

Über Raketen

GRÖTTRUP

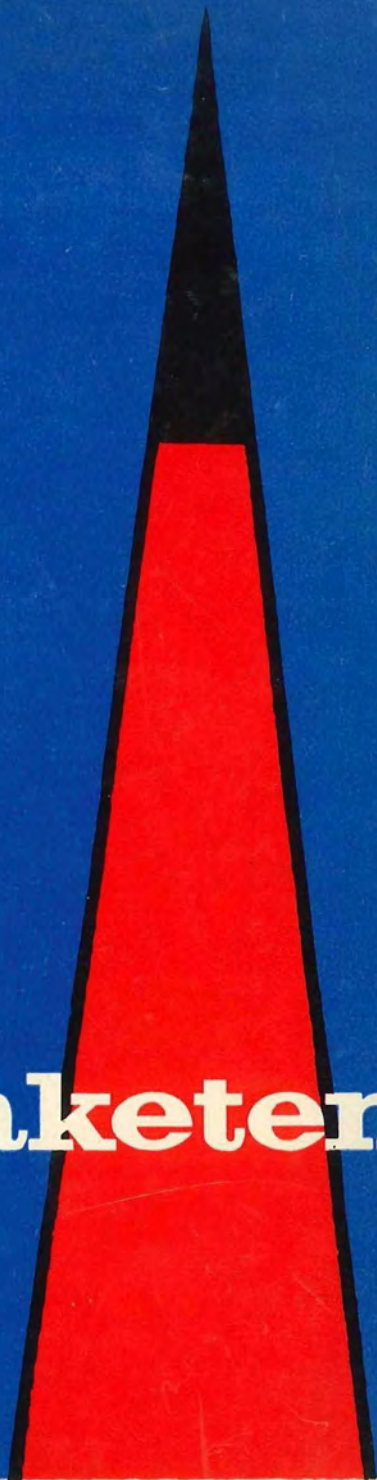
ULLSTEIN

HELMUT GRÖTTRUP

Über Raketen

ULLSTEIN

Allgemeinverständliche Einführung in Physik und
Technik der Rakete



Z H O B

GRÖTTRUP

**Über
Raketen**

**Über
Raketen**

Die Rakete ist in jüngster Zeit als Forschungsinstrument und Machtmittel populärer geworden als irgendein anderes Erzeugnis der technischen Intelligenz. Trotzdem ist das wirkliche Wissen um sie recht dürftig. Das vorliegende Buch, verfaßt von einem der hervorragendsten Fachleute auf dem Gebiet des Raketenbaus, will daher in den Aufbau und die Funktion der Rakete und ihrer Teile einführen. Die beiden Hauptkapitel sind den wissenschaftlichen Grundlagen und der Technik der Rakete gewidmet. Der Leser lernt hier Allgemeingültiges aus Naturwissenschaft und Technik, weil auch die Rakete nur im allgemeinen Zusammenhang unserer physischen Welt zu verstehen ist. Im einleitenden Kapitel wird ein Überblick über die Vielzahl der existierenden und der geplanten Raketentypen gegeben. Den Ausklang bildet ein kurzer Abriss über die dem Menschen nützlichen Anwendungen der Raketentechnik. Das Buch wendet sich an den technisch interessierten Laien, nicht an den Fachmann. Daraus erklärt sich die große Zahl einfacher, oft symbolischer Abbildungen und das Fehlen jeglicher Mathematik. Es verzichtet aber auch auf historische Darstellungen, Erlebnisberichte und visionäre Zukunftsdarstellungen, um statt dessen die Rakete, die Funktionsabläufe und die ihnen zugrunde liegenden Naturgesetze in voller Breite und Ausführlichkeit schildern zu können.

Helmut Gröttrup wurde 1916 in Köln als Sohn eines Ingenieurs geboren. Nach seinem Studium an der Technischen Hochschule Berlin, das er 1939 mit der Diplomprüfung abschloß, arbeitete er in den Elektromechanischen Werken Karlshagen. Im September 1945 wurde Gröttrup Leiter eines wissenschaftlichen Büros, das sich mit der Rekonstruktion der Forschungsergebnisse der Raketenentwicklung befaßte, und stand anschließend den Zentralwerken Bleicherode vor, denen die Rekonstruktion der Rakete V 2 aufgetragen war. Im Oktober 1946 wurde Gröttrup mit Frau und Kindern nach Rußland deportiert, wo er zunächst als Hauptkonstrukteur ein deutsches Kollektiv von technischen und wissenschaftlichen Mitarbeitern leitete, das sich mit der Projektierung von Fernraketen befaßte; später, als die russische Direktion ihn absetzte, beschäftigte er sich mit mathematischen und elektronischen Arbeiten. Im November 1953 nach Deutschland zurückgekehrt, flüchtete Gröttrup mit seiner Familie sofort in die Bundesrepublik. Hier befaßte er sich zunächst mit Fragen aus dem Gebiet der elektronischen Rechenmaschinen und Aufgaben der mechanischen Selektion. Bis Dezember 1958 war er Mitarbeiter der C. Lorenz A.G., bei der er ein Laboratorium für Datenverarbeitung neu aufbaute und verschiedene Geräte und Anlagen entwickelte.

HELMUT GRÖTTRUP

Über Raketen

*Allgemeinverständliche Einführung
in Physik und Technik der Rakete*

Mit 29 Abbildungen und 151 Zeichnungen

VERLAG ULLSTEIN
BERLIN · FRANKFURT · WIEN

INHALT

	Vorwort	7
Kapitel 1	DIE SAAT GING AUF	9
	Ordnungsprinzipien	13
	Eine Typenreihe	19
Kapitel 2	DIE WISSENSCHAFTLICHEN GRUNDLAGEN	32
	Raketen-Ballistik	39
	Raketen-Aerodynamik	71
	Raketen-Thermodynamik	78
	Festigkeits-Lehre	98
	Theorie der Steuerung	104
Kapitel 3	DIE TECHNIK DER RAKETEN	122
	Die Zelle	125
	Das Triebwerk	131
	Die Brennkammer	134
	Fördersysteme	141
	Das Triebwerk der Rakete R 14	149
	Feststoff-Triebwerke im Vormarsch	160
	Die Steuerung	163
	Kreiselgeräte	166
	Funkgeräte	173
	Der Rechner	184
	Steuerorgane	185
	Steuerung der Vanguard-Rakete	192
	Die Bodengeräte	203

Umschlag- und Einbandentwurf: Hans Bohn

© 1959 by Ullstein A.G., Berlin

Alle Rechte, auch das der fotomechanischen Wiedergabe, vorbehalten

Printed in Germany, West-Berlin 1959 · Gedruckt im Ullsteinhaus Berlin

Kapitel 4	DER NUTZEN DER RAKETENTECHNIK	212
	Transport von Gütern und Menschen.....	214
	Transport von Nachrichten.....	218
	Nützliche Feststoffraketen	221
	Nützliche Satelliten	224
	Satelliten als Forscher	227
	Raum-Laboratorien	235
	Raumfahrt	237
	Stichwortverzeichnis	240

VORWORT

Wenn die Flut von Veröffentlichungen und Büchern über Raketen und ihre Technik, die uns das Geophysikalische Jahr mit seinen Satellitenaufstiegen beschert hat, um »noch ein Buch« vermehrt wird, so muß der Verfasser dafür eine stichhaltige Begründung haben und seine Veröffentlichung sich von anderen wesentlich unterscheiden.

Dieses Buch geht von dem Gedanken aus, daß es notwendig sei, den Nichtfachmann eingehender über das Wesen und die Technik der Raketen in allen ihren Teilen zu unterrichten, als es bisher geschehen ist. Es erschien dem Verfasser wichtig, die Prinzipien, auf denen die Raketentechnik aufbaut und die praktische Verwertung dieser Prinzipien systematisch darzustellen, ob es sich nun um ballistische oder chemische Fragen, um die Technik des Triebwerks oder der Kreiselgeräte handelt. Auf jegliche Reportagen wurde bewußt verzichtet. Ebenso fehlen Beschreibungen von gelungenen oder mißglückten Starts, obwohl der Verfasser in Deutschland und Rußland manchen Start miterlebte. Es fehlen Berichte aus der Vergangenheit und die Lebensbilder der »Väter der Raketentechnik«, und schließlich fehlen irgendwelche phantastischen Schilderungen von interplanetaren Reisen und fernen Welten.

Das Buch will vor allem ein Lehrbuch sein, allerdings ein Lehrbuch für Nichtfachleute. Es versucht dem unterschiedlichen Wissensschatz des modernen Menschen Rechnung zu tragen, der die kaum ein halbes Jahrhundert alten Hochfrequenzwellen als Selbstverständlichkeit hin- nimmt und von dem seit einigen hundert Jahren bekannten Unterschied zwischen Masse und Gewicht eines Körpers kaum etwas weiß.

Wird fehlendes Wissen mit »gesundem Menschenverstand« überbrückt, so entstehen von den wirklichen Vorgängen nicht selten falsche Vorstellungen. Der Verfasser hat sich Mühe gegeben, diese falschen Bilder nicht plötzlich, sondern schrittweise abzubauen, Irrtümer allmählich zu beseitigen und die richtigen Vorstellungen gleich einem Mosaik entstehen zu lassen. Als Mosaiksteine dienen kleine, simple Skizzen, die jeweils nur *einen* Gedanken unterstützen sollen. Die große Zahl dieser Skizzen beweist, daß der Stoff nicht nur in der großen Linie, sondern auch in vielen Verästelungen verarbeitet worden ist, wenn auch eine Vollständigkeit nicht erreicht wurde.

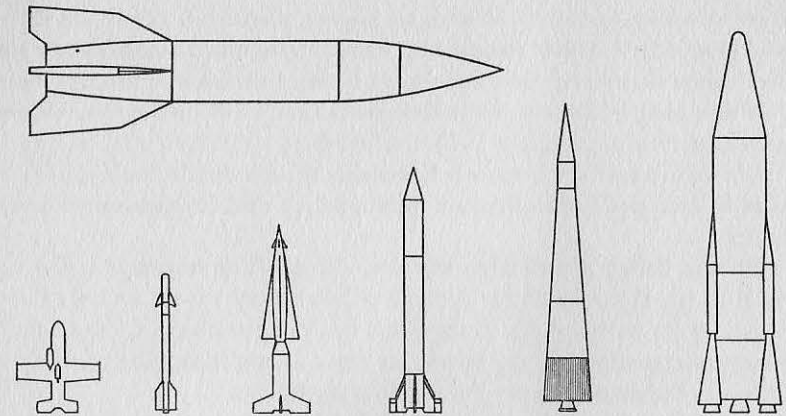
Vorwort

Das einleitende Kapitel soll einen Querschnitt vom Stand der modernen Raketentechnik geben. In dieser Übersicht werden zahlreiche Begriffe verwendet, deren Erklärung erst durch das Studium der folgenden zwei Hauptkapitel erarbeitet werden muß. Der unbefangene Leser wird also gut daran tun, zunächst nur die Bilder des ersten Kapitels zu betrachten und ein genaueres Studium auf später zu verschieben.

Das zweite Kapitel versucht, in die Grundlagen der Raketentechnik einzudringen. Die darin gewonnenen Erkenntnisse dienen als Ausgangspunkt für das Verständnis der im dritten Kapitel beschriebenen Teile und Geräte, aus denen sich eine Rakete zusammensetzt. Das letzte Kapitel schließlich gibt einen kurzen Überblick über einige Anwendungsmöglichkeiten der Raketen und Satelliten zum Nutzen des Menschen.

Durch den Lesebuchcharakter wird diese Darstellung, so hofft der Verfasser, geeignet sein, für die Raketentechnik begeisterte junge Menschen mit den unzähligen Sondergebieten bekannt zu machen, auf denen sie nach ihrer Ausbildung mitarbeiten können. Sie soll aber auch die Überzeugung wachrufen, daß ohne sorgfältige Grundausbildung auf keinem der Sondergebiete eine ernsthafte Mitarbeit möglich ist.

Das Buch konnte nur entstehen, weil es dem Verfasser in den Jahren nach dem Kriege vergönnt war, in einem Kreise hervorragender Fachleute für jedes Teilgebiet der Raketentechnik zu arbeiten. Für diese Zeit des intensiven Schaffens und Lernens unter schwierigen Verhältnissen dankt der Verfasser allen, die dabei gewesen sind.



Kapitel 1

DIE SAAT GING AUF

Der Krieg ist der Vater aller Dinge, sagt ein altes Wort, das heute noch oft gedankenlos nachgesprochen wird, obwohl es gerade in unserem Jahrhundert seine Berechtigung und seine Wahrheit verloren hat. Denn wer wollte behaupten, daß die großen wissenschaftlichen Entdeckungen, die unser Leben umgestaltet haben, auf den Einfluß des Krieges zurückzuführen seien? Wer wollte etwa sagen, daß die Entwicklung der modernen Automobiltechnik, der medizinischen Technik, die Entwicklung der Haushaltgeräte – und das sind doch Dinge, die unser Leben wirklich beeinflussen! – durch den Krieg noch maßgeblich bestimmt und beeinflußt worden seien? Nein, wir müssen heute anerkennen, daß wesentliche Impulse für die Entwicklung und den Fortschritt unserer Zivilisation aus friedlichem Anlaß gewonnen werden und auf den kriegerischen Anlaß verzichten können.

Und doch gibt es Gebiete, in denen das Wort vom Krieg als Vater aller Dinge seine Berechtigung behalten hat. So das Gebiet, das uns in diesem Buch interessiert, die Raketentechnik.

Der zweite Weltkrieg und die Zeit seiner Vorbereitung haben in allen Staaten die seit mehr als hundert Jahren aus den Arsenalen der Militärs verschwundenen Pulverraketen wieder aufleben lassen. Pulverraketen aller Größen und Formen, insbesondere für Infanterie-Anwendung,

wurden entwickelt, erprobt und im Kriege eingesetzt. Auch die Entwicklung der V 2, der Stamm-Mutter aller modernen Fernraketen, ist nicht ohne den gewaltigen Druck des Krieges denkbar und ohne eine von den Möglichkeiten dieses Kriegswerkzeuges allzusehr überzeugte politische Führungsschicht in Deutschland.

Die Lawine der technischen Entwicklung, die durch die V 2 in fast allen Staaten der Erde ausgelöst wurde, ist auf drei Ursachen zurückzuführen.

Erstens haben die Erfolge mit der V 2 die Welt überzeugt, daß es möglich ist, Fernraketen für große Reichweiten zu bauen, und die Propaganda, die während des Krieges mit der V 2 getrieben und nach dem Kriege fortgesetzt wurde, führte zu einer – vielleicht übertrieben – hohen Einschätzung dieser Fernraketen als Waffen.

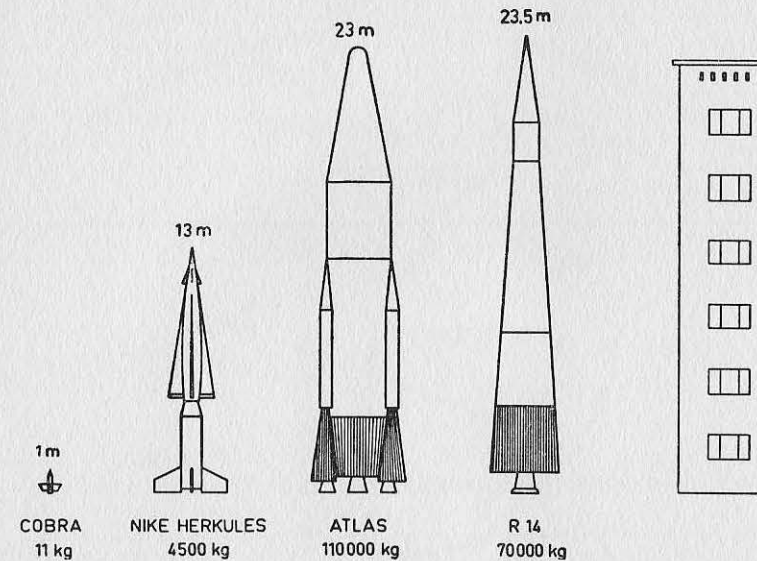
Zweitens haben sich alle Siegermächte bei Kriegsschluß die Kenntnisse, die Unterlagen und die übriggebliebenen Geräte aus der V-2-Entwicklung und der V-2-Fertigung gesichert und dieses Material als Grundstein für ihre eigene Entwicklung verwendet.

Drittens haben die Sieger des zweiten Weltkrieges keine Mühe gescheut, sich die Spezialisten, die in Peenemünde an der V-2-Entwicklung oder im Harzgebiet in der V-2-Fertigung tätig waren, zu sichern; besonders Amerika und Rußland haben große Gruppen von »Spezialisten« auf Jahre hinaus, zum Teil für immer, an ihr Land gebunden.

Das Ergebnis ist heute, kaum 15 Jahre nach Kriegsende, eine verwirrende Fülle von Raketen aller Größen und Reichweiten. Allein in den Vereinigten Staaten sind etwa zwanzig Typen im Einsatz, weitere fünf kurz davor und etwa fünfzehn Typen noch in der Entwicklung. Hierbei sind die für die Forschung entwickelten Raketentypen noch nicht einmal mitgezählt. Die Entwicklung in Großbritannien liegt sehr viel mehr unter dem Schleier des Geheimnisses. Aber auch dort ist bekannt, daß mindestens sechs Typen im oder kurz vor dem Einsatz sind und mindestens drei bis fünf Typen zur Zeit entwickelt werden. Besonders festen Fuß hat die Raketentechnik in Frankreich gefaßt. In Frankreich sind heute schon neun verschiedene Raketentypen im Truppeneinsatz oder kurz davor, sieben weitere Typen in Entwicklung. Die Geheimhaltung in Rußland und den Ostblockländern war von jeher viel besser als die des Westens. Wir wissen daher über die sowjetrussische Raketenentwicklung sehr wenig. Was wir wissen und was wir aus den spärlichen Meldungen zusammenstellen können, zeigt uns jedenfalls, daß auch in der UdSSR mindestens zwanzig verschiedene Raketentypen in Entwicklung sind oder sich bereits im Truppeneinsatz befinden. Denken wir nun

weiterhin daran, daß Länder wie Japan, Italien, Schweden und die Schweiz ebenfalls Raketen entwickeln, so können wir annehmen, daß es heute auf der Welt einhundert verschiedene militärische Raketen für die verschiedensten Aufgaben gibt. Das ist eine Fülle von Typen, in die es Ordnung hineinzubringen gilt.

Ein Querschnitt durch die vielen Raketentypen von der kleinsten bis zur größten zeigt uns die Vielgestaltigkeit der Entwicklung. Die Panzer-



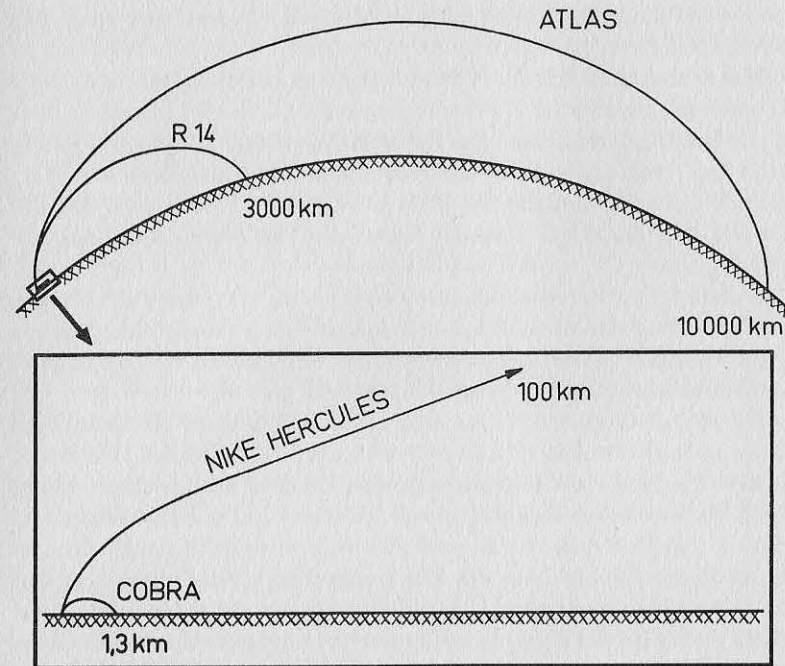
abwehrrakete »Cobra 4« ist mit ihren 11 Kilogramm Startgewicht eine der kleinsten überhaupt verwendeten Typen. Viel anspruchsvoller ist die 12,7 Meter hohe »Nike-Herkules« mit 4,5 Tonnen Startgewicht, die die Amerikaner für die Flugabwehr entwickelt haben. Ein Projekt, das die deutschen Spezialisten in der UdSSR ausgearbeitet haben, ist die R 14, über deren Verwirklichung aber nichts bekannt ist. Sie ist eine Mittelstreckenrakete mit einer Länge von etwa 23 Metern und einem Startgewicht von rund 70 Tonnen. Noch weiter geht die Aufgabe der amerikanischen »Atlas«. Sie ist eine interkontinentale Rakete, ebenfalls 23 Meter lang, aber mit einem Startgewicht von etwa 110 Tonnen. So reicht das Arbeitsgebiet der Raketentechnik von kleinen Geräten, die beinahe in der Aktentasche transportiert werden können, bis zu Raketen für größte Reichweiten, die höher als ein normales Haus sind.

