



NASA: Atlantis-Aufstieg am 2. 12. 88

*Tassilo Halbritter*

## Raumfahrt

*Der Aufbruch zu fernen Welten hat die Menschen bereits in der Antike beschäftigt. Die Sehnsucht zum Besuch der uns benachbarten Himmelskörper zieht sich durch die fantastische Literatur der letzten zwei Jahrtausende.*

### **Fantastische Literatur**

„Ikaromenippus“ oder „Die Luftreise“, verfasst um 170 vom Satiriker *Lukian* (in seinen *Wahren Geschichten*), war vermutlich das erste literarische Mondabenteuer, ja, der erste Weltraumroman überhaupt. Lukian unternimmt mit seinen Freunden per Schiff eine abenteuerliche Entdeckungsfahrt. Dabei gerät er in einen Wirbelsturm, der ihn bis zum Mond trägt. Der dortige König führt gerade einen Krieg gegen die Sonnenbewohner um die Venus, was den Helden zu weiteren Abenteuern und dem Erzähler zu Betrachtungen über das Sonnensystem verhilft.

Abgesehen von fantasievollen Abenteuern schilderten die Autoren damals vor allem auch gerne politische Utopien. Rund 1.400 Jahre später wählt der Astronom und Naturphilosoph *Johannes Kepler* den Rahmen einer fiktionalen Mondreise in lateinischer Sprache, um für die wissenschaftliche Wahrheit der kopernikanischen Weltanschauung zu werben: 1609 beschreibt er in seiner Erzählung „*Somnium oder der Traum vom Mond*“, wie sich die Erde vom Mond aus zeigen müsste. Kepler war bereits klar, dass es zur Überwindung der irdischen Gravitation einer gewaltigen Kraft bedarf, für die in seiner Erzählung hilfreiche Dämonen sorgen, die einen jungen Mann namens *Duracotus* von Island auf den Mond befördern.

*Carl Ignaz Geiger* schildert 1790 in seinem satirisch-utopischer Kurzroman „Reise eines Erdbewohners in den Mars“ eine interplanetarische Ballonfahrt, eine Zivilisation auf dem Mars und dort auch einen frühsozialistischen Idealstaat ohne Privateigentum. Die Schrift des Radikalaufklärers Carl Ignaz Geiger erschien anonym.

*Edgar Allan Poe* thematisiert 1835 in „Das beispiellose Abenteuer eines gewissen Hans Pfaall“ eine Mondreise mittels Ballon. Sie unterscheidet sich von ihren Vorgängern durch ein erhöhtes Maß an Glaubwürdigkeit und Wissenschaftlichkeit. Sein Titelheld, ein Rotterdamer Blasebalgflicker, flieht vor seinen Gläubigern mithilfe eines Ballons zum Mond. Dies ist eine der ersten Science-Fiction-Geschichten überhaupt, denn die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe und dessen Folgen werden genau beschrieben.

Ein prägendes Werk des Science-Fiction-Genres, das die Mondfahrt um etwa hundert Jahre vorwegnimmt, stammt aus Frankreich. Darin wird erstmals im 19. Jahrhundert der Weltraumflug technisch durchgespielt, denn in seinem Roman „Von der Erde zum Mond“ von 1865 schießt *Jules Verne* zwei Amerikaner, einen Franzosen, zwei Hunde und diverse Hühner ins All. Sie gewinnen den Sauerstoff auf dem Flug durch chemische Prozesse. Abgefeuert wird die Raumkapsel der Weltraum-Reisegruppe aus einer 300 Meter langen Superkanone, der *Columbiade*, die mit 200 Tonnen Sprengstoff geladen ist. Wie rund 100 Jahre später die Astronauten der „Apollo“-Missionen, starten die Raumfahrer in Florida – und wie bei realen Weltraumprojekten müssen zunächst gewaltige Geldsummen gesammelt werden, bevor der Start erfolgen kann.

Schießbaumwolle oder auch TNT (Trinitrotoluol) bringen den für die Verbrennung benötigten Sauerstoff bereits im Molekül mit: die Nitratgruppe enthält neben Stickstoff drei Sauerstoffatome. Zersetzt sie sich, dann stellt sie den Sauerstoff am Verbrennungsort zur Verfügung und dieser muss nicht erst langwierig von außen herantransportiert werden. Daher kann die Reaktion schlagartig ablaufen, als Explosion!

Die Fortsetzung „Die Reise um den Mond“ erschien 1870. Die Raumfahrer entdecken, dass ihr Kurs die Mondlandung verfehlen wird. Sie gelangen in eine Umlaufbahn um den Mond, ihre Flugbahn ist glücklicher-weise eine Ellipse und führt sie schließlich nach einem Flug um die Mondpole wieder zu ihrem Heimatplaneten zurück.

### **Realistische Überlegungen**

Doch die Reisenden würden den Anpressdruck durch die enorme Beschleunigung beim Abschuss nicht überleben! Der Ausweg ist ein Fahrzeug, das seinen Vortrieb nach dem Rückstoßprinzip selbst erzeugt – kurz gesagt: die Rakete. Wie schon einige Jahre zuvor der Russe *Konstantin Ziolkowski* formuliert *Hermann Oberth* (1894–1989), geboren in Siebenbürgen, die „Raketengrundgleichung“ und trug damit dazu bei, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Weltraumfahrt zu begründen. Die Rakete startet vergleichsweise langsam und beschleunigt erst am Rande der Atmosphäre auf Höchstgeschwindigkeit. Das schont die Besatzung und verringert die Luftreibung, die das Fluggerät ausbremst.

Unabhängig voneinander entwickeln die beiden Pioniere der Raumfahrt auch das Prinzip der Stufenrakete: Während des Flugs wird die Rakete durch den Verbrauch des vielen Treibstoffs schnell leichter und kann so ihre Geschwindigkeit immer weiter steigern. Ist eine Stufe ausgebrannt, wird die leere Hülle abgesprengt, um das Gewicht weiter zu verringern – nur so lassen sich Geschwindigkeiten von 28.000 Kilometern in der Stunde zur Überwindung der Erdanziehungskraft erreichen. Die eigentliche Raumkapsel ist nur die winzige Spitze der riesigen Rakete, die sich zu 90 Prozent aus Treibstoff, 9 Prozent Raketenkörper und nur 1 Prozent Nutzlast zusammensetzt!

### **So sahen Zeitgenossen die Ideen von Raumfahrt und Mondlandung**

*Ich bin so frei zu behaupten, dass es trotz aller wissenschaftlichen Fortschritte niemals eine Reise*

zum Mond geben wird. Lee de Forest, Erfinder, 1957

*Raumfahrt ist völliger Unsinn.* Richard Woolley, Hofastronom des englischen Königshauses, 1956

*Die abstruse Idee, zum Mond zu fliegen, ist hoffnungslos, weil es unüberwindbare Grenzen für die Flucht aus der Anziehungskraft der Erde gibt.* Forest Moulton, Astronom, 1932

*Diese alberne Idee, etwas auf den Mond zu schießen, ist ein Beispiel dafür, zu welchen Extremen eine teuflische Spezialisierung Wissenschaftler treiben kann.* Alexander Bickerton, Chemieprofessor, 1926

### **Wie man den Weltraum erreicht**

*Am 20. Juli 1969 um 21 Uhr 17 MEZ setzte die Landefähre Eagle des Raumschiffes Apollo 11 auf der Mondoberfläche auf. Damit waren zum ersten Mal Menschen auf einem anderen Himmelskörper gelandet ...*

Um mit vom Menschen gebauten Fahrzeugen in den Weltraum zu gelangen, der definitionsgemäß schon bei 100 Kilometer Höhe beginnt (Kármán-Linie), kommen derzeit nur Raketenantriebe in Betracht. Die Gründe dafür lege ich im Folgenden, auch mit der nötigen Mathematik durchsetzt, dar.

Die fantasiereiche Vorstellung von Jules Verne, mit einer Riesenkanone Objekte zum Mond zu schießen, ist aus mehreren Gründen nicht realistisch. Das von Verne beschriebene Szenario ist vor allem deswegen unmöglich, weil die Detonationsgeschwindigkeit der verwendeten Schießbaumwolle und damit die Geschwindigkeit des Geschosses weit niedriger ist als die *Fluchtgeschwindigkeit*. Das Projektil könnte die Erdanziehungskraft nicht überwinden und würde wieder auf die Erde zurückfallen. Auch mit einem besseren – hypothetischen – Sprengstoff wäre es kaum möglich, eine größere Masse bis zum Mond zu befördern, denn das Kanonenrohr müsste über 300 Kilometer lang sein, abgesehen von der Startbeschleunigung der Raumkapsel von über 20 g (also der zwanzigfachen Erdbeschleunigung), was wohl kein Raumfahrer überleben würde.

Daher bleibt nur der Raketenantrieb, wobei sich sogleich das Problem ergibt, dass die Rakete ja ihren Treibstoff mitbefördern muss, der wiederum das Gewicht der Rakete erhöht und das erfordert wieder mehr Treibstoff ...

### **Raketengleichung**

Der russische Amateurwissenschaftler Konstantin E. Ziolkowski (1857 - 1935) begann, angeregt durch die Erzählungen von Jules Vernes, selbst Geschichten über interplanetare Raumfahrt zu schreiben. Darin ließ er mehr und mehr physikalische und technische Probleme einfließen und entwickelte sich dabei zum Verfasser theoretischer Abhandlungen. Ab etwa 1885 stellte er eine Vielzahl von Überlegungen zur Realisierung von Raumflügen an, um schließlich die Formeln für die Raketengleichung 1903 aufzustellen.

Das Grundprinzip des Raketenantriebs besteht darin, eine begrenzte Menge an Treibstoff mit einer bestimmten Austrittsgeschwindigkeit auszustoßen und gemäß dem 3. Newtonschen Gesetz (*Actio = Reactio*) den Impuls und damit die Geschwindigkeit der Rakete mit ihrer Nutzlast in die entgegengesetzte Richtung zu erhöhen. Wenn eine einstufige Rakete mit Anfangsmasse  $m_0$  und Anfangsgeschwindigkeit null betrachtet wird, deren Triebwerk die Stützmasse kontinuierlich und mit der konstanten Geschwindigkeit  $v_g$  ausstößt, dann gilt (unter idealisierten Bedingungen) die Raketengrundgleichung für die Geschwindigkeit  $v$  der Rakete in Abhängigkeit von der Restmasse  $m$  (also der um den verbrauchten Treibstoff verkleinerten Anfangsmasse).

Die Austrittsgeschwindigkeit  $v_g$  wird auch als spezifischer Impuls des Triebwerks bezeichnet.

$$\Delta v(m) = v_g \cdot \ln(m_0/m)$$

Den Bruch  $m_0/m$  nennt man Masseverhältnis. Der Schub des Raketenmotors ergibt sich aus Strahlgeschwindigkeit multipliziert mit dem Differenzial  $dm/dt$ , das wir als Treibstoffaufwand pro

Sekunde annehmen können:

$$F = v_g \cdot (dm/dt)$$

Nun sind die meisten von uns im täglichen Leben weder mit Exponentialgleichungen noch mit Differentialrechnung befasst. Somit reicht es wenn wir uns folgendes merken:

*Schubkraft = Massenauswurfrate x Ausströmgeschwindigkeit*

Für vertikale Raketenstarts, geringe Steighöhen und unter Vernachlässigung des Luftwiderstands gilt

$$v_{End} = v_g \cdot \ln (m_0 / m_{End} - g \Delta t)$$

mit der Fallbeschleunigung  $g$  und der Brenndauer  $\Delta t$ .

Aus diesen Formeln kann man in einer von Mathematikern als "ganz einfach" bezeichneten Weise ableiten, dass die Höchstgeschwindigkeit der Rakete dann ihrer Strahlgeschwindigkeit entspricht, wenn ihr Masseverhältnis  $e = 2,72$  ist! Das heißt, wenn das Startgewicht der Rakete etwa 2,7 mal so groß ist wie das Gewicht der leeren (ausgebrannten) Rakete, natürlich inklusive Motor und Nutzlast. Das alles zeigt, dass wir einen Treibstoff mit maximaler Strahlgeschwindigkeit benötigen. Wer sich für die genaue mathematische Herleitung interessiert, der wird z. B. in Wikipedia unter *Raketengrundgleichung* fündig.

### **Brennstoffe**

Heute häufig gebrauchte flüssige Brennstoffe sind: Alkohol, Benzin, Kerosin, Hydrazin ( $N_2H_4$ ). Als Oxidator kommt meist Sauerstoff in verflüssigter Form zum Einsatz. Damit erreicht man Strahlgeschwindigkeiten von etwa 3000 Metern pro Sekunde. Bei Verbrennung von verflüssigt mitgeführtem Wasserstoff mit ebensolchem Sauerstoff sind Austrittsgeschwindigkeiten von 3800 Metern pro Sekunde erreichbar.

Alle diese Ausführungen dienen der Veranschaulichung, dass hohe Leistung von hoher Geschwindigkeit abhängt und diese wiederum von Masseverhältnis und Strahlgeschwindigkeit bestimmt wird.

### **Fluchtgeschwindigkeit**

Und wie hoch ist nun die erforderliche Geschwindigkeit (*Fluchtgeschwindigkeit*), um das Schwerefeld der Erde zu verlassen? Die benötigten 11,2 Kilometer pro Sekunde entsprechen etwa **40.000 km/h**. In der Praxis ist auch der Luftwiderstand auf den ersten 10 Höhen-Kilometern zu berücksichtigen, somit erreicht man mit keinem heute verfügbaren Treibstoff (ausgenommen hochgiftige Exoten mit Fluor) die nötige Geschwindigkeit zum Verlassen der Erde. Findige Forscher erfanden daraufhin die Stufenrakete: Nach dem Ausbrennen der ersten Stufe wird diese abgeworfen und die Restmasse um das Gewicht der Tanks, Pumpen und Motoren dieser Stufe verringert. Ebenso verfährt man mit einer zweiten Antriebsstufe und erst die dritte Stufe erreicht dann die erforderliche Geschwindigkeit. Meist kommen bei der ersten Stufe noch zusätzliche Feststoffraketen (Booster) zum Einsatz, die mithelfen, das hunderte Tonnen schwere Gefährt in Fahrt zu bringen.

Die gute Nachricht: Zum Erreichen einer *Orbitalbahn* in niedriger Höhe (einige hundert Kilometer) genügt schon eine Brennschlussgeschwindigkeit von etwa 8 Kilometern pro Sekunde (entspricht 28.500 km/h). Bei einem Raketenstart spielt auch die lokale Rotationsgeschwindigkeit der Erde eine Rolle, da sie die durch die Rakete aufzubringende Geschwindigkeit reduzieren kann. Maximal ist dieser Effekt bei einem Start am Äquator in Richtung Osten, dabei liefert die Erdrotation einen Beitrag von etwa 0,46 km/s.

Um auf Orbitalgeschwindigkeit zu kommen benötigt man viel mehr Treibstoff als zum Aufstieg auf die nötige Höhe. Deswegen sind die "Touristenflüge" zur *Kármán-Linie* überhaupt möglich, die ja nur an die Grenze zum Weltraum kratzen.

Die *Fluchtgeschwindigkeit* ist um den Faktor  $\sqrt{2}$  größer als die Orbitalgeschwindigkeit ( $7,91 \cdot 1,414 = 11,19$ ). Vereinfacht hängt die Fluchtgeschwindigkeit bei einem als kugelsymmetrisch angenommenen Himmelskörper lediglich von dessen Masse und Radius ab. Auch muss für Flugbahnen zum Mond die Fluchtgeschwindigkeit nicht ganz erreicht werden, denn das Schwerefeld der Erde soll ja nicht vollständig verlassen werden. Die dritte kosmische Geschwindigkeit, also jene die zum Verlassen des Sonnensystems nötig ist, beträgt 16,67 km/s. Noch ein Vergleich: Zum Verlassen der Milchstraße müsste man etwa 533 km/s aufbringen! Die einfachsten Flüge zum Mond folgen der Hohmann-Bahn. Der **Hohmann-Transfer** ist ein energetisch günstiger Übergang zwischen zwei Himmelskörpern. Die Transfer-Ellipse verläuft sowohl zur Ausgangsbahn als auch zur Zielbahn tangential. Für Flüge zu Planeten benutzt man zur Treibstoffersparnis jedoch gerne den Katapulteffekt (auch Slingshot-Effekt oder Swing-by-Manöver genannt). Die Raumkapsel zapft dabei die Schwerkraft der Planeten unterwegs an und gewinnt so Bewegungsenergie, die Reise dauert zwar viel länger ist aber viel günstiger vom Treibstoffbedarf.

### **Interplanetares Reisen**

Um in den Weltraum zu gelangen benötigt man ein geeignetes Antriebssystem. Bei den derzeit verwendeten Raketen-Antriebssystemen handelt es sich ausschließlich um Rückstoßantriebe. In der Praxis sind es am häufigsten chemische Antriebe, worunter die Feststoff- und Flüssigkeitstriebwerke fallen. Mit diesen Antrieben für Stufenraketen kann man in ein paar Tagen den Erdmond und in einigen Monaten unsere Nachbarplaneten Mars oder Venus erreichen. Reisen zu anderen Planeten in unserem Sonnensystem dauern dagegen Jahre und Jahrzehnte!

### **Besiedlung des Mars?**

Der immer wieder vorgebrachte Wunsch nach einer Besiedlung des Mars (eventuell nach *Terraforming*) ist aus mehreren Gründen reine Utopie! Abgesehen von der fehlenden, ausreichenden Atmosphäre und den äußerst niedrigen Temperaturen ist es fraglich, ob genug Wasser aus tieferen Mars-Schichten gewonnen werden kann. Vor allem bringen Solarzellen auf Grund der größeren Sonnenentfernung und der Erblindung durch Staubstürme wenig Leistung. Bleiben also nur Kernreaktoren zur Energiegewinnung.

Das größere Problem ist jedoch der Transport des benötigten Materials (nicht nur von ein paar Astronauten) zum Mars! Alles muss aus dem Schwerefeld der Erde gebracht (11,2 km/s!) und beim Mars wieder abgebremst werden. Außerdem dauert der Transport zum Mars im günstigsten Fall ca. sechs Monate! An eine Rückkehr ist mit den heutigen Antriebsmethoden sowieso nicht zu denken. Günstiger wären Starts von einer Mondbasis aber dazu benötigt man eine geeignete Infrastruktur auf dem Erdmond.

Also sollten wir es bei Sonden und deren Suche nach Beweisen für die einstige Bewohnbarkeit belassen. Spuren von Fossilisation sowie von organischem Kohlenstoff sind die Primärziele der NASA.

### **Interstellares Reisen**

Noch schlimmer sieht die Situation bei interstellaren Flügen aus. Das nächste Sonnensystem (Centauri mit den drei Sonnen Alpha A und Alpha B sowie Proxima) ist etwas über vier Lichtjahre entfernt und mit den zur Verfügung stehenden chemischen Antrieben beträgt die Reisedauer 80 bis 100.000 Jahre! Also besser Sonden, vielleicht mit Lichtsegeln, dorthin schicken?

Um eine Rakete mit einer Tonne Nutzlast auf ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit (60.000 km/s) zu beschleunigen, müsste man  $10^{26057}$  Tonnen Treibstoff aufwenden, das ist leider mehr als die Gesamtmasse im überblickbaren Universum von etwa  $10^{51}$  Tonnen! Jetzt einmal abgesehen von der Zunahme der Masse bei relativistischen Geschwindigkeiten (Einstein!).

## Alternative Antriebe

Welche alternativen Antriebe haben sich Wissenschaftler bisher ausgedacht?

- Ionen-Antrieb

Die Radiofrequenz-Ionen-Triebwerke (RIT) erzeugen durch elektromagnetische Wellen ein Plasma, die positiv geladenen Teilchen werden anschließend durch Gitter nach außen beschleunigt. Nach der Passage des sogenannten Neutralisators, der dem Strahl wieder Elektronen zuführt und ihn somit elektrisch neutral macht, werden die Teilchen ausgestoßen. Als Stützmasse wird Xenon verwendet.

- Photonen-Triebwerk

Bei einer Photonenrakete, u. a. vorgeschlagen von Eugen Sänger, würde ein Atomreaktor eine schwarze Fläche so stark erhitzen, dass die Schwarzkörperstrahlung der Fläche Schubkraft erzeugt. Der Nachteil besteht darin, dass sehr hohe Energiemengen notwendig sind, um winzigste Schubkräfte zu erzeugen.

- Strahlensegel

Sogenannte Sonnensegel befinden sich in der Entwicklung und sollen sich den Effekt des Strahlungsdrucks zunutze machen indem sie mit einem großen Segel elektromagnetische Strahlung einfangen und davon angetrieben werden. Der Schub wäre dabei minimal (und nähme mit der Entfernung von der Strahlungsquelle quadratisch ab), jedoch entsteht er ohne Treibstoffverbrauch und bleibt stetig, solange der Einfluss von Strahlungsquellen mit dem Segel genutzt wird. Bei einem Lasersegel wird mit einem Laserstrahl auf das Segel gezielt, dadurch könnte man mit mondbasierten Lasern Sonden beschleunigen.

- Nuklear-Antrieb

Die nukleare Salzwasserrakete wurde von Robert Zubrin vorgeschlagen. Dabei wird dem Wasser ein wenig (20 %) Uran- oder Plutoniumsalz beigemischt. Damit die kritische Masse nicht erreicht wird, wird das Salzwasser in verschiedenste kleine Behälter aufgeteilt, die mit Neutronenabsorbern ausgekleidet sind. Aus den verschiedensten Behältnissen wird das Salzwasser in eine Reaktionskammer gepumpt. Dort wird die kritische Masse des Uran- bzw. Plutoniumsalzes schließlich erreicht, und die nukleare Kettenreaktion beginnt. Das Wasser, in dem die Salze gelöst sind, wirkt gleichzeitig als Moderator und Stützmasse (= Antriebsmasse). Die Kettenreaktion erzeugt eine enorme Hitze, die das Wasser verdampfen lässt, das Wasserdampf-Spaltstoff-Gemisch verlässt den Antrieb durch eine Lavalldüse. Wegen des dabei erzeugten radioaktiven (strahlenden) Ausstoßes nur im Weltraum einsetzbar!

## Hypothetische Antriebe

- Warp-Antrieb

Unter einem *Warp-Antrieb* (englisch *to warp* „verzerren“, „krümmen“) versteht man einen Antriebsmechanismus, der Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit durch gezieltes Krümmen der Raumzeit ermöglichen soll. Nicht das Raumschiff wird angetrieben, sondern das All bewegt sich! Denn wenn man die Raumzeit vor einem Raumschiff zusammenschieben und dahinter als Ausgleich strecken würde, könnte man mit Überlichtgeschwindigkeit sein Ziel ansteuern. Das Schiff bliebe dabei in einer Blase gefangen, in der die Besatzung nicht viel von der interstellaren Reise mitbekäme. Vergleichbar mit einem Personentransportband am Flughafen: Wenn hinter mir Boden aus dem Nichts entsteht und vor mir weggenommen wird, dann bewege ich mich!

- Wurmlöcher

Verbindungen im Raum werden über „Abkürzungen“ durch Wurmlöcher hergestellt. Wurmlöcher sind theoretische Gebilde, die sich aus speziellen Lösungen der Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie ergeben. Sie werden auch *Einstein-Rosen-Brücke* genannt. Der Name Wurmloch stammt von der Analogie mit einem Wurm, der sich durch einen Apfel hindurchfrisst. Er verbindet

damit zwei Seiten der Oberfläche durch einem Tunnel. Das veranschaulicht das Verbinden von zwei Orten im Universum.

- Antimaterie-Antrieb

Die Energie für diesen Antrieb würde durch eine Paarvernichtung von Materie und Antimaterie geliefert werden. Bei diesem Prozess wird die gesamte Ruheenergie der Teilchen vollständig freigesetzt. Dabei wird in eine Wolke aus Materie ein wenig Antimaterie geschossen. Die Materie erhitzt sich dadurch enorm, weil die einsetzenden Paarvernichtungsprozesse außerordentliche Energiemengen liefern. Das entstandene Plasma wird anschließend durch eine magnetische Düse ausgestoßen. Das größte Problem aus heutiger Sicht stellt die Erzeugung und Lagerung von Antimaterie dar!

- Neue Effekte

*EmDrive*: Elektromagnetischer Antrieb in Form eines hypothetischen Mikrowellen-Antriebes. Seine Funktion ist bisher unbewiesen und würde nach bisherigem Kenntnisstand das physikalische Gesetz der Impulserhaltung verletzen.

*Unruh-Effekt*: Der nach William Unruh benannte Effekt ist eine Vorhersage der Quantenfeldtheorie, nach der ein beschleunigter Detektor, der an ein quantisiertes Feld gekoppelt wird, das sich in einem Vakuumzustand bezüglich eines Inertialsystems befindet, die lokalen Fluktuationen des Vakuums registrieren kann. Unruh hat zudem postuliert, dass ein durch den Quantensee der virtuellen Teilchen bewegter Beobachter Wärmestrahlung empfindet. Dieses Phänomen ist eng verwandt mit der Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher, die dazu führt, dass diese mit der Zeit verdampfen.

*Mach-Lorentz-Antrieb*: Auch als Woodward-Effekt bezeichnet, ist Teil einer Hypothese, die James F. Woodward 1990 vorschlug. Die Hypothese besagt, dass vorübergehende Massenschwankungen in jedem Objekt auftreten, das innere Energie absorbiert, während es eine angemessene Beschleunigung erfährt. Die Nutzung dieses Effekts könnte einen reaktionslosen Schub erzeugen, den Woodward und andere in verschiedenen Experimenten zu messen behaupten.

\*\*\*

Zum Abschluss noch ein kolorierter Stummfilm von Georges Méliès aus dem Jahre 1902!  
<http://www.youtube.com/watch?v=zCM111KAP40>

### Quellen:

Lukian von Samosata: Wahre Geschichten

Johannes Kepler: Der Traum, oder: Mond-Astronomie: Somnium sive astronomia lunaris

Carl Ignaz Geiger: Reise eines Erdbewohners in den Mars

Edgar Allan Poe: Das beispiellose Abenteuer eines gewissen Hans Pfaall

Jules Verne: Von der Erde zum Mond

Die Reise um den Mond

---

Ley, Wittmann, Hallmann: Handbuch der Raumfahrttechnik, 5. Auflage, 2019

Physik des Warp-Antriebes, in: Spektrum Kompakt 22/21

Maiwald, Quantius, Rievers: Grundlagen der Orbitmechanik, 2. Auflage 2021

Susskind/Hrabovsky: Klassische Mechanik. Alles was Sie brauchen, um Physik zu treiben, 2020

*Alternative Antriebstechniken*, wenn man bereits im Weltraum ist, beschreibt ein Artikel in Spektrum der Wissenschaft, 12/2019, Seite 74: Schuss ins Blaue