einige Kopiervorlagen angehängt, die in einer Unterrichtseinheit über Fallvorgänge auf dem Mond verwendet werden können.

Fallgesetze

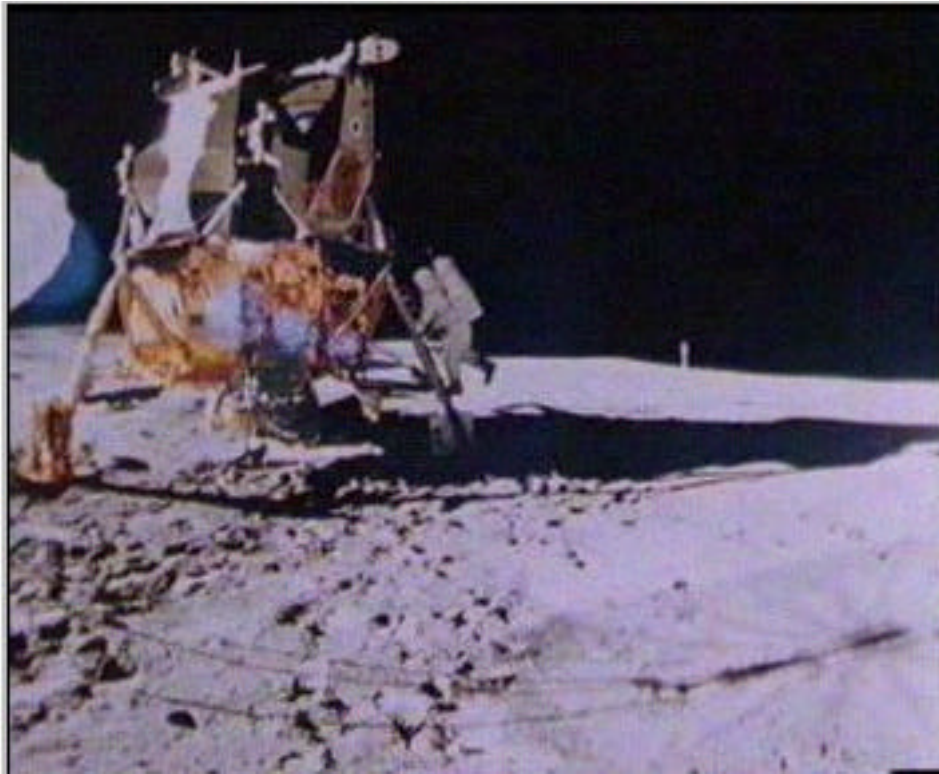
Alle Körper werden durch die Schwerkraft gleich beschleunigt, unabhängig von ihrer Masse.

Zwischen Fallzeit t und Fallstrecke s besteht folgender Zusammenhang:

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Darin ist g die Fallbeschleunigung.

Analyse der Fallvorgänge auf Mondfilmen



Variante 1:

Aus der Fallzeit und der Fallstrecke läßt sich die Fallbeschleunigung g des Mondes ermitteln und mit dem bekannten Wert vergleichen.

$$g = 2s / t^2$$

Analyse der Fallvorgänge auf Mondfilmen

Variante 2

Fälschungsbehauptung:

Die Filme sind auf der Erde entstanden und in Zeitlupe veröffentlicht, was die geringere Mondschwere vortäuscht.

Vergleicht man die irdische mit der lunaren Fallzeit, so läßt sich der Zeitlupenfaktor ermitteln. Die Filme können dann mittels Computer im angeblichen Originaltempo rekonstruiert werden. Die Bewegungsabläufe müssen den uns geläufigen irdischen Verhältnissen entsprechen.

Falldauer aus 1 m Höhe

auf der Erde ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$): 0,45 s

auf dem Mond ($g = 1,62 \text{ m/s}^2$): 1,11 s

$$t = \sqrt{2s / g}$$

Zeitlupenfaktor: $0,45 / 1,11 = 0,41 = 1 / 2,46$

Analyse der Fallvorgänge auf Mondfilmen

Variante 3: Wurfhöhe des aufgeworfenen Mondstaubs



$$g = \frac{\sin^2 a \cdot v^2}{2 \cdot h}$$

Geschwindigkeit des Rovers : $v = 2 - 3 \text{ m/s}$

Abwurfwinkel zur Horizontalen : $a = 50 - 60^\circ$

Scheitelpunktshöhe der Wurfparabel: $h = 2 \text{ m}$

Fallbeschleunigung: $g = 1 - 2 \text{ m/s}^2$ (Mond)