Wie die Größe und das Gewicht der Raketen, so sind auch ihre Leistungen verschieden. Nehmen wir an, die eben gezeigten Raketen-typen brausten mit ihrer Höchstgeschwindigkeit über der Erdoberfläche dahin. Dann ergäbe sich folgendes Bild: die kleine »Cobra« würde in einer Minute etwa 5 Kilometer zurücklegen, die »Nike-Herkules« bereits 59 Kilometer je Minute, also das Zehnfache, die Fernrakete »R 14« 270 und die »Atlas« 400 Kilometer in einer Minute.



Noch deutlicher sind die Unterschiede der Reichweiten in unserer nächsten Abbildung. Mit der Fernrakete »Atlas« der Amerikaner können 10000 Kilometer im Freiflug zurückgelegt werden. Das Projekt »R 14«, das für die Sowjetrussen ausgearbeitet wurde, hatte eine Reichweite von 3000 Kilometern. In das Bild dieser beiden den Globus umspannenden Flugbahnen lassen sich die Flugbahnen der kleineren Typen

nicht mehr einzeichnen. Ein kleines Stück Erdoberfläche wurde daher, stark vergrößert, noch einmal herausgezeichnet. Die Rakete »Nike-Herkules« erreicht auf ihrem Verfolgungsflug gegen ein feindliches



Flugzeug immerhin die stattliche Entfernung von 100 bis 120 Kilometern vom Startpunkt aus, während die Panzerabwehrrakete »Cobra« nur eine Entfernung von 1,3 bis 2 Kilometern zu durchmessen braucht.

Ordnungsprinzipien

Die großen Fernraketen werden im angelsächsischen Sprachgebiet durch bestimmte Abkürzungen gekennzeichnet, die auch in unserer Presse immer wieder auftreten:

IRBM ist die Bezeichnung für Raketen mit einer Reichweite bis etwa

2500 Kilometer. Die Abkürzung bedeutet »Intermediate Range Ballistic Missile« oder auf deutsch »Mittelstreckenrakete«.

Die Abkürzung ICBM wird für Raketen mit Reichweiten zwischen 2500 und 8000 Kilometern verwendet. Sie bedeutet auf englisch »Intercontinental Ballistic Missile« oder auf deutsch »Interkontinentale, ballistische Rakete«.

Eine neue Abkürzung ist TCBM für Raketen zwischen 8000 und 20000 Kilometern Reichweite: »Transcontinental Ballistic Missile« oder »Transkontinentale, ballistische Rakete«. Mit 20000 Kilometern Reichweite kann man von jedem Punkt des Erdballs jeden anderen Punkt erreichen, denn der Umfang der Erde beträgt 40000 Kilometer. Mit der Entwicklung derartiger Raketen haben die Vereinigten Staaten Mitte 1958 begonnen.

In den englisch sprechenden Ländern hat sich, wie später auch bei uns, eine Einteilung der verschiedenen Raketentypen herausgebildet, die die Flugkörper nach Start- und Landeort unterscheidet. In vielen Fällen ist damit zugleich ihre Aufgabenstellung festgelegt.

Raketen, die von einem Flugzeug aus starten und auf einem anderen Flugzeug landen sollen, sind im militärischen Sinne natürlich Geschosse, die dem Luftkampf der Flugzeuge dienen. Diese kleinen, leichten, häufig durch Funkverfahren ferngesteuerten Raketen, sind vor allem dazu entwickelt, von Jägern aus auf angreifende Bomber verschossen zu werden. Die moderne Entwicklung der Luftkriegstechnik zeigt allerdings, daß der Schutz, der einem Land durch Jäger gewährleistet werden kann, relativ gering ist. Bei den hohen Fluggeschwindigkeiten der Bomber ist es nahezu unmöglich, die Jäger zum richtigen Zeitpunkt in die Nähe der Bomber zu bringen. Diese »Luft-Luftwaffen« werden mit der Zeit ebenso verschwinden wie die Jäger. In dem Augenblick, in dem Fernraketen großer Reichweite die Bomberflottillen ersetzen, werden sie ganz überflüssig.

Eine etwas längere Lebensdauer ist wahrscheinlich den »Luft-Bodenwaffen« vorauszusagen. Diese Waffen sind konsequente Weiterentwicklungen der gelenkten Bomben des zweiten Weltkrieges, die dazu dienen, bestimmte Ziele, »Punktziele«, vom Flugzeug aus zu bekämpfen. Die kleinsten von ihnen werden zur Panzerbekämpfung eingesetzt, die größten tragen Atombomben. Für die Bomber hat der Einsatz derartiger Waffen den großen Vorteil, daß sie im allgemeinen nicht dicht an das Ziel heranfliegen müssen, sondern die letzte Strecke von der ferngesteuerten, unbemannten Luft-Boden-Waffe zurückgelegt wird. Auch diese Waffen werden eines Tages überflüssig sein, dann nämlich, wenn die Bomber selbst als Mittel der Kriegführung ausscheiden.

Die beiden bisher beschriebenen Gruppen lassen wenig Ansätze zu einer friedlichen Verwendung der Raketentechnik erkennen. Anders ist es mit den nun folgenden Gruppen.

Die Gruppe der »Boden-Luft-Waffen« umfaßt, militärisch gesehen, die Flugabwehrraketen. Je schneller die Bombenflugzeuge werden und in je größerer Höhe sie fliegen, um so schwieriger wird der Jägereinsatz und um so notwendiger ist es, mit Raketen vom Boden gegen die anfliegenden Bomber zu kämpfen. Die Anwendung von Flugabwehrgeschützen hat schon im zweiten Weltkrieg in Anbetracht der Flugzeuggeschwindigkeiten keinen wesentlichen Erfolg gehabt – trotz der massierten Angriffe, mit denen in künftigen Kriegen vielleicht nicht mehr zu rechnen ist. Daher wird in allen Ländern der Entwicklung von Flugabwehrraketen größte Aufmerksamkeit gewidmet.

Wenn man sich konsequent an diese Einteilung hält, gehören auch die Raketen, die zur Erforschung der oberen Atmosphäre in die Höhe geschickt werden, die Raketen, die die Satelliten auf ihre Bahn bringen, und schließlich sogar die Raumschiffe der späteren Zukunft zu diesen Boden-Luft-Raketen. Alle diese Flugkörper zeigen jedoch sehr wenig Verwandtschaft mit den Flugabwehrraketen. Sie sind nämlich, im Gegensatz zu diesen, nicht wendig und rasch umsteuerbar, da sie ja kein sich bewegendes Ziel verfolgen. Im allgemeinen sind sie nicht von Flugabwehrraketen abgeleitet, sondern von den gleich zu besprechenden Boden-Boden-Waffen. Hier stoßen wir also auf eine Schwierigkeit bei der herkömmlichen, nur vom Militärischen getroffenen Einteilung.

Die weitaus größte und interessanteste Unterabteilung der Raketentechnik umfaßt die »Boden-Boden-Waffen« oder unmilitärisch die »Boden-Boden-Raketen«.

Häufig wird zu dieser Gruppe auch die Unterabteilung der ferngelenkten Flugzeuge gezählt. Mit solchen ferngelenkten Flugzeugen kann man sehr große Reichweiten erzielen, ohne den gewaltigen Treibstoffverbrauch in Kauf nehmen zu müssen, den die ballistischen Raketen erfordern. Vom militärischen Standpunkt aus betrachtet, ist der Hauptnachteil der ferngelenkten Flugzeuge, daß sie – theoretisch zumindest – einfach abgewehrt werden können, da sie sich ja wie Flugzeuge in relativ geringen Höhen über dem Erdboden und mit etwa konstanter Geschwindigkeit und Richtung bewegen.

Anders steht es mit den Wurfkörpern, also den eigentlichen ballistischen Fernraketen. In ihrer militärischen Verwendung handelt es sich um die gefährlichsten Waffen, die man sich vorstellen kann. Sie fliegen über sehr große Reichweiten, in Höhen, in denen man sie nicht erreichen kann,

Die Saat ging auf

und ihre Abwehr ist nahezu ausgeschlossen. Aber auch vom zivilen Standpunkt, in der Verwendung für die Forschung oder sogar für den Verkehr, haben diese Boden-Boden-Geräte eine große Zukunft. Sie sind die Vorstufe der Raumfahrt, sie sind die Voraussetzung der die Erde umkreisenden Satelliten, und aus ihnen wird sich einmal die Anwendung von Raketen für den Güterverkehr, vielleicht sogar für den Personenverkehr auf der Erde entwickeln. Natürlich gibt es in dieser Gruppe nicht nur Raketen größter Reichweite, sondern, wie wir vorhin schon gesehen haben, auch Raketen bis zu ganz kleinen Reichweiten herunter. Gerade in dieser Gruppe ist die Differenzierung nach Reichweiten und die Verschiedenheit der Geräte außerordentlich stark.

Die Aufzählung der Raketenarten wäre unvollständig, würden nicht noch die einzeln angewendeten Triebwerke erwähnt, die entweder einem Flugzeug oder auch einer Rakete das Starten erleichtern und die man deshalb als »Starthilfe« bezeichnet. Diese Triebwerke sind meist so aufgebaut, daß sie, nachdem sie ihre Funktion erfüllt haben, mit oder ohne Treibstofftanks abgeworfen werden können, damit sie das Gewicht des Flugzeuges oder der Rakete auf dem weiteren Fluge nicht beeinträchtigen.

Zum Abschluß nennen wir noch einmal die Raketentypen, die man bei der Einteilung nach Start- und Landeort unterscheidet, mit den dazugehörigen englischen Fachausdrücken:

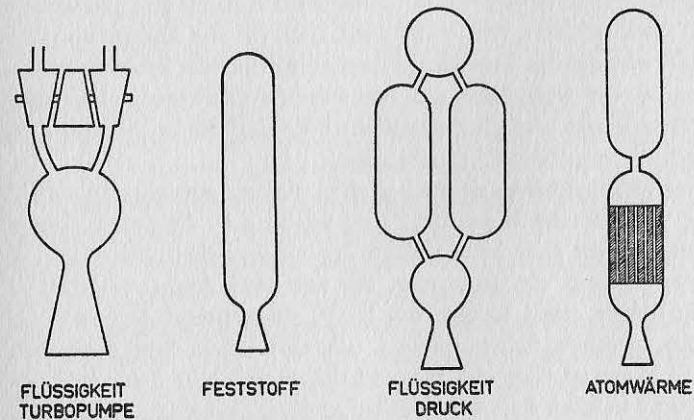
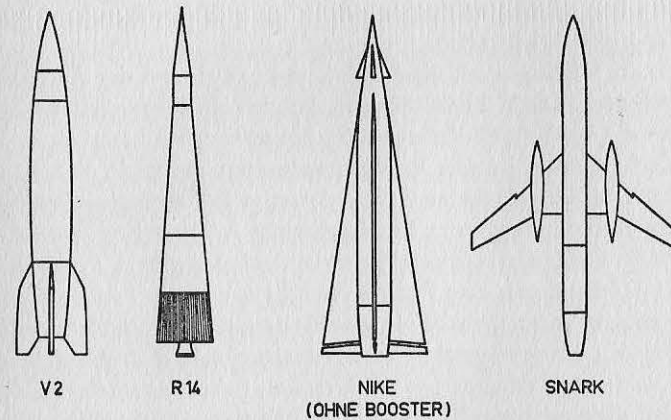
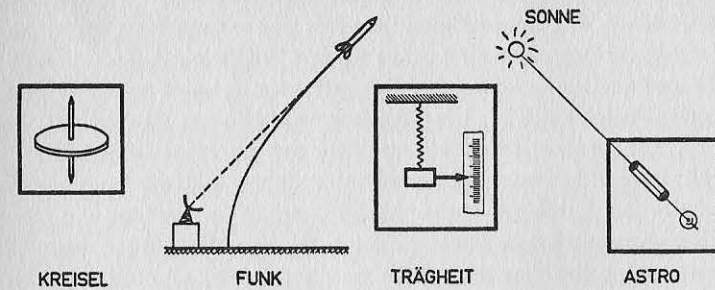
Luft-Luft-Waffen	Air-to-Air-Missiles
Luft-Boden-Waffen	Air-to-Ground-Missiles
Boden-Luft-Waffen	Ground-to-Air-Missiles
Boden-Boden-Waffen	Ground-to-Ground-Missiles
Starthilfen	Booster

Gibt diese Gliederung auch einen ersten Überblick, so reicht sie doch nicht aus, Ordnung in den Wirrwarr der vielen, jetzt existierenden Raketentypen zu bringen. Wir wollen daher versuchen, uns klarzumachen, wie eine Einteilung nach den technischen Lösungen, die für die einzelnen Raketentypen gefunden wurden, aussehen würde.

Die drei Hauptteile einer jeden Rakete sind die Zelle, das Triebwerk und die Steuerung.

Die Zelle ist sozusagen das Gerüst, in das die anderen Teile der Rakete eingebaut werden und das sie trägt. Unterschiede der verschiedenen Zellenformen zeigen sich deutlich am Umriß der Rakete. Die Silhouette der V 2 ist im Bewußtsein der Öffentlichkeit zur Standard-Silhouette einer Rakete geworden. Sie besitzt einen langen, schlanken Körper mit

Teile der Rakete



einem Flossenheck, das zur Stabilisierung während des Fluges durch die Luft dient. Von dieser Außenform her gibt es zwei Möglichkeiten der Weiterentwicklung. Die eine führt zu den ballistischen Fernraketen für große und größte Reichweiten. Ein extremes Beispiel zeigt die Außenform des Projektes R 14: ein flügelloser Kegel ohne Flossen und Tragflächen. Die andere Entwicklung führt zur Ausrüstung der Zelle mit Flügeln kleiner Spannweite, die im wesentlichen dazu dienen, die Rakete innerhalb der normalen Atmosphäre steuerbar zu machen, wie es etwa für Flugabwehrraketen notwendig ist. Werden die Flügel weiter ausgebaut, so kommt man schließlich zu einer Form, die einem modernen Schnellflugzeug ähnelt. Diese Form wird bei Raketen angewendet, die nach ihrem Aufstieg längere Zeit in der Lufthülle bleiben sollen, oder bei den schon erwähnten flugzeugähnlichen unbemannten Lenkkörpern für sehr große Reichweiten.

Einer der wichtigsten Teile der Rakete ist zweifellos der Antrieb oder das Triebwerk. Die V 2 hatte für den Antrieb ein Flüssigkeitstriebwerk, bei dem die beiden zur Verbrennung kommenden Flüssigkeiten durch eine Kreiselpumpe in den Verbrennungsraum gefördert wurden. Bei Feststoff- oder Pulverraketen ist eine derartige Förderung nicht möglich, und der Verbrennungsraum ist gleichzeitig Aufbewahrungsraum aller Treibstoffe. Doch auch bei den Flüssigkeitsraketen gibt es Typen, die auf eine Förderung durch eine Pumpe verzichten und die Treibstoffe durch Druck auf die Vorratsbehälter in den Verbrennungsraum fördern.

Außer den heute allgemein verwendeten chemischen Antrieben existieren – auf dem Papier oder in allerersten Laboratoriumsversuchen – Antriebe, die eine wesentlich höhere Leistung erreichen wollen. Es liegt nahe, die Atomenergie, die ja bereits zum Antrieb von größeren Fahrzeugen, wie Schiffen, verwendet wird, auch für den Antrieb von Raketen zu Hilfe zu nehmen. Darüber hinaus gibt es bereits Projekte und Überlegungen, die weit über die Atomwärme-Triebwerke hinausführen. Iontriebwerke und Photonentriebwerke sind die Stichworte für diese heute noch utopischen Antriebsarten.

Der Nichtfachmann denkt bei einer Rakete zunächst an das Triebwerk, vielleicht noch an die Zelle, weil sie ja die äußere Form bestimmt, vergißt aber häufig einen der wesentlichsten Bestandteile der Rakete, nämlich die Steuerung. Sie hat zwei Aufgaben. Einmal soll sie die Rakete stabil halten, das heißt, sie während der Antriebsbahn hindern, größere Schwingungen um den Schwerpunkt auszuführen oder sich gar zu überschlagen und damit aus ihrer Bahn zu kommen. Dies wird in allen Raketen durch eine Kreiselanordnung erreicht. Die

zweite Aufgabe der Steuerung ist die Einhaltung einer bestimmten Genauigkeit im Ziel.

Auch die Steuerung hat zahllose Entwicklungsstufen durchgemacht und wird in vielen Varianten in den verschiedenen Raketen angewendet. Die V 2, die während des Krieges verschossen wurde, hatte meist eine reine Kreiselsteuerung, das heißt, die einzelnen Raketen besaßen ähnlich wie ein Schiff auf dem Ozean eine Art Kreiselkompaß, der der Rakete den Kurs angab, nach dem sie zu fliegen hatte. Schon während des Krieges hat man sich um eine Verbesserung der Treffgenauigkeit der Raketen bemüht, indem man sie mit einer Radaranlage vom Boden aus steuerte. Derartige Radaranlagen sind natürlich unerlässlich, wenn die Rakete, wie zum Beispiel die Flugabwehrrakete, ein bewegtes Ziel verfolgen muß. Eine auch schon während des Krieges ausgearbeitete und verwendete Methode, die Geschwindigkeit einer Rakete festzulegen, besteht in der Anwendung eines bordfesten »Trägheitsmessers«.

Dem Seemann und dem Flugzeugführer ist die Astronavigation, also die Steuerung nach den Sternen, geläufig. Einige moderne Raketen werden durch automatische Geräte nach den Sternen gelenkt.

Die Aufgaben, die den drei Hauptteilen einer jeden Rakete zufallen, sind, wie aus dieser kurzen Übersicht hervorgeht, auf verschiedene Weise zu verwirklichen. Für jeden dieser Teile gibt es eine Reihe von technischen Lösungen, und in den einzelnen Raketentypen sind wiederum Teile verschiedener Lösungsart kombiniert. Ein Versuch, die Vielfalt der Raketen nach diesen Merkmalen einzuteilen, scheint nicht zum Ziel zu führen.

Eine Typenreihe

Am Ende unserer Überlegungen über die Systematik von Raketen müssen wir also feststellen, daß weder die Einteilung nach den Leistungen noch die nach den Start- und Landeorten noch die nach den verwendeten technischen Lösungen uns ganz befriedigt. Wir werden daher als Ordnungsrichtschnur in der folgenden Betrachtung einiger typischer Vertreter der Raketentechnik einfach die Reichweite nehmen. In dieser natürlichen Ordnung sollen vor uns einige Raketen aufmarschieren, die als Repräsentanten ganzer Gruppen gelten können. Das Wort »marschieren« paßt hier gut, der heutigen Lage entsprechend sind es zumeist militärische Vertreter der Raketengilde.

MOSQUITO

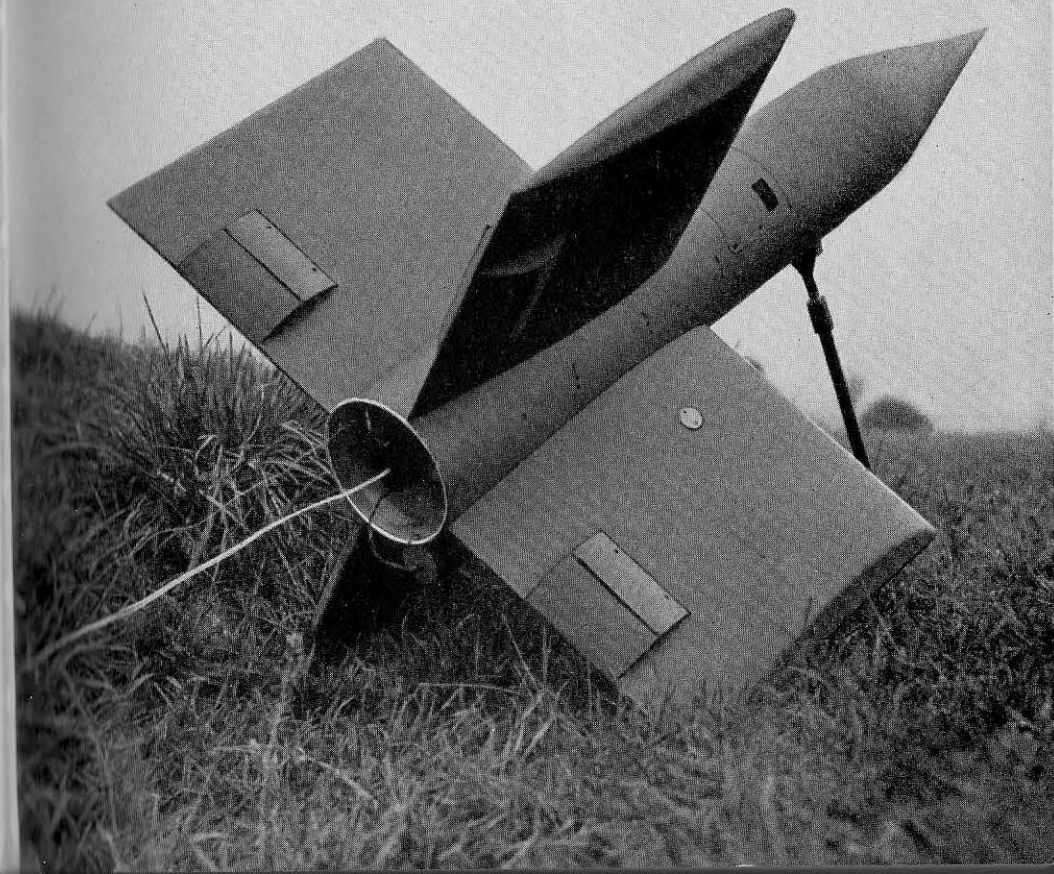
Die kleinsten militärisch verwendeten Raketen dienen der Panzerbekämpfung. Schon während des Krieges hatte sich eine Reihe von Raketengeschossen herausgebildet, die leicht transportiert werden konnten und nach Sicht ungesteuert auf Panzer abgeschossen wurden. Um die Gefährdung des Schützen zu vermindern, mußte die Reichweite dieser Waffen vergrößert werden, ohne die Treffgenauigkeit zu verringern. Das aber bedeutete den Übergang zu gesteuerten Waffen.

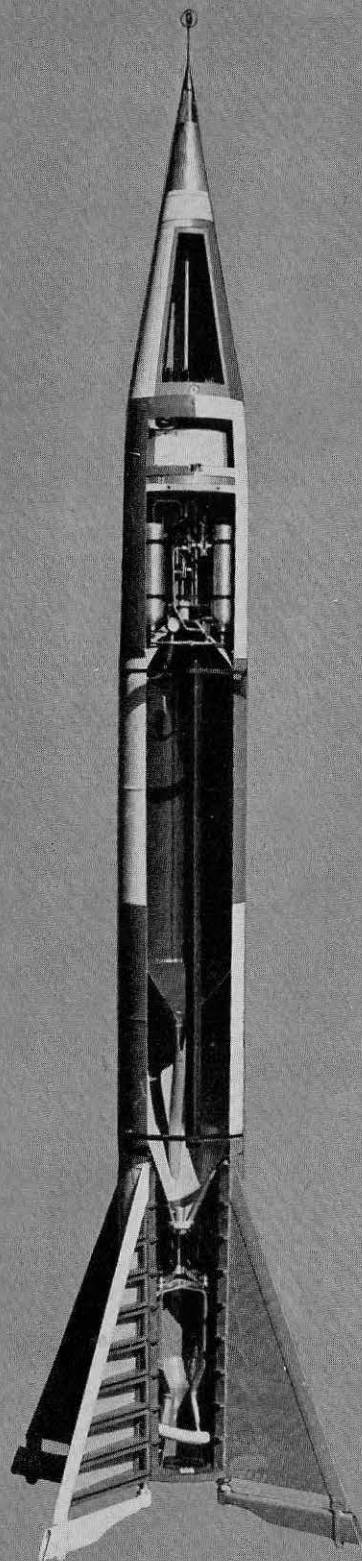
Wir zeigen als Beispiel die Mosquito, die aus der »Cobra«, einer Gemeinschaftsentwicklung der Schweizer Firmen Contraves/Oerlikon und der deutschen Firma Bölkow entstanden ist. Sie hat vier, während des Transportes abgenommene und kurz vor dem Start montierte Tragflügel, die ihr einen horizontalen Flug ermöglichen und außerdem die Manövrierfähigkeit erhöhen. Die Rakete besitzt Feststofftriebwerke, die ihr die Geschwindigkeit eines Sportflugzeuges erteilen. Ein Behälter mit zwei Raketen kann bequem von einem Mann getragen werden. Ihre Reichweite ist durch die Steuerung begrenzt. Für einen stabilen Flug sorgt eine eingebaute Kreiselsteuerung, der Kreisel wird vor dem Start durch eine kleine Pulverladung »aufgezogen«. Die Fernlenkung erfolgt nach Sicht, die Steuerkommandos werden über eine Drahtverbindung zur Rakete geleitet. Der Verbindungsdraht befindet sich im Inneren der Rakete in einer Spule und spult sich während des Fluges laufend ab.

Solange mit Erdkämpfen im Kriege gerechnet werden muß, also wohl solange es überhaupt Kriege geben wird, werden diese Waffen ihre Bedeutung nicht verlieren.

Daten:

Bezeichnung:	Mosquito
Entwickler:	Contraves/Oerlikon, Schweiz
Startgewicht:	11 kg
Marschgeschwindigkeit:	85 m/s = 306 km/std
Reichweite:	2000 m
Länge:	0,9 m
Spannweite:	0,6 m
Treibstoff:	Feststoff
Stabilität:	Kreisel
Lenkung:	Drahtkommandolenkung
Steuerorgane:	Luftruder





VÉRONIQUE

Raketen sind das einzige Mittel, mit dem man die oberen Schichten der Atmosphäre erforschen kann. Untersuchungen der Atmosphäre mit Raketen werden auch dann noch wichtig sein, wenn der Reiz der Neuheit verloren ist, wenn also die grundsätzlichen Fragen beantwortet sind. Viele Erkenntnisse lassen sich nur durch ungezählte Versuche oder über Jahrzehnte laufende Messungen gewinnen.

In Frankreich wurde vom Laboratorium für ballistische und aerodynamische Untersuchungen in Vernon unter der Leitung von ehemaligen Peenemündern für diesen Zweck die Véronique entwickelt, von der unser Foto die Ausführung N zeigt.

Die Rakete ist ungesteuert, daher muß die Zelle aerodynamisch stabil sein. Das erklärt die verhältnismäßig großen Heckflossen. Das Mittelstück der Zelle besteht aus den beiden Treibstoffbehältern. Im unteren zylindrischen Teil der Zelle ist die Brennkammer untergebracht. Oberhalb der Treibstoffbehälter befinden sich die Druckflaschen, mit denen die Treibstoffe in die Brennkammer gedrückt werden. Die hohle Spitze dient zur Aufnahme der Meßgeräte für die Untersuchungen, während der Raum zwischen Spitze und Druckflaschen von Fallschirmen ausgefüllt ist, die die am Gipfelpunkt der Bahn abgesprengte Spitze zum Erdboden tragen.

Um die Rakete in den ersten Sekunden nach dem Start stabil zu halten, bleibt sie kurzzeitig über Lenkarme und Seile mit der Startstelle verbunden.

Daten:

Bezeichnungen:	Véronique Typ N, N-A oder AGI
Entwickler:	Laboratoire des Recherches Ballistiques et Aérodynamiques. Vernon, Frankreich
Startgewicht:	1435 kg bis 1342 kg (je nach Ausführung)
Brennschlußgewicht:	370 kg bis 280 kg
Brennschlußgeschwindigkeit:	1400 m/s bis 1900 m/s = 5000 km/std bis 6800 km/std
Gipfelhöhe:	115 km bis 220 km
Gesamtlänge:	7,30 m
Durchmesser:	0,55 m
Flossenspannweite:	1,35 m
Schub:	4000 kg
Brenndauer:	45 s bis 49 s
Treibstoffe:	Terpentinöl und Salpetersäure
Fördersystem:	Druckförderung
Steuerung:	ungesteuert

HONEST JOHN

Die großkalibrige Artillerie-Rakete der Vereinigten Staaten »Honest John« ist ein eindrucksvoller Beweis dafür, wie gut sich Feststoffraketen für kürzere Entfernungen einsetzen lassen. Dem Honest John fällt etwa die gleiche Aufgabe zu wie den schweren Mörsern in den beiden letzten Weltkriegen, also der Transport großer Sprengkörper über Entfernungen bis etwa 30 Kilometer.

Im Jahre 1950 begann die Firma Douglas Aircraft Company in Zusammenarbeit mit der Army Ordnance die Entwicklung dieser Rakete, und nach einigen Vorversuchen unter Aufsicht des Redstone Arsenal in Huntsville konnten bereits im August 1951 die ersten Geräte vorgeführt werden. Die ersten Versuche waren so erfolgreich, daß man die Erprobung sehr schnell abschließen und mit der Serienfertigung beginnen konnte.

Die Honest John ist eine ballistische Feststoffrakete, die in der Lage ist, auch einen Atomsprengkörper zu tragen. Die größeren Baugruppen der Rakete werden in der Fabrik montiert und an die Startstellen geliefert. Die endgültige Montage findet erst an der Startstelle selbst statt. Der Abschub der Raketen erfolgt von einer Startrampe, die entweder auf einem Transportfahrzeug angebracht ist oder selbständig im Gelände aufgebaut werden kann. Obwohl die Rakete ungesteuert ist, erreicht man mit ihr erstaunliche Treffgenauigkeiten. Versuche in Japan über eine Schußweite von 10 Kilometern ergaben nur 40 Meter Streuung.

Daten :

Bezeichnung:	Honest John (Ehrlicher Johann) oder M-30
Entwickler:	Douglas Aircraft Company, USA
Startgewicht:	2720 kg
Brennschluß- geschwindigkeit:	500 m/s = 1800 km/std
Reichweite:	32 km
Länge:	8,20 m
Durchmesser:	0,76 m
Flossenspannweite:	2,40 m
Antrieb:	Feststofftriebwerk
Steuerung:	ungesteuert





NIKE

Die Abwehr von Bombenflugzeugen erfordert Raketen, die vom Boden aus in sehr kurzer Zeit in die erforderliche Höhe aufsteigen können. Außerdem müssen sie wendig sein, um den beweglichen Zielen folgen zu können.

Die Raketen der Nike-Serie, die Nike-Ajax, die Nike-Hercules und die Nike-Zeus, wurden von der Western Electric in den Vereinigten Staaten entwickelt. An dieser Stelle soll nur die Nike-Hercules beschrieben werden.

Sie ist wie ihre Schwestern eine zweistufige Rakete. Im Gegensatz zur Ajax verwendet die Nike-Hercules in beiden Stufen Feststofftriebwerke. Der Start erfolgt senkrecht. Der zum Start verwendete Antrieb setzt sich aus vier Feststoffantrieben zusammen, beschleunigt die Rakete auf Überschallgeschwindigkeit und wird nach Ausbrennen abgeworfen. Stabilität und Steuerfähigkeit werden durch die schmalen Dreieckflügel der zweiten Stufe und die Luftruder in beiden Stufen garantiert. Die Rakete kann einen Atomsprengkopf tragen.

Zu einer Nike-Startstelle gehört eine etwa 2 bis 3 Kilometer entfernt aufgebaute Leitstelle, in der die Radargeräte für die Verfolgung des Zieles und für die Führung der Raketen aufgebaut sind.

Daten :

Bezeichnung:	Nike-Hercules oder XSAM-A-25
Entwickler:	Army Ordnance Corps, Bell Telephone Labs, Western Electric und Douglas Aircraft, sämtlich in den USA
Startgewicht:	4500 kg
Geschwindigkeit:	980 m/s = 3500 km/std
Reichweite:	120 km
Länge der 2. Stufe:	8,25 m
Länge beider Stufen zusammen:	12,70 m
Durchmesser der 2. Stufe:	0,77 m
Spannweite der Tragflächen:	2,50 m
Antrieb:	Feststofftriebwerke in beiden Stufen
Lenkung:	Radar-Fernlenkung mit Elektronenrechner am Boden
Steuerorgane:	Luftruder in der 1. und 2. Stufe

REDSTONE

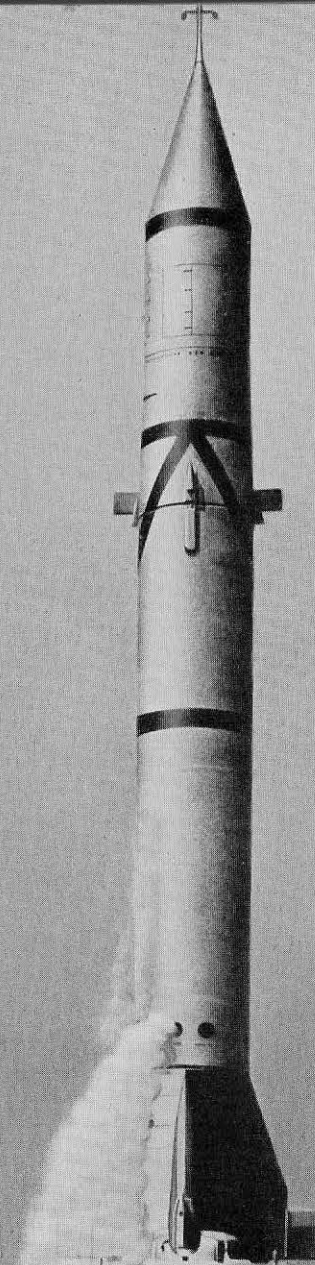
Die »Kurzstrecken«-Raketen ergänzen das militärische Arsenal für Schußweiten, die von Geschützen nicht mehr erreicht werden können. Es war der Wunsch nach einer solchen Ergänzung, der die deutsche politische Führung 1937 veranlaßte, in einem für die damalige Zeit ungeheuren Umfang Mittel für die Raketenentwicklung frei zu machen.

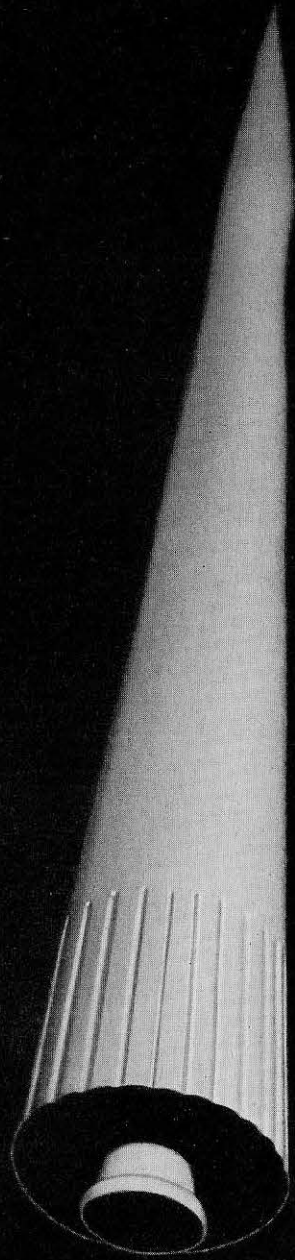
Die Redstone ist der geradlinige Abkömmling der deutschen V2. Sie wurde entwickelt von der Guided Missiles Development Division (Lenkgeschöß-Entwicklungsabteilung) in Redstone, USA, unter der Leitung von Professor Dr. von Braun.

Der äußerliche Unterschied gegenüber der V2 besteht darin, daß die Maße geringfügig vergrößert wurden, um die Leistung des Gerätes heraufzusetzen, und daß man einfachere Formen wählte. Während die V2 in aerodynamischer Hinsicht sehr sorgfältig durchgebildet war, hat man bei der Redstone darauf verzichtet. So ist die Spitze der Redstone ein einfacher Kreiskegel, ihr Körper ein glatter Zylinder. Auch die Flossen weisen keinerlei gekrümmte Flächen auf, sondern sind aus ebenen Stücken zusammengesetzt. Die Rakete hat ein Flüssigkeitstriebwerk, das offensichtlich eine verbesserte Version des V2-Triebwerkes darstellt. Die Steuerung, eine Trägheitssteuerung, ist von Bodenstationen unabhängig, da sie den Funkweg nicht benützt. Die Rakete ist bereits im Truppeneinsatz und kann sowohl normale als auch atomare Sprengköpfe tragen.

Daten:

Bezeichnung:	Redstone oder Jupiter I oder XSSM-A-14
Entwickler:	Army Ballistic Missiles Agency, USA
Hersteller:	Chrysler Co., USA
Startgewicht:	22 000 kg
Brennschlußgeschwindigkeit:	1800 m/s = 6500 km/std
Reichweite:	400 km
Länge:	19 m
Durchmesser:	1,77 m
Schub:	34 000 kg
Antrieb:	Flüssigkeitstriebwerk
Treibstoffe:	Alkohol und Sauerstoff
Fördersystem:	Turbopumpen
Steuerung:	Trägheitssteuerung und -lenkung
Steuerorgane:	Strahl- und Luftruder





R 14

Während Raketen mit Reichweiten von einigen hundert Kilometern noch zu den taktischen Waffen gehören, ist die Klasse der Raketen um 2500 Kilometer Reichweite (IRBM) die wichtigste für strategische Überlegungen.

Die ballistische Rakete R 14 wurde 1948 bis 1950 von einem deutschen Kollektiv in der UdSSR als Projekt ausgearbeitet und durch experimentelle Untersuchungen gestützt. Wie weit dieses Projekt die russische Raketenentwicklung beeinflusst hat, läßt sich schwer abschätzen.

Die äußere Form der R 14 ist ein schlanker Kreiskegel ohne Tragflächen oder Flossen. Die Tragkonstruktion besteht aus einem großen Behälter, der durch einen Zwischenboden in die beiden Abteilungen für Brennstoff und Sauerstoff geteilt ist. Beide Behälterhälften stehen unter einem geringen Überdruck und erhalten hierdurch ihre Steifigkeit etwa wie eine aufgeblasene Papiertüte. Der obere Behälterrand trägt den Nutzlastzylinder, der durch eine ganz leichte, leere Vorspitze abgedeckt ist. Der unterste Boden des Treibstoffbehälters ist ein stumpfer Kegel, an dessen Mitte das Triebwerk angreift. Das Triebwerk besteht aus der Brennkammer und den beiden Turbopumpen für die Treibstoffe.

Das Heck ist eine Blechschürze, auf der die Rakete zum Start aufgestellt wird. Die Steuerung der Rakete erfolgt durch das Schwenken des Triebwerkes in beiden Richtungen.

Daten:

Bezeichnung:	Projekt R 14
Entwickler:	Deutsches Raketenkollektiv in der UdSSR
Startgewicht:	73 000 kg
Brennschlußgewicht:	7 000 kg
Brennschlußgeschwindigkeit:	4500 m/s = 16 200 km/std
Reichweite:	3000 km
Länge:	23,5 m
Größter Durchmesser:	2,7 m
Schub:	100 000 kg
Treibstoffe:	Alkohol oder Petroleum und Sauerstoff
Fördersystem:	Turbopumpen
Steuerung:	Integrierende Wendezeiger
Lenkung:	Funkfernlenkung
Steuerorgane:	Schwenkbares Triebwerk und Abgasdüsen

ATLAS

Die Klasse der ICBM, der Interkontinentalen Ballistischen Raketen, mit Reichweiten von etwa einem Viertel des Erdumfanges muß heute noch als die Klasse der »absoluten« Waffen gelten, gegen die es keine Verteidigung gibt. Die hohen Kosten jedes einzelnen Schusses führen zwangsweise zur ausschließlichen Verwendung von Atomsprenkköpfen.

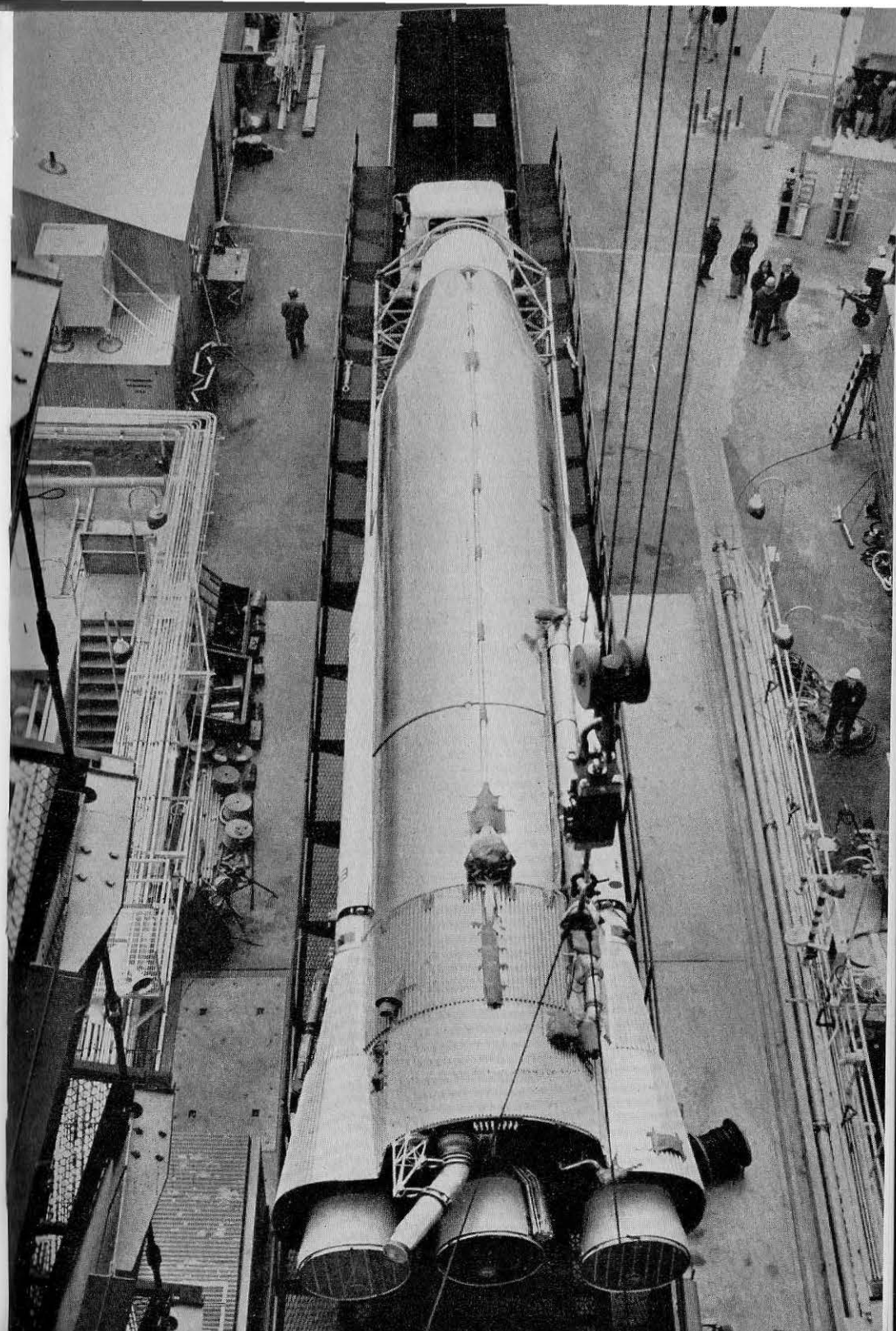
Die interkontinentale Kampfrakete »Atlas« ist in der Lage, eine Wasserstoffbombe zu tragen. Sie wurde in den Jahren 1953 bis 1958 von der Convair Astronautics USA entwickelt, einer Firma also, die den Namen der Raumschiffahrt bereits im Firmentitel trägt. Ihre Konstruktion weicht in vielen Punkten von konventionellen Formen ab, und es gibt eine Anzahl überraschender Übereinstimmungen in den Details mit dem Projekt R 14. Das Haupttriebwerk der Rakete wird beim Start von zwei Starthilfe-Triebwerken unterstützt, die danach abgeworfen werden. Hierdurch wird die hervorragende Flugleistung erzielt.

Wie bei der R 14 sind die Treibstoffbehälter druckstabilisiert und verleihen der Zelle die Festigkeit. Die Nutzlast ist auch hier mit einer stumpfen Nase versehen, um die Eintaucherhitzung klein zu halten. Die Rakete wird durch die schwenkbare Brennkammer der zweiten Stufe und zwei Hilfsdüsen gesteuert.

Obwohl die Atlas als Waffe entwickelt wurde, wird mit ihr bereits während der Versuchsflüge ein umfangreiches Forschungsprogramm abgewickelt. So wurde z.B. um die Jahreswende 1958/59 eine ganze Atlas-Rakete als Satellit auf die Bahn um die Erde geschickt.

Daten:

Bezeichnung:	Atlas oder SM - 65
Entwickler:	Convair Astronautics, USA, im Auftrage der US-Luftwaffe
Startgewicht:	110 000 kg
Brennschlußgeschwindigkeit:	6700 m/s = 24 000 km/std
Reichweite:	10 000 km
Länge:	23 m
Durchmesser:	3 m
Schub, 1. und 2. Stufe:	180 000 kg
Schub, 2. Stufe allein:	45 000 kg
Treibstoffe:	Petroleum und Sauerstoff
Fördersystem:	Turbopumpen
Lenkung:	Funkfernlenkung (später Trägheitssteuerung)
Steuerorgane:	Schwenkbare Triebwerk und Hilfsdüsen





NAA X-15

Das Raketenflugzeug NAA X-15 muß als Vorläufer der bemannten Raumfahrzeuge angesehen werden. Sein Aktionsbereich liegt weit über dem atmosphärischen Gürtel der Erde.

Mit den Vorüberlegungen für dieses Forschungsgerät wurde bereits 1952 begonnen. Die Entwicklung wurde 1955 von der North American Aviation aufgenommen und führte zu den Versuchsflügen Anfang 1959. Aufgabe des Versuchsflugzeuges ist vor allem die Erforschung der Flugbedingungen in den höchsten Atmosphärenschichten. Hierzu zählt neben den technischen Problemen auch die Frage der Wirkung solcher Flüge auf den menschlichen Organismus.

Die Zelle besteht aus Sonderwerkstoffen, die in einem großen Temperaturbereich ihre guten Festigkeitseigenschaften beibehalten. Man rechnet bei der Landung mit Temperaturen zwischen 500 und 1000 Grad Celsius an der Außenhaut. Daher ist die Kabine für den Piloten hermetisch geschlossen und wird von einer Klimaanlage mit Atemluft versorgt. Um die Sicherheit zu erhöhen, trägt der Pilot außerdem noch einen Druckanzug, der mit einer eigenen Sauerstoffanlage versehen ist.

Entsprechend seiner Aufgabenstellung trägt die X-15 über eine halbe Tonne Meß- und Registriergeräte mit sich. Die Zahl der Meßpunkte für Druck- und Temperaturmessungen geht in die Hunderte.

Da ein großer Teil der Bahn der X-15 im luftleeren Raum verläuft, wird die Steuerung ähnlich wie bei den großen Fernraketen durch Hilfsdüsen vorgenommen.

Für die Landung ist das Flugzeug mit ausfahrbaren Kufen und einem Bugrad ausgerüstet.

Daten:

Bezeichnung:	NAA X-15
Entwickler:	North American Aviation Inc. USA
Startgewicht:	14200 kg
Höchstgeschwindigkeit:	1600 m/s = 5800 km/std
Gipfelhöhe:	160 km
Länge:	15,2 m
Spannweite:	6,7 m
Schub:	23000 kg
Treibstoffe:	Ammoniak und Sauerstoff
Steuerorgane:	Hilfsdüsen

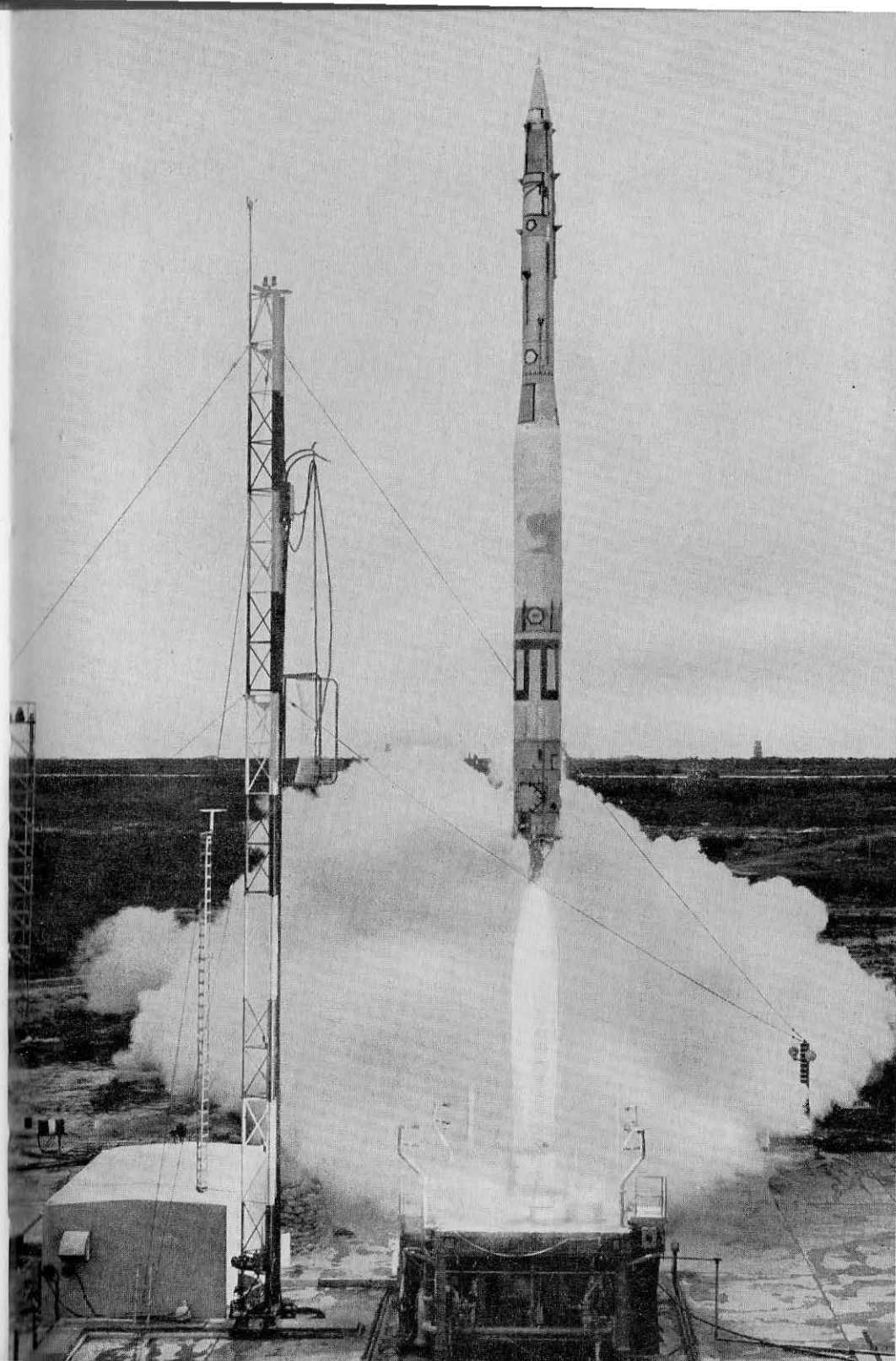
VANGUARD

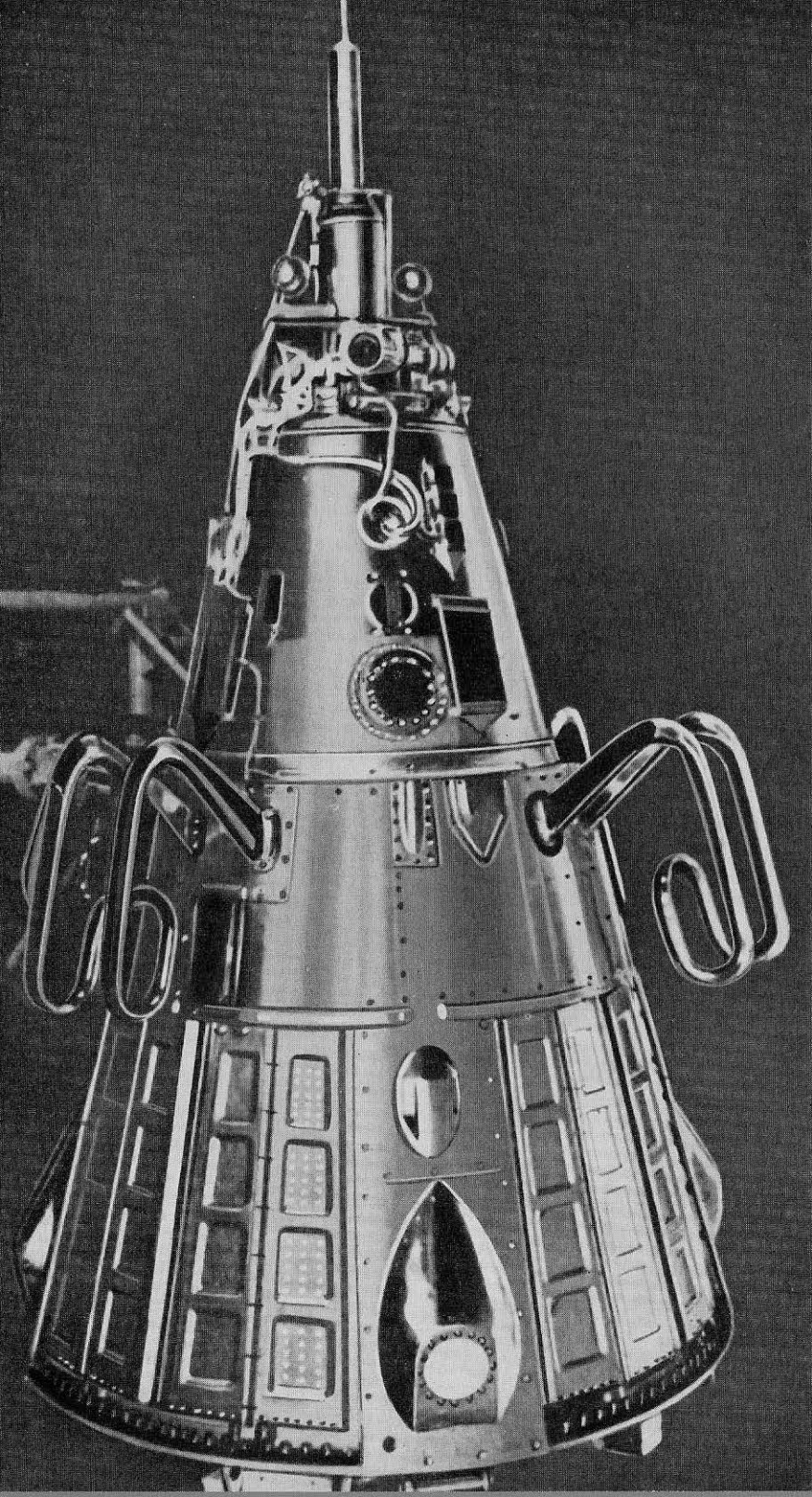
Weniger mächtig und weniger imposant als die großen militärischen Raketen, dabei im Grunde leistungsfähiger sind die Raketen, mit denen Satelliten auf ihre Bahn transportiert werden.

Die meisten Einzelheiten sind über die Vanguard bekannt, die im Auftrage der US-Luftwaffe von Glenn L. Martin entwickelt wurde. Mit ihr wurden einige der amerikanischen Satelliten auf ihre Bahn um die Erde gebracht. Die lange, schlanke Rakete ist aus drei Stufen aufgebaut. Erste und zweite Stufe werden von Flüssigkeitstriebwerken, die dritte Stufe von einem Feststofftriebwerk angetrieben. Die Steuerung der ersten und zweiten Stufe erfolgt durch schwenkbare Triebwerke. Kreisel- und Funkgeräte sind in der zweiten Stufe untergebracht. Die dritte Stufe, die erst gezündet wird, wenn die Bahn in die Horizontale umgebogen ist, ist ungesteuert. Damit sie ihre Richtung beibehält, wird sie vor der Zündung in Rotation versetzt.

Daten :

Bezeichnung:	Vanguard
Entwickler:	Glenn L. Martin, USA
Startgewicht:	10 200 kg
Gewicht der 2. und 3. Stufe:	2 200 kg
Gewicht der 3. Stufe mit Satellit:	225 kg
Gewicht des Satelliten:	9,3 kg
Brennschlußgeschwindigkeit der 1. Stufe:	1 680 m/s = 6 050 km/std
Brennschlußgeschwindigkeit der 2. Stufe:	4 100 m/s = 14 800 km/std
Brennschlußgeschwindigkeit der 3. Stufe:	8 000 m/s = 29 000 km/std
Brennschlußhöhe der 1. Stufe:	56 km
Brennschlußhöhe der 2. Stufe:	210 km
Brennschlußhöhe der 3. Stufe:	480 km
Länge der dreistufigen Rakete:	22 m
Durchmesser der 1. Stufe:	1,14 m
Durchmesser der 2. Stufe:	0,82 m
Schub der 1. Stufe:	12 500 kg
Schub der 2. Stufe:	3 400 kg
Schub der 3. Stufe:	2 200 kg
Treibstoffe der 1. Stufe:	Petroleum und Sauerstoff
Treibstoffe der 2. Stufe:	Dimethylhydrazin und Salpetersäure
Treibstoffe der 3. Stufe:	Feststoff
Steuerung:	Kreisel und Beschleunigungsmesser
Lenkung:	ohne Fernlenkung
Steuerorgane:	Schwenkbare Triebwerke und Düsen





SPUTNIK III

Alle bisher aufgezählten Raketen haben gemeinsam, daß sie nur für sehr kurze Zeit die Erdoberfläche verlassen. Flugkörper für sehr lange Flugzeit müssen zwei Bedingungen erfüllen: sie müssen weit außerhalb der dichten Lufthülle der Erde kreisen, und ihre Geschwindigkeit muß etwa 8 km/sek betragen – sie müssen also zu Satelliten der Erde werden.

Es fällt schwer, aus der großen Familie der Satelliten, die die Erde umkreisen oder umkreist haben, einen als kennzeichnend auszuwählen. Wir haben uns die Sache leichtgemacht und einfach nach dem Gewicht der im Satelliten beförderten Nutzlast ausgewählt.

Der kegelförmige Sputnik III wurde am 15. Mai 1958 auf die Umlaufbahn gebracht. Wie die meisten der im Geophysikalischen Jahr gestarteten Satelliten ist er Träger für eine Anzahl wissenschaftlicher Meßinstrumente. Strahlenmeßgeräte und solche für die Zusammensetzung der Lufthülle sind eingebaut. Elektrische und magnetische Felder werden gemessen. Schließlich darf bei einem Satelliten, der in so großer Höhe fliegt, ein Gerät zur Registrierung kleinster Meteorite nicht fehlen. Um den Betrieb nicht von der Lebensdauer eingebauter elektrischer Batterien abhängig zu machen, sind Sonnenbatterien vorgesehen, die das Licht der Sonne in elektrischen Strom verwandeln. Alle Daten, die der Sputnik III auf seiner Bahn sammelt, werden beim Überflug der Meß- und Registrierstationen über Funksender auf die Erde heruntergesendet, dort registriert und später ausgewertet.

Daten:

Bezeichnung:	1958 Delta oder Sputnik (Trabant) III.
Entwickler:	UdSSR
Start:	15. Mai 1958
Niedrigste Höhe der Bahn:	250 km
Größte Höhe der Bahn:	1880 km
Umlaufzeit:	106 Minuten
Geschätzte Lebensdauer:	200 Jahre
Gesamtgewicht:	1327 kg
Gewicht der Instrumente:	968 kg
Länge:	3,57 m
Größter Durchmesser:	1,73 m

RAUMSTATION

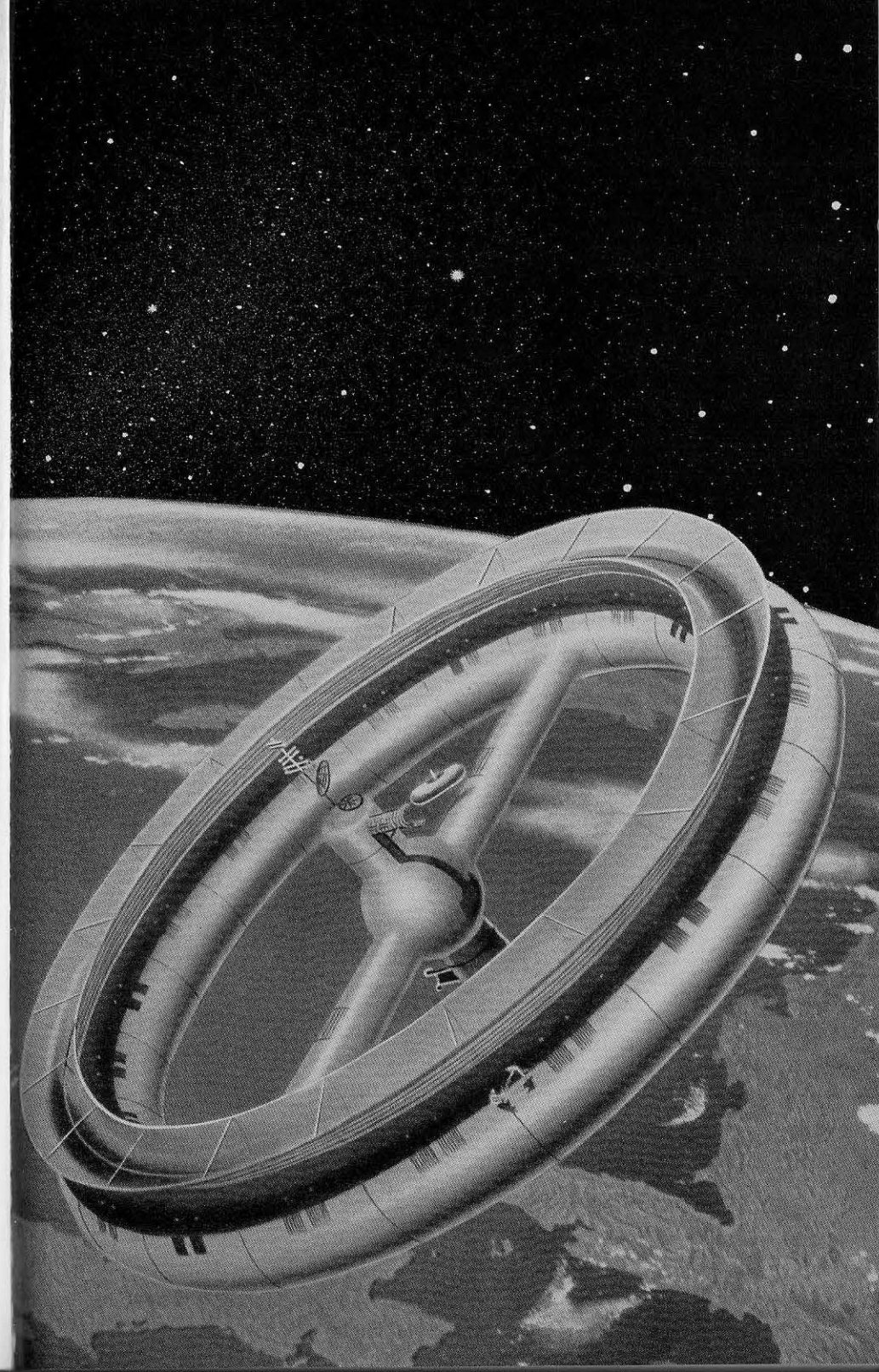
Den unbemannten Satelliten werden eines Tages bemannte folgen. Solche bemannten Außenstationen haben die Propheten und Vorkämpfer der Raumfahrt von jeher intensiv beschäftigt, da sie ja nicht nur ein wertvolles Hilfsmittel für Beobachtung und Forschung, sondern ein notwendiger Schritt für die Weltraumfahrt selbst sind.

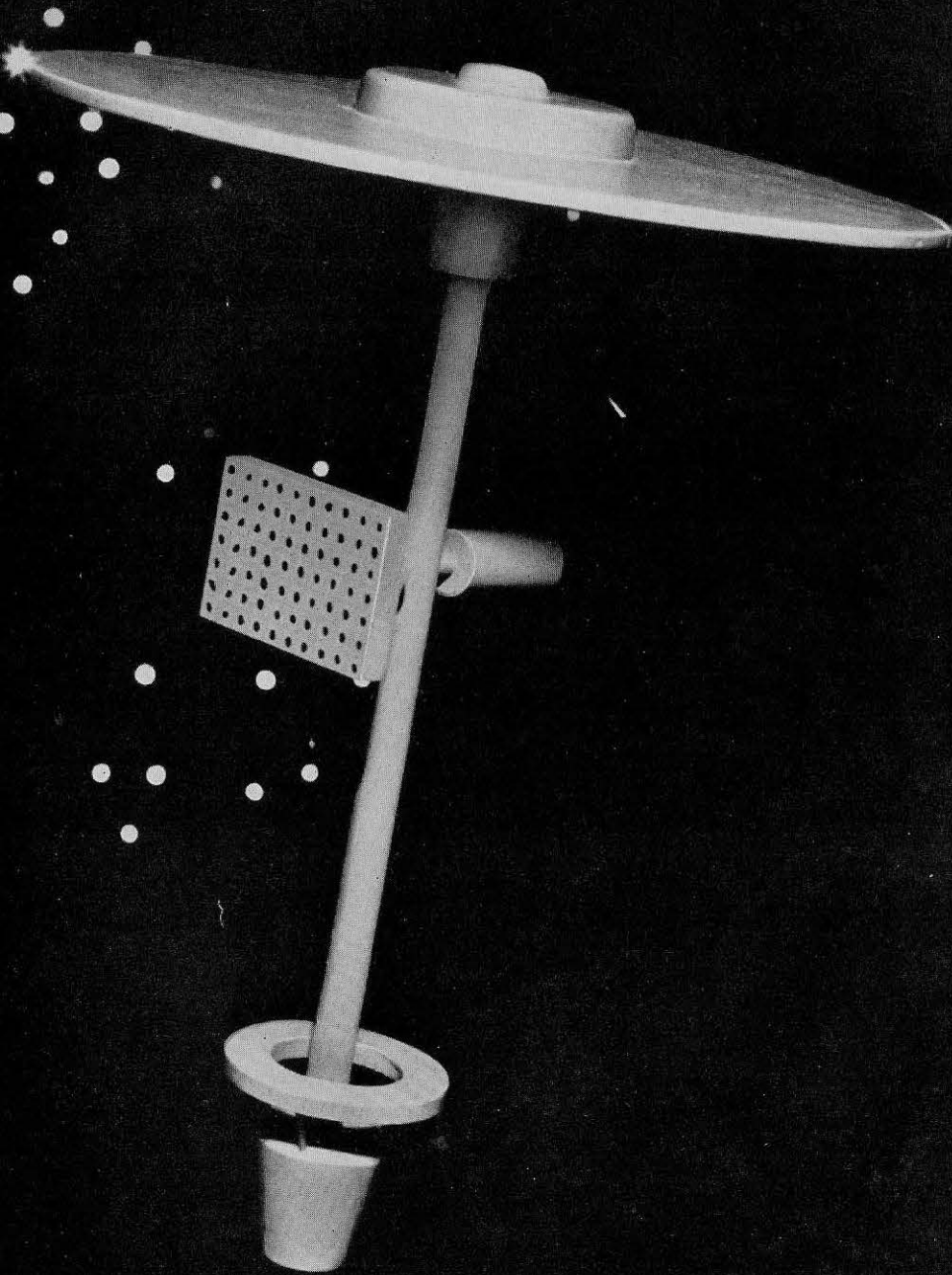
Von den zahlreichen Entwürfen ist die Außenstation von Professor von Braun einer der am besten durchdachten. Auf einer nahezu kreisförmigen Bahn um die Erde kreist ein großes Rad, dessen Felge durch eine Doppelspeiche mit der Nabe verbunden ist. Die Felge ist ein durch Zwischenböden unterteilter Rohrring, in dem nahezu alle Wohn- und Arbeitsräume untergebracht sind. Die Speichen dienen als Zufahrt zur Nabe und die Nabe selbst als Schleuse zum Außenraum. Der ganze Ring dreht sich langsam um seine Nabe und erzeugt hierdurch im Inneren der Felge einen Anpreßdruck, der für die Insassen die Schwerkraft ersetzt. Die gesamte Außenhaut ist zum Schutze gegen kleine Meteore doppelwandig ausgeführt. Alle zum Leben erforderlichen Dinge, selbst ein Teil der Atmungsluft, müssen von der Erde heraufgebracht werden. Nur die Energie erzeugt sich die Station selbst mit Hilfe der kreisförmigen Sonnenkraftanlage.

Ein solches riesiges Gebilde kann natürlich nicht als Ganzes von der Erde in die Kreisbahn transportiert werden. Nach den Vorschlägen Professor von Brauns sollen die Teile der Raumstation mit etwa 10 bis 15 riesigen Transportraketen in die Kreisbahn gebracht und dort zusammengesetzt werden. Jedes dieser Raumschiffe wiegt beim Start etwa so viel wie ein Leichter Kreuzer und bringt eine Last hinauf, die bequem von zwei großen Lastwagen mit Anhängern transportiert werden könnte. Ein Vergleich dieser Angaben mit den heutigen Gewichten von Raketen und Satelliten zeigt die Schwierigkeiten, die der Verwirklichung solcher Projekte entgegenstehen.

Daten:

Bezeichnung:	Projekt einer Raumstation
Entwurf:	Prof. Dr. v. Braun
Abstand der Bahn über der Erde:	1 730 km
Fluggeschwindigkeit:	7 080 m/s = 25 400 km/std
Durchmesser des Ringes:	75 m
Gewicht der Raumstation:	400 000 kg
Volumen der Raumstation:	18 400 m ³ (Kubikmeter)
Gesamtstartgewicht der Transportraketen:	80 000 000 kg





RAUMSCHIFF

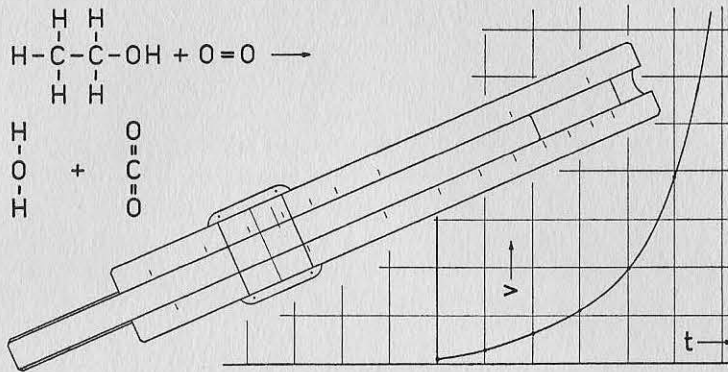
Für die Propagandisten der Weltraumfahrt ist die Raumstation in erster Linie das Sprungbrett zu größeren Reisen. Sie denken an bemannte Raumschiffe, die den Mond und die Planeten erkunden, später sogar in Räume außerhalb unseres Sonnensystems vorstoßen. Die Zweckmäßigkeit einer bemannten Raumfahrt soll hier nicht untersucht werden. Sicher ist, daß die Raumstation diese Aufgabe sehr erleichtert. So erlaubt sie zum Beispiel, Raumschiffe ungewöhnlicher Form und mit ungewöhnlichen Antrieben zu verwenden, die für einen Aufstieg von der Erde unbrauchbar wären.

Ein Projekt eines solchen Raumschiffes wurde von Dr. Stuhlinger, USA, entworfen. Es gliedert sich in drei Hauptteile, die durch ein langes Rohr verbunden sind.

Auf einem gigantischen Rad, das als Kühler dient, sind die Aufenthaltsräume für die Passagiere aufgebaut. Im Schwerpunkt des Raumschiffes sind die Treibstoffbehälter und die Schubkammern angebracht. Der Antriebsstrahl wird nicht durch Temperatur und Druck, sondern durch eine elektrische Beschleunigung auf seine hohe Austrittsgeschwindigkeit gebracht. Am anderen Ende des Rohres befindet sich ein Kernreaktor zur Erzeugung der elektrischen Energie für die Schubkammern. Der Schub ist im Verhältnis zur Masse lächerlich gering, die Beschleunigung nur ein verschwindender Bruchteil der Erdbeschleunigung. Daher kann dieses Raumschiff nur zwischen den Außenstationen von Planeten verkehren und nie auf einem Planeten landen.

Daten :

Entwurf:	Dr. E. Stuhlinger, USA
Startgewicht:	730 000 kg
Länge:	80 m
Treibstoff-Gewicht:	365 000 kg
Schub:	50 kg
Elektrische Leistung der Anlage:	23 000 kW
Reisezeit zum Mars und zurück:	2 Jahre



Kapitel 2

DIE WISSENSCHAFTLICHEN GRUNDLAGEN

Die Raketentechnik ist, im Gegensatz zur Atomtechnik, kein Kind der Wissenschaft. Die großen Errungenschaften der Atomtechnik, an deren Anfängen wir stehen, wurden angebahnt durch die Entdeckung bis dahin unbekannter Naturgesetze, ihre theoretische Untersuchung und ihre experimentelle Bestätigung. Die Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften öffneten eine Tür zu neuen technischen Möglichkeiten, an die niemand zuvor gedacht hatte, weil niemand daran denken konnte.

Der Entwicklung der modernen Raketentechnik gingen keine überraschenden Entdeckungen bis dahin unbekannter Naturgesetze voraus, sondern die technischen Träumereien hochbegabter Menschen, die neben ihrem Idealismus und ihrer Phantasie oft eine erstaunliche Voraussicht der künftigen technischen Entwicklung bewiesen. Die Grundgesetze, nach denen Raketen gebaut werden und nach denen die Raketen fliegen, sind seit vielen Jahrhunderten bekannt, und schon vor der Aufdeckung dieser Naturgesetze gab es bei verschiedenen Völkern der Erde Raketen. Die Väter der modernen Raketentechnik hatten also eigentlich keine wissenschaftliche, sondern eine technische Aufgabe, die allerdings auf diesem Gebiet außerordentlich hohes Verständnis und Können voraussetzte.

Trotzdem beansprucht die Raketentechnik, wie jeder andere Zweig der Technik, die Naturwissenschaften. Das Funktionieren der Raketen

und ihrer Teile gründet sich auf naturwissenschaftliche Gesetze. Während andere technische Arbeitsgebiete oft nur auf einige wenige Disziplinen der Naturwissenschaft Bezug nehmen, beansprucht die Raketentechnik als Voraussetzung für ihre Arbeit nahezu alle Gebiete, von der Medizin bis zur Physik. Wie jede andere Technik fördert sie diese Wissenschaften durch Fragen und Aufgabenstellungen sowie durch die Notwendigkeit, Experimente zu machen.

Auf manchen technischen Arbeitsgebieten werden Gegenstände erzeugt, die wiederum der Forschung dienen können. Das gilt für die Raketentechnik mehr als für andere Techniken, denn eine der Hauptaufgaben der Raketen ist ja gerade die Forschung, sei es nun die Höhenforschung in der obersten Atmosphäre, also der näheren Umgebung der Erde, oder die Weltraumforschung.

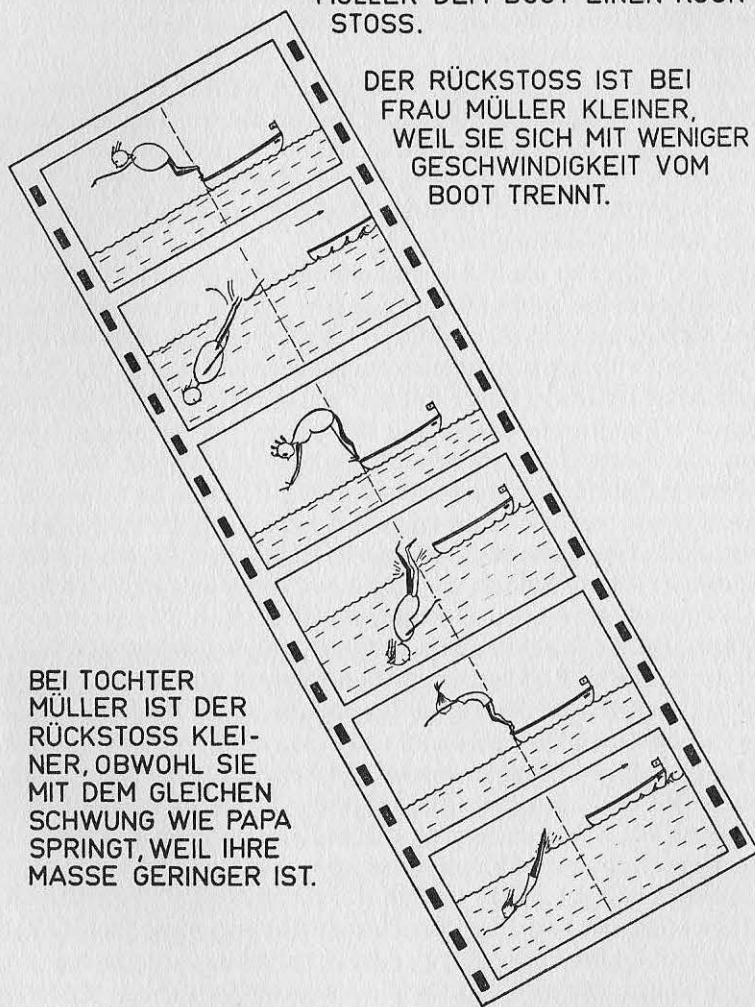
Obwohl sich also die Raketentechnik nicht auf jüngste wissenschaftliche Erkenntnisse stützt (die oft nur sehr schwer zu verstehen sind), wird doch niemand in sie eindringen können, der sich nicht der Mühe unterziehen will, ihre wichtigsten physikalischen und chemischen Grundlagen kennenzulernen. Daher soll hier vor dem Kapitel »Technik« das Kapitel »Grundlagen« stehen. Die Darstellung physikalischer Gesetze ohne die dazugehörige Mathematik ist zwar ein Wagnis. Wegen der weitverbreiteten Scheu vor mathematischen Formeln ist es jedoch in diesem Kapitel unternommen und die Formel durch die bildhafte Darstellung ihrer Resultate ersetzt worden. Der Autor hofft, daß der Fleiß, mit dem er die Mathematik umgangen hat, durch den Fleiß des Lesers beim Studium der folgenden Seiten belohnt wird.

Den meisten Menschen macht es große Schwierigkeiten zu glauben, daß die Rakete sich im luftleeren Raum bewegen und dort angetrieben werden kann. Warum die Rakete sich im luftgefüllten Raum, dicht über der Erdoberfläche, bewegt, wo sie sich ja »an der Luft abstoßen kann«, meinen sie ohne weiteres zu verstehen. Der Witz bei der Sache ist aber gerade, daß ein physikalisches Grundgesetz der Rakete erlaubt, sich im luftleeren Raum fortzubewegen, sich beschleunigen und antreiben zu lassen. Das Gesetz, das hier zugrunde liegt, ist einfach und soll an einem praktischen Beispiel erklärt werden.

Herr Müller ist mit seiner Familie zum Bad gegangen. Sie haben ein kleines leichtes Boot gemietet, und das erste Bild unseres Streifens zeigt Herrn Müller, wie er mutig als guter Schwimmer auf der Kante des Bootes steht und zum Absprung bereit ist. Noch sind beide, Herr Müller und das Boot, in Ruhe. Nun springt Herr Müller, und auf unserem zweiten Bild sehen wir ihn nach einem eleganten Kopfsprung durch das

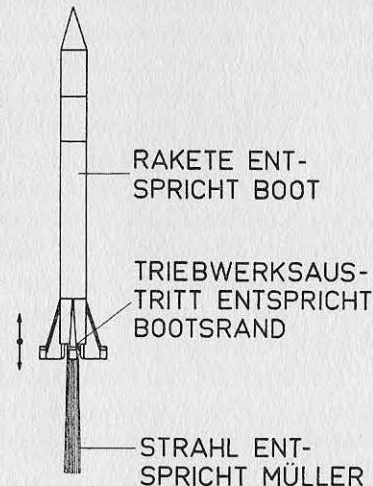
BEIM ABSPRUNG ERTEILT HERR MÜLLER DEM BOOT EINEN RÜCKSTOSS.

DER RÜCKSTOSS IST BEI FRAU MÜLLER KLEINER, WEIL SIE SICH MIT WENIGER GESCHWINDIGKEIT VOM BOOT TRENNT.



BEI TOCHTER MÜLLER IST DER RÜCKSTOSS KLEINER, OBWOHL SIE MIT DEM GLEICHEN SCHWUNG WIE PAPA SPRINGT, WEIL IHRE MASSE GERINGER IST.

Wasser schießen. Aber auch das Boot hat den Platz verlassen, auf dem es vorher lag, es wurde beim Absprung zurückgestoßen. Das erscheint uns ganz natürlich, und doch ist es genauso schwer zu verstehen wie das Grundgesetz der Raketentechnik. So, wie wir in diesem Beispiel nicht danach fragen, woran sich das Boot oder Herr Müller abgestoßen hat, ist auch bei der Rakete von einem »Abstoßen an der Luft« nicht die Rede. Müller und Boot stoßen sich gegenseitig ab und haben nach der Trennung beide Fahrt. Genauso erklärt sich der Antrieb der Rakete durch das gegenseitige Abstoßen von Antriebsstrahl und Rakete. Während der Antriebsbahn schießt aus dem Heck der Rakete ein Strahl von verbrannten Treibstoffen heraus. Dieser Strahl von verbrannten Treibstoffen entspricht dem Herrn Müller unseres Beispiels, die Rakete selbst aber dem Boot. Dadurch, daß der Antriebsstrahl die Rakete mit hoher Geschwindigkeit verläßt und sich dabei an ihr abstößt, wie Herr Müller an dem Boot, erhält die Rakete einen Rückstoß, und dieser Rückstoß beschleunigt und bewegt sie.



In unserem Beispiel spielt das Wasser, das das Boot und auch Herr Müller trägt, nur eine untergeordnete Rolle. Es dient dem Rückstoß nicht. Man kann sich vorstellen, daß er auch ohne das Wasser in gleicher Größe vorhanden wäre. Im Gegenteil, das Wasser bremst die Bewegung des Bootes durch die Reibung mit den Bootswänden. Das gleiche gilt für die Rakete. Auch die Rakete braucht für die Wirkung des Rückstoßes die umgebende Luft nicht, diese verzehrt vielmehr durch ihre Reibung einen Teil der Kraft, den der Antriebsstrahl auf die Rakete ausübt, und vermindert dadurch die Geschwindigkeit der Rakete.

Wir können noch zwei weitere wichtige Eigenschaften des Rückstoßes einer Rakete aus unserem Beispiel ableiten. Auf unseren Bildern 3 und 4 ist es Mama Müller, die den Sprung ins kühle Naß wagt. Sie ist genauso schwer, oder, wie der Physiker unhöflich sagt, sie hat die gleiche Masse wie Papa Müller, aber sie hat nicht solchen Mut wie er, sie ist kein so guter Schwimmer, und infolgedessen springt sie mit viel weniger Abstoßgeschwindigkeit vom Boot weg. Der Erfolg ist klar. Das Boot

wird zwar auch, wie bei Papa Müller, zurückgestoßen, nur nicht so kräftig. Auf die Rakete übertragen heißt dies, daß die Geschwindigkeit, mit der der Strahl verbrannter Treibstoffe aus ihr herausschießt, einen entscheidenden Einfluß auf den Rückstoß haben muß. Je schneller die verbrannten Treibstoffe sie verlassen, um so stärker ist der Rückstoß auf die Rakete und um so kräftiger wird sie angetrieben.

Auch die Tochter Müller versucht auf den Bildern 5 und 6 den Absprung. Sie ist jung und daher mindestens so schwungvoll wie der Papa, sie springt mit derselben Geschwindigkeit ab, und trotzdem wird das Boot nicht so stark zurückgestoßen. Woran mag das liegen? Nun, es ist sehr einfach. Der Tochter Inge fehlt es natürlich an der Masse, die Papa Müller hat. Je größer die Masse ist, die das Boot verläßt, um so größer ist der Rückstoß, ist die Wirkung auf das Boot. Genau dasselbe läßt sich von der Rakete sagen. Es kommt nicht nur darauf an, die verbrannten Treibstoffe mit sehr hoher Geschwindigkeit aus der Rakete abzustoßen, sondern genauso wichtig ist es, sehr viel, eine große Masse verbrannter Treibstoffe auszustoßen. Wir werden später sehen, daß der Anteil, den die Treibstoffe an der Gesamtmasse der Rakete haben, einen entscheidenden Einfluß auf die Geschwindigkeit und damit auch auf die Reichweite oder die Gipfelhöhe einer Rakete hat.

Das mit Hilfe von Familie Müller und ihrem Boot erarbeitete Grundgesetz der Physik nennen die Physiker den Satz von der Erhaltung des Impulses. Wir können ihn speziell für die Raketentechnik in folgender Form aussprechen:

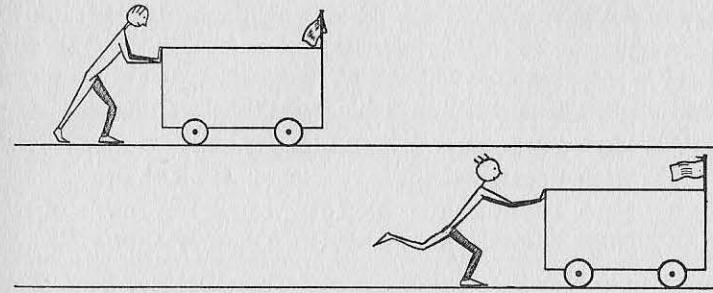
Die Rakete wird durch den Rückstoß des Antriebsstrahles in Bewegung gesetzt. Der Rückstoß ist um so größer, je größer die in der Sekunde ausgestoßene Strahlmasse und je höher die Geschwindigkeit ist, mit der diese Masse die Rakete verläßt.

Der Rückstoß des Antriebsstrahles wird in der Raketentechnik der »Schub« genannt. Er wird wie andere Kräfte in der Technik in Kilogramm (kg) oder Tonnen (1 t = 1000 kg) gemessen. Das ist die gleiche Maßeinheit, wie sie für Gewichte von Körpern verwendet wird. Auch das Gewicht eines Sackes Mehl ist eine Kraft, mit der dieser Sack auf seine Unterlage drückt. Der Schub verschiedener Raketentypen ist je nach der Aufgabe, die der Rakete gestellt ist, außerordentlich verschieden. Die Skala reicht von einigen Kilogramm bei den kleinsten Raketen bis zu Hunderten von Tonnen, also Hunderttausenden von Kilogramm bei den Riesen unter ihnen.

Unter der Wirkung des Schubes setzt sich die Rakete, wie wir wissen, in Bewegung. Wir wollen diesen etwas verwickelten Vorgang in mehreren

Phasen studieren, und zwar zunächst für die einfachste Bahn einer Rakete, den geradlinigen senkrechten Aufstieg.

Das anschauliche Beispiel, an dem wir die Vorgänge erklären werden, ersetzt die Rakete durch einen Wagen, der sich nicht senkrecht in die Höhe, sondern auf einer horizontalen Straße bewegt, und den Antriebsstrahl durch einen Menschen, Herrn Maier. Wenn Sie oder ich einen schweren Wagen auf der Straße anschieben müssen, so drücken wir ihn zunächst mit der größten Kraft, die uns zur Verfügung steht. Ist der Wagen einmal in Schwung, ist er also auf die Geschwindigkeit beschleunigt, mit der wir marschieren wollen, so genügt ein leichter Schub, um ihn in Marsch zu halten.



BEI GLEICHBLEIBENDER SCHUBKRAFT WÄCHST DIE GESCHWINDIGKEIT LAUFEND AN.

Anders Herr Maier. Er hat den Ehrgeiz, es dem Antriebsstrahl einer Rakete gleichzutun, der auch nicht im Schub nachläßt, wenn die Rakete in Schwung ist. Er schiebt also mit konstanter Kraft. Der Wagen, der zunächst in Ruhe war, setzt sich schwerfällig in Bewegung und wird dann immer schneller: er wird beschleunigt. Die Geschwindigkeit unseres durch Menschenkraft bewegten Fahrzeuges können wir am Tachometer ablesen, und zwar in Kilometer je Stunde (Stundenkilometer). Um den Vorgang genau zu studieren, lesen wir alle 10 Sekunden ab und finden folgende Werte:

Nach 0 Sekunden (zu Beginn)	0 km/Stunde
Nach 10 Sekunden	4 km/Stunde
Nach 20 Sekunden	8 km/Stunde
Nach 30 Sekunden	12 km/Stunde

Nach 30 Sekunden wird Herr Maier kaum noch mit dem Wagen Schritt halten können. Schöbe er, wie sein Vorbild, der Antriebsstrahl,

unverdrossen mit gleichbleibender Kraft weiter, so würden wir finden, daß die Geschwindigkeit des Wagens in jedem Zeitabschnitt von 10 Sekunden, so wie im Anfang unserer Beobachtung, um 4 Stundenkilometer zunimmt. Solche Bewegungen mit zunehmender Geschwindigkeit nennt man *beschleunigt*, und als Maß der Beschleunigung wählt man den Zuwachs an Geschwindigkeit in der Zeiteinheit. In unserem Beispiel wäre also die Beschleunigung des Wagens

4 km/std in 10 Sekunden.

In der Raketentechnik verwendet man etwas andere Maßeinheiten als die willkürlichen unseres Beispiels. Man mißt die Geschwindigkeit in Metern je Sekunde (m/s) und betrachtet auch den Geschwindigkeitszuwachs in Sekundenabschnitten. So sagt man zum Beispiel: die Erdbeschleunigung ist 9,81 m/s je Sekunde, und meint damit, daß ein fallender Stein in jeder Sekunde 9,81 m/s an Geschwindigkeit gewinnt. Seine Geschwindigkeit ließe sich also in folgender Tabelle festhalten:

Nach 0 Sekunden (beim Loslassen)	=	0 m/s
Nach 1 Sekunde	=	9,81 m/s
Nach 2 Sekunden	$2 \times 9,81$	= 19,62 m/s
Nach 3 Sekunden	$3 \times 9,81$	= 29,43 m/s

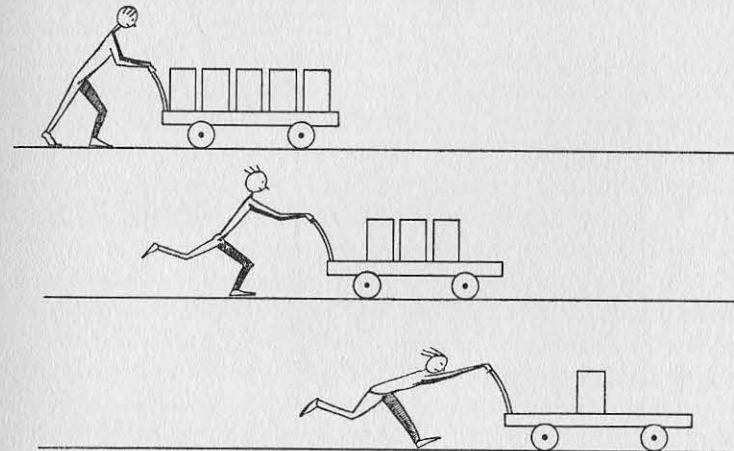
Wovon hängt die Beschleunigung ab? Unser Beispiel zeigt es uns: Ein schwächtiger Mann wird mehr Zeit benötigen, einen Wagen in Fahrt zu bringen als ein kräftiger: Die Beschleunigung ist um so größer, je größer die Kraft ist. Ein leichter Wagen wird sich eher auf hohe Geschwindigkeit bringen lassen als ein schwerer: Die Beschleunigung ist um so größer, je kleiner die Masse ist.

Übertragen wir nun die Ergebnisse unseres Gedankenexperimentes auf die Rakete:

Vor dem Start steht die Rakete auf der Startstelle in Ruhe, ihre Geschwindigkeit ist gleich Null. Der Antrieb wird eingeschaltet, der Antriebsstrahl drückt die Rakete mit gleichbleibender Kraft in die Höhe. Sie wird beschleunigt, ihre Geschwindigkeit nimmt von Sekunde zu Sekunde zu. Die Beschleunigung, also die Geschwindigkeitszunahme in der Sekunde, ist um so größer, je größer der Schub des Antriebsstrahles und je kleiner die Masse der Rakete ist.

Wer erinnert sich nicht, in der Wochenschau das unvergeßliche Bild vom Start einer großen Rakete gesehen zu haben? Ganz langsam, beinahe unmerklich hebt sich der turmhohe Raketenkörper vom Starttisch ab, um immer schneller und schneller zu werden und schließlich mit rasender Geschwindigkeit am Himmel zu verschwinden.

Die Zunahme der Geschwindigkeit durch die Beschleunigung wird bei der Rakete noch durch einen weiteren Einfluß unterstützt. Der Schub einer Rakete entsteht dadurch, daß verbrannte Treibstoffmengen sie ununterbrochen verlassen. Die Rakete wird somit immer leichter, das heißt, sie verliert an Masse, sie verzehrt sich selbst. Auf Herrn Maier und

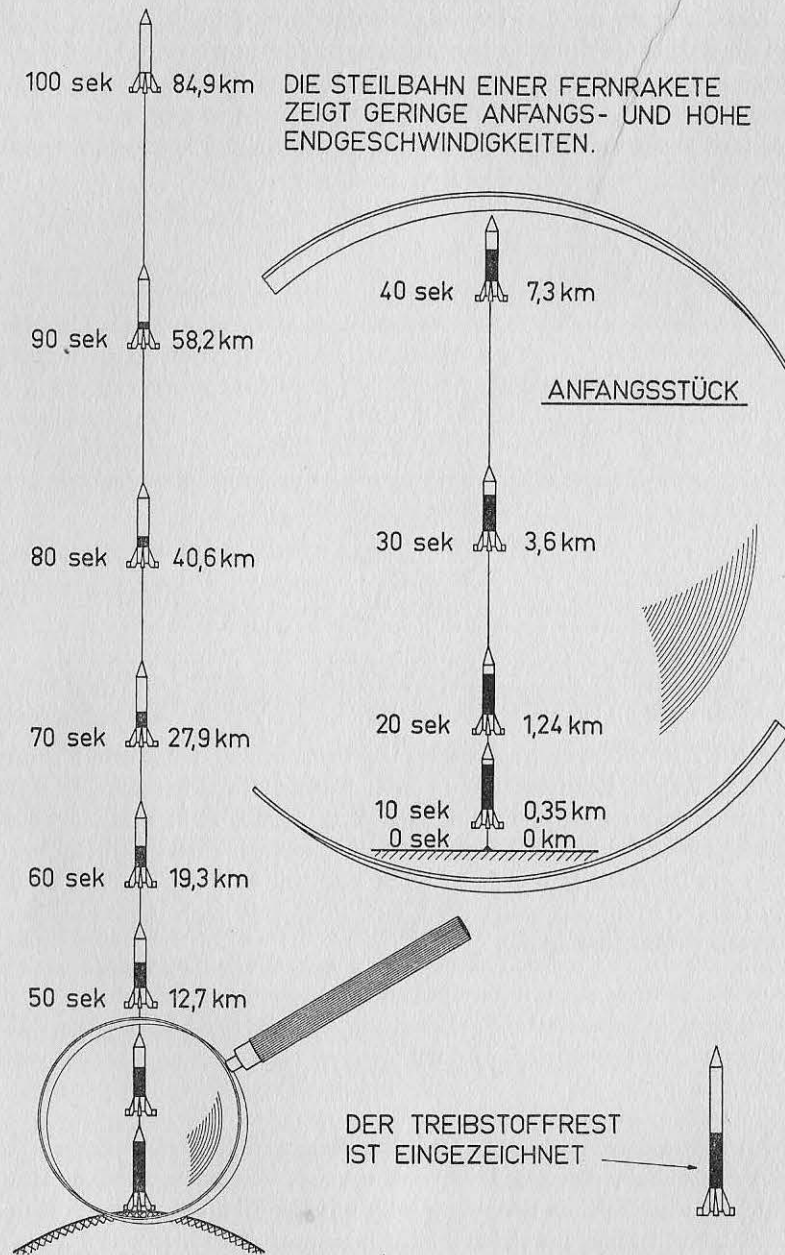


DER GESCHWINDIGKEITZUWACHS IST NOCH GRÖßER, WENN DIE GESCHOBENE MASSE UNTERWEGS ABNIMMT.

seinen Wagen übertragen: Zunächst steht eine große Menge von Kisten auf dem Wagen. Beim Anschieben fallen laufend Kisten herunter, so daß er immer leichter wird. Der unveränderte Schub wirkt also auf eine ständig kleiner werdende Masse. Nach dem, was wir eben gelernt haben, kann die Beschleunigung dabei nicht konstant bleiben, sondern muß anwachsen. Hierdurch steigt die Geschwindigkeit noch stärker als bei konstanter Beschleunigung.

Raketen-Ballistik

Man kann diese Vorgänge vorher berechnen, so genau jedenfalls, wie man den Schub, den das Triebwerk erzeugt, voraussetzen kann. Das Ergebnis einer solchen Rechnung zeigt uns das Bild. Die Antriebsbahn einer Rakete ist hier aus vielen Pfeilen zusammengesetzt. Jeder Pfeil ent-



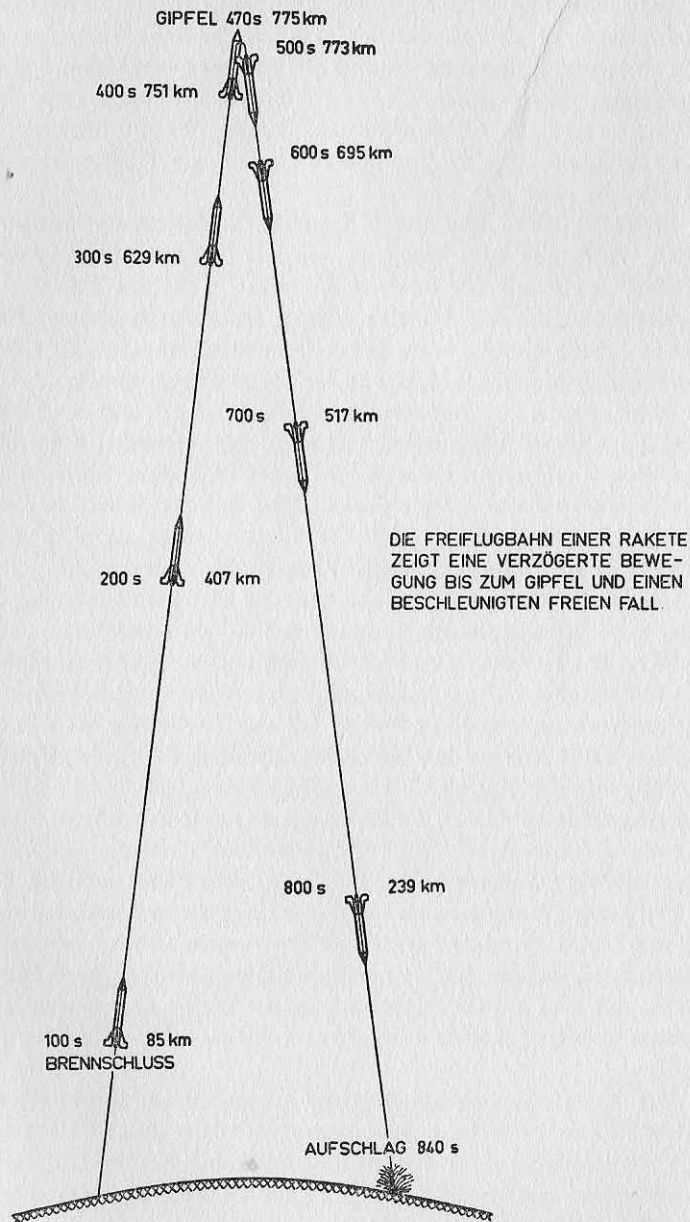
spricht dem Weg in 10 Sekunden. Die Pfeile kurz nach dem Start sind klein, das heißt, daß die Geschwindigkeit der Rakete dann noch gering ist. Durch den doppelten Einfluß des konstant wirkenden Schubes und der immer kleiner werdenden Masse der Rakete werden die Geschwindigkeiten und damit auch die zurückgelegten Wege immer größer – bis zum Brennschluß, also dem Punkt, an dem die Treibstoffe der Rakete verbraucht sind.

In der Rechnung, und natürlich auch in der Zeichnung, wurde übrigens noch ein Faktor berücksichtigt, den wir bisher nicht erwähnt haben. Außer dem Schub des Triebwerkes wirkt ja auf die Rakete noch eine zweite Kraft, die den Aufstieg bremst, nämlich die Erdanziehung. Wir haben vorhin schon gehört, daß sie bei einem frei fallenden Körper eine Beschleunigung von 9,81 m/s in der Sekunde hervorruft.

Wenn man sich in Gedanken vorstellt, daß der Schub des Triebwerkes und die Erdanziehung immer (etwa im Sekundentakt) abwechselnd an der Rakete angreifen, so erhält man das Bild einer Springprozession: drei Schritt vorwärts, zwei zurück. Ein Teil der Schubkraft wird also durch die Erdbeschleunigung unwirksam gemacht, er wird verbraucht, um die Erdanziehung zu überwinden. Dieser Anteil nimmt aber gegen Ende der Brennzeit ständig ab, weil die Erdbeschleunigung konstant bleibt, während die Beschleunigung der Rakete anwächst.

Wenn die Treibstoffe verbraucht sind, also im Brennschlußpunkt, hat die Rakete eine hohe Geschwindigkeit erreicht und fliegt mit dem ihr innewohnenden Schwung weiter. Unsere Zeichnung auf der nächsten Seite schließt sich an den im vorhergehenden Bild gefundenen Brennschlußpunkt mit Höhe 85 km in der hundertsten Sekunde an. Der Schub hat aufgehört zu wirken, die Erdanziehung aber wirkt beharrlich weiter. Sie verzögert die Rakete, baut ihre Geschwindigkeit ab, bis diese schließlich den Wert 0 erreicht. Der Punkt, an dem dies geschieht, heißt der Gipfelpunkt. Trotz der sich ständig verlangsamenden Geschwindigkeit ist die Rakete bis dahin noch eine sehr große Strecke gestiegen. Nun beginnt sie, da die Erdbeschleunigung weiterwirkt, zu fallen wie ein Stein, den man am Gipfelpunkt losgelassen hat. Ihre Geschwindigkeit wächst in jeder Sekunde um 9,81 m/s, bis zum Aufschlag auf den Erdboden.

Mit diesem Gedankenexperiment haben wir ein einfaches, anschauliches Bild einer Steilbahn gewonnen: Nach dem Start: die Antriebsbahn mit ständig steigender Geschwindigkeit, der Brennschlußpunkt und anschließend die Freiflugbahn mit dem Aufstieg bis zum Gipfelpunkt und dem Absturz auf die Erde.



Leider ist diese Vorstellung zu einfach, um wahr zu sein. Wir haben nämlich eine Reihe von Einflüssen vernachlässigt, die zum richtigen Bild einer Steilbahn unbedingt dazugehören. Es sind dies:

- Der Widerstand der Luft
- Die Veränderlichkeit der Erdbeschleunigung
- Die Veränderlichkeit des Schubes.

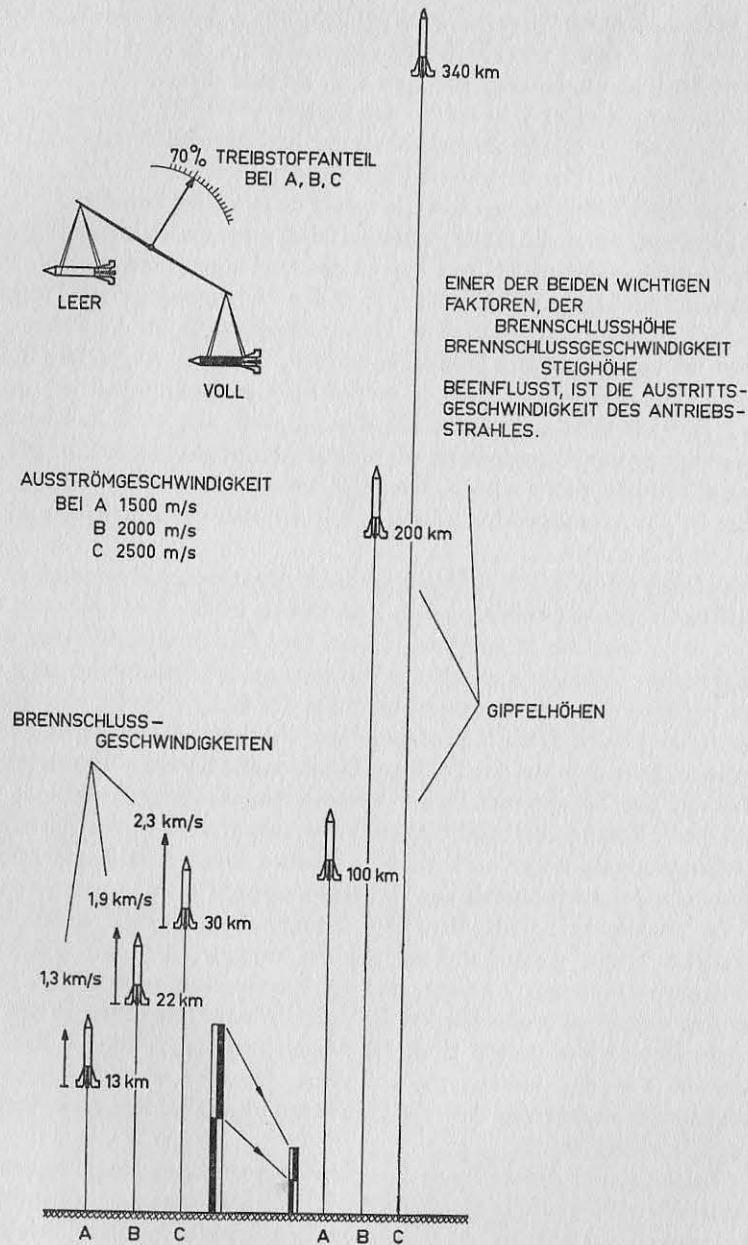
Auf diese Einflüsse werden wir später noch zurückkommen.

Ein Stein, der in die Höhe geworfen wird, fliegt um so höher, je größer die Geschwindigkeit ist, mit der er die werfende Hand verläßt. Eine Gewehrkuugel trägt umso weiter, je höher die Anfangsgeschwindigkeit ist, mit der sie das Rohr verläßt. Genau dasselbe gilt für die Rakete. Sie kann in um so größere Höhen vorstoßen, oder um so größere Reichweiten auf der Erde erzielen, je größer die Geschwindigkeit ist, die ihr der Antrieb erteilt. Auf die Geschwindigkeit, die eine Rakete nach Beendigung der Antriebsbahn am Brennschlußpunkt hat, haben, wie wir aus der Müller-Story wissen, zwei Größen entscheidenden Einfluß. Die eine ist die Abstoßgeschwindigkeit, mit der sich der Antriebsstrahl aus der Rakete ablöst.

Bei den meisten Triebwerken ist diese Ausströmgeschwindigkeit der heißen Gasmassen abhängig von dem Druck in der Brennkammer und von der Zusammensetzung des Gases. Der Druck seinerseits wird bei chemischen Antrieben durch die Verbrennungstemperatur bedingt und ist genauso wie die Zusammensetzung der Gase von der chemischen Natur der beiden Treibstoffkomponenten abhängig. Wie wir später sehen werden, kann man aus der Treibstoffkombination bereits die zu erzielende theoretische Temperatur in der Verbrennungskammer errechnen, und aus dieser Temperatur ergibt sich mit der Annahme einer ideal gestalteten Verbrennungskammer und ideal gestalteten Düse eine ideale höchste Ausströmgeschwindigkeit der Verbrennungsprodukte.

In Wirklichkeit wird diese Ausströmgeschwindigkeit natürlich nie erreicht. Dafür sorgen die zahlreichen Verluste, die, wie bei jedem anderen technischen Vorgang, mit der Umwandlung der in den Treibstoffen enthaltenen chemischen Energie in Bewegungsenergie des Antriebsstrahles verbunden sind. Man berechnet daher in der Raketentechnik aus der idealen theoretischen Austrittsgeschwindigkeit die sogenannte »effektive« Austrittsgeschwindigkeit, bei der diese Verluste berücksichtigt sind.

Welche starke Auswirkung die effektive Austrittsgeschwindigkeit des Antriebsstrahles auf die Flugbahn der Rakete hat, zeigen die abgebildeten Beispiele. Drei Raketen A, B und C sollen das gleiche Startgewicht be-



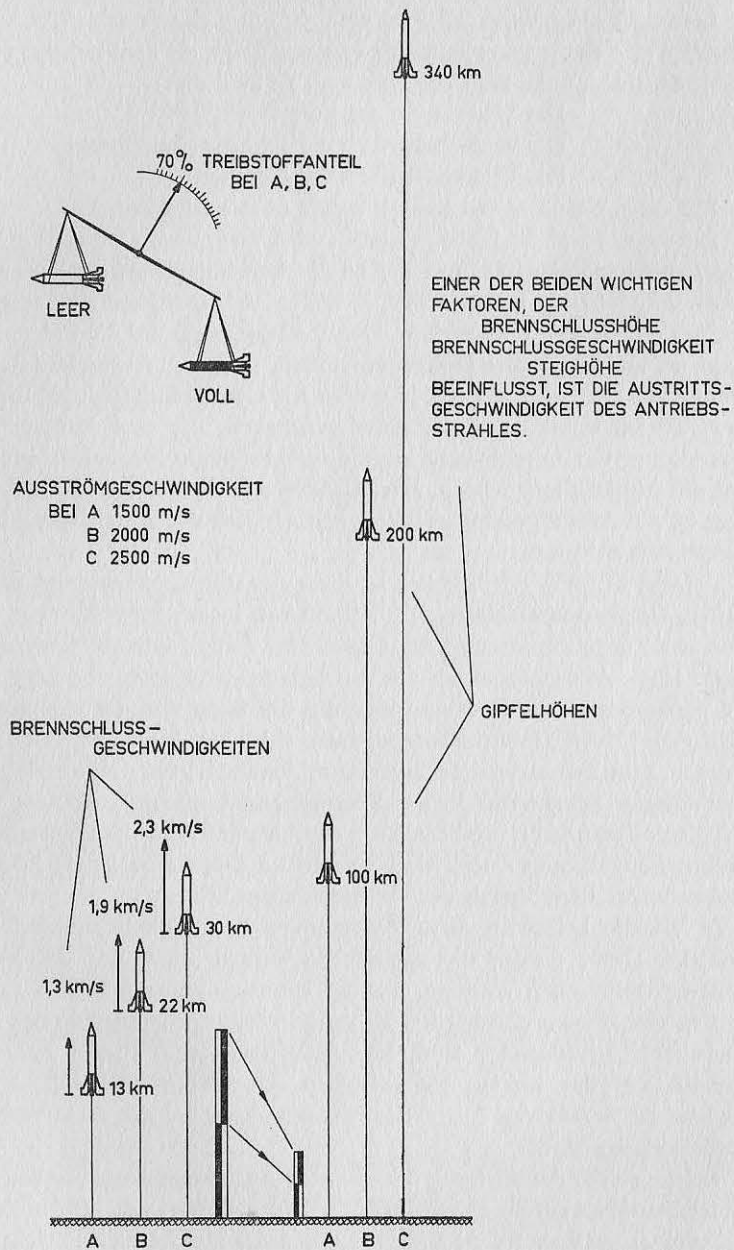
sitzen und ebenso das gleiche Gewicht nach Ausbrennen der Treibstoffe. Der Treibstoffanteil ist daher bei ihnen ebenfalls gleich, und zwar mit 70 Prozent angenommen. Auch die Brennzeit sei für alle drei Raketen dieselbe, das heißt, alle drei Raketen verbrauchen in der Sekunde die gleiche Menge Treibstoff. Durch geeignete Treibstoffauswahl und vielleicht auch verschiedene Triebwerkskonstruktion soll dagegen die effektive Austrittsgeschwindigkeit des Strahles in den drei Fällen verschieden sein, und zwar für die Rakete A 1800 m/s, für die Rakete B 2000 m/s und für die Rakete C 2200 m/s.

Die Berechnung der Steilbahnen zeigt den sehr großen Einfluß der Austrittsgeschwindigkeit des Antriebsstrahles auf die Leistung einer Rakete. Die bei Brennschluß, das heißt nach dem Ausbrennen der Treibstoffe erreichten Höhen und Geschwindigkeiten der Rakete C sind so viel größer als die der Rakete A, daß C bis in eine Höhe von 340 Kilometern über dem Erdboden vorstoßen kann, während A nur die »kümmerliche« Höhe von 100 Kilometern erreicht.

Wegen dieses gewaltigen Einflusses der Strahl-Austrittsgeschwindigkeit auf die Geschwindigkeiten und damit auf Steighöhen oder Reichweiten der Raketen ist das Hauptbestreben der Raketentechniker seit jeher die Entwicklung von Triebwerken mit hoher Austrittsgeschwindigkeit gewesen. Bei den chemischen Triebwerken – dazu zählen alle heute praktisch verwendeten – sind höhere Austrittsgeschwindigkeiten der Antriebsgase nur mit höheren Temperaturen im Inneren der Brennkammer zu erreichen. Dies wiederum bedeutet, daß es schwieriger wird, die Brennkammer zu kühlen, damit sie während der, wenn auch kurzen, Brenndauer intakt bleibt und einwandfrei arbeitet. Durch die Verwendung hochwarmfester Baustoffe und durch die Einführung raffinierter Kühlverfahren hat man die Grenze für die Temperatur in der Brennkammer allerdings schon ziemlich weit hinausgeschoben.

Trotz aller Entwicklungsarbeit ist auf der Basis der chemischen Treibstoffe eine unbegrenzte Verbesserung der Raketentriebwerke nicht zu erwarten. Die maximal erzielbaren Ausströmgeschwindigkeiten für den Strahl liegen für chemische Treibstoffe in der Größenordnung von 5000 m/s. Diese Grenze kann man nur noch mit Triebwerken überschreiten, die nicht mehr mit der chemischen Verbindung, also etwa der Verbrennung von Brennstoffen arbeiten. Es ist daher kein Wunder, daß sich die Raketentechniker schon seit Jahren nach anderen Möglichkeiten umschauen und insbesondere daran denken, die Atomenergie für ihre Zwecke einzuspannen.

Solange die Raketentechniker noch auf chemische Triebwerke und



sitzen und ebenso das gleiche Gewicht nach Ausbrennen der Treibstoffe. Der Treibstoffanteil ist daher bei ihnen ebenfalls gleich, und zwar mit 70 Prozent angenommen. Auch die Brennzeit sei für alle drei Raketen dieselbe, das heißt, alle drei Raketen verbrauchen in der Sekunde die gleiche Menge Treibstoff. Durch geeignete Treibstoffauswahl und vielleicht auch verschiedene Triebwerkskonstruktion soll dagegen die effektive Austrittsgeschwindigkeit des Strahles in den drei Fällen verschieden sein, und zwar für die Rakete A 1800 m/s, für die Rakete B 2000 m/s und für die Rakete C 2200 m/s.

Die Berechnung der Steilbahnen zeigt den sehr großen Einfluß der Austrittsgeschwindigkeit des Antriebsstrahles auf die Leistung einer Rakete. Die bei Brennschluß, das heißt nach dem Ausbrennen der Treibstoffe erreichten Höhen und Geschwindigkeiten der Rakete C sind so viel größer als die der Rakete A, daß C bis in eine Höhe von 340 Kilometern über dem Erdboden vorstoßen kann, während A nur die »kümmerliche« Höhe von 100 Kilometern erreicht.

Wegen dieses gewaltigen Einflusses der Strahl-Austrittsgeschwindigkeit auf die Geschwindigkeiten und damit auf Steighöhen oder Reichweiten der Raketen ist das Hauptbestreben der Raketentechniker seit jeher die Entwicklung von Triebwerken mit hoher Austrittsgeschwindigkeit gewesen. Bei den chemischen Triebwerken – dazu zählen alle heute praktisch verwendeten – sind höhere Austrittsgeschwindigkeiten der Antriebsgase nur mit höheren Temperaturen im Inneren der Brennkammer zu erreichen. Dies wiederum bedeutet, daß es schwieriger wird, die Brennkammer zu kühlen, damit sie während der, wenn auch kurzen, Brenndauer intakt bleibt und einwandfrei arbeitet. Durch die Verwendung hochwarmfester Baustoffe und durch die Einführung raffinierter Kühlverfahren hat man die Grenze für die Temperatur in der Brennkammer allerdings schon ziemlich weit hinausgeschoben.

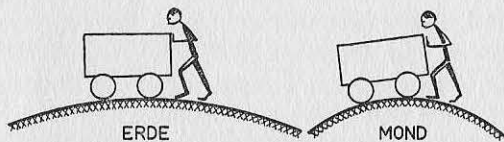
Trotz aller Entwicklungsarbeit ist auf der Basis der chemischen Treibstoffe eine unbegrenzte Verbesserung der Raketentriebwerke nicht zu erwarten. Die maximal erzielbaren Ausströmgeschwindigkeiten für den Strahl liegen für chemische Treibstoffe in der Größenordnung von 5000 m/s. Diese Grenze kann man nur noch mit Triebwerken überschreiten, die nicht mehr mit der chemischen Verbindung, also etwa der Verbrennung von Brennstoffen arbeiten. Es ist daher kein Wunder, daß sich die Raketentechniker schon seit Jahren nach anderen Möglichkeiten umschaun und insbesondere daran denken, die Atomenergie für ihre Zwecke einzuspannen.

Solange die Raketentechniker noch auf chemische Triebwerke und

damit auf eine bestimmte obere Grenze der Austrittsgeschwindigkeit beschränkt sind, werden sie mit allen Mitteln danach trachten, die zweite Einflußgröße, die die Brennschlußgeschwindigkeit und damit die Steighöhe und Reichweite beeinflusst, bis ins letzte auszunutzen. Diese Einflußgröße ist der »Treibstoffanteil« der Rakete.

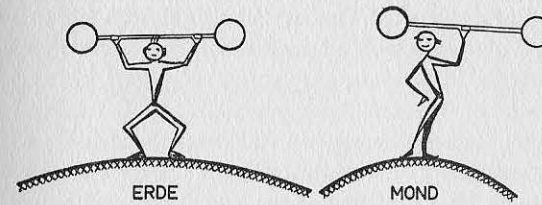
Erinnern wir uns an die Müller-Story: Bei gleicher Absprunggeschwindigkeit von Papa und Tochter Müller erhält das Boot die größere Geschwindigkeit vom Papa, weil er die größere Masse besitzt. Spränge Papa Müller einmal von einem schweren, ein anderes Mal von einem leichten Boot ab, so würde das leichte Boot den größeren Schwung erhalten. Es kommt also offensichtlich auf das Verhältnis der Massen von Springer und Boot an. Diesem Verhältnis entspricht bei der Rakete das Verhältnis der während der ganzen Antriebsbahn ausströmenden Masse zur Masse der leeren Rakete. Da aber die ausströmenden Massen zunächst als Treibstoffe in der Rakete gespeichert sind, kann man auch vom Verhältnis der Treibstoffmasse zur Raketenmasse sprechen, oder um es anschaulich auszudrücken, vom »Treibstoffanteil«. Das ist jener Prozentsatz der Masse einer vollgetankten Rakete, der auf den Treibstoff entfällt. Wenn das Gewicht der getankten Rakete zu 75 Prozent auf den Treibstoff und zu 25 Prozent auf die leere Raketenkonstruktion entfällt, spricht man also von einem Treibstoffanteil von 75 Prozent.

Wir müssen hier etwas abschweifen und den schon wiederholt gebrauchten Begriff »Masse« etwas näher erläutern. Im gewöhnlichen Leben fallen die Begriffe »Masse« und »Gewicht« zusammen. Durch ein Gedankenexperiment läßt sich



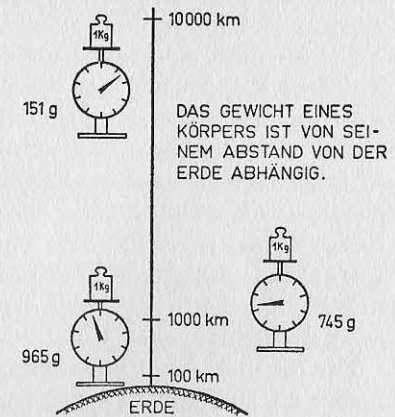
DAS ANSCHIEBEN EINES WAGENS MACHT AUF DER ERDE UND AUF DEM MOND GLEICH VIEL MÜHE, WEIL DIE TRÄGE MASSE EINE VOM ORT UNABHÄNGIGE EIGENSCHAFT DES WAGENS IST.

jedoch leicht nachweisen, daß sie gar nicht identisch sind. Wenn wir Herrn Müller, das Boot und den dazugehörigen See in Gedanken auf den Mond versetzen, würde der Absprung des Herrn Müller und der Rückstoß auf das Boot genauso verlaufen wie auf der Erde. Auch Herrn Maier würde es die gleiche Mühe machen wie auf der Erde, den schweren Wagen anzuschieben. In diesen Fällen wirkt nämlich die Masse, ausführlicher gesagt: die »träge Masse«, als Widerstand gegen die Bewegung. Falls Herr Müller aber versuchte, ein Gewicht zu heben oder gar selbst einen Luftsprung zu machen, brächte er es zu erstaunlichen Leistungen, um die ihn ein Olym-



DAS HEBEN EINER KUGELSTANGE IST AUF DEM MOND VIEL LEICHTER, WEIL DAS GEWICHT KEINE UNVERÄNDERLICHE EIGENSCHAFT DER KUGELSTANGE IST, SONDERN DURCH DIE ANZIEHUNGSKRAFT DER HIMMELSKÖRPER ENTSTEHT.

Während also die Masse eine dem Körper fest verhaftete Größe ist, ändert sich das Gewicht je nach dem Ort, an dem er sich befindet. Das Gewicht entsteht auf der Erde durch die Erdanziehung, auf dem Mond durch die Mondanziehung. Im freien Weltraum, weit von allen Himmelskörpern, hat ein Körper, mag er auf der Erde noch so schwer sein, kein Gewicht. Daher ist es auch nicht verwunderlich, daß das Gewicht eines Körpers auf der Erde von seiner Höhe über dem Erdboden abhängt. Die Erdanziehung wird schwächer, wenn wir uns von der Erde entfernen. Ein Kilogrammgewicht vom Kaufmann wiegt in 100 Kilometern Höhe bereits 35 Gramm weniger als auf dem Erdboden, in 1000 Kilometern Höhe nur noch 745 und in 10000 Kilometern Höhe 151 Gramm, also wenig mehr als ein viertel Pfund. Da sich nun die Raketen in den verschiedensten Höhen über der Erdoberfläche tummeln, rechnen wir (wo es angängig ist) lieber mit den Massen als mit den Gewichten ihrer Teile. Für die Berechnung der Raketenbahn tritt die Erdanziehung selbst als Kraft auf. Hier muß man also das Gewicht berücksichtigen. Bei Bahnen bis etwa 10 Kilometer Höhe ist der Fehler, den man durch die Annahme einer gleichbleibenden Erdanziehung macht, noch nicht beträchtlich, wie unser Beispiel zeigt. Für größere Höhen darf sich der Ballistiker, dessen Aufgabe die Berechnung der Raketenbahnen ist, eine solche Vernachlässigung aber nicht erlauben.



DAS GEWICHT EINES KÖRPERS IST VON SEINEM ABSTAND VON DER ERDE ABHÄNGIG.

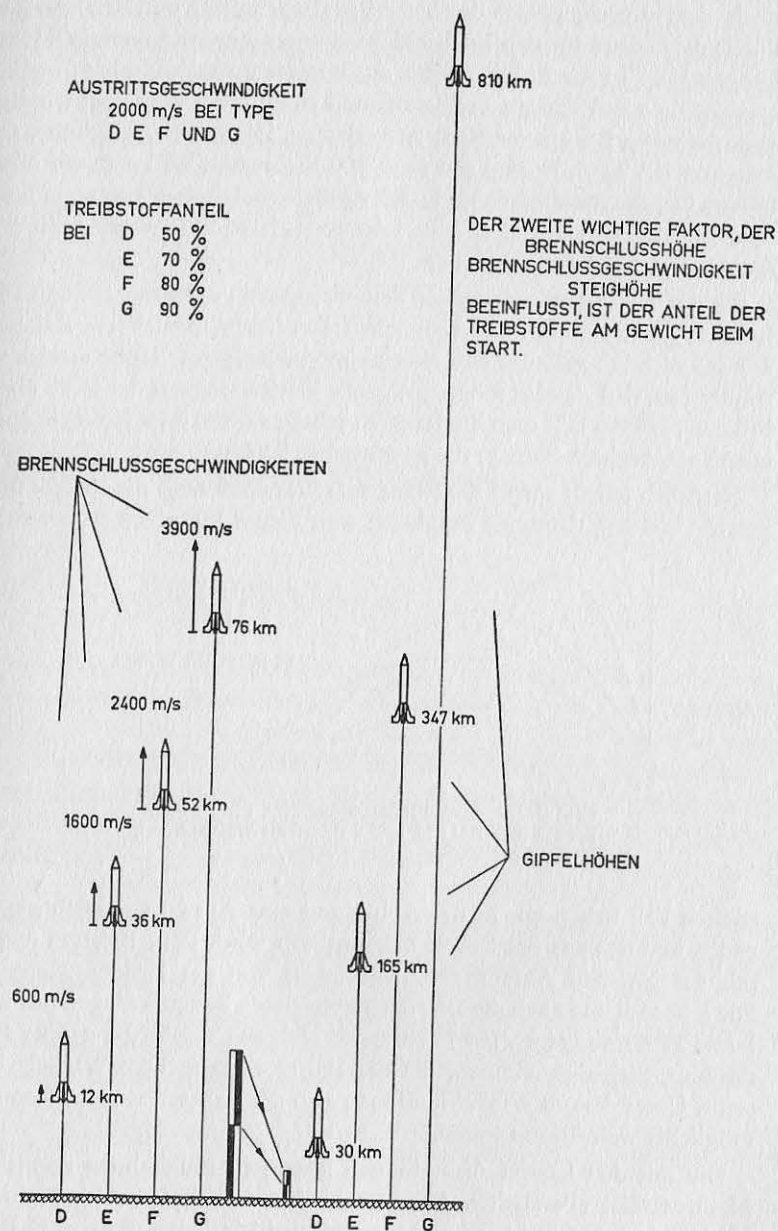
Ein Kilogrammgewicht vom Kaufmann wiegt in 100 Kilometern Höhe bereits 35 Gramm weniger als auf dem Erdboden, in 1000 Kilometern Höhe nur noch 745 und in 10000 Kilometern Höhe 151 Gramm, also wenig mehr als ein viertel Pfund. Da sich nun die Raketen in den verschiedensten Höhen über der Erdoberfläche tummeln, rechnen wir (wo es angängig ist) lieber mit den Massen als mit den Gewichten ihrer Teile. Für die Berechnung der Raketenbahn tritt die Erdanziehung selbst als Kraft auf. Hier muß man also das Gewicht berücksichtigen. Bei Bahnen bis etwa 10 Kilometer Höhe ist der Fehler, den man durch die Annahme einer gleichbleibenden Erdanziehung macht, noch nicht beträchtlich, wie unser Beispiel zeigt. Für größere Höhen darf sich der Ballistiker, dessen Aufgabe die Berechnung der Raketenbahnen ist, eine solche Vernachlässigung aber nicht erlauben.

Zurück zu unserer Einflußgröße, dem Treibstoffanteil. Dessen außerordentliche Wirkung auf die Brennschlußgeschwindigkeit läßt sich leicht durch eine ganz einfache Überlegung nachweisen. Nehmen wir an, wir hätten eine Rakete mit 20 Tonnen Startgewicht und 14 Tonnen Treibstofffüllung, also einem Treibstoffanteil von 70 Prozent, durch konstruktive Tricks so verbessert, daß der Treibstoffanteil auf 80 Prozent gestiegen sei. Bei 20 Tonnen Startgewicht beträgt die Treibstofffüllung dann 16 Tonnen. Nun lassen wir eine alte und eine neue Rakete gleichzeitig starten. Beide fliegen zunächst ständig nebeneinander her bis zu dem Punkt, bei dem die alte Rakete ihren Treibstoff aufgebraucht hat. Von da ab beginnt ihre Geschwindigkeit wieder abzunehmen. Die neue Rakete aber fliegt mit unvermindertem Schub weiter, bis die 2 Tonnen Treibstoff, die sie *mehr* enthält, verbraucht sind. Außerdem wirkt dieser unverminderte Schub noch auf eine kleinere Masse, als die alte Rakete sie jemals haben konnte, und beschleunigt die neue stärker als die alte je beschleunigt wurde. Dieser doppelte Einfluß der längeren Brennzeit und der höheren Beschleunigung läßt den Treibstoffanteil so wirksam werden.

Hierfür noch ein exakt berechnetes Beispiel: Wir haben vier verschiedene Raketen mit vier verschiedenen Werten für den Treibstoffanteil durchgerechnet. Bei allen soll die gleiche Kombination von Treibstoffen unter denselben Bedingungen verwendet werden, das heißt, die effektive Ausströmgeschwindigkeit für die vier Antriebsstrahlen soll die gleiche sein. Wir wollen weiter annehmen, daß auch die Brennzeit für alle Raketen gleich ist, daß also die verschiedenen Treibstoffmengen in allen vier Fällen in der gleichen Zeit verbraucht sind. Das bedeutet natürlich, daß der Durchsatz, das heißt die je Sekunde verbrauchte Treibstoffmenge, verschieden groß ist.

Das Ergebnis der Bahnrechnung spricht für sich selbst. Während die Rakete mit 50 Prozent Treibstoffanteil nur eine kleine Brennschlußhöhe und eine geringe Brennschlußgeschwindigkeit erreicht, steigen die Brennschlußhöhe und insbesondere die Brennschlußgeschwindigkeit rasch mit zunehmendem Treibstoffanteil. Entsprechend verhalten sich auch die Steighöhen, die mit den verschiedenen Treibstoffanteilen erreicht werden können.

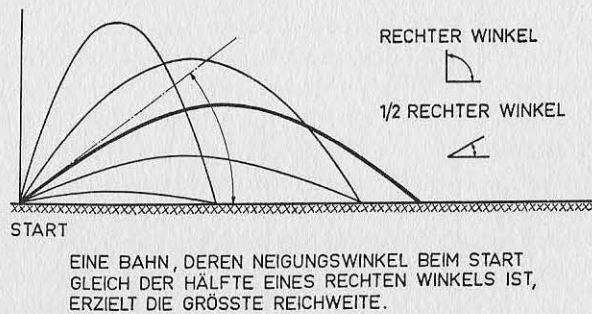
Nach diesem Ergebnis ist leicht einzusehen, daß die Raketentechniker sich mit allen Mitteln bemüht haben, den Treibstoffanteil für die Raketen so günstig wie möglich zu gestalten. Aber auch hier ist dafür gesorgt, daß die Bäume nicht in den Himmel wachsen. Ein Werkstoff für den Bau von Raketen und Triebwerken mit dem spezifischen Gewicht Null ist



noch nicht erfunden. Nach den bisherigen Ergebnissen und Erfahrungen dürfte die Grenze für den Treibstoffanteil unter sehr vorteilhaften Bedingungen bei 90 Prozent liegen. Wie aus unserer Berechnung hervorgeht, erreicht man mit diesem Treibstoffanteil noch nicht die Geschwindigkeit, die nötig ist, um die Erde zu verlassen. Die größte Steighöhe, die man erzielen kann, beträgt nur etwa 800 Kilometer. Will man auf noch höhere Geschwindigkeiten und noch größere Steighöhen kommen, muß man tatsächlich ganz andere Mittel der Konstruktion anwenden, die wir später noch beschreiben werden.

Die auf den vorausgegangenen Seiten sorgfältig untersuchte Steilbahn ist nur ein Sonderfall der möglichen Raketenbahnen. Viele Raketen werden nicht so gelenkt, daß sie eine möglichst große Höhe erreichen, sondern so, daß sie eine möglichst große Entfernung auf der Erde überbrücken. Hierzu läßt man die Raketen schräg starten oder lenkt sie nach einem senkrechten Start in die gewünschte Richtung um.

Natürlich taucht sofort die Frage auf: Wie stark muß die Rakete umgelenkt werden, damit sie möglichst weit fliegt? Für einen sehr verein-

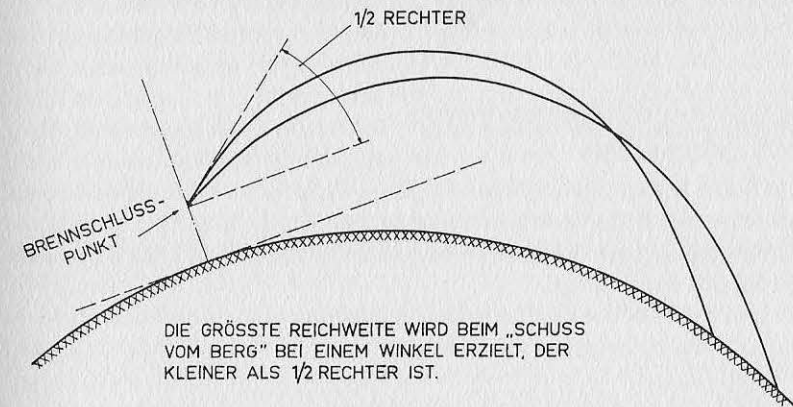


fachten Fall haben wir in der Abbildung eine Antwort gezeichnet, die vielen von uns aus der Schule bekannt sein wird. Fünf Raketen fliegen mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit von der Erdoberfläche ab. Die sehr steil und auch die sehr flach gestarteten Raketen fliegen nur über kurze Entfernungen. Eine bevorzugte Neigung ergibt die größte Entfernung, diejenige nämlich, die die Hälfte eines rechten Winkels darstellt. Unter diesem Winkel muß man also die Raketen starten, wenn sie möglichst weit fliegen sollen.

Die mit den letzten Abbildungen gezeigten Flugbahnen nennt der Mathematiker »Parabeln«. Aus verschiedenen Gründen sind die in der Wirklichkeit auftretenden Bahnkurven jedoch keine Parabeln. Einer

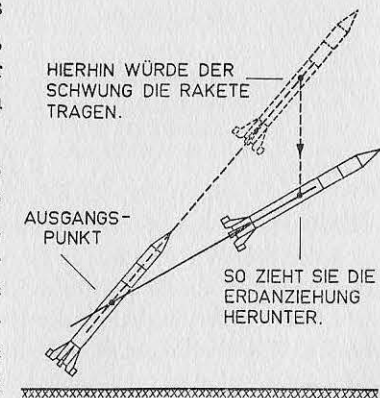
dieser Gründe, der sich vor allem bei kurzen Bahnen auswirkt, ist der Luftwiderstand. Bei langen Bahnen, also großer Reichweite, macht sich dagegen bemerkbar, daß die Erdanziehung überall zum Erdmittelpunkt zeigt und – wie wir schon wissen – mit steigender Höhe abnimmt.

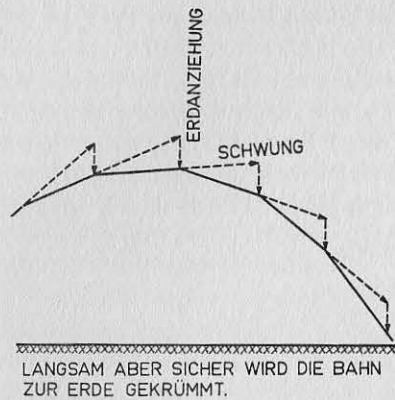
Selbst wenn wir die Besprechung dieser Einflüsse auf später vertagen und vorerst annehmen, daß Flugbahnen Parabeln darstellen, müssen wir das Ergebnis für den günstigsten Neigungswinkel noch einer Korrektur



unterziehen. Unsere erste Überlegung setzt voraus, daß die Rakete beim Start sofort ihre Brennschlußgeschwindigkeit hat und ohne Antrieb weiterfliegt wie ein Stein, der geworfen wird. In Wirklichkeit aber liegt der Brennschlußpunkt, wie unsere nächste Abbildung zeigt, in größerer Höhe über der Erdoberfläche. Da die Erdoberfläche außerdem nicht eben, sondern gekrümmt ist, tritt der Fall ein, den die Artilleristen den »Schuß vom Berg« nennen. Wie uns aus der Abbildung sofort klar wird, verlangt der »Schuß vom Berg« für die größte Reichweite einen kleineren Winkel als einen halben Rechten.

Die Form der Raketenbahnen, die »Wurfparabel«, erscheint uns so natürlich und selbstverständlich, daß sie bisher keiner Erklärung bedurfte. Trotzdem wollen wir ihre Entstehung verfolgen, um bei ähnlichen Untersuchungen eine klare Vorstellung zu haben. Greifen wir uns

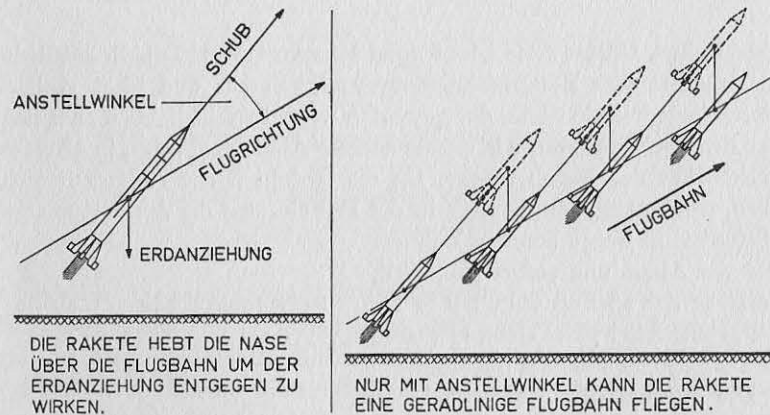




irgendeinen Punkt der Bahn heraus. In diesem Punkt wirken auf die Rakete gleichzeitig zwei Einflüsse: ihr Schwung und die Erdanziehung. Wir machen es uns bequem und lassen diese beiden Einflüsse in Gedanken zeitlich nacheinander an der Rakete angreifen. In der ersten Sekunde trägt der Schwung sie geradlinig nach oben, wo wir ihre Stellung gestrichelt festhalten. Dann lassen wir die Erdanziehung wirken, wodurch sie

ein Stück heruntergeholt wird. In dieser Weise können wir die Rakete auf ihrer ganzen Bahn verfolgen und erkennen deutlich, wie die beharrliche Erdanziehung die aufwärts gerichtete Bahn allmählich, aber sicher zum Erdboden herumbiegt.

Nicht nur auf der Freiflugbahn, auch schon auf der Antriebsbahn wirkt diese Erdanziehung auf die Rakete. Zu den Einflüssen »Schwung« und

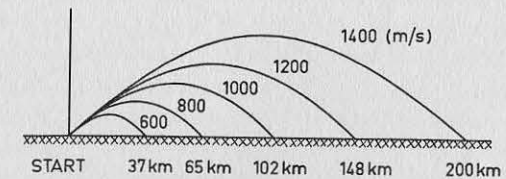


»Erdbeschleunigung« tritt hier noch der Schub des Triebwerkes. Wirkt sich der Schub genau in der Flugrichtung aus, also in der Richtung, in die der Schwung die Rakete weist, so hätten wir ein ganz ähnliches Bild wie bei der Freiflugbahn: die Bahn würde allmählich der Erde zugebogen. Wie die Rakete es anstellt, statt dessen eine gerade Antriebsbahn zu fliegen, zeigt uns das Bild. Die Rakete weist mit ihrer Nase nicht in

Flugrichtung, sondern darüber hinaus. Unsere Hilfszeichnung, die die zwei Einflüsse Schub und Erdanziehung nacheinander wirken läßt, zeigt den Erfolg: eine geradlinige Antriebsbahn. Der Winkel, den die Raketenachse, oder die Richtung des Schubes, mit der Flugbahn bildet, heißt »Anstellwinkel«. Natürlich kostet die Überwindung der Erdanziehung einen Teil der Antriebskraft. Am Anfang der Bahn, kurz nach dem Start, ist dieser Anteil größer als gegen Brennschluß, da die Rakete noch ein hohes Gewicht hat. Zu dieser Zeit spielt auch die Luftkraft, der »Auftrieb«, eine große Rolle, die wir aber erst später besprechen wollen.

Auch eine weitere Kraft werden wir erst später kennenlernen, nämlich die Zentrifugalkraft. Sie spielt insbesondere bei sehr großen Reichweiten eine bedeutende Rolle. Wir werden das Wesen dieser Kraft studieren müssen, wenn wir die Bewegung der Satelliten verstehen wollen. An dieser Stelle sei nur gesagt, daß die Zentrifugalkraft immer dann auftritt, wenn die Bahn gekrümmt ist, daß sie stets nach außen zeigt und daß sie um so stärker ist, je mehr die Bahn sich krümmt und je höher die Geschwindigkeit der Rakete ist.

Das nächste Gedankenexperiment soll uns darüber Aufschluß geben, wie stark der Einfluß der Geschwindigkeit auf die Reichweite ist. Wir lassen wieder fünf Raketen starten, diesmal alle unter dem günstigsten Neigungswinkel, aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Während die langsamste Rakete mit nur 600 m/s starten soll, fliegen die folgenden jeweils um 200 m/s schneller, so daß die schnellste mit 1400 m/s aufsteigt. Die Abbildung zeigt uns, was wir erwartet haben: schnelle Raketen fliegen weiter. Dem aufmerksamen Betrachter zeigt sie mehr. Vergleichen wir die Bahnen der langsamsten Rakete (600 m/s) mit der Bahn der Rakete,



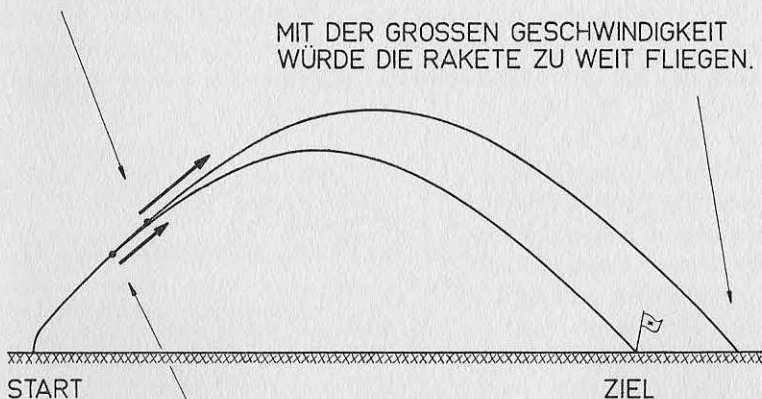
DIE REICHWEITE STEIGT QUADRATISCH MIT DER GESCHWINDIGKEIT.

die genau doppelt so schnell ist (1200 m/s), so finden wir, daß die Rakete mit der *doppelten* Geschwindigkeit genau *viermal* so weit fliegt ($4 \times 37 \text{ km} = 148 \text{ km}$). Bei dreifacher Geschwindigkeit flöge sie $3 \times 3 = 9$ mal so weit, bei vierfacher $4 \times 4 = 16$ mal so weit. Der Mathematiker sagt: »Die Reichweite steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.« Auch wenn wir das nicht verstehen, erkennen wir den über Erwarten großen Einfluß der Brennschlußgeschwindigkeit.

Da von einer Rakete – einer friedlichen oder kriegerischen – verlangt werden muß, daß sie möglichst genau in dem vorgegebenen Ziele ankommt, muß man auf diese Größe, die Brennschlußgeschwindigkeit, einwirken. Man folgt damit dem Verfahren der Artillerie. Die Schußweite einer Kanone ist abhängig von der Pulverladung, dem Gewicht der Kanonenkugel und dem Erhöhungswinkel, unter dem das Geschützrohr aufgestellt wird. Seit Hunderten von Jahren legen die Kanoniere mit dem Geschützerhebungswinkel und mit der Anzahl der Pulversäcke, die sie ins Kanonenrohr hineinwerfen, die Reichweite ihrer Geschosse fest. Die Menge des zum Abschluß verwendeten Pulvers bestimmt die Austrittsgeschwindigkeit der Kugel aus dem Lauf, also die Anfangsgeschwindigkeit für ihre Freiflugbahn.

Auch bei Raketen ist der wichtigste Faktor, der die Reichweite beeinflusst, die Brennschlußgeschwindigkeit, das heißt die Anfangsgeschwindigkeit der Freiflugbahn. Bei ungesteuerten Pulverraketen geht man genau den gleichen Weg wie die Kanoniere mit ihren Geschützen. Man sorgt dafür, daß die Raketen unter einem bestimmten Erhebungswinkel

AN DIESEM PUNKTE WÄRE DER
BRENNSTOFF VERBRAUCHT.



MIT DER GROSSEN GESCHWINDIGKEIT
WÜRDIE DIE RAKETE ZU WEIT FLIEGEN.

DAHER SCHALTET MAN DEN ANTRIEB VