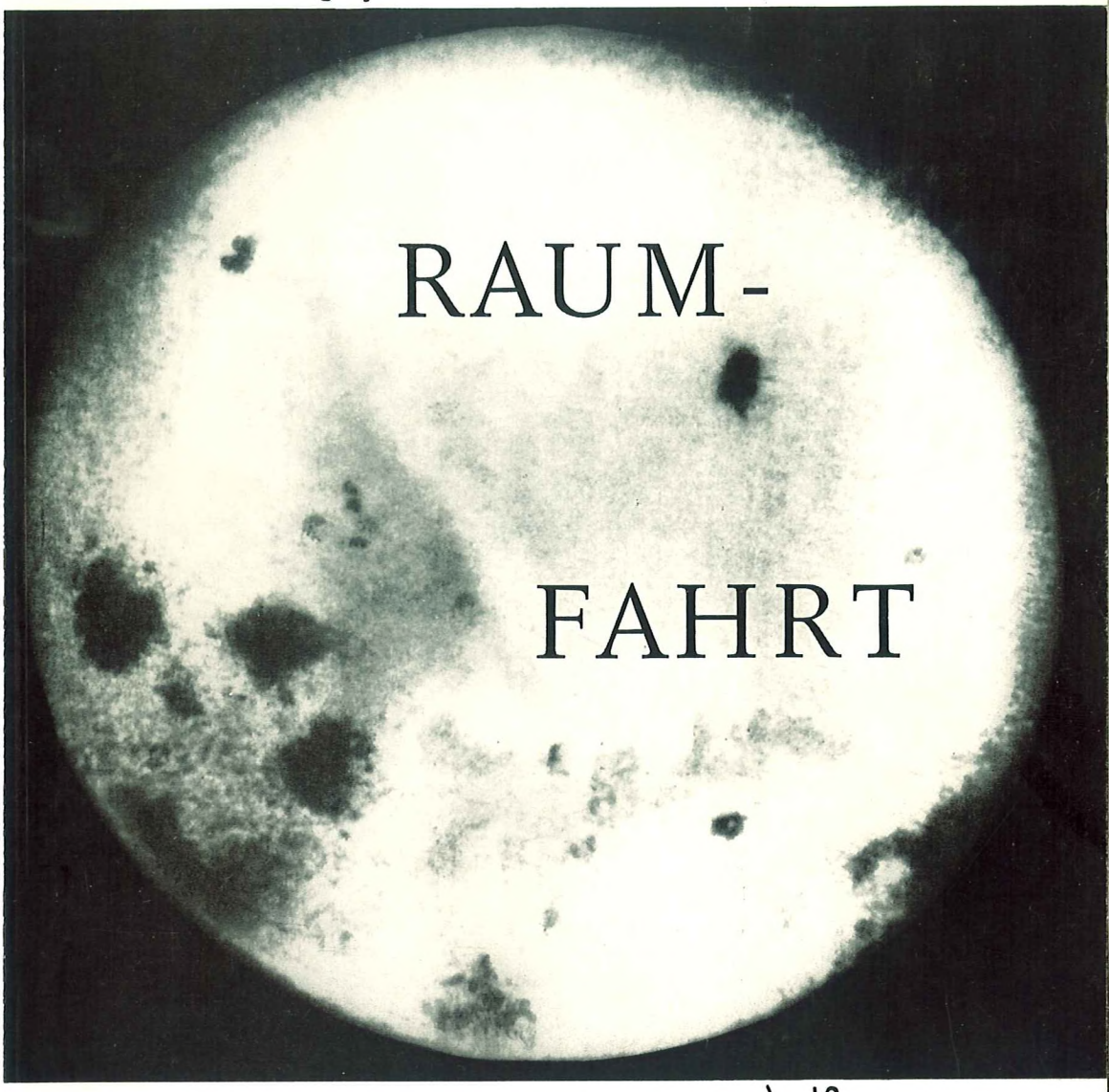


Von JAKOB ACKERET

Auf dem Umschlag:

Erste Aufnahme der Mondrückseite, Oktober 1959
(Akademie der Wissenschaften der USSR)

NEUJAHRSBLATT

herausgegeben von der

Naturforschenden Gesellschaft in Zürich

auf das Jahr 1960

162. Stück

1960

Kommissionsverlag Gebr. Fretz AG, Zürich

Abhandlung Nr. 4

der

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich

Jahrgang 104

Redaktion: Prof. Dr. H. Steiner, Zoologisches Institut der Universität,
und P.D. Dr. E. A. Thomas, Fehrenstrasse 15, Zürich

Ausgegeben am 31. Dezember 1959

Raumfahrt

Von

JAKOB ACKERET

Institut für Aerodynamik
ETH Zürich

Mit 19 Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	5
I. Die Anwendung des Raketenprinzips für die Raumfahrt	5
1. Das Raketenprinzip	5
2. Das Stufenprinzip	10
II. Erzeugung hoher Auspuffgeschwindigkeiten in der Raketendüse	12
1. Chemische Antriebe	12
2. Nichtchemische Antriebe	20
a) Verwendung der Kernenergie: thermische Beschleunigung	20
b) Elektrische Beschleunigung	21
III. Himmelsmechanische Grundlagen der Raumfahrt	22
1. Das Anziehungsgesetz	22
2. Mond- und Planetenfahrten	28
IV. Die Raumreise	30
1. Der Start	30
2. Der Überflug	32
3. Die Steuerung	34
4. Die Landung	35
V. Die wissenschaftliche Bedeutung der Raumfahrt	38
VI. Schluss	45
Literatur	46

Einleitung

Die Raumfahrt, das heisst die Ortsveränderung im planetarischen Raum, bisher nur ein Traum der Menschheit, ist heute auf dem Wege zur Verwirklichung. Wenn auch noch grosse Schwierigkeiten zu überwinden sind, so lässt sich doch mit einiger Wahrscheinlichkeit vermuten, dass noch vor Ablauf unseres Jahrhunderts grössere interplanetarische Reisen unternommen werden. Freilich darf man sich, mindestens für den Anfang, eine solche Fahrt nicht allzu gemütlich vorstellen; die physische und wohl auch psychische Beanspruchung der unter sehr veränderten Bedingungen lebenden Insassen des Raumschiffes dürfte so gross sein, dass der «Raumarzt» nicht weniger nötig sein wird als etwa der Navigator.

Nun braucht man glücklicherweise nicht zu warten, bis alle diese Probleme gelöst sind. Solange nämlich die wissenschaftlichen Ziele im Vordergrund stehen, können auch u n b e m a n n t e Raumfahrzeuge sehr wertvolle Ergebnisse liefern; teilweise liegen solche heute schon vor. Man hat raffinierte Apparaturen ersonnen und ausgeführt, die automatisch Registrierungen machen und zur Erde übermitteln, und der Tag ist vielleicht nicht mehr fern, wo der Anblick der Erde aus dem Weltraum, die noch unbekannte Rückseite des Mondes und anderes bequem auf den irdischen Fernsehschirmen beobachtet und verfolgt werden können. B e m a n n t e Raumschiffe sollen aber folgen. Auch sie können wissenschaftlich eingesetzt werden: etwa, wenn es gilt, die Mond- oder Marsoberfläche mineralogisch und biologisch zu untersuchen oder dort feste astronomische Observatorien einzurichten. Daneben gibt es allerdings auch Ziele, die weniger klar formuliert werden: Ziele politischer oder militärischer Art, Prestigeüberlegungen oder auch nur Abenteuerlust. Hier kann man nur dringend wünschen, dass noch zur rechten Zeit internationale Abkommen entstehen, die einen Missbrauch der neuen technischen Möglichkeiten verhindern.

Die Entwicklung der Raumschiffahrt-Technik ist zurzeit in vollem Fluss. Gar manches, was heute als letzte Errungenschaft gilt, wird morgen überholt sein. Nicht so die ehernen Gesetze der Himmelsmechanik, deren Anwendung auf technische Probleme etwas ergibt, was den Ingenieuren bisher noch nie vorkam: eine völlig reibungslose Bewegung, die mit der sprichwörtlichen «astronomischen Genauigkeit» berechnet und verfolgt werden kann.

I. Die Anwendung des Raketenprinzips für die Raumfahrt

1. Das Raketenprinzip

Wir wollen der Einfachheit wegen die Raumfahrt als eine Bewegungsart definieren, bei der ein Fahrzeug entweder «ganz» dem Einfluss des Schwerefeldes der Erde entrinnt[1] oder mindestens ihm nur soweit unterworfen ist, dass es

[1] Wie weiter hinten gezeigt wird, erstreckt sich theoretisch der Einfluss der Schwerkraft jedes Körpers bis ins Unendliche; doch sind die Kräfte in grosser Distanz ausserordentlich klein.

zwangsläufig längere Zeit (Wochen, Monate, Jahre) im praktisch luftleeren Raum weit weg von der Erdoberfläche seine Bahn zieht. Als Fernziel der Raumfahrt wäre ein Fahrzeug denkbar, das einerseits beliebige Fahrten zwischen den Planeten und ihren Monden (eventuell mit Aufenthalt dort) ausführt, andererseits aber auch sich dem Schwerefeld der Sonne entzieht und damit das Sonnensystem verlässt. Obwohl dies heute noch reichlich phantastisch erscheint, ist doch zu sagen, dass nicht völlig neue Prinzipien dazu nötig sind. Es genügt eine Verbesserung und Vergrösserung der heute schon bestehenden beziehungsweise geplanten Raumfahrzeuge.

Im Gegensatz zur Luftfahrt, wo auf zwei ganz verschiedene Weisen ein Körper zum Schweben gebracht werden kann, nämlich aerostatisch (Luftschiff) und aerodynamisch (Flugzeug), ist das Bewegungsprinzip der Raumfahrt ein einheitliches: man muss dem Flugkörper eine genügend grosse Geschwindigkeit erteilen, wenn er die Erde verlassen soll. Dabei ist es in gewissen Grenzen gleichgültig, ob die Beschleunigung eine mässige, aber langdauernde oder eine starke von kürzerer Dauer ist.

Es war Jules Verne, der in seinem Roman «Von der Erde zum Mond» den letzteren Fall in extremis sich ausdachte: Er schoss sein Raumschiff aus einer grossen vertikalen Kanone gegen unseren Trabanten. Etwas schüchtern berührte er die naheliegende Frage, ob die Insassen durch den heftigen Prall beim Abschuss nicht doch Schaden leiden könnten, und er ersann eine kunstvolle Dämpfungsvorrichtung, die freilich jedem, der die Grundgesetze der Mechanik kennt, ein Lächeln abnötigt. Immerhin enthält dieser Roman einige recht witzige Bemerkungen. Auch war der Abschussort nicht übel gewählt: er war fast genau auf Cape Canaveral, dem heutigen Startzentrum der amerikanischen Satelliten und Planetoiden.

Viel einfacher machte es der andere grosse Meister der Science Fiction, H. G. Wells, in seiner Geschichte «The first Men in the Moon» (1901). Er lässt den Erfinder Cavor eine für die Schwerkraft undurchlässige Substanz (das Cavorit) entdecken. Es genügt dann eine Umhüllung des Raumschiffes mit Cavorit, wobei einige Jalousien vorgesehen sind, die geöffnet die Schwerkraft, sei es der Erde oder des Mondes, hereinlassen. Es ist ihm wohl entgangen, dass auf diese Weise das schönste Perpetuum mobile gebaut werden könnte. Gleichzeitig sehen wir aus dessen Unmöglichkeit eine wichtige Eigenschaft der Schwerkraft, dass sie nämlich alle Körper durchdringt und anscheinend nicht aufgehalten werden kann[2].

Weniger heftige, aber länger dauernde Antriebswirkungen können nun mit dem Raketenprinzip erzeugt werden. Dieses ist denn auch

[2] Die Schwere ist immer noch ein grosses Rätsel der Physik. Die Einsteinsche Gravitationstheorie (1916) hat zwar ausserordentliche Erweiterungen unserer Naturerkenntnis gebracht. Trotzdem steht die so einfach scheinende Massenanziehung nach wie vor ohne inneren Zusammenhang mit den übrigen Kräften der Natur. Eine Ahnung von den Überraschungen, die hier noch einmal eintreten könnten, gibt das Paulische Neutrino, ein masseloses, experimentell nachgewiesenes Elementarteilchen, das auch eine äusserst kleine Absorption erfährt und fast ohne Störung den ganzen Erdball durchqueren kann.

allgemein angewandt. Es ist im wesentlichen eine Anwendung des dritten Newtonschen Gesetzes von der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung. Wenn jemand auf einer glatten Eisfläche einen Körper wegstösst, so setzt er sich in entgegengesetzte Bewegung. Hat der Körper die Masse M_k und nimmt er durch die ausgeübte Kraft die Geschwindigkeit V_k in Vorwärtsrichtung an, so wird (bei reibungslos gedachter Unterlage) der Stossende mit der Masse M_p eine rückwärts gerichtete Geschwindigkeit V_p annehmen, wobei die einfache Beziehung gilt:

$$M_k \cdot V_k = M_p \cdot V_p$$

Das Produkt von Masse und Geschwindigkeit wird I m p u l s J genannt; der Impuls ist andererseits gleich dem Produkt des Mittelwertes der Kraft mit der Zeit T der Kraftanwendung:

$$J = \overline{K} \cdot T$$

Für die ganze Raketentechnik ist der Impuls von fundamentaler Wichtigkeit. Während in der übrigen Technik das Produkt

$$\text{Kraft} \cdot \text{Weg} = \text{Energie}$$

eher vorherrscht, ist also hier

$$\text{Kraft} \cdot \text{Zeit} = \text{Impuls}$$

dem Problem mehr angepasst.

Man gibt deshalb die «Stärke» einer Rakete nicht etwa in PS an, sondern in kgs oder auch ts (Kilogramm und Tonne als Kraft aufgefasst).

Eine Fliegerabwehrrakete liefert etwa den Impuls

$$J = 1000 \text{ kg} \cdot 40 \text{ s} = 40 \text{ ts}$$

eine Grossrakete

$$J = 100 \text{ t} \cdot 200 \text{ s} = 20\,000 \text{ ts}$$

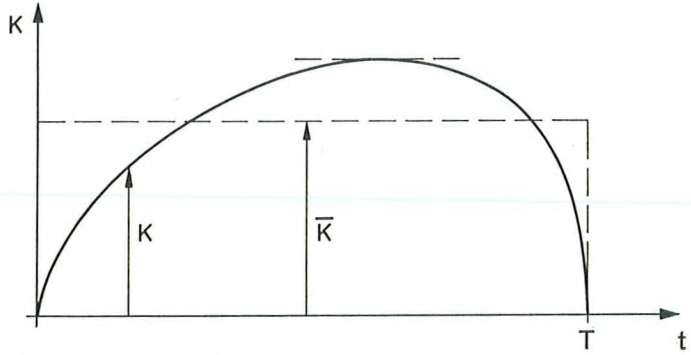


Abb. 1 Eine Kraft K, die mit der Zeit t sich ändert, gibt einen Impuls, der dem Flächeninhalt unter der Kurve proportional ist beziehungsweise gleich dem Produkt vom Zeitmittelwert der Kraft $\overline{K}$ und der gesamten Wirkungszeit T.

Man kann selbstverständlich mehrere Massen nacheinander ausstossen und schliesslich zu kontinuierlichem Ausfluss während begrenzter Zeit übergehen. Man erhält dann den eigentlichen Raketenmotor, wie er heute verwendet und ständig verbessert wird. Abb. 2 zeigt anschaulich diesen Übergang. Der in einzel-

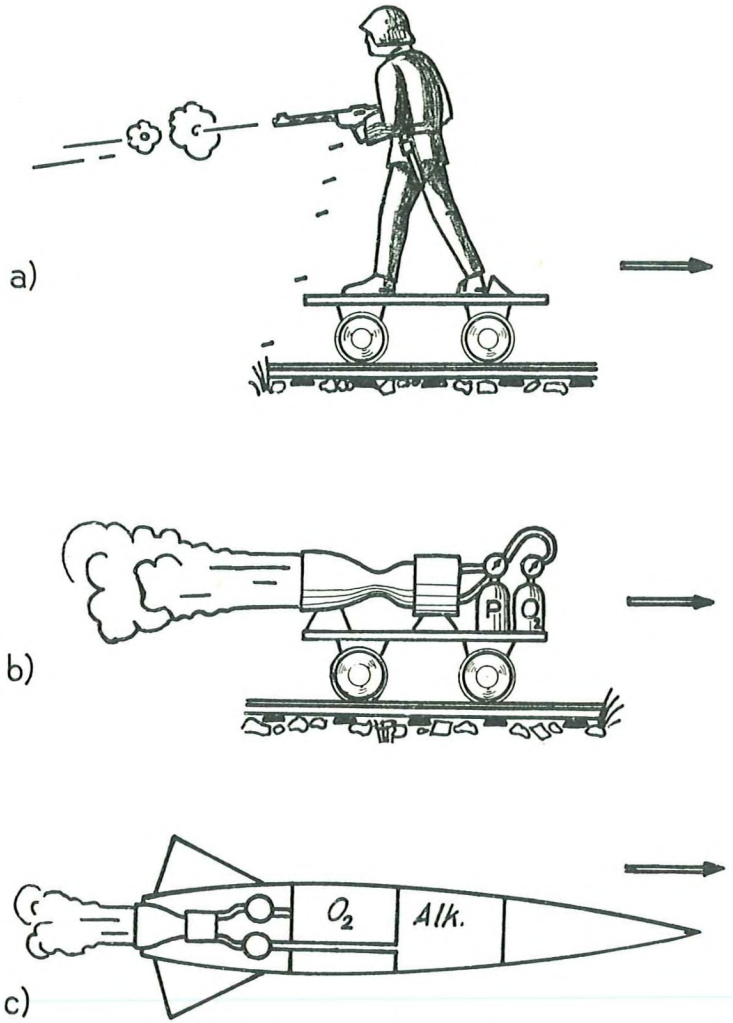


Abb. 2 Das Rückstossprinzip.

a) Der Rückstoss beim Feuern eines Maschinengewehrs würde den reibungslos gedachten Wagen mit dem Mann zurückrollen lassen.

b) An Stelle der einzelnen Schüsse kann ein kontinuierlicher Ausfluss treten, der durch die Verbrennung von Petrol und Sauerstoff ständig unterhalten wird.

c) Bei der eigentlichen Rakete (etwa mit Sauerstoff und Alkohol betrieben) sind genau die gleichen Vorgänge wie unter b) wirksam. Nur die technische Anordnung ist verschieden.

nen Stössen erfolgende Rückprall des Maschinengewehres (Abb. 2a) lässt den Schützen mit dem (reibungslos gedachten) Wagen zurückrollen. Die hochgespannten Brenngase eines Raketenofens (Abb. 2b) strömen hingegen mit grosser Geschwindigkeit kontinuierlich ab. Die Einrichtung erfährt den entsprechenden Rückwärtsimpuls, der ihre Geschwindigkeit sukzessive erhöht. Die unterste Figur (Abb. 2c) unterscheidet sich davon nur durch technische Details. Alle diese Einrichtungen arbeiten natürlich auch im leeren Raum; keineswegs handelt es sich um ein Rückstossen gegen die Luft.

Die Mechanik liefert eine ziemlich einfache mathematische Formel für die (ohne Reibung) erzielbare Geschwindigkeit nach Ausstossen der Gase. Ist die Raketenmasse beim Inbrandsetzen M_1, nach dem Abbrand M_2, so dass also im ganzen die Masse der ausgestossenen Gase $M_1 - M_2$ ist, sei ferner die relative Geschwindigkeit, mit der die Gase die Ausfluss- oder Düsenmündung verlassen, gleich w, so ermittelt sich die erlangte Geschwindigkeit V des Raketenrestes M_2 (in Gegenrichtung) bei Abwesenheit sonstiger Kräfte zu

$$V = w \cdot ln\left(\frac{M_1}{M_2}\right) \qquad \text{(I)}$$

wo ln der natürliche Logarithmus ist.

Die Zahlentafel 1 zeigt einige Werte von V:

M_1/M_2 →	2,718	4	6	8	10	
w = 2000	2000	2775	3585	4160	4605	chemischer Antrieb
↓ 3000	3000	4160	5380	6240	6910	
4000	4000	5550	7170	8320	9210	
8000	8000	11 100	14 340	16 640	18 420	Kernantrieb

Nehmen wir als heute praktisch erreichte Werte für einstufige Raketen beispielsweise

$$w = 2400 \text{ m/s}, \quad M_1/M_2 = 5$$

War das Gesamtgewicht beim Start = 100 t, so sind also 80 t Treibstoff verbrannt worden, um die restlichen 20 t auf 3860 m/s zu bringen. Das gilt für störungsfreie Bewegung. Luftwiderstand und Schwerewirkung während der Beschleunigungsdauer reduzieren die Geschwindigkeit spürbar. Letztere ist übrigens nicht gänzlich als Verlust zu buchen, weil während der Dauer des Abbrandes ja auch Höhe gewonnen wird. Immerhin zeigt eine Rechnung, dass ein rascher Start mit hoher Beschleunigung erwünscht wäre. Doch sind hier konstruktive und bei bemannten Raketen auch physiologische Grenzen vorhanden, die zu grosse Startbeschleunigungen verbieten.

2. Das Stufenprinzip

Wir werden noch sehen, dass für ein «Verlassen» des Schwerefeldes der Erde höhere Geschwindigkeiten nötig sind, nämlich rund 11 000 m/s oder angenähert 40 000 km/h. Man sieht aus der Zahlentafel 1, dass dies einstufig auch bei hohen Massenverhältnissen (8) und bei $w = 3000$ m/s (was gegenwärtig einen Höchstwert darstellt) nicht erreichbar ist. Da hilft nun das sogenannte Stufenprinzip (Abb. 3). Im erwähnten Beispiel ($M_1/M_2 = 5$, $w = 2400$ m/s) ist am Ende der Verbrennung noch eine Masse von 20 t vorhanden. Der grösste Teil davon wird von der Masse der leeren Behälter, der Raketenmotoren, Pumpen usw. geliefert; ein kleinerer Teil, sagen wir 8 t, wäre noch als «Nutzlast» verfügbar. Diese soll nun gemäss dem Stufenprinzip in Form einer kleineren Rakete (zweite Stufe) ausgeführt sein. Setzen wir der Einfachheit halber für diese zweite Stufe das gleiche Massenverhältnis und dieselbe Auspuffgeschwindigkeit ein, so ergibt sich für die zweite Stufe eine Anfangsmasse von 8 t, eine Endmasse von 1,6 t und eine z u s ä t z l i c h e Geschwindigkeit wiederum von 3860 m/s, so dass also die total erlangte Geschwindigkeit dieser 1,6 t 7720 m/s wäre. $^8/_{20}$ von 1,6 t sind dann die «Nutzlast» der zweiten Stufe, also 640 kg. Der Gewinn ist dadurch zustande gekommen, dass man die 12 t «toter» Endmasse der ersten Stufe abgetrennt und nicht mehr weiter beschleunigt hat. – Auch 7720 m/s ist noch zu wenig für eine wirkliche Raumfahrt; man muss noch eine dritte Stufe anbringen, deren Anfangsmasse die besagten 640 kg wäre. Die Endmasse würde 128 kg betragen und hätte die Totalgeschwindigkeit von $3 \cdot 3860$ m/s $= 11\,580$ m/s. Damit wäre auch bei Berücksichtigung des anfänglichen Luftwiderstandes die sogenannte «Fluchtgeschwindigkeit» erreicht. Die Nutzlast der dritten Stufe beträgt noch $^8/_{20}$ mal 128 kg = 51,2 kg, die etwa aus Instrumenten bestehen könnte.

Wir stellen die Massenbilanz übersichtlich zusammen:

Anfangsmasse I	100 000 kg	
Treibstoff ausgestossen	80 000 kg	
Endmasse I	20 000 kg	Geschwindigkeit 3 860 m/s
abgetrennt	12 000 kg	
Anfangsmasse II	8 000 kg	
Treibstoff ausgestossen	6 400 kg	
Endmasse II	1 600 kg	Geschwindigkeit 7 720 m/s
abgetrennt	960 kg	
Anfangsmasse III	640 kg	
Treibstoff ausgestossen	512 kg	
Endmasse III	128 kg	
davon Behälter	76,8 kg	
Nutzlast	51,2 kg	Geschwindigkeit 11 580 m/s

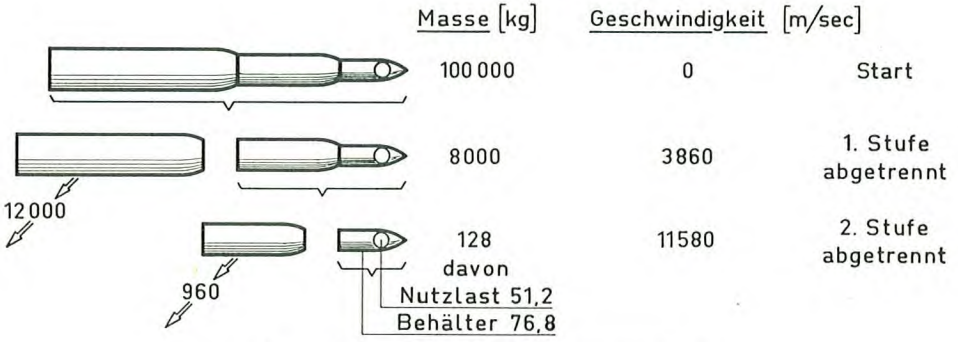


Abb. 3 Das Stufenprinzip. Erklärung im Text.

Mit 100 000 kg Anfangsmasse kann man also bei den vorliegenden Annahmen nur rund 50 kg wirkliche Nutzlast aus dem Schwerefeld der Erde bringen; das effektive Massenverhältnis ist somit $^1/_{2000}$, und man versteht jetzt, warum bei einigen Raketen zuletzt nur Körper von Fussballgrösse die wirkliche Raumfahrt angetreten haben. Die Anfangsmasse der russischen «Luniks» war offenbar wesentlich grösser gewesen; auch ist es wahrscheinlich, dass die Auspuffgeschwindigkeit dort mehr als 2400 m/s betrug.

Die Mehrstufigkeit gibt naturgemäss Anlass zu Komplikationen. Es ist nicht gerade leicht, die Trennung der Stufen und das Anzünden der nächsten präzis vorzunehmen, indem die Lage der Rakete im Raum bei der Trennung sehr genau festgelegt sein muss, ebenso der Zeitpunkt; sonst kann die weitere Bahn der Endmasse beträchtliche Fehler aufweisen. Es werden deshalb grosse Anstrengungen gemacht, die Stufenzahl zu reduzieren. Es läuft dies gemäss Formel I darauf hinaus, Auspuffgeschwindigkeit und Massenverhältnis so hoch wie möglich zu treiben. Erstere wird noch näher besprochen werden; sie hängt zusammen mit der Suche nach energiereichen und gleichzeitig leichten neuen Treibstoffen. Ein gutes, das heisst grosses Massenverhältnis kann nur bei sehr raffinierter Konstruktion erhalten werden. Längst hat man die Wände der grossen Treibstoffbehälter zum Tragen herangezogen; sie ersetzen die früher noch angewandte getrennte Aussenhaut. Dabei geht man so weit, dass die Rakete ohne Behälter-Innendruck kaum aufrecht stehen kann. Alle Hilfsapparate, wie Düsen, Pumpen, Leitungen, Steuerorgane, werden so knapp als möglich dimensioniert. Erschwerend wirkt die Tatsache der heftigen Erschütterungen beim Abbrand, die leicht zu Störungen führen – um so mehr, als einzelne Behälter, Leitungen und Ventile bei sehr tiefen Temperaturen arbeiten (flüssiger Sauerstoff [— 180° C], flüssiger Wasserstoff [— 253° C]), was zu Versprödungen Anlass geben kann. Der Leser, der nur die Bilder und Filme von misslungenen Starts sieht, ist leicht geneigt, ein abschätziges Urteil über das Können der Erbauer zu fällen, da er die wahren Schwierigkeiten der Aufgabe kaum ahnen kann. Man darf nicht vergessen, dass die gesamte F l u g -Betriebsdauer des Raketenmotors eines bestimmten Typs nur nach wenigen Stunden zählt, wäh-

rend welchen man Erfahrungen sammeln muss. Günstiger steht es mit den Brennversuchen am Boden; doch treten im Fluge eben neue störende Erscheinungen auf. Ähnliches gilt für das Steuerungssystem. Erschwerend tritt hinzu, dass misslungene Starts meistens nur Trümmer hinterlassen, die, falls sie überhaupt aufgefunden werden, die Untersuchungen der Unfallursachen sehr mühsam gestalten.

II. Erzeugung hoher Auspuffgeschwindigkeiten in der Raketendüse

1. Chemische Antriebe

Wenn man dem auszustossenden Treibstoff eine grosse Geschwindigkeit geben will, so muss man ihm eine hohe Energie zuführen. Das geschieht, wenn es sich um grössere Mengen handelt, am einfachsten durch Erhitzung. Eine solche könnte im Prinzip von aussen her, etwa mit einem System geheizter Röhren erfolgen oder aber einfacher dadurch, dass man den Treibstoff sich selbst durch eine chemische Reaktion erwärmen lässt. Bis vor kurzem schien nur der zweite Weg gangbar und er ist vorläufig der einzige praktisch verwirklichte. Heute ist man aber daran, auch den ersten heranzuziehen, wobei ein Kernreaktor Wärme an ein leichtes Gas abgibt – ein zweifellos vielversprechender Vorschlag, der aber eine grosse Entwicklungsarbeit verlangen wird.

Am einfachsten erscheint die Verwendung fester Treibstoffe, also von Schiesspulver, und in der Tat ist das auch die schon vor Jahrhunderten angewandte Methode. Sie lebt noch heute in den Feuerwerkraketen und hat ausserordentliche Verbesserungen seit ihrer stark steigenden Verwendung für militärische Zwecke erfahren. Es gibt heute Stimmen, die glauben, dass der modernen Feststoffrakete überhaupt die Zukunft gehöre.

Es ist gelungen, grosse homogene Massen von festem Treibstoff in komplizierte Formen zu giessen. Die Verbrennung ist durchaus nicht eine explosive, sondern kann sich über Minuten erstrecken. Etwas vereinfachend kann man sagen, dass die Oberfläche einer solchen Treibstoffmasse mit konstanter Geschwindigkeit in die Tiefe brennt. Die Brenngeschwindigkeit hängt noch vom Verbrennungsdruck ab. Bei 100 at ist sie für Treibstoffe vom Typus Nitroglyzerin-Nitrozellulose von der Grössenordnung 0,5 bis 5 cm/s. Hat man also eine Ladung, die in «Zigaretten»-Form abbrennt (Abb. 4a), von einem Meter Länge und eine Verbrennungsgeschwindigkeit von 2 cm/s, so dauert der Abbrand 50 s. Es kann sehr unerwünscht sein, die heisse Abbrandstelle a–a nahe an die Wand kommen zu lassen; man führt dann eine Hohlform ein (Abb. 4b), die radial von innen nach aussen brennt. Diese hat aber den Nachteil, dass die Brandfläche nicht konstant ist, sondern ständig wächst, und damit nimmt die Erzeugung von heissen Gasen zu und der Druck steigt scharf an. – Es sind kunstvolle Formen entwickelt worden, die beim Abbrand möglichst konstante Drücke geben und die Wände erst im letzten Augenblick erhitzen (Abb. 4c). So einfach dies alles aussieht, so schwierig ist die sichere Durchführung eines geregelten

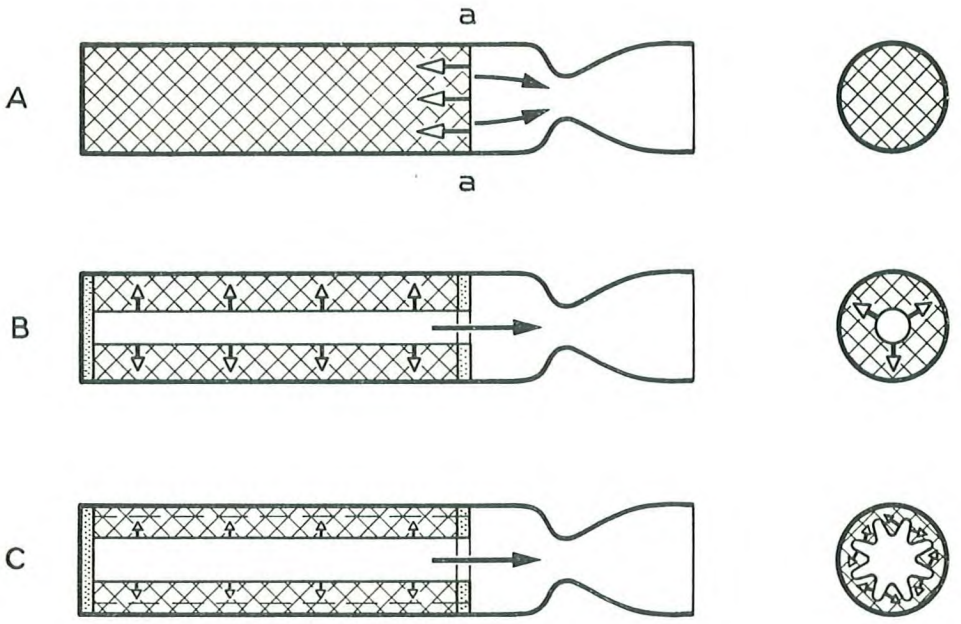


Abb. 4 Feststoff- («Pulver»-) Raketen.
A Abbrand longitudinal (Zigarettenform). Starke Erhitzung der Wand während längerer Zeit. Druck konstant.
B Abbrand radial zylindrisch. Druck wächst zeitlich.
C Gewellte Innenform. Innenfläche zeitlich annähernd konstant, ebenso der Druck.

Abbrandes über längere Zeit. Die Schwierigkeiten werden aber allmählich überwunden und es scheint, dass Auspuffgeschwindigkeiten von 2400 m/s erreicht werden können.

Der Abbrand erzeugt ein sehr heisses Gas (etwa 2800° C) unter einem Druck, der noch von der Grösse der engsten Düsenöffnung abhängt und 20 bis 100 at beträgt. Lässt man dieses durch eine Öffnung strömen, so erlangt es um so grössere Geschwindigkeiten, je spezifisch leichter es ist. Es ist weiterhin schon lange bekannt, dass ein einfaches Loch oder ein zylindrischer Ansatz keine vollständige Umsetzung des vorhandenen Druckgefälles in Geschwindigkeit ergeben kann, weil im engsten Querschnitt höchstens Schallgeschwindigkeit (dem dortigen Gaszustand entsprechend) auftreten kann. Der Druck an dieser Stelle ist immer noch hoch (etwa die Hälfte des Kammerdruckes), wesentlich höher als der Aussendruck, die Expansion des Gases also unvollständig. Man kann aber ganz oder nahezu auf den Aussendruck expandieren, wenn man ein in Strömungsrichtung divergentes Rohrstück anschliesst; man erhält dann die sogenannte L a v a l - D ü s e, die in der Dampfturbinentechnik seit langem gebräuchlich, deren Theorie aber viel älter ist (St. Venant 1839). Dass trotz Geschwindigkeitserhöhung der Querschnitt vergrössert werden muss, kommt

daher, dass die Geschwindigkeit gegen einen endlichen Grenzwert, die Gasdichte aber bei fortdauernder Expansion gegen Null strebt. Im divergenten Teil herrscht Überschall-, im engsten Querschnitt Schall- und im konvergenten Teil Unterschallgeschwindigkeit. In Abb. 5 ist der Druckverlauf angegeben. Am Austritt (f_e) kann der Druck p_e noch vom Aussendruck p_a etwas verschieden sein, doch ist der damit verbundene Verlust gering. Es ist also mit Rücksicht auf das Düsengewicht angezeigt, die Expansion nicht vollständig innerhalb der Düse auszuführen.

Feste Treibstoffe werden vor allem bei kleineren Raketen verwendet. Ihre Anwendung bei grossen wird versucht. Man hofft, dass der Wegfall zahlreicher Einzelteile der Flüssigkeitsraketen gewichtlich sich so auswirkt, dass die etwas kleinere Auspuffgeschwindigkeit wenigstens teilweise wettgemacht wird. – Sollen aber die grösstmöglichen Raketengeschwindigkeiten erzielt werden, dann bleibt nur das eben erwähnte Flüssigkeitstriebwerk übrig (Abb. 5). Es besteht auch aus einer Brennkammer (Raketenofen) mit anschliessender Laval-Düse. In den Ofen werden zahlreiche feine Flüssigkeitsstrahlen gespritzt, die einesteils aus oxydierender Flüssigkeit, andernteils aus dem flüssigen Brennstoff bestehen. Die Strahlen sind so gerichtet, dass sie sich innerhalb der Kam-

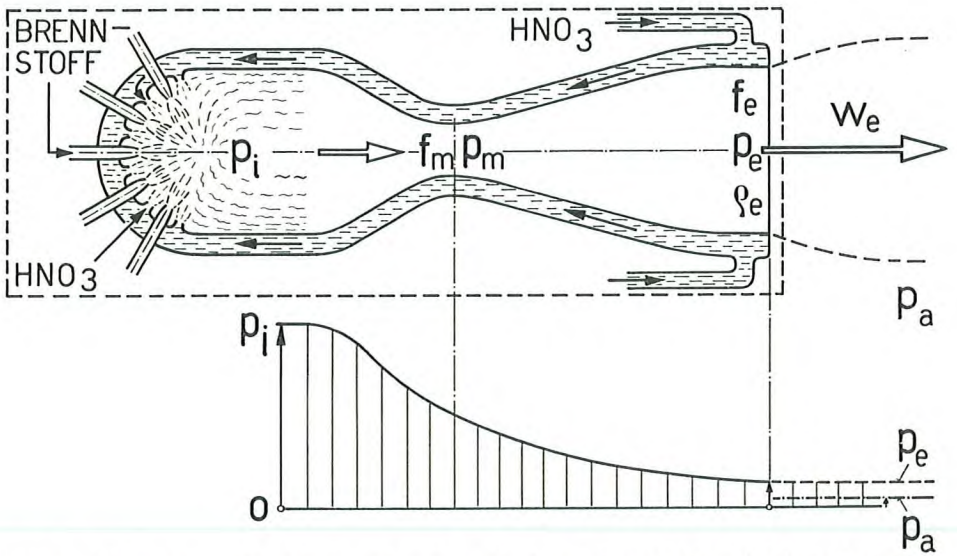


Abb. 5 Schema eines Flüssigkeitstriebwerkes. Als Oxydator und Mantelkühlmittel wird beispielsweise Salpetersäure (HNO_3) genommen, als Brennstoff Flugpetrol. Die Flüssigkeiten treffen in Strahlen zusammen und verbrennen. Der Druck p_i in der Brennkammer (Raketenofen) ist 20 bis 50 Atmosphären. Anschliessend die Laval-Düse mit engstem Querschnitt f_m. Der Druck p_e am Ende des divergenten Überschallteils braucht nicht genau gleich dem Aussendruck p_a zu sein, insbesondere in grossen Höhen. Im engsten Querschnitt ist der Druck p_m etwa die Hälfte des Innendruckes. Die Temperatur geht von T_i im Ofen gleichfalls zu niederen Werten. T_e ist ungefähr die Hälfte bis ein Drittel von T_i.

mer treffen. Da die Verbrennungstemperatur ausserordentlich hoch ist, höher als die Schmelztemperatur des Wandmaterials, muss die Wand gekühlt werden (OBERTH). Es geschieht dies so, dass man einen eng anliegenden Kühlmantel um Brennkammer und Düse legt, durch den zum Beispiel der Brennstoff mit grosser Geschwindigkeit strömt. Die engste Stelle ist gewöhnlich die am meisten gefährdete, weil dort der Wärmeübergang infolge grosser Geschwindigkeit und noch erheblicher Dichte des Gases besonders gross ist. Das Kühlmittel wird erwärmt und gelangt nachher in die Brennkammer; die Kühlwärme geht also nicht verloren (Regenerativkühlung).

Es gibt noch andere Kühlverfahren, beispielsweise die sogenannte «Schwitzkühlung», wo die Kühlflüssigkeit durch die poröse oder mit Löchern versehene Düsenwand direkt ins Innere gepresst wird und einen dünnen Gasschleier bildet, der erst weiter stromabwärts verbrennt. Die praktischen Schwierigkeiten dieses Verfahrens sind allerdings gross, so dass trotz vielversprechender Möglichkeiten noch wenig über Ausführungen und Betriebserfahrungen verlautet ist. Einen Einblick in die Abhängigkeit der Auspuffgeschwindigkeit w von der Gaszusammensetzung und den Brennkammerbedingungen (Druck, Temperatur) gibt die Formel von ST. VENANT und ZEUNER:

$$w = \sqrt{2\,\mathfrak{R}\,\frac{\gamma}{\gamma-1}\cdot\frac{T_i}{\mathfrak{M}}\left[1-\left(\frac{p_e}{p_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \qquad \text{(II)}$$

$\mathfrak{R}$ = Universelle Gaskonstante $\left(8{,}316\cdot 10^7\,\frac{\mathrm{erg}}{\mathrm{Grad}}\right)$

γ = Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen (c_p/c_v)
γ variiert mit der Gaszusammensetzung und liegt zwischen 1,25 und 1,35

T_i = Absolute Temperatur (° C + 273) in der Brennkammer
(Grössenordnung 2500 ÷ 3500 °K)

p_i = Kammerdruck (20 ÷ 100 ata) 1 at = $0{,}981\cdot 10^6\,\frac{\mathrm{dyn}}{\mathrm{cm}^2}$

p_e = Druck am Düsenaustritt

$\mathfrak{M}$ = Mittleres Molekulargewicht der Kammergase

Bei den ersten V 2-Raketen war man genötigt, mit den Temperaturen nicht zu hoch zu gehen. Man verwendete als Oxydator flüssigen Sauerstoff, als Brenn- (und Kühl-) stoff eine wässerige Lösung von Äthylalkohol (75 %).

Dafür ergeben sich (in runden Zahlen):

$$T_i = 2850°\ \mathrm{C} = 3123\ °\mathrm{K}$$
$$\gamma = 1{,}22$$
$$\mathfrak{M} = 22$$

bei

$$p_i = 21\ \mathrm{ata}$$
$$p_e = 1\ \mathrm{ata}$$

wird

$$w = 2350\ \mathrm{m/s}$$

Heute geht man weiter, weil die Kühlung wesentlich verbessert werden konnte. An Stelle von Alkohol kommen Brennstoffe zur Verwendung, die etwa den Heizwert von Flugzeugpetrol haben. Grosse Anstrengungen sind auch mit Bor-Wasserstoff-Verbindungen gemacht worden, die etwas grössere Auspuffgeschwindigkeiten ergeben. Stark gefördert wird gegenwärtig das Studium von flüssigem Wasserstoff als Brennstoff. Mit reinem Sauerstoff zusammen erhält man eine Knallgasflamme mit Ausströmgeschwindigkeiten von 3700 m/s und mehr. Dabei hat sich ergeben, dass Lagerung und Transport in grösseren Mengen durchaus möglich sind und die Explosionsgefahr genügend reduziert werden kann. Als Oxydator wird neben flüssigem Sauerstoff auch flüssiges Fluor versucht. Gegenüber Sauerstoff kann damit noch etwas Geschwindigkeit gewonnen werden; jedoch ist die Handhabung von Fluor trotz grosser Fortschritte auf diesem Gebiet für den Grossbetrieb noch recht umständlich (Korrosion, Giftigkeit).

Mit der Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme wird ungefähr die Grenze des mit normalen chemischen Mitteln Möglichen erreicht. Sehr interessant wäre noch der Ersatz von flüssigem Sauerstoff (O_2) durch flüssiges Ozon (O_3), doch steht ihm die noch nicht gänzlich überwundene Gefahr der Selbstzersetzung des Ozons entgegen. Man kann hoffen, dass auch diese Hürde noch übersprungen werden kann; dann hätten wir eine Kombination, die gegen 4000 m/s liefert.

Um Zeit und Kosten zu sparen, versucht man die Verbrennungs-, Expansions- und Kühlungsvorgänge soweit als möglich rechnerisch zu verfolgen. Allein, es müssen dabei zahlreiche Annahmen gemacht werden, die genau nur aus dem Experiment entnommen werden können. Da ferner Modellversuche, wie sie etwa im Flugzeugbau sich bewährt haben, wegen der vielen neuen Parameter hier wenig zuverlässig sind, bleibt nur der Versuch im grossen übrig. So sind denn gewaltige Bodenprüfstände entstanden (Abb. 6), die man des enormen Lärms und der Explosionsgefahr wegen in abgelegene Gegenden verlegt. Abb. 7 zeigt eine in den Prüfstand eingebaute Düse für 70 000 bis 75 000 kg Schub. Für grössere Raketen werden mehrere Düsen parallel angeordnet. Die drei Motoren der Rakete (Abb. 8) ergeben einen Gesamtschub von 162 t, das entspricht beiläufig einer kinetischen Strahlleistung von 2,7 Millionen PS! Der Treibstoffverbrauch je Sekunde ist rund 650 kg.

Gelegentlich werden Vorschläge gemacht, sogenannte Radikale, das heisst im gewöhnlichen Zustand unstabile Stoffe, vor allem einatomigen Wasserstoff (H_1) zu verwenden. Die Rekombination $H_1 + H_1 = H_2$ liefert nämlich erstaunlich grosse Wärmemengen, auf gleiche Masse bezogen 14,5mal mehr als die Knallgasreaktion. Ausgelöst wurden diese Ideen durch Laboratoriumsexperimente, bei denen es gelungen ist, Radikale in allerdings grosser Verdünnung bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt (—273° C) an Wänden festzufrieren und während einiger Zeit zu lagern. Die Aussichten für eine stabile Lagerung grösserer Konzentrationen sind heute freilich noch gering.

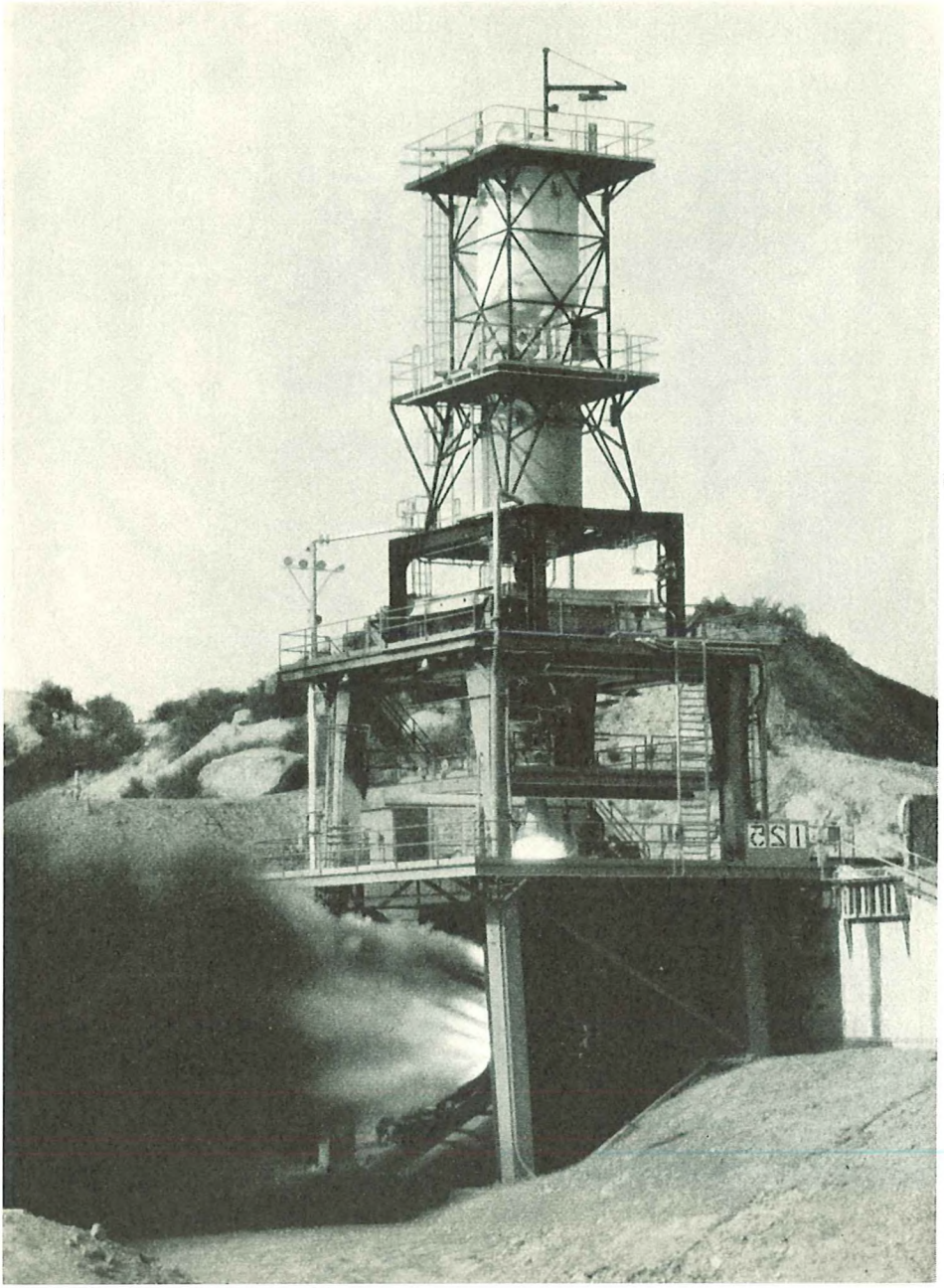


Abb. 6 Prüfstand für Grossraketen der «Rocketdyne Division of North American Aviation Inc.», aufgestellt in den Santa Susana-Bergen (Kalifornien). Der Raketenstrahl wird nach links um 90° umgelenkt.

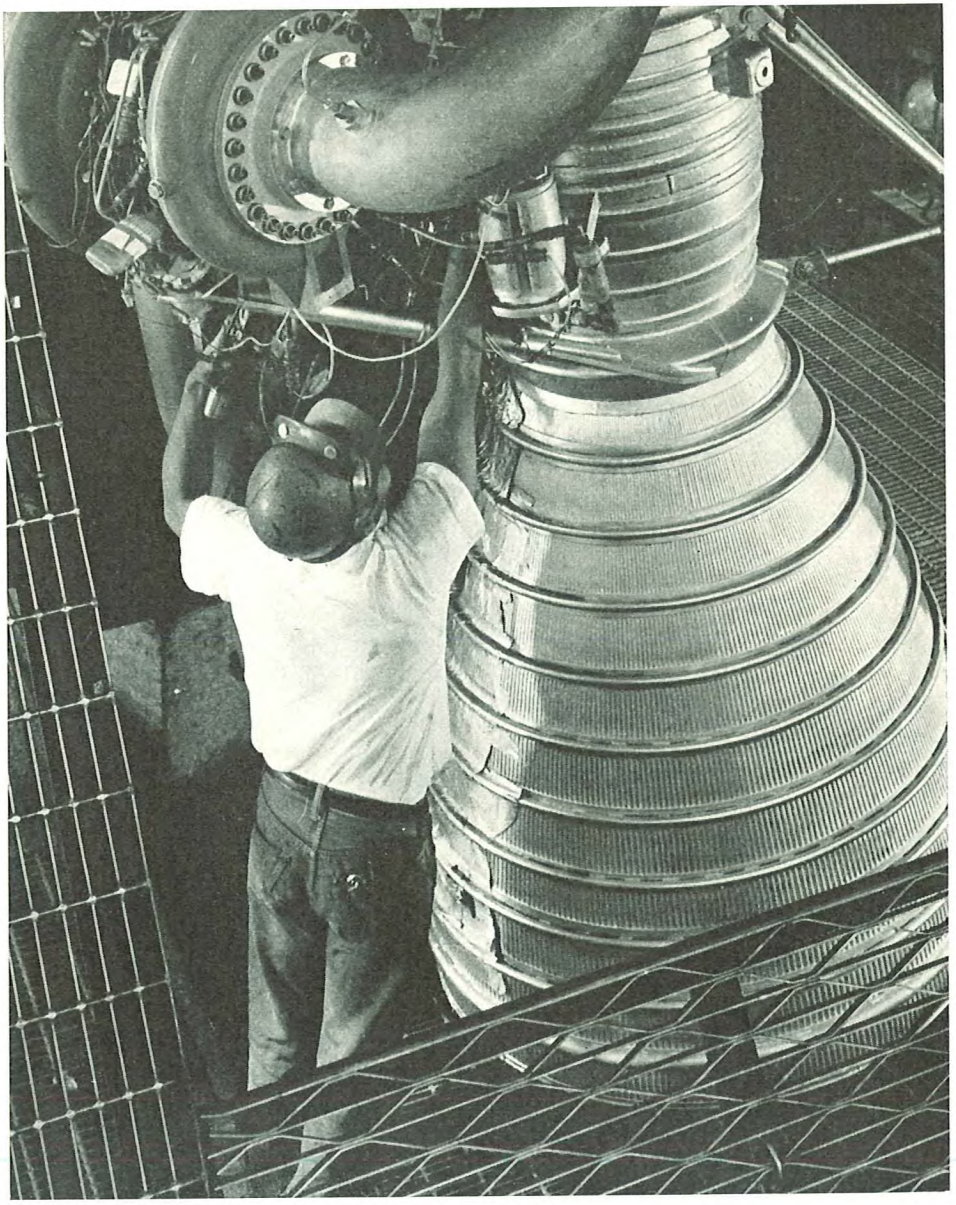


Abb. 7 Raketenmotor von 75 000 kg Schub im Raketenprüfstand (Abb. 6) montiert. Der divergente Teil der Düse besteht aus zahlreichen zusammengefügten Röhrchen, durch die die Kühlflüssigkeit strömt. Links oben die Zentrifugalpumpen für Sauerstoff und Petrol.

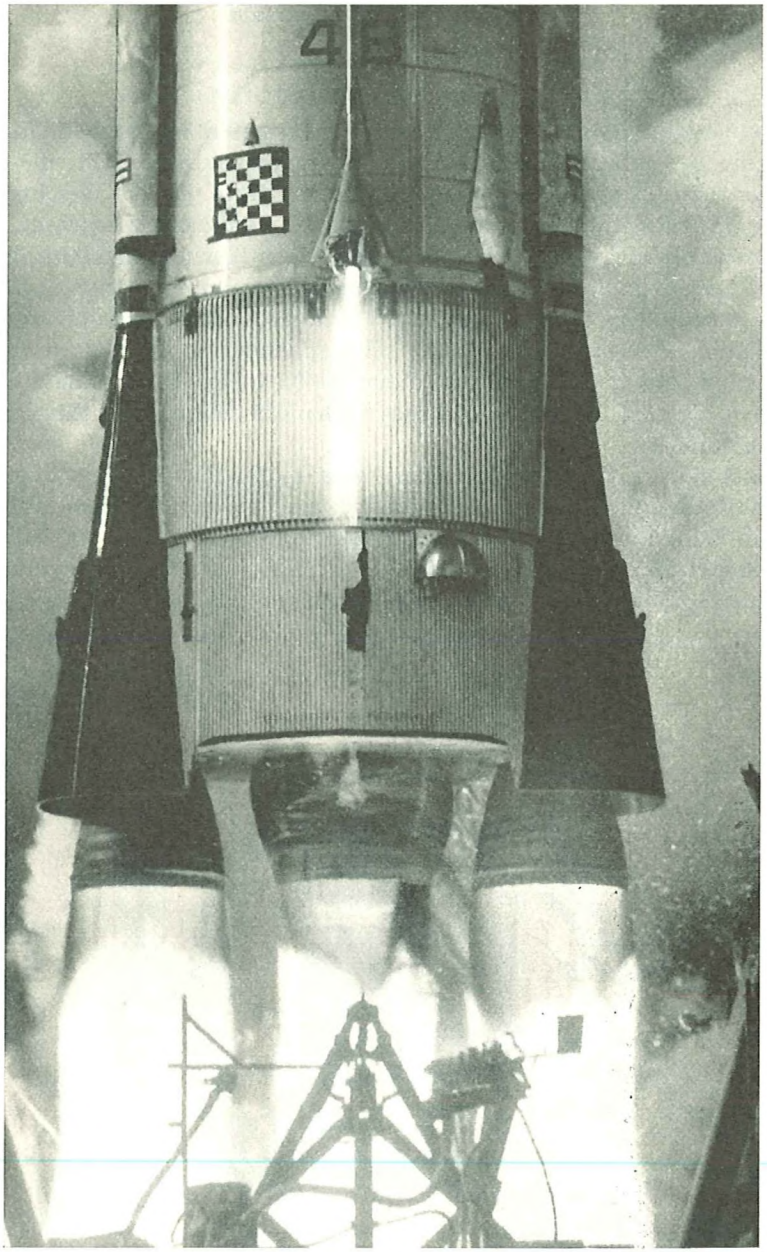


Abb. 8 Start einer Atlas-Rakete der Convair-Astronautics Division, San Diego, Kalifornien. Man sieht die abwerfbaren (sogenannten «Booster»-) Raketen links und rechts, in der Mitte die Rakete der zweiten (End-) Stufe («Sustainer»). Ferner ist oben eine der kleinen Steuerraketen («Vernier») im Betrieb, die die letzten kleinen Geschwindigkeitskorrekturen geben. Das Startgewicht beträgt rund 117 t, der Schub der drei Hauptraketen 162 t. Reichweite 9600 km.

2. Nichtchemische Antriebe

a) Verwendung der Kernenergie: thermische Beschleunigung

Nachdem es gelungen ist, Kernenergie in technischem Maßstab in Wärme umzusetzen, liegt es nahe, für die Raumfahrt diese nahezu unerschöpfliche Energiequelle heranzuziehen. Doch muss man beachten, dass wir zur Beschleunigung Impuls erzeugen müssen, dass wir also auch hier nicht vermeiden können, Massen ausströmen zu lassen. Die Anwendung der Kernenergie läge also darin, leichten Gasen (vor allem Wasserstoff) hohe Geschwindigkeiten zu erteilen dadurch, dass man diese unter Druck in einem Reaktor heizt und dann durch eine Laval-Düse ausströmen lässt; Abb. 9 zeigt schematisch die Anordnung. Eine grössere Einrichtung (unter dem Decknamen Kiwi) ist in den USA für Bodenversuche im Betrieb, wobei naturgemäss noch nicht auf kleinstes Gewicht Rücksicht genommen ist.

Während man in gasgekühlten Betriebsreaktoren heute kaum über 400 bis 500° C hinauskommt, sind für die Raketenreaktoren Gastemperaturen von 2000° C in Betracht gezogen. Uran, in Graphit fein verteilt, in Stäben oder Rohren angeordnet, mit einem Strahlungsschild von 15 cm Beryllium ist in einem der orientierenden Projekte beispielsweise angenommen. Flüssig gelager-

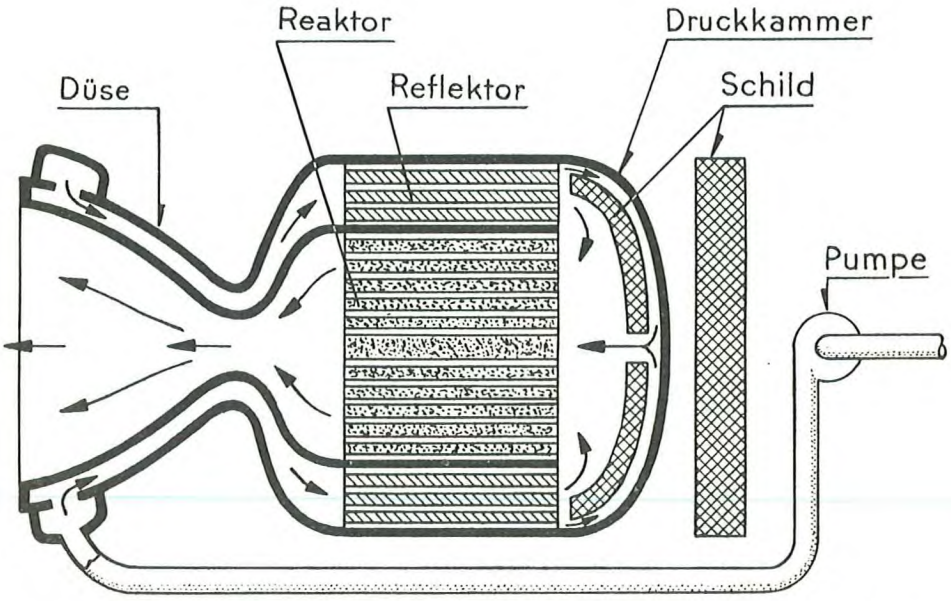


Abb. 9 Schema einer Kernenergie-Wasserstoff-Rakete. Die Pumpe fördert flüssigen Wasserstoff, der zunächst für die Mantel- und Reflektorkühlung verwendet wird, dabei verdampft und dann in den engen Kanälen des eigentlichen Reaktors auf hohe Temperaturen (2000° C) erhitzt wird. Anschliessend folgt die Laval-Düse. Die Ausströmgeschwindigkeit würde 8000 m/s erreichen. Gegenwärtig in Vorerprobung.

ter Wasserstoff wird zunächst auf hohen Druck gebracht, dann verdampft und noch relativ kalt in den Reaktor geleitet. Der Eintrittsdruck dürfte 50 bis 100 ata betragen. Ein beträchtlicher Teil wird für die Reibung und die Geschwindigkeitserhöhung in den engen Passagen aufgebraucht. Nach vorläufigen Rechnungen scheint es möglich zu sein, mit einem Durchmesser des Reaktorkerns von 1,2 m, einer Länge von 1 m bei 90 ata Druck und einer Wandtemperatur des Graphits von 2300° C, 300 000 kg Schub zu erzeugen, wobei die Austrittsgeschwindigkeit gegen 8000 m/s beträgt, bei einem Gesamtgewicht des Schubaggregates von 12 t. Für den Reaktor brauchte man etwa 50 kg angereichertes Uran.

Die Realisierung eines solchen Aggregates würde (bei genügender Betriebssicherheit) einen ausserordentlichen Fortschritt bedeuten, der die Raumschifffahrt auf neue Bahnen führen müsste. Man versteht, dass heute grosse Anstrengungen gemacht werden, um die zahlreichen technologischen Hindernisse zu überwinden. Dass dabei auch Resultate anfallen, die für andere Gebiete der Technik (Kernkraftwerke, Hochtemperaturbaustoffe, Lagerung von flüssigem Wasserstoff) wertvoll sind, braucht wohl nicht besonders betont zu werden.

b) Elektrische Beschleunigung

Die bisher besprochene Anlage hat den Nachteil, dass die Kernenergie nicht so weit ausgenützt wird, wie es bei langdauerndem Betrieb möglich wäre. Die Energie, die an den Wasserstoff abgegeben wird, ist, selbst wenn 100 t insgesamt ausgeschleudert werden, ungefähr 1 000 000 kWh. So gross diese Zahl auch scheint, so ist sie doch nur ein ziemlich kleiner Bruchteil der in dem spaltbaren Material enthaltenen Energie, indem schon 40 g U_{235}, vollständig gespalten, diese Energie liefern können. Man käme also zur Erde zurück, ohne die Reaktorladung ausgenützt zu haben. Deshalb hat man an Beschleunigungsanordnungen gedacht, die kleine Schübe über sehr lange Zeiten (Jahre) geben, so dass ein relativ schwacher Reaktor so weit als möglich ausgenützt würde. Ein Start von der Erde aus wäre dann freilich ausgeschlossen; vielmehr müsste er von einem künstlichen grossen Satelliten (Aussenstation) erfolgen, der auch als Rückkehrort gedacht ist. Die Idee ist, mit einer konventionellen Kernkraftanlage (Reaktor, Dampfturbine, Kondensator) elektrische Energie zu erzeugen und damit geladene Teilchen (Atomionen) zu beschleunigen.

Auf den ersten Blick scheint dieser Plan allerdings ziemlich abwegig zu sein. Man kann je Sekunde nur ganz geringe Mengen ausstossen. Zum Beispiel sind für nur 0,133 g Cäsium je Sekunde gegen 100 Amp erforderlich (nach dem bekannten Faradayschen Gesetz). Aus Gründen der Entladungsphysik (Raumladungen) muss mit relativ hohen Spannungen, zum Beispiel 6000 V, gefahren werden. Das bedingt eine elektrische Leistung von rund 600 kW. Zwar werden die Ionen auf sehr grosse Geschwindigkeiten gebracht (93 000 m/s); die Rückstosskraft ist aber, der geringen Masse wegen, nur 1,26 kg (Kraft)[3]. Wenn die

[3] Um eine elektrische Aufladung des Schiffes zu vermeiden, die der weiteren Ausströmung positiver Ionen rasch ein Ende setzen würde, müssen gleichzeitig Elektronen in den Strahl emittiert werden. Dies ergibt eine geringe Erhöhung des Schubes.

Einrichtung ein halbes Jahr lang in Betrieb ist und rund 2000 kg Cäsium abgeschleudert sind, ist der gesamte Impuls doch beträchtlich – nämlich etwa 20 000 ts, also vergleichbar mit einer chemischen Grossrakete. Flüge von monate-, ja jahrelanger Dauer sind zum Besuch der Venus oder des Mars ohnehin Bedingung, so dass es durchaus denkbar ist, dass in Zukunft solche Ionen-Raumschiffe von Bedeutung sein könnten. Das erklärt wohl auch die intensive Forschungsarbeit auf diesem Gebiet.

Es gibt aber noch viel weitergehende Pläne. Man möchte auf elektrischem Wege sehr heisse Gase erzeugen, so heiss, dass sie thermisch ionisiert werden – das heisst aus Atomionen und Elektronen bestehen (sogenannte Plasmen). In diesem Zustand ist die Mischung elektrisch leitend und kann durch magnetische Felder geführt, eventuell auch beschleunigt werden. Letzten Endes läuft dieses Bestreben darauf hinaus, die Wände (zum Beispiel die Laval-Düsen), die das Gas sonst führen und die nur mässig hohe Temperaturen aushalten, zu ersetzen durch magnetische Führung, so dass Gastemperaturen höherer Grössenordnung angewendet werden können. Besondere Bedeutung würde dieses Verfahren bekommen, falls es später möglich sein sollte, Energie durch sogenannte Wasserstoff-Fusion zu gewinnen. Fast alle diese Vorschläge benötigen enorm starke elektrische Ströme und Magnetfelder, womit das Problem der Schaffung ultraleichter elektrischer Maschinen in den Vordergrund rückt.

Vorläufig stehen die nichtchemischen Antriebe noch am Anfang einer wohl mühsamen Entwicklung. Trotzdem möchte man die Prophezeiung wagen, dass die späteren Raumfahrer in irgendeiner Form sich der durch Kernreaktionen freigelegten neuen Energien bedienen werden.

III. Himmelsmechanische Grundlagen der Raumfahrt

1. Das Anziehungsgesetz

Johannes Kepler (1571—1630) fand 1609 bis 1619 aus einer sorgfältigen Analyse der Beobachtungen der Bewegung des Mars, die Tycho Brahe gegen Ende des 16. Jahrhunderts vorgenommen hatte, seine berühmten drei Gesetze:

a) Die Bahn jedes Planeten ist eine Ellipse, mit der Sonne in einem Brennpunkt.

b) Die Verbindungslinie Sonne–Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

c) Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die Kuben ihrer mittleren Entfernung von der Sonne (mittlere Entfernung gleich halbe grosse Achse der Ellipse).

Es war eine vielfach beschriebene, aber immer wieder erregende wissenschaftliche Grosstat, als Newton 1686 zeigen konnte, dass die Keplerschen Gesetze mathematische Folgerungen aus der Mechanik, zusammen mit der Annahme sind, dass jede Masse M_1 eine andere Masse M_2 mit der Kraft

$$K = \gamma \frac{M_1 M_2}{r^2} \qquad \text{(III)}$$

anzieht. r ist der Abstand der Mittelpunkte der Massen, γ die universelle Gravitationszahl

$$\gamma = 6{,}668 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{s}^2} \right)$$

Die sogenannte Himmelsmechanik ist faktisch nichts anderes als das Studium der Bewegungen der Himmelskörper unter dem alleinigen Einfluss dieser Kraft. Ob die Körper gross oder klein, ob sie weit oder nahe, schnell oder langsam sind, ändert nichts an diesem Kraftgesetz[4]. Sind mehr als zwei Körper vorhanden, so sind ihre Bahnen keine Ellipsen mehr und können sogar sehr komplizierte Formen annehmen. Ein solches Dreikörpersystem ist etwa Erde–Mond–Raumschiff. Hier liegt glücklicherweise eine grosse Vereinfachung darin, dass die kleine Masse des Raumschiffes an den Bahnen von Erde und Mond nichts ändert, deren Bewegung also festliegt. Trotzdem ist die Rechnung schwierig, weil das Raumschiff unter Umständen den grossen Massen sehr nahe kommen kann und dann beträchtliche Bahnänderungen erleidet. – Während früher solche Aufgaben im Studierzimmer einiger weniger Astronomen oder Mathematiker fernab vom Tagesgetriebe behandelt wurden, ist heute das Dreikörperproblem ein Arbeitsthema der grossen Flugzeugfirmen geworden, die sich teilweise auf «Space flight» umgestellt haben (Douglas, Convair, Lockheed und andere)[5]. Hier werden von einem zahlreichen Personal mit Hilfe elektronischer Rechengeräte in einem Monat mehr Bahnen berechnet als vorher in einem Jahrhundert. Diese Steigerung des Tempos betrifft allerdings nur die Rechenarbeit. Die allgemeinen Gesetze, wie sie von Poincaré, Sundman, Charlier, Levi-Civita und andern gefunden wurden, behalten nach wie vor ihren Wert und ihre Bedeutung.

Betrachten wir nun den einfachsten Fall, den senkrechten Aufstieg von der Erde aus (Abb. 10a). Schon Newton zeigte, dass die Schwerewirkung aller Massenelemente einer Kugel ausserhalb derselben gleich gross ist wie im Falle, dass die ganze Kugelmasse M im Zentrum O vereinigt ist. Damit ergibt sich die Anziehungskraft auf die Masse m des Raumschiffes zu

$$K = \gamma \frac{M m}{r^2}$$

gegen das Zentrum gerichtet. An der Oberfläche der Erde, $r = R$, ist K einfach gleich dem Gewicht (Masse mal Erdbeschleunigung)

$$K_R = \gamma \frac{M m}{R^2} = \text{mg} \left(g \cong 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right)$$

[4] Erst im 20. Jahrhundert hat Einstein (1916) gezeigt, dass kleine Abweichungen vom Newtonschen Gesetz tatsächlich vorkommen. Sie sind aber so gering, dass sie nur in ganz wenigen Fällen überhaupt bemerkt werden (Merkur-Bahn) und für die Berechnung der Bahnen von Raumschiffen vernachlässigt werden können.

[5] Die «Convair-Astronautics-Division» San Diego (Kalifornien) beschäftigte beispielsweise Ende 1959 gegen 18 000 Personen.

Somit wird

$$K = m \cdot g \cdot \frac{R^2}{r^2}$$

Für die Masse der Erde geben uns die Astronomen den Wert:

$$M_E = 5{,}977 \cdot 10^{27}\ \mathrm{g}$$

für den mittleren Erdradius:

$$R = 6{,}371 \cdot 10^8\ \mathrm{cm} = 6371\ \mathrm{km}$$

Im mittleren Abstand des Mondes (384 400 km) ist somit die Anziehungskraft der Erde wesentlich kleiner als das Gewicht an der Erdoberfläche, nämlich nur der 3640ste Teil. Es ist nun leicht die gesamte Hubarbeit zu berechnen, die erforderlich ist, um den Körper M von der Erdoberfläche bis in sehr grosse Distanzen zu bringen. Sie ist

$$A = \int_R^\infty K\,dr = \gamma \frac{M\,m}{R}$$

Nach dem Energiesatz muss die kinetische Energie beim Abschuss gerade diesem Betrag gleich sein (ohne Luftwiderstand). Das führt auf die Beziehung:

$$\frac{m}{2} v_0^2 = \gamma \frac{M\,m}{R} = m \cdot g\,R$$

somit

$$v_0 = \sqrt{2\,g\,R}\ \text{(Fluchtgeschwindigkeit)} \qquad \text{(IV)}$$

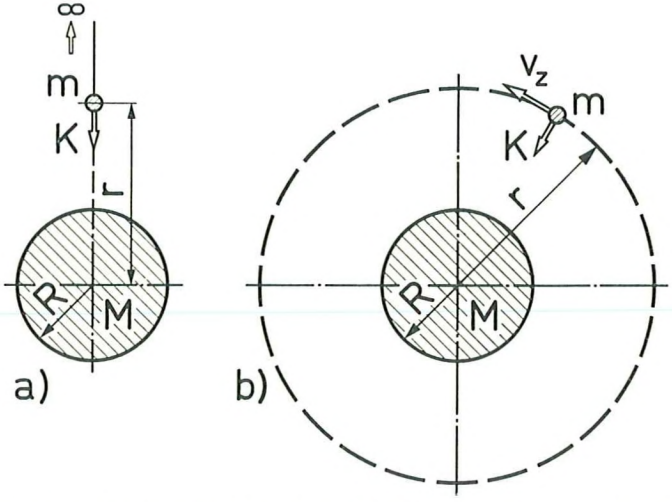


Abb. 10 a) Senkrechter Aufstieg einer Masse m im Schwerefeld der Erde M.
b) Zirkulare (Satelliten-) Bewegung.

Das entspricht der Fallgeschwindigkeit eines Körpers, der bei konstanter Anziehung eine Höhe gleich dem Erdradius durchfallen würde.

Die Werte eingesetzt, ergibt sich

$$v_0 = 11\,200 \text{ m/s} = 40\,320 \text{ km/h}$$

das heisst rund 14mal mehr als die Mündungsgeschwindigkeit eines Gewehrgeschosses und 34mal mehr als die Schallgeschwindigkeit an der Erdoberfläche.

Ein anderer Fall ist die Umkreisung der Erde (Mond, künstliche Satelliten). Schon NEWTON hat ihn gekannt. Hier muss die Anziehungskraft der Erde gerade der Zentrifugalkraft gleich sein (Abb. 10b):

$$\frac{\gamma M m}{r^2} = \frac{m v_z^2}{r}$$

oder

$$v_z = \sqrt{\frac{\gamma M}{r}} = \sqrt{g \frac{R^2}{r}} \qquad \text{(V)}$$

Diese Zirkulargeschwindigkeit v_z hat ein Maximum, wenn $r = R$ ist, die Kreisbahn also sehr nahe der Erdoberfläche verliefe. Dann ist

$$v_{z0} = \sqrt{g R}$$

also 0,7071 der Fluchtgeschwindigkeit, somit 7920 m/s.

Die Umlaufzeit ist gegeben durch

$$T = \frac{2 \pi r}{v_z} = \frac{2 \pi r \sqrt{r}}{\sqrt{g R^2}} \qquad \text{(VI)}$$

Quadriert ergibt sich das dritte Keplersche Gesetz (vereinfacht für den Kreisbahnfall) $T^2 \sim r^3$.

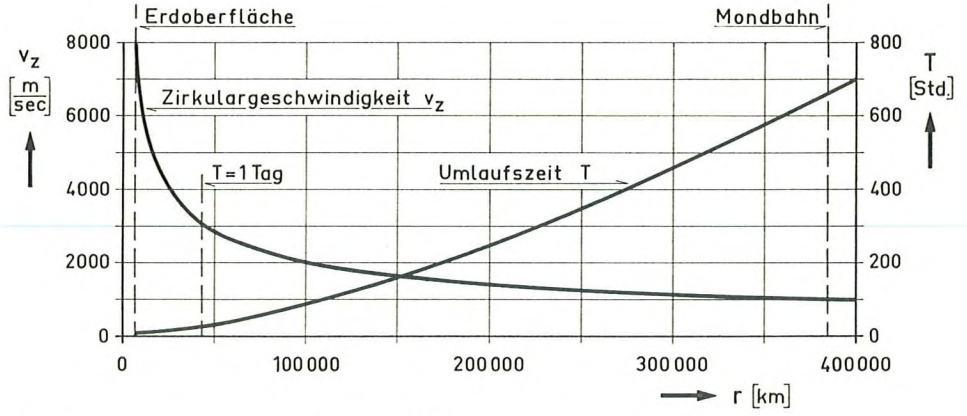


Abb. 11 Zirkulargeschwindigkeiten und Umlaufzeiten für Kreisbahnen von verschiedenem Radius (r vom Erdmittelpunkt aus gerechnet).

In Abb. 11 sind Bahngeschwindigkeiten und Umlaufzeiten für Kreisbahnen von verschiedenem Radius angegeben.

Zwei Einzelwerte sind interessant:

1. Im Abstand $r = 42\,200$ km vom Zentrum beträgt die Umlaufzeit gerade 24 Stunden, das heisst ein Satellit in dieser Distanz würde sich stets über demselben Punkt des Äquators befinden.
2. Im Abstand von $r = 384\,400$ km ist die Umlaufzeit rund 27½ Tage und entspricht annähernd derjenigen des dort befindlichen Erdmondes, der allerdings keinen exakten Kreis beschreibt[6].

Als dritten allgemeinen Fall rechnen wir eine KEPLER-Ellipse aus, wie sie sich bei beliebiger Lancierung ergibt und unter dem alleinigen Einfluss des Erdschwerefeldes und Vernachlässigung der Luftreibung von selbst ad infinitum erhält (Abb. 12). Mit elementaren Rechnungen lässt sich zeigen, dass ein kleiner

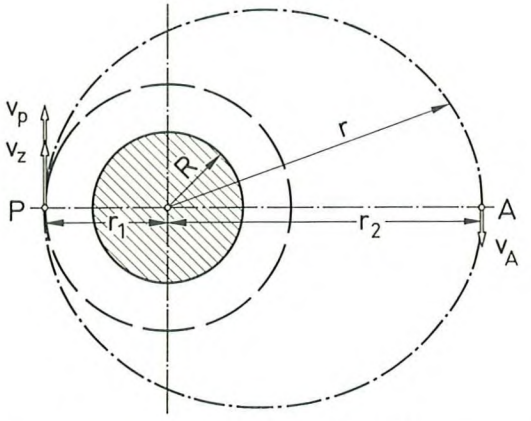


Abb. 12 Ausweitung einer Satellitenbahn zur Ellipse durch Vergrösserung der Geschwindigkeit im Perigäum P (von V_z auf $V_p = \varphi \cdot V_z$).

Körper, der zunächst mit der Zirkulargeschwindigkeit v_z im Abstand r_p die Erde umkreist und dann sehr rasch auf eine grössere Geschwindigkeit $v_p = \varphi \cdot v_z$ gebracht wird, eine Ellipse beschreibt, in deren einem Brennpunkt der Erdmittelpunkt liegt. Die Ellipse hat ihren nächsten Punkt r_P (Perigäum P) am Ort der erwähnten Geschwindigkeitserhöhung. Der fernste Punkt, das Apogäum A liegt diametral und hat den Abstand

$$r_A = r_P \cdot \frac{\varphi^2}{2 - \varphi^2} \qquad \text{(VII)}$$

[6] Auch müsste bei der Mondbahn berücksichtigt werden, dass der Ellipsenbrennpunkt nicht mehr genau mit dem Erdzentrum zusammenfällt.

Es ist nun interessant zu sehen, dass r_A sehr rasch anwächst, wenn v_P grösser wird (Abb. 13 und 14). Für $\varphi = \sqrt{2}$ erhält man $r_A = \infty$. Der Mond hat eine Umlaufgeschwindigkeit von rund 1 km/s. Würde man 414 m/s hinzufügen, so würde er dem Anziehungsbereich der Erde entfliehen. Bei einer Kreisbahn in der Nähe der Erdoberfläche müssen hingegen 3280 m/s hinzukommen; man hat dann total gerade die Fluchtgeschwindigkeit von 11 200 m/s. Hier erhellt der Nutzen der oft beschriebenen sogenannten Aussenstation, einem relativ grossen künstlichen Satelliten, der gewissermassen als Tankstelle gedacht ist. Ein Raumfahrzeug, das von dort abstösst, muss relativ zu diesem Satelliten eine mässige Geschwindigkeit aufbringen, um weite Reisen unternehmen zu können. Natürlich wird uns im Grunde nichts geschenkt, weil der Aufstieg zur Satellitenhöhe ja auch durch Raketen erfolgen muss. Aber man kann die Reise nach dem Umsteigen mit kleineren Raumraketen fortsetzen. Solange die Auspuffgeschwindigkeiten w höchstens 3 bis 4 km/s betragen, sind solche Stationen von Bedeutung für grosse Raumschiffe, die in die Planetenräume vorstossen sollen. Bei $w = 8000$ m/s, wie sie bei Wasserstoff-Atomraketen erwartet wird, ist ein direkter Start von der Erde vermutlich praktischer.

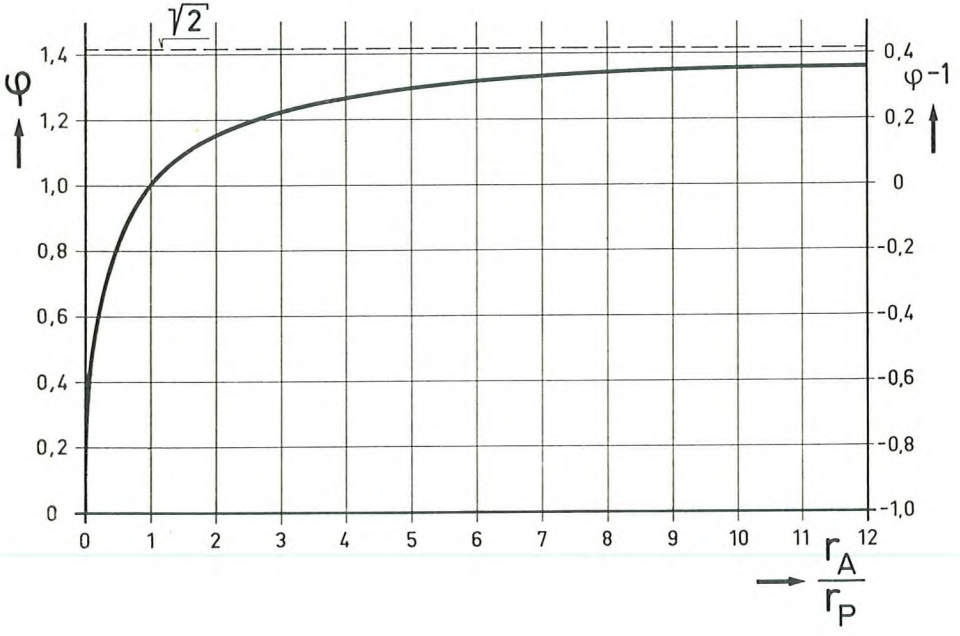
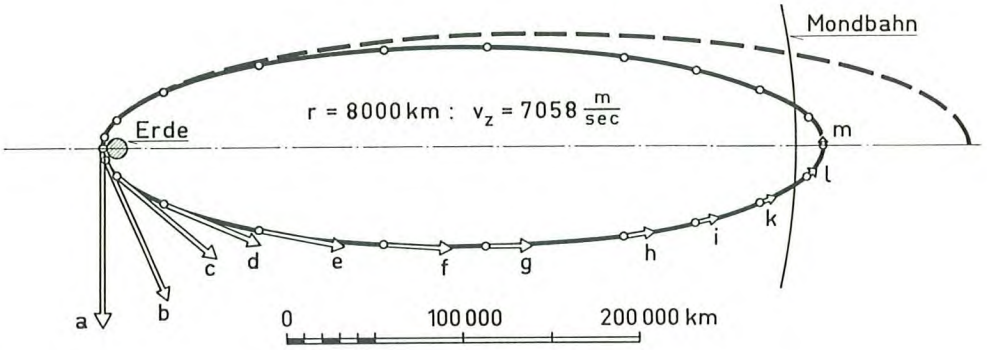


Abb. 13 Verhältnis $\frac{r_A}{r_P}$ bei verschiedenem φ.

$\varphi = \sqrt{2}$ ergibt an Stelle der Ellipse eine Parabel, die ins Unendliche reichen würde (ohne Sonneneinfluss!). $\varphi = 1$ ergibt die Kreisbahn. $\varphi < 1$ ergibt Ellipsen, bei denen das Apogäum näher am Anziehungszentrum ist als das Ausgangsperigäum. $\varphi = 0$ entspricht dem geradlinigen Sturz ins Zentrum.



Bahnpunkt	a	b	c	d	e	f
v [m/sec]	9883	9131	6990	4181	2565	1727
t	0	13 min	35 min	2h 14 min	7h 13 min	16h 46 min

g	h	i	k	l	m	a
1305	884	676	474	292	198	9883
27h 43 min	47h 33 min	62h 23 min	81h 4 min	103h 6 min	127h 16 min	254h 31 min

Abb. 14 Eine Kepler-Ellipse, die erhalten wird, wenn man von einer Kreisbahn ($r_P = 8000$ km) ausgeht und $\varphi = 1{,}40028$ wählt. Sie führt zur Apogäumdistanz von 400 000 km. Für die Punkte a bis m sind die Geschwindigkeiten und die Zeiten in der Zahlentafel angegeben. Auffallend ist die Verlangsamung der Bewegung in grosser Distanz. Gestrichelt ist eine Ellipse gezeichnet, die durch eine Geschwindigkeitserhöhung im Perigäum von 9883 auf 9900 m/s, also von nur 0,17 %, entsteht. Sie führt nicht weniger als 82 000 km weiter. Man sieht die enorme Bedeutung der Genauigkeit der Anfangsgeschwindigkeit.

2. Mond- und Planetenfahrten

Wir hatten früher angenommen, dass nur die Erde und das Raumschiff vorhanden seien. In Tat und Wahrheit sind aber weitere Himmelskörper da. Für die nächste Nähe der Erde ist es vor allem der Mond. Er hat zwar nur $^1/_{81.3}$ der Erdmasse; bei Annäherung an ihn wird er gravitationsmässig aber doch sehr wirksam. Sieht man von der Wirkung der Sonne ab, ebenso von Störungen durch Planeten, so liegt das früher erwähnte vereinfachte Dreikörperproblem vor. Die Ellipse wird durch den Mond unter Umständen stark gestört. Es können Schleifen entstehen (die für die Photographie der Rückseite interessant wären). Es kann aber auch das Raumschiff durch den Mond einen so grossen Zusatzimpuls erfahren, dass es das Erde-Mond-System verlässt. Einige Promille Fehler in der Geschwindigkeit genügen dazu. Der letzte Fall ist übrigens schon zweimal eingetreten; die Geschosse «Mechta» der Russen und Pioneer IV der Amerikaner sind dem Anziehungsbereich der Erde entflohen. – Beim ersten Monttreffen (Lunik II) wurden Bahngeschwindigkeit und Richtung während des Beginns des Fluges durch kleine zusätzliche Raketenstrahlen korrigiert. Es ist dies die Methode, die auch für Ferngeschosse angewendet wird, wo die Genauigkeitsansprüche eher grösser sind (siehe Abb. 8).

Das System Erde-Mond ist nur ein kleiner Fleck im Sonnensystem. Will man weiter weg gehen, so muss man die Sonnenschwere in erster Linie in Rechnung setzen. Sie ist es, die unsere Erde auf ihrem jährlichen Umlauf hält. Ihre Bahn ist nahezu kreisförmig und wir können die einfachen Formeln mit einiger Nähe-

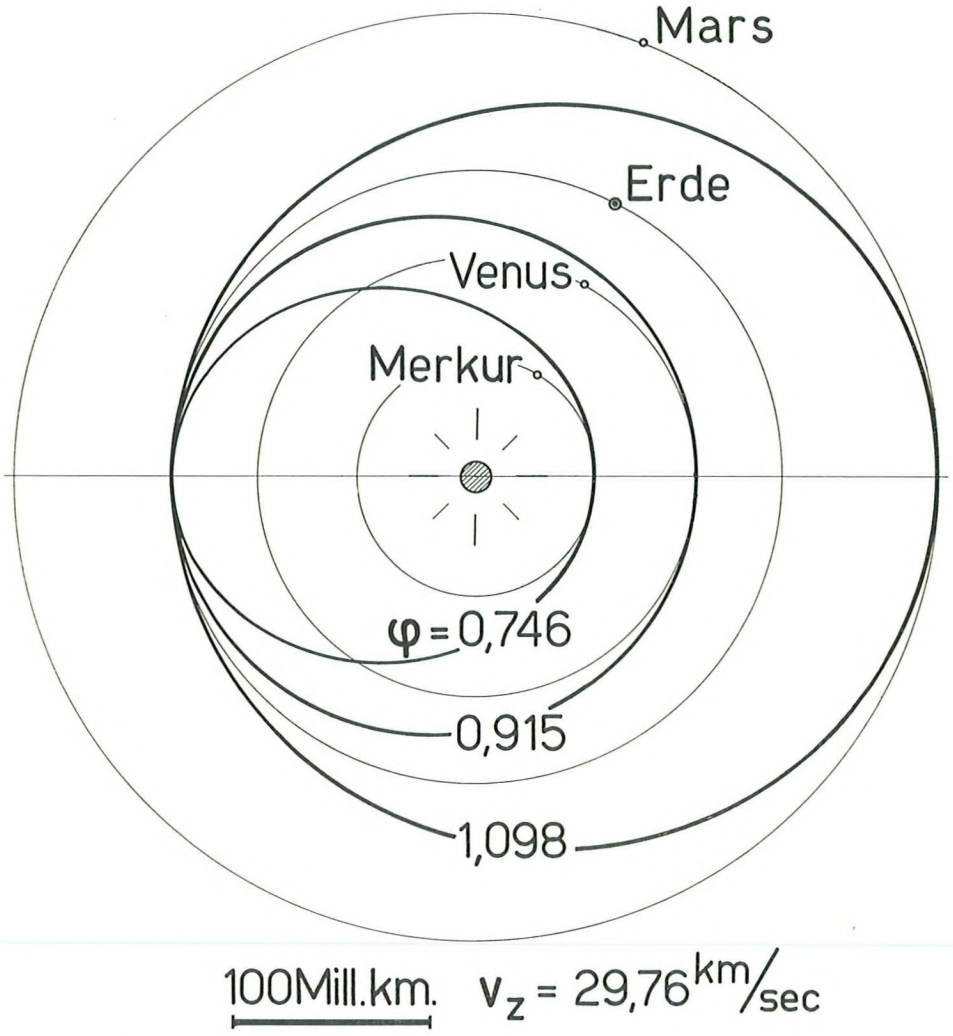


Abb. 15 Kepler-Bahnen eines künstlichen Planeten. Man denkt sich das Schiff zunächst aus dem Schwerefeld der Erde gebracht. Dann würde es auf der (nahezu) kreisförmigen Erdbahn um die Sonne sich bewegen. Führt man Geschwindigkeitsvergrösserungen ($\varphi > 1$) oder -verkleinerungen ($\varphi < 1$) aus, so weiten sich die Ellipsen bis zur Marsbahn aus, beziehungsweise führen «hinunter» zur Venus oder zum Merkur.

rung auch hier anwenden. – Für eine Planetenreise ist folgender Aufwand erforderlich:

a) Man muss dem Schwerefeld der Erde «entrinnen». Dazu ist die Fliehgeschwindigkeit von 11 200 m/s nötig.
b) In grösserer Distanz, zum Beispiel 1 000 000 km, wird das Fahrzeug relativ zur Erde sich nur noch langsam bewegen; die 11 200 m/s sind dann praktisch für die Hubarbeit aufgebraucht worden.
c) In diesem Zustand bewegt sich das Raumschiff mit der Erde um die Sonne, ist aber praktisch frei von der Erdanziehung. Die Bahngeschwindigkeit um die Sonne beträgt rund 30 km/s. Steigern wir jetzt durch Abbrennen weiterer Raketen diese Geschwindigkeit auf den φ-fachen Betrag, so weitet sich die mit der Erdbahn praktisch zusammenfallende Raketenbahn zur Ellipse aus, die über die Erdbahn in Richtung der Marsbahn reicht, falls die Zusatzgeschwindigkeit ΔV in Umlaufrichtung angebracht wird, die aber auch nach innen zur Venusbahn hinführen kann, wenn man diese entgegengesetzt anbringt (Abb.15). Würde man die ganze Umlaufgeschwindigkeit abstoppen ($\Delta V = -30$ km/s), so würde das Fahrzeug in die Sonne fallen. Bringt man aber einen positiven Zusatz von $0{,}414 \cdot 30$ km/s $\cong$ 12,4 km/s an, so verlässt es das Sonnensystem. Dazwischen können alle möglichen Planetenreisen ausgeführt werden. Freilich sind wir zurzeit längst noch nicht so weit. Es ist erst möglich geworden, eine relativ kleine Masse in eine solche Planetoidenbahn zu schicken (die immerhin schon in Marsnähe führt). Es ist aber nur eine Frage des Antriebes, ob man auch andere Planeten erreichen kann. Es wäre denkbar, dass man schon in drei oder fünf Jahren den Mars oder die Venus aus der Nähe photographieren wird und das Bild bei Annäherung des (natürlich noch unbemannten) Raumschiffes auf die Erde überträgt. Eigentliche (bemannte) Raumreisen, zum Beispiel zum Mars, werden aber wohl erst viel später folgen können. Im Prinzip haftet solchen Expeditionen nichts Utopisches mehr an.

IV. Die Raumreise

1. Der Start

Für grosse Raketen hat sich der v e r t i k a l e Start eingeführt, um möglichst rasch grosse Höhen zu erreichen und den Luftwiderstand klein zu halten (Abb. 16). Ein langes Verweilen im Schwerefeld gibt Geschwindigkeitsverluste, was man rasch überblickt, wenn man sich den Extremfall vorstellt, wo der Schub gleich dem Startgewicht ist. Da würde man zuerst viel Zeit und damit Brennstoff verlieren und erst in Fahrt kommen, wenn sich das Gesamtgewicht infolge Brennstoffverbrauchs vermindert hat. Andererseits ist ein zu grosser Startschub nicht vorteilhaft, weil man grosse und schwere Düsen, Pumpen usw. brauchen würde. Heute ist der Startschub etwa 50 bis 70 % grösser als das Startgewicht. Nachdem ein Teil des Treibstoffes verbrannt ist und die Masse des

Schiffes entsprechend abgenommen hat, beschleunigt sich die Rakete immer mehr, wobei der Schub infolge des verminderten Luftgegendrucks am Düsenende eher etwas zunimmt. Am Ende des Abbrandes einer Stufe kann die Beschleunigung nach oben schon ein Vielfaches der Erdbeschleunigung betragen, was bei bemannten Schiffen für die Insassen eine starke physische Belastung darstellt. Bei den folgenden Stufen wiederholt sich der Vorgang. Hierbei muss die Flugbahn der Rakete mehr und mehr parallel zur Erdoberfläche gestellt werden. Würde man bei Brennschluss der letzten Stufe noch eine Neigung gegen die Horizontale haben, so würde die Rakete nach einem Umlauf um die Erde gefährlich tief in die Erdatmosphäre eindringen oder sogar den Erdboden treffen.

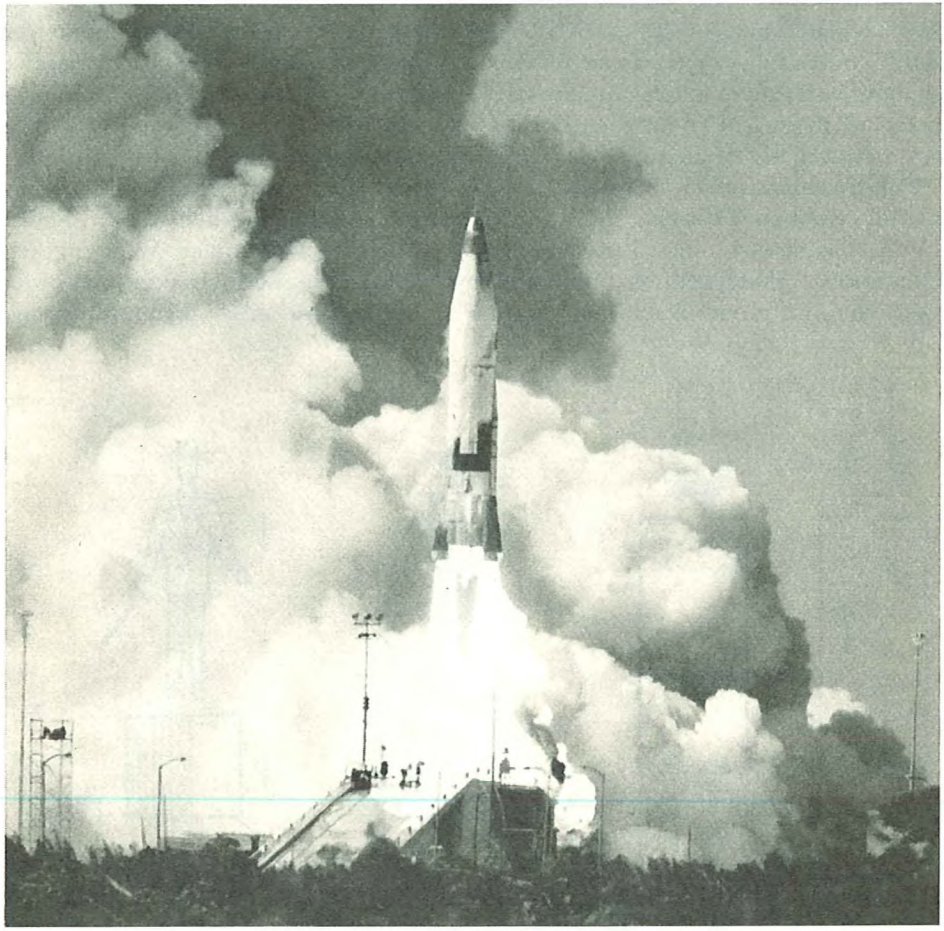


Abb. 16 Start einer grösseren Rakete. Drei Düsen im Betrieb. Während der Füllung hat sich aussen am Sauerstofftank Eis angesetzt, das jetzt abfällt und verdampft. Steuerung durch kleine Zusatzdüsen (sogenannte Vernier-Düsen) und durch Schwenken der «Sustainer-Düse» (Abb. 8).

Die Bahn ist nämlich, da der Luftwiderstand in grösseren Höhen fast keine Rolle mehr spielt, wiederum eine Ellipse mit einem Brennpunkt im Erdmittelpunkt und das Perigäum muss hoch genug liegen. Damit sind Schräglagen bei Brennschluss ausgeschlossen – es sei denn, dass die Geschwindigkeit zur Flucht von der Erde ausreicht. Dann wird die Ellipse zur Parabel, die nicht zur Erde zurückführt. Überfluchtgeschwindigkeiten führen zu hyperbolischen Bahnen.

2. Der Überflug

Nach Brennschluss und im leeren Raum wirkt auf die Rakete und ihre Insassen nur noch die Schwerkraft, die man ja nicht abstellen kann. Trotzdem tritt ein eigentümlicher Zustand ein, der fälschlicherweise oft als «Schwerelosigkeit» bezeichnet wird. Schon JULES VERNE hat diesen Zustand recht drastisch beschrieben, wobei er ihn an den Ort verlegte, wo die Schwerewirkungen von Mond und Erde sich gerade aufheben, also tatsächlich kein Gewicht vorhanden ist. Aber er hat übersehen, dass die «Schwerelosigkeit» im Innern des Fahrzeuges nicht nur in diesem «neutralen Punkt», sondern stets dann vorhanden ist, wenn keine andern als Anziehungskräfte auf das Raumschiff wirken.

Um dies einzusehen, erinnern wir uns zunächst an die einfache, aber fundamental wichtige Tatsache, dass alle Körper, ob leicht oder schwer, im leeren Raum, das heisst ohne Luftwiderstand und unter alleiniger Wirkung der Schwerkraft gleich schnell fallen (Abb. 17 links). Denken wir uns jetzt einen Menschen auf einem Stein stehend, der seinerseits auf einer festen Unterlage

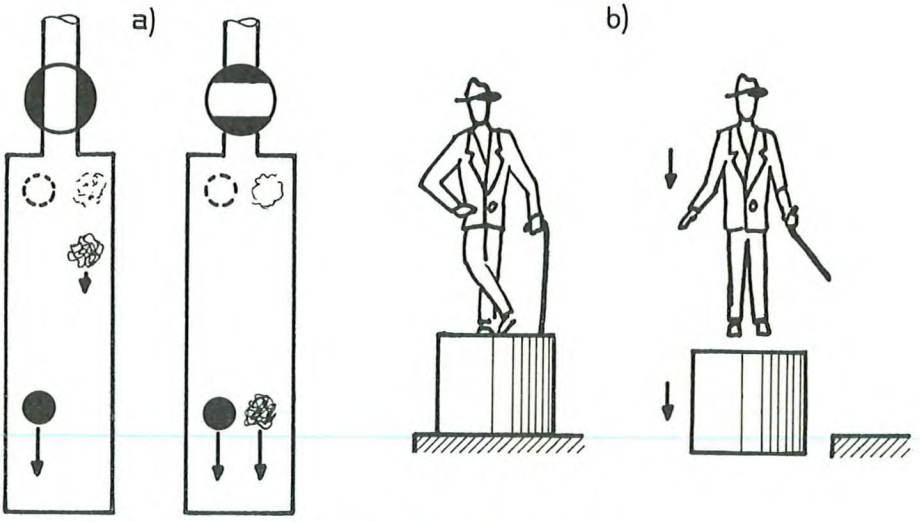


Abb. 17 «Schwerelosigkeit».

a) Im leeren Raum fallen alle Körper gleich schnell – links luftgefüllter Raum, rechts luftleerer Raum.

b) Links: Mann und Unterlage auf festem Boden; «Gewicht» fühlbar; rechts: Boden weggezogen. Mann und Unterlage fallen gleich schnell, deshalb keine Kraft auf die Unterlage. Der Mann «schwebt» relativ zur Unterlage (Raumschiff).

ruht. Die Unterlage werde nun plötzlich weggezogen (Abb. 17 rechts). Dann fallen Stein und Mann nach unten, und weil sie gleich schnell fallen, üben sie aufeinander keinen Druck aus. Der Mann ist gegenüber dem Stein «gewichtslos» geworden. Von dieser Art ist nun die «Schwerelosigkeit», die während der Reise vorhanden ist, sobald die Rakete abgestellt und auch der Luftwiderstand verschwunden ist. In den Anfangsgründen der Mechanik lesen wir, dass ein «Fall» nicht notwendigerweise mit einer Geschwindigkeit nach «unten» verbunden zu sein braucht. Ein Fall liegt auch vor, wenn eine Aufwärtsbewegung durch die Schwere verzögert wird. – Der Lunik III, der jetzt eine dauernde Umlaufbewegung bis über Mondhöhe macht, fällt beständig, ebenso wie ein Satellit oder auch unser Mond fällt. Ohne Schwerkraft würden alle diese Körper geradlinig sich von uns entfernen. Die Richtungsänderung der Flugbahn von der Geraden zu einem Kreis oder einer Ellipse ist die Wirkung des ständigen Fallens. Indem man sich diese Dinge klar zu machen versucht, durchwandert man die Gedankengänge, die KEPLER unendlich Mühe gemacht haben, die GALILEI erstmals etwas erhellte und die NEWTON endlich in vollendete Form brachte.

Praktisch hat also der zukünftige Raumfahrer kein «Gewicht» mehr. Die Gegenstände im Schiff schweben beim kleinsten Anstoss durch die Kabine und der Reisende selbst kennt kein «oben» und «unten». Er kann auch mit einem geeigneten «Raumanzug» das Schiff verlassen ohne zu «fallen». – Man hat mit schnellen Flugzeugen kurzzeitige Fallbewegungen (30 s) ausführen können und die Insassen so schweben lassen. Der Wein floss nicht mehr aus der Flasche, sondern musste herausgeschüttelt werden, wonach er sich zu kugeligen Tropfen ballte, die nicht wussten, wohin sie sich bewegen sollten. Einzelne Versuchspersonen fanden diesen Zustand amüsant, andere reagierten ungünstig. Endgültige Schlüsse bezüglich des Verhaltens von Menschen sind naturgemäss bei so kurzer Versuchsdauer nicht möglich, doch geben Tierversuche (siehe unten) Anlass zur Hoffnung, dass die Schwerelosigkeit kein unüberwindliches Hindernis für die Raumfahrt sein wird.

Wird der Boden nicht weggeschoben, sondern mit einer festen Beschleunigung nach oben bewegt, so ergibt sich eine Erhöhung des Druckes zwischen der Person und dem Stein. Die Beschleunigung durch die Schwere an der Erdoberfläche ist rund $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$. Beschleunigt man nun zum Beispiel die Unterlage (Raumschiff) nach oben mit $b = 30\ \mathrm{m/s^2}$, so wird der genannte Druck auf das Vierfache $\left(\frac{10+30}{10}\right)$ steigen und wir verspüren den «Andruck» in Form eines vergrösserten Gewichtes. Das ist aus der Fliegerei wohlbekannt – man spricht dort von «*ng*», wenn der Druck auf die Sitzfläche auf den n-fachen Wert des gewöhnlichen Gewichtes steigt. n-Werte grösser als 1 können auf jedem Karussel erprobt werden, auch in einem Lift beim Anfahren nach oben.

Das Leben in einem Raumschiff stellt auch, abgesehen von der Schwerelosigkeit, neue und schwierige Probleme. Das Fehlen des Wechsels von Tag und Nacht, der ewig gleiche schwarze Himmel, die enorm starke Ultraviolettstrah-

lung der Sonne, die völlige Abwesenheit jeder Empfindung der Fahrzeugbewegung, das umständliche Herumtasten im Schiff, das mühsame Essen und Trinken erfordern ein hohes Mass von Anpassungsfähigkeit und Training. Da man das Raumschiff nicht «lüften» kann, müssen sehr verbesserte Klimaanlagen geschaffen werden, um vor allem Gerüche und giftige Küchendünste zu beseitigen. Es ist zu hoffen, dass die Raumphysiologen und -psychologen noch zur rechten Zeit Lösungen finden werden.

3. Die Steuerung

Man darf sich nicht vorstellen, dass ein Raumschiff in gleicher Weise Steuermanöver ausführen kann wie andere bekannte Fahrzeuge. Zu Änderungen der Geschwindigkeit nach Grösse und/oder Richtung sind K r ä f t e erforderlich, nicht nur Verstellung von Steuerorganen. Auf einer sehr glatten Eisfläche gelingt es bekanntlich nicht, durch Drehen des Schlittens eine Kurve einzuleiten; er gleitet in Querstellung in der bisherigen Richtung weiter.

Erdfahrzeuge entnehmen die nötige Kraft der Reibung auf dem Boden. Schiffe erfahren bei Schrägstellung grosse Kräfte vom Wasser her, die zur Kurvenbewegung führen. Analog ist es bei den Luftfahrzeugen.

Im leeren Raum gibt es ausser den Schwerewirkungen keine äusseren Kräfte, so dass zwar eine Satellitenbahn um die Erde möglich ist – nicht aber eine Kreisbahn, die keine anziehenden Körper umschliesst. Theoretisch wäre denkbar, dass die Rakete mit der Spitze gegen ein gewünschtes Drehzentrum gerichtet und in Betrieb gesetzt wird. Der Schub liefert dann die nach der Mechanik erforderliche Zentripetalkraft. Allein, man kann sich rechnerisch rasch vergewissern, dass damit eine ungeheure Treibstoffverschwendung verbunden wäre. (Das erwähnte Richten der Raketenachse dagegen ist leicht zu bewerkstelligen und benötigt theoretisch keinen Energieverbrauch [Abb. 18].)

Es bleibt also nichts anderes übrig, als die Bahn im wesentlichen den Gravitationseinflüssen zu überlassen und nur relativ kleine Korrekturen anzubringen. Solche kommen praktisch nur hinsichtlich des Geschwindigkeitsbetrages in Frage, weniger als Änderungen der Geschwindigkeitsrichtung. Um ein «Missil» bei 10 000 m/s um einen Grad aus der Geraden abzulenken, ist ebensoviel Impuls nötig wie zur Erhöhung oder Verminderung seines Geschwindigkeitsbetrages um 175 m/s. Mit letzterer aber können unter Umständen weit wirksamere Beeinflussungen der Bahn verbunden sein.

Heute noch hängt die Bahn vor allem von der Grösse, etwas weniger von der Richtung der G e s c h w i n d i g k e i t bei Brennschluss ab. Für den Mondschuss beispielsweise wurde verlangt, dass die Geschwindigkeit auf $^1/_{10}$ Promille genau sei, die Richtung auf etwa $^1/_2$ Grad. Die erste Forderung ist ziemlich schwer zu erfüllen. Geringste Brennstoffreste, die nachbrennen, können da von Bedeutung sein, auch die Geschwindigkeitsmessung vom Boden aus (mit Doppler-Effekt) verlangt hohe Präzision. (Für ballistische Geschosse ist natürlich die Richtung sehr wesentlich.) Bei Raumfahrten muss unter Umständen auch die Brennschlusszeit auf einige Sekunden genau eingehalten werden. Die Bahnform, ihre Störungen durch die Elliptizität des Erdballs, durch Mond und

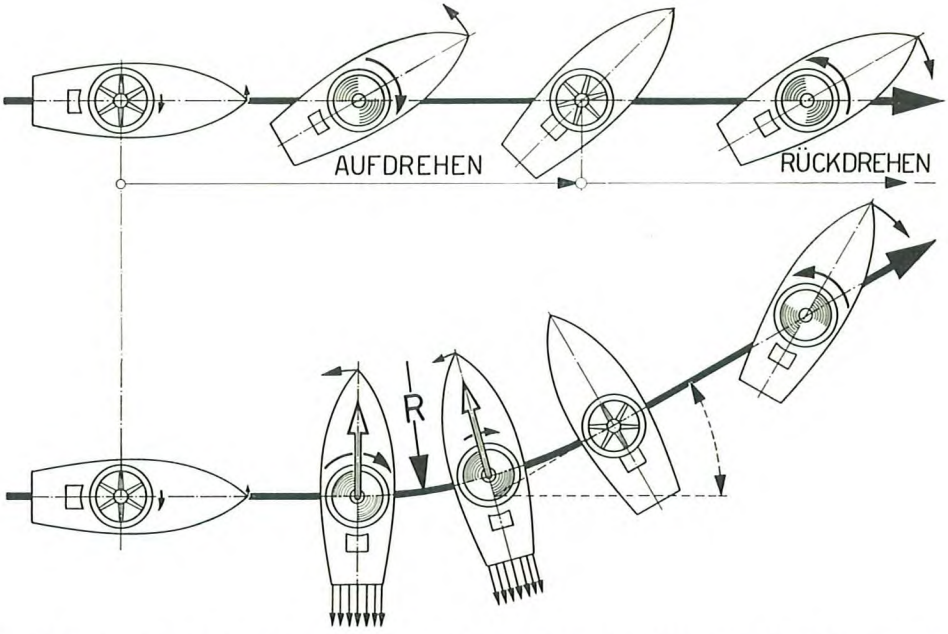


Abb. 18 Im leeren Raum kann (ohne Anziehungskräfte der Erde oder des Mondes) eine gekrümmte Bahn nur durch Benützung der Rakete erzwungen werden. Dazu ist das Schiff quer zur ursprünglichen Geschwindigkeit zu stellen. Das kann ohne Energieaufwand etwa durch Drehen eines Rades im Raketeninnern geschehen. Der Raketenkörper dreht sich in entgegengesetztem Sinne so lange, bis das Rad stillgesetzt wird, und verharrt in der gedrehten Lage. Wird dann die Rakete in Brand gesetzt, so tritt eine Zentripetalkraft auf, die eine Krümmung der Bahn und damit eine Richtungsänderung bewirkt. Entgegengesetzte Raddrehung gibt ein Rückdrehen.

Sonne werden vorher mit elektronischen Geräten errechnet. Die Kurzwellenbeobachtungen von der Erde aus während der Fahrt aber liefern laufend Angaben, mit denen die Rechenmaschinen gespeist werden. Sind später noch Korrekturen notwendig, so müssen sie durch Maschinen genügend rasch ausgerechnet werden, deren Programmierung schon vorher vorbereitet ist[7].

4. Die Landung

Als vor Jahrzehnten der mechanische Flug sich ausbreitete, war der Spruch «Fliegen heisst Landen» üblich, und auch heute muss das Landen besonders ausführlich geübt werden. Auch der zukünftige Raumfahrer wird sich wohl kaum auf dem Mond, der Venus oder dem Mars ansiedeln, sondern zur alten Erde zurückkommen wollen. Im Grund ist jede Landung eines Raumschiffes

[7] Die Raumbanditen der heute so exotisch blühenden Science Fiction-Schundliteratur werden also kaum vermeiden können, einen Mathematiker gefangen mit sich zu führen und ihn besonders gut zu pflegen; denn wenn er sich nur um ein Prozent in seinen Berechnungen irrt, kann die Fahrt leicht über den Punkt «of no return» hinausführen.

zunächst ein F a l l aus unermesslicher Höhe, genauer gesagt: mit einer Rückkehrgeschwindigkeit von der Grössenordnung 10 000 m/s. Bei Annäherung an die Erdoberfläche wird zwischen 50 und 100 km Höhe der dichtere Teil der Erdatmosphäre erreicht. Diese setzt der Bewegung einen nach unten rasch wachsenden Widerstand entgegen und gibt damit eine gewünschte Bremsung. Solch ein Vorgang ist seit Urzeiten bekannt, indem die Meteoriten ja auch auf diese Weise verzögert werden. Allein schon der blosse Augenschein zeigt, dass dies alles andere als eine sanfte Landung ist. Der Meteorit erhitzt sich bis zur Weissglut, zerfällt gelegentlich in Stücke, lässt Streifen von geschmolzenem und verdampftem Material zurück. Ein Donnerknall trifft den Boden; schliesslich kommt ein Teilstück relativ langsam auf die Erde nieder, das aussen Schmelzspuren aufweist, innen aber gelegentlich noch kalt ist. Die Verzögerung ist so gross (Grössenordnung 100 bis 200 g), dass (von der Wärme abgesehen) bestenfalls Tiere von Insektengrösse sie überleben würden, keinesfalls aber Menschen.

Es gibt im Prinzip zwei Wege zur sicheren Landung. Man kann erstens B r e m s r a k e t e n einbauen, die einen Impuls nach aufwärts liefern und sozusagen einfach eine Umkehr des Startvorganges geben. Bei genügend sauberer Regelung könnte das Aufsetzen sehr gemächlich erfolgen. Sollte es zur Landung auf dem Mond kommen, der ja keine merkliche Atmosphäre hat, so kann nur dieses Verfahren in Betracht fallen. Es hat allerdings den Nachteil eines sehr grossen Treibstoffverbrauches und würde bei der Anwendung für die Rückkehr auf den Erdboden diesbezüglich zu unerhörten Startgewichten führen, da ja sämtlicher Treibstoff von Anfang an mitgeführt werden muss. Mit chemischen Energien ist hier nicht auszukommen.

Die Lage ist also die, dass man doch wieder auf die L u f t b r e m s u n g zurückgreifen muss, jedoch nun versucht, das Eindringen in die Atmosphäre so zu steuern, dass vor allem die Verzögerungen nicht auf das lebensgefährliche Mass steigen. Man muss, wie man sagt, in einem «Korridor», einem eng begrenzten Bahnraum, sich der Erde nähern, der in raffinierter Weise so berechnet ist, dass das Raumschiff einerseits noch zulässige Verzögerungen aufweist (sie betragen immer noch 10 bis 12 g), andererseits auch nicht zu lange der Hitze ausgesetzt ist. Das setzt natürlich voraus, dass wiederum mit Rechenmaschinen und Steuerraketen Bahnkorrekturen angebracht werden.

Der Erwärmungsvorgang ist ebenso interessant, wie er schwierig zu beherrschen ist. Aber hier hat man bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Wenn ein Gasstrom durch Aufstau zur Ruhe gebracht wird, setzt sich die kinetische Energie in Wärme um. Am Kopf eines rückkehrenden Raumschiffes liegt nun ein solcher Aufstau (relativ zum Körper) vor. Aus der Gasdynamik folgt eine Temperaturerhöhung, die bei konstanten spezifischen Wärmen auf den Wert

$$\Delta T = T_0 \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \qquad \text{(VIII)}$$

führt. Dabei bedeuten T_0 die absolute Temperatur der Luft ausserhalb des Kopfes, γ ist das Verhältnis der spezifischen Wärmen und unter gewöhnlichen Umständen gleich 1,40. M schliesslich ist die Machsche Zahl, das Verhältnis der

Geschwindigkeit des Kopfes zur Schallgeschwindigkeit in der Aussenluft. Setzt man also

$T_0 = 300\ ^\circ K$
$M = 30$ (entsprechend etwa einer Eintauchgeschwindigkeit von 10 000 m/s)

so folgt für die Temperaturerhöhung

$$\Delta T = 300 \cdot 0{,}2 \cdot 900 = 54\,000\ ^\circ K$$

Dazu sind folgende Bemerkungen zu machen:

a) Die Annahme konstanter spezifischer Wärme ist nicht mehr zutreffend.
b) Die Luft wird in ihrer chemischen Zusammensetzung verändert. Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle werden in Atome gespalten (Dissoziation) und diese noch teilweise ionisiert, das heisst es wird ein Elektron der Aussenschale abgespalten.
c) Dissoziation und Ionisation verbrauchen grosse Wärmemengen. Dadurch bleibt die Temperatur weit unter dem oben errechneten Betrag.
d) Sowohl das Gas als vor allem auch die Körperoberfläche strahlen Wärme ab, was wiederum die Temperatur erniedrigt.
e) Nicht nur im sogenannten Staupunkt, sondern auch an der übrigen Oberfläche, wo das Gas durch Reibung zum Stillstand kommt (in der unmittelbar an der Oberfläche liegenden Schicht), ergeben sich hohe Temperaturen.

Nun ist aber zu beachten, dass die Temperatur allein noch nicht das Mass der Gefährdung ergibt. Es kommt im wesentlichen darauf an, wieviel Wärme an den Körper übergeht. Der Wärmeübergang hängt ausser vom Temperaturunterschied auch von der Dichte und der Geschwindigkeit des Gases ab, ferner von der Möglichkeit der Wiedervereinigung der dissoziierten Moleküle an den Wänden (Wände als sogenannte heterogene Katalysatoren wirkend). Es ergeben sich so ausserordentlich verwickelte Zusammenhänge. Immerhin hat sich gezeigt, dass der Wärmeübergang kleiner wird, wenn der Körper eine relativ stumpfe Form hat. Es entsteht dann eine Art Staumantel, der sich, leuchtend wie ein Glorienschein, um die Vorderseite des Körpers legt und in dem die Geschwindigkeiten klein sind.

Für militärische Raketen will man die Stumpfheit nicht zu weit treiben, damit das Geschoss nicht zu langsam auftrifft. Bei den uns interessierenden wissenschaftlichen Anwendungen sind aber für die Rückkehr sehr plumpe Formen vorgesehen. Die letzte Strecke bis zum Erdboden ist für eine Fallschirmlandung reserviert.

Trotz der erwähnten günstigen Form des Kopfes steigt die Temperatur der Oberfläche immer noch sehr hoch. Man hat deshalb an schwer schmelzbare Stoffe gedacht, wie Wolfram usw. Es zeigt sich aber, dass die Wärmeleitfähigkeit der Metalle so gross ist, dass trotz relativ kurzer Hitzezeit zu viel Wärme ins Innere gelangt. Unter den im Kompromiss besten Materialien stehen interessanterweise Kunststoffe (Teflon usw.) an vorderer Stelle. Sie leiten die Wärme schlechter, isolieren das Innere besser und geben durch Schmelzen, Verdampfen und (paradoxerweise) Verbrennen einen zusätzlichen Wärmeschutz.

Beim Verbrennen entstehen nämlich Rauchgase, die ihrerseits einen eng anliegenden Schleier bilden, der den viel heisseren Staugasen den Zutritt zur Oberfläche erschwert.

Für die relativ mässigen Rückkehrgeschwindigkeiten ballistischer Raketen ist das Wärmeproblem gelöst. Man hat Tiere lebend zurückgebracht und neuerdings auch einen hochinteressanten Film, der ein Stück einer solchen ballistischen Reise, aus 1100 km Höhe gesehen, zeigt. Bei der Rückkehr aus dem Weltraum ist die Aufgabe weit schwieriger. Hier wird unter anderem auch daran gedacht, dicke Platten von Beryllium schmelzen und verdampfen zu lassen, bis das Ärgste überstanden ist.

Eine Abart der zweiten Lösung stellen die Versuche dar, den rückkehrenden Raketenköpfen ausser vergrössertem Widerstand nach Art der Flugzeugflügel auch Auftrieb zu geben. Bei eher tangentialem Einschuss in die Erdatmosphäre kann damit das rasche Eindringen in tiefere Schichten vermieden werden. Die Energieabgabe erstreckt sich über längere Zeiten, innerhalb welcher die Abstrahlung zur besonderen Wirksamkeit kommt. Nur der praktische Versuch kann entscheiden, ob sich dieser Weg als brauchbar herausstellen wird.

V. Die wissenschaftliche Bedeutung der Raumfahrt

In den «alten» Zeiten, das heisst noch vor 10 Jahren, mussten die Anhänger der Astronautik viel Beredsamkeit aufwenden, um zu zeigen, dass Raumfahrten für die Wissenschaft mehr liefern könnten als nur eine Bestätigung dessen, was man schon weiss. Heute liegen zahlreiche Ergebnisse vor, die schon ein ziemlich überraschendes Aussehen haben, und niemand zweifelt mehr daran, dass noch viel mehr Neues gefunden werden wird. Der Luftmantel der Erde ist zwar ein lebenswichtiger Schutz der organischen Welt gegen Strahlungen, Meteoreinschläge usw. Er ist aber gleichzeitig auch ein Hindernis in der Erforschung des Aussenraumes. Unsere Fernrohre, selbst die kleineren Kaliber, könnten wesentlich mehr leisten, wenn die Luftunruhe wegfiele, und die Spektroskope der Astrophysiker müssten nicht mehr nur in einem relativ engen «Fenster» im Bereich der verschiedenen Wellenlängen verwendbar sein. Selbst wenn es noch einige Zeit nicht gelänge, in die Nähe von Mars und Venus zu kommen, würden doch schon Beobachtungen aus grosser Distanz, aber ohne Luftunruhe und Luftabsorption, eine ausserordentliche Vermehrung unserer Kenntnisse der Planetenoberflächen liefern.

Im Prinzip müsste es auch möglich sein, auf dem Mond ein festes Observatorium zu errichten, das optische Beobachtungen sehr weit entfernter Sternsysteme in bisher unerreichter Klarheit erlaubte. Die Abwesenheit von Wind und die dort viel geringere Schwere würden es auch ermöglichen, sehr grosse Apparaturen, sagen wir einmal ein Radioteleskop von 1000 m Durchmesser, aufzustellen. Freilich ist wohl auch anzunehmen, dass dabei neue Schwierigkeiten zu überwinden sind, wie etwa der Einschlag von vielen kleinen Meteoren, die starke Erwärmung und Abkühlung während der hellen und dunklen 14 Tage, ganz zu schweigen von den höchst prekären Aufenthaltsverhältnissen der Be-

obachter. Eine Satellitenstation von grösseren Abmessungen, die um die Erde in einigen tausend Kilometern Abstand kreiste, wäre vielleicht eher ausführbar. Derartige Dinge werden zurzeit ernsthaft geplant.

Im Grunde sind es drei grosse Problemkreise, zu denen die Raumfahrt vermutlich Wesentliches beitragen wird:

a) die Entstehung des Planetensystems;
b) die Kosmologie, das heisst die örtliche und zeitliche Betrachtung des Weltalls;
c) die Entstehung des Lebens.

Noch sind wir ganz am Anfang und noch ist das Hauptinteresse eher auf Messungen gerichtet, die die Lebensbedingungen für bemannte Flüge und das Funktionieren neuartiger Instrumente aufzeigen sollen. Nebenbei sind aber auch schon Beobachtungen ausgeführt worden, die tiefer gehen und die die Vorboten weit kühnerer Programme sind. Daneben gibt es auch Anfänge einer Art Raumtechnik, Übermittlung von Nachrichten und Television, Wetterbeobachtung in globalem Ausmass, Ausnützung der Sonnenstrahlung zur Energieerzeugung in Raumschiffen usw.

Eine kurze Übersicht einiger bisher erreichter Resultate soll eine Vorstellung geben von den gegenwärtigen Bestrebungen. Es hätte wenig Wert, auf Einzelheiten einzugehen, da alles noch im Flusse ist und laufend neue Verbesserungen der Apparaturen erfolgen.

1. Luftdichte in Abhängigkeit von der Höhe. – Die künstlichen Satelliten geben eine interessante Möglichkeit, die Luftdichte bis in grosse Höhen (600 km) zu bestimmen. Auch eine sehr dünne Luft ergibt eine Bremswirkung, die sich, da sie bei nahen Satelliten über Tage und Wochen akkumuliert wird, relativ genau messen lässt. Entgegen der naiven Vorstellung, zeigt sich, dass der Luftwiderstand die Umlaufzeit verkürzt, nicht verlängert, weil die Erdschwere beim Einschrumpfen der Bahn eine Arbeit leistet, die gerade doppelt so gross ist wie die Bremsarbeit. Für einen kugelförmigen Satelliten sind die für die Rechnung benötigten Widerstandsbeiwerte ziemlich genau bekannt. Es gibt auch zylindrische, die sich während des Umlaufs dauernd überschlagen, so dass man Mittelwerte annehmen muss. Als Beispiel einer Auswertung von King-Hele sei eine Tabelle für den Höhenbereich zwischen 200 und 400 km angegeben:

Höhe	Luftdichte	Dichte
km	Luftdichte auf Meereshöhe	g/cm³
200	$3{,}5 \cdot 10^{-10}$	$4{,}3 \cdot 10^{-13}$
220	$2{,}1 \cdot 10^{-10}$	$2{,}5 \cdot 10^{-13}$
240	$1{,}2 \cdot 10^{-10}$	$1{,}5 \cdot 10^{-13}$
260	$7{,}6 \cdot 10^{-11}$	$9{,}3 \cdot 10^{-14}$
280	$4{,}7 \cdot 10^{-11}$	$5{,}8 \cdot 10^{-14}$
300	$3{,}1 \cdot 10^{-11}$	$3{,}8 \cdot 10^{-14}$
320	$2{,}1 \cdot 10^{-11}$	$2{,}6 \cdot 10^{-14}$
340	$1{,}5 \cdot 10^{-11}$	$1{,}8 \cdot 10^{-14}$
360	$1{,}1 \cdot 10^{-11}$	$1{,}3 \cdot 10^{-14}$
380	$7{,}8 \cdot 10^{-12}$	$9{,}6 \cdot 10^{-15}$
400	$5{,}8 \cdot 10^{-12}$	$7{,}1 \cdot 10^{-15}$

Die Bestimmungen in grösseren Höhen sind vorläufig ziemlich unsicher, vor allem deswegen, weil es sich gezeigt hat, dass die Luftdichte grossen Schwankungen unterworfen ist, indem durch Sonnenstrahlung die Luft verschieden stark erwärmt wird, und dadurch der Luftmantel mehr oder weniger weit in den Raum reicht. Bemerkenswert ist eine 28tägige Periode; es sind aber auch tägliche Schwankungen vorhanden.

2. Die Lufttemperatur ist wesentlich schwerer zu ermitteln und die heute vorliegenden Messungen sind indirekt und wenig sicher. Immerhin dürfte zwischen 200 und 400 km die Temperatur 700 bis 800° C erreichen. Die Erwärmung erfolgt durch starke Absorption ultravioletten Lichtes der Sonne.

3. Noch weniger zuverlässig sind die Angaben über den Wind in diesen Höhen. Man kann aus den Bahnbeobachtungen auf eine West-Ost-Strömung von 200 bis 250 km/h schliessen.

4. Die Erde ist nicht eine exakte Kugel. Insbesondere hat der Äquatorwulst einen beträchtlichen Einfluss auf die Bahn, indem diese sich längs des Äquators dauernd in gleicher Richtung verschiebt. Der Effekt ist den Astronomen schon lange bekannt; es treten aber darüber gelagert kleine Störungen auf, aus denen man weitere Schlüsse auf die Massenverteilung in der Erde ziehen kann. Der Unterschied zwischen äquatorialem und polarem Erddurchmesser ist nach diesen Ermittlungen beispielsweise um 150 m geringer als bisher angenommen. – Wesentlich ist für alle diese Untersuchungen, dass die nahen Satelliten so viele Umläufe machen (1½ bis 2 Stunden Umlaufzeit). Das ergibt einen guten statistischen Fehlerausgleich.

5. Nachdem es gelungen ist, Filme heil auf die Erde zurückzubringen, können Aufnahmen der Erde aus grossen Höhen (bis heute 1100 km) ausgewertet werden. Die Krümmung der Erdoberfläche ist natürlich augenfällig; die Erde erscheint nun als Himmelskörper. Wichtiger ist aber die Beobachtung der Wolkenmeere. Was sonst nur sehr schematisch auf einer Grosswetterkarte angedeutet ist, erscheint hier als Naturvorgang mit einer Menge Details, die noch der Deutung harren. Es kann kein Zweifel mehr bestehen, dass in Zukunft Wetter-Satelliten (mit Fernsehübertragung) eine wichtige Rolle spielen werden.

6. Die Photographie beziehungsweise Television wird stets ein Ziel der Raumfahrt bleiben. Schon heute gibt es Bilder der Sonne, die Oberflächendetails (Granulation, Sonnenflecke) viel deutlicher zeigen als alle irdischen Aufnahmen. Die Technik der selbstgesteuerten Himmelsphotographie ist aber erst in Entwicklung. Es ist wahrscheinlich, dass sie noch mancherlei Überraschungen bringen wird. Besonderen Reiz bietet die Aufgabe, die von uns aus nicht sichtbare Hinterseite des Mondes (etwa 40 % der gesamten Oberfläche) durch ein (unbemanntes) «Missil» aufzunehmen und das Bild auf die Erde zu übertragen. Eine erste, naturgemäss noch nicht sehr vollkommene Aufnahme ist von der russischen Akademie bereits veröffentlicht worden. Sie zeigt neue Maria und Krater, lässt aber noch viele Fragen offen; zweifellos wird man in Kürze bessere

Bilder haben. Man hat ausgerechnet, dass es mit vollkommeneren, heute prinzipiell bekannten Mitteln und bei Aufnahmen aus der Nähe möglich sein sollte, Objekte von wenigen Kilometern Durchmesser noch genügend genau aufzulösen, was übrigens auch für die uns zugewandte Mondseite ein gewisses Interesse hätte, insbesondere für das Aufsuchen von geeigneten Landungsstellen für bemannte Mondflüge.

7. Schon seit längerer Zeit wird die sogenannte k o s m i s c h e S t r a h l u n g von den Physikern untersucht. Sie ist deshalb bemerkenswert, weil sie primär aus Atomkernen (zur Mehrheit Wasserstoff [= Protonen], aber auch schwereren Kernen bis zum Eisen) besteht, die zum Teil mit enormen Energien aus dem Weltall kommen (millionenmal mehr als die schnellsten in den grossen Beschleunigern künstlich erzeugten Protonenstrahlen). Ihr Ursprung ist immer noch nicht sicher bekannt. Ballone mit Photoplatten erreichen zwar relativ grosse Höhen (25 bis 30 km), aber sie schweben immer noch und nur kurze Zeit im Luftraum. In einem Satelliten zum Beispiel könnte man praktisch ohne Störung durch die Umgebung und über lange Zeit Messungen machen. Einzelresultate sind schon vorhanden; die volle Ernte wird wohl dann kommen, wenn die Platten heil zur Erde gebracht werden. Vorläufig wird hauptsächlich mit Zählern verschiedener Bauart gearbeitet.

8. Eine Überraschung bietet die Entdeckung der sogenannten S t r a h l u n g s g ü r t e l (VAN ALLEN), Regionen mit grosser Dichte von relativ schnell bewegten Teilen; es gibt deren zwei. Deren Lage und Ausdehnung ist weitgehend vom magnetischen Feld der Erde bestimmt. Die grösste Ausdehnung in radialer Richtung findet sich am Äquator, die kleinste in der Nähe der Pole. Die Speisung der beiden Gürtel mit geladenen Teilchen erfolgt offenbar aus zwei verschiedenen Quellen. Der äussere Gürtel bekommt Teilchen direkt von der Sonne, der innere hängt von Folgeerscheinungen der kosmischen Strahlen ab (Herausschlagen von Neutronen aus Kernen, radioaktiver β-Zerfall der Neutronen in Protonen). So lautet gegenwärtig die Erklärung; es wäre aber nicht verwunderlich, wenn Modifikationen der Theorie erfolgen würden.

Die Intensität der Strahlung, die im Innern eines Raumschiffes als γ- (Röntgen-) Strahlung erscheinen würde, ist gross genug, um Befürchtungen zu wecken, dass bemannte künstliche Satelliten (vor allem Aussenstationen) gefährdet wären. Ein schneller Durchgang hingegen würde wahrscheinlich ungefährlich sein. Man versteht, dass gegenwärtig das Studium dieser recht unerwünschten «Abwehr des Himmels gegen Invasion» besonders eifrig betrieben wird.

9. Bei vielen Satelliten sind Apparaturen angebracht worden, die den Einschlag von K l e i n m e t e o r i t e n anzeigen. Grössere wären natürlich katastrophal, aber solche sind selten und ein Zusammentreffen ein ausserordentlicher Zufall. Nicht so bei den Teilchen von Staubgrösse, die viel zahlreicher sind. Da sie relativ zum Raumschiff unter Umständen eine sehr grosse Geschwindigkeit (20 bis 70 km/s) haben, können sie die Aussenhaut beschädigen. Im grossen und ganzen hat man jetzt den Eindruck gewonnen, dass die Klein-

meteoriten nicht ganz so gefährlich sind, wie man ursprünglich befürchtet hatte; gegen die grossen gibt es praktisch keinen Schutz. Für die Raumreisen ist die Frage der Verteilung der Meteoriten auf die verschiedenen Grössenklassen deshalb nach wie vor brennend.

10. Das Magnetfeld der Erde in grösseren Distanzen, ferner dasjenige des Mondes (falls ein solches vorhanden ist), kann durch neue, sehr empfindliche Magnetometer (und Telemetrierung auf die Erde) gemessen werden. Man nimmt heute an, dass das innere Magnetfeld der Himmelskörper durch Bewegung flüssiger oder gasförmiger Massen zustande kommt, da ja der gewöhnliche Ferromagnetismus schon bei relativ mässigen Temperaturen verloren geht. Die russischen Forscher behaupten nun, dass der Mond nach ihren Messungen kein eigenes Magnetfeld hat. Das würde auf einen festen und ziemlich kühlen Kern hindeuten.

11. In Vorbereitung sind Messungen, die eine neue Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie zum Ziele haben. Bekanntlich hat man bisher drei astrophysikalische Effekte mit dieser Theorie erklären können:

a) eine langsame Drehung des Merkur-Perihels (rund 44 Bogensekunden im Jahrhundert);
b) Ablenkung eines Lichtstrahles, der nahe an der Sonne vorbeigeht (1,75 Bogensekunden, wovon die eine Hälfte durch Sonnenanziehung der Photonen, die andere durch die «Krümmung» des Raumes hervorgerufen wird);
c) Rot-Verschiebung der Spektrallinien, das heisst Veränderungen der Frequenz von Lichtstrahlen, die von der Sonne oder andern Sternen zur Erde gelangen.

Während a) recht genau aus der Theorie erklärt werden kann, sind bei b) zum Teil noch Zweifel vorhanden, die sich aber auf die Genauigkeit der Messungen beziehen. Hingegen ist c) zwar qualitativ beobachtet worden, die Messungen sind aber noch mit vielen Unsicherheiten behaftet.

Im ganzen wird zwar der Wahrheitsgehalt der allgemeinen Relativitätstheorie kaum ernsthaft bezweifelt; eine bessere experimentelle Bestätigung ist aber immer von hohem Wert. – Bezüglich c) ist nun verschiedentlich vorgeschlagen worden, einen Satelliten mit einer Uhr höchster Präzision auszurüsten (freilich nicht ein mechanisches Uhrwerk, sondern eine auf molekularen Vorgängen beruhende sogenannte Atomuhr) und die Zeit- beziehungsweise Frequenzangaben auf die Erde zu übertragen. Der Zeitunterschied gegenüber einer gleichbeschaffenen Uhr auf der Erde würde dann einen zu c) analogen Effekt aufweisen müssen (Violettverschiebung). Man glaubt, dass das Experiment mit heutigen Mitteln mit Erfolg durchführbar ist. Dabei tritt gleichzeitig ein anderer Effekt auf, der an sich zwar seit mehr als 50 Jahren aus der speziellen Relativitätstheorie bekannt ist, aber auch heute noch zu vielen Diskussionen und ungläubigem Kopfschütteln Anlass gibt: die sogenannte Zeit-Dilatation, das heisst das Langsamergehen von Uhren im bewegten Körper, verglichen mit ruhenden

Uhren. – Vielleicht ist es am besten, wenn wir darüber einen kleinen Abschnitt aus einem Vortrag EINSTEIN's wiederholen, den dieser in unserer Naturforschenden Gesellschaft in Zürich gehalten hat (am 16. Januar 1911). Er sagt darin:

«Am drolligsten wird die Sache, wenn man sich folgendes ausgeführt denkt. Man gibt dieser Uhr eine sehr grosse Geschwindigkeit (nahezu gleich c) und lässt sie in gleichförmiger Bewegung weiterfliegen und gibt ihr dann, nachdem sie eine gewisse Strecke durchflogen hat, einen Impuls in entgegengesetzter Richtung, so dass sie wieder an die Ursprungsstelle, von der sie abgeschleudert wurde, zurück kommt. Es stellt sich dann heraus, dass sich die Zeigerstellung dieser Uhr während ihrer ganzen Reise fast nicht geändert hat, während eine unterdessen am Orte des Abschleuderns in ruhendem Zustand verbliebene Uhr von genau gleicher Beschaffenheit ihre Zeigerstellung sehr wesentlich geändert hat. – Man muss hinzufügen, dass das, was für diese Uhr gilt, welche wir als einen einfachen Repräsentanten alles physikalischen Geschehens eingeführt haben, auch gilt für ein in sich abgeschlossenes physikalisches System irgendwelcher anderer Beschaffenheit. Wenn wir zum Beispiel einen lebenden Organismus in eine Schachtel hinein brächten und ihn dieselbe Hin- und Herbewegung ausführen liessen wie die Uhr, so könnte man erreichen, dass dieser Organismus nach einem beliebig langen Fluge beliebig wenig geändert wieder an seinen ursprünglichen Ort zurückkehrt, während ganz entsprechend beschaffene Organismen, welche an den ursprünglichen Orten ruhend zurückgeblieben sind, bereits längst neuen Generationen Platz gemacht haben. Für den bewegten Organismus war die Zeit der Reise nur ein Augenblick, falls die Bewegung annähernd mit Lichtgeschwindigkeit erfolgte. Dies ist eine unabweisbare Konsequenz der von uns zugrunde gelegten Prinzipien, die die Erfahrung uns aufdrängt.»

Und weiter:

«Wir haben vorhin gesehen, dass eine bewegte Uhr nach der Relativitätstheorie langsamer läuft als dieselbe Uhr in ruhendem Zustand. Wohl dürfte es für immer ausgeschlossen bleiben, dass wir dieses durch Experimente mit einer Taschenuhr verifizieren werden, weil die Geschwindigkeiten, die wir einer solchen mitteilen können, gegen die Lichtgeschwindigkeit verschwindend klein sind.»

Auch diese Zeit-Dilatation kann bei der hohen Genauigkeit der Atomuhren mit Satelliten gemessen werden. Um aber grössere Effekte oder gar eine messbare Lebensverlängerung der Reisenden zu erzielen, muss (wie EINSTEIN ja betont) die Fahrzeuggeschwindigkeit sich stark der Lichtgeschwindigkeit c nähern. Man hat sich darüber schon Gedanken gemacht, wie das eventuell realisierbar wäre (Photonenschiffe). Aber wenn man auch vorsichtigerweise das Wort «unmöglich» besser vermeidet, so ist es selbst den Optimisten (die allerdings auf die Dauer meistens recht haben) klar, dass dieses Ding noch Weile hat.

12. Ein interessanter Vorschlag für ein mit Raketen durchzuführendes Experiment stammt von E. TELLER. Man denke sich einen künstlichen Planeten, ungefähr auf der Bahn der Erde. Zu einer gewissen Zeit wird er sich jenseits der Sonne in Opposition zur Erde befinden; die Distanz zur Erde ist dann rund 300 Millionen Kilometer. Dort soll eine grosse Wasserstoffbombe zur Explosion gebracht werden, die neben materiellen Teilchen eine grosse Menge Licht aussendet, und zwar Wellen von sehr verschiedenen Längen, von den ultraroten bis zu den γ-Strahlen. Da keine Stosswelle (wie in der Luft) entsteht, ist der Lichtblitz äusserst kurz. Auf der Erde, besser noch auf einem künstlichen Satelliten, werden Instrumente aufgestellt, die das Eintreffen der verschiedenen Strahlungen feststellen (was recht genau geschehen kann: 10^{-6} s). Die Zeit, die das

Licht braucht, um zur Erde zu gelangen, ist rund 1000 s. Bei einer relativen Genauigkeit von vielleicht 10^{-9} könnten nun Unterschiede in der Geschwindigkeit des Lichtes sehr verschiedener Wellenlänge gemessen werden und damit ermittelt, ob das Licht im leeren Raum Dispersion zeigt oder nicht. Das Resultat wäre in jedem Fall von grosser Bedeutung für die Theorie der Felder.

13. Von besonderem Interesse sind Untersuchungen an L e b e w e s e n während der Raumfahrt. Hier sind sowohl von den Amerikanern wie von den Russen bedeutende Erfolge erzielt worden. Als Beispiel seien Messungen an zwei Affen erwähnt, die eine respektable Raumfahrt heil überstanden haben (Mai 1959), nachdem ein erster Flug (Dezember 1958) zwar messtechnisch geglückt war, das Tier aber nicht aufgefunden werden konnte.

Man kann sich nicht leicht eine Vorstellung machen, welche Mühe und Sorgfalt die Vorbereitung eines solchen Versuchs erfordert. Der Affe muss in einer genau dem Körper angepassten Wiege liegen; der naturgemäss enge Raum muss klimatisiert sein. Zahlreiche Instrumentengeber müssen angebracht werden, deren Wirksamkeit und Freiheit von Zufallsanzeigen bis unmittelbar vor dem Start geprüft werden. Die grösste Nervenprobe für das Versuchstier und vielleicht noch mehr für die Physiologen ist das sogenannte «count-down», die systematische Kontrolle aller Apparaturen, die Stunden, ja sogar Tage dauern kann, und wobei das Tier in der engen Kapsel eingeschlossen ist. Es werden gegenwärtig grosse Anstrengungen gemacht, diese Zeit zu verkürzen. Dazu ist ein gutes Zusammenspiel von Ingenieuren und Physiologen erforderlich. – Die Ergebnisse beruhen einerseits auf den während des Fluges radioelektrisch übermittelten Signalen, andererseits auf dem Augenschein und der tierärztlichen Untersuchung kurz nach der Auffindung. Abb. 19 zeigt zum Beispiel die Frequenz der Herzschläge von drei Tieren. Die oberste Kurve gehört zu dem ersten Flug, bei dem der Affe nicht mehr gefunden werden konnte, die beiden andern

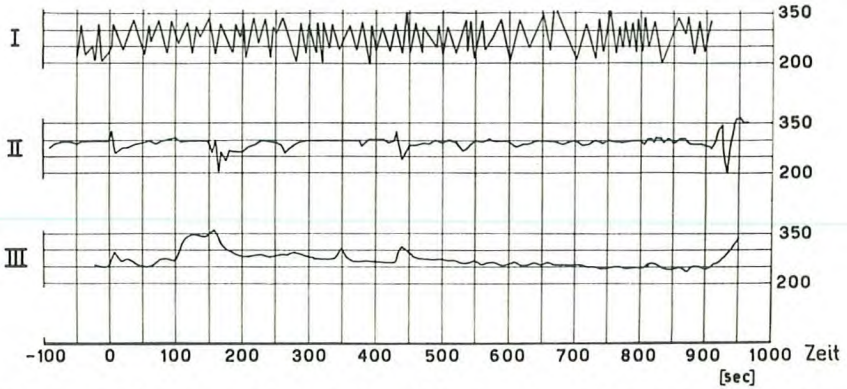


Abb. 19 Herztätigkeit dreier Versuchstiere (Affen) während ballistischer Flüge. II und III gehören zu verschiedenen Tieren beim gleichen Flug. Die «Schwerelosigkeit» tritt nach rund 150 Sekunden ein und dauert etwa 12 Minuten.

zum Flug zweier Affen, die mit der Kapsel unversehrt zur Erde zurückkehrten. Die Reaktionen sind etwas verschieden, aber sowohl die enorme Beschleunigung (12,5 g) beim Start und die entsprechend grosse Verzögerung bei der Rückkehr, als auch die 12 Minuten dauernde «Schwerelosigkeit» ergaben keinerlei bedenkliche Anzeichen. Auch die Hündin Laika im zweiten russischen Satelliten (die allerdings geopfert werden musste), hat die Schwerelosigkeit tagelang ohne Schwierigkeiten überstanden. – Noch müssen sehr viel mehr Versuche dieser Art gemacht werden, bis man einen Menschen in ein Raumschiff setzen darf. Gegenwärtig deutet aber vieles darauf hin, dass bei sorgfältigem Vorgehen das Risiko einer Katastrophe wesentlich vermindert werden kann. Ein Wagnis ist die erste menschliche Raumfahrt natürlich nach wie vor.

Diese Liste könnte vermehrt werden. Vielleicht genügen aber die aufgeführten Versuche und Vorschläge, um ein Bild einer grossen und ständig wachsenden wissenschaftlichen Aktivität zu geben.

VI. Schluss

Vergessen wir nicht, dass erst zwei Jahre seit dem Auftauchen des ersten künstlichen Satelliten verstrichen sind (4. Oktober 1957). Überraschend viel ist erreicht worden, viel mehr aber ist in Vorbereitung für die nächsten Jahre.

Nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen ist das Planetensystem der S o n n e mit Ausnahme unserer Erde eine fürchterliche Wüstenei. Es ist für den Menschen zu heiss (Merkur, Venus) oder zu kalt (Mars). Die Atmosphären, soweit überhaupt vorhanden, sind zu dünn (Mars), erstickend (Venus, CO_2) oder giftig (Jupiter, NH_3, CH_4). Nur für den Mars scheinen gewisse Bedingungen für ein sehr primitives pflanzliches Leben vorhanden sein. – Werden die ersten Raumfahrten uns zu Korrekturen dieser Ansichten nötigen? Etwa so, dass das Leben ins Innere einiger Planeten und Monde sich verkriecht, um gegen die vernichtende Kälte und Strahlung geschützt zu sein? Wird man Spuren von erst entstehendem oder aber längst vergangenem Leben finden? Oder sind wir hier auf der Erde wirklich a l l e i n – durch unermessliche Distanzen vom «nächsten» Planetensystem getrennt?

Ein neues, grossartiges F o r s c h u n g s m i t t e l ist uns mit der R a u m f a h r t in die Hände gegeben. Es muss die Sorge der dazu Berufenen sein, dafür zu sorgen, dass es seinem einzig vernünftigen Zweck: der F ö r d e r u n g d e r W i s s e n s c h a f t in Zukunft nicht entfremdet wird. – Gewiss wird auch da und dort der persönliche Ehrgeiz mitspielen – aber wer möchte es einem jungen Menschen verargen, zu hoffen, dass gerade e r der neue Kolumbus sein wird, der seinen Fuss zuerst auf den Mond oder den Mars setzt?

Literatur

Die Raketen- und Raumfahrt-Literatur ist schon sehr umfangreich. Hier wollen wir nur einige wenige Hinweise geben.

A. Zusammenfassende Bücher

J. Stemmer: Raketenantriebe. Zürich 1952, 523 S.
Beschreibender Natur, mit zahlreichen historischen Ausführungen.

H. S. Seifert und Mitautoren: Space Technology. New York 1959.
Ein umfangreiches Sammelwerk mit zahlreichen Literaturangaben.

G. P. Sutton: Rocket Propulsion Elements. 2. Auflage, New York 1956, 480 S.
Befasst sich nur mit dem Antrieb. Enthält viele Zahlenangaben und ein grosses Literaturverzeichnis.

J. W. Herrick, E. Burgess, W. Lanford: Rocket Encyclopedia. Los Angeles 1959, 600 S.
Ein sehr brauchbares Nachschlagelexikon mit vielen Illustrationen.

B. Zeitschriften

Es existieren zahlreiche ganz- und halbpopuläre Zeitschriften. Daneben gibt es aber auch solche rein wissenschaftlicher Art:

Astronautica Acta, Springer-Verlag, Wien.

Astronautics, herausgegeben von der American Rocket Society.

Journal of the British Interplanetary Society, London.

C. Kongressberichte (jährlich)

Der neueste betrifft den 9. Internationalen Astronautischen Kongress, Amsterdam 1958. Springer-Verlag, Wien 1959, 2 Bände, 970 S.

D. Astronomische Literatur

Wir nennen hier nur ein neues, leichtverständliches und sehr schön illustriertes Werk:

L. Rudaux, G. de Vaucouleurs: Astronomie. Larousse, Paris, 506 S., 1958, mit Nachtrag 1959.

GEBR. FRETZ AG ZÜRICH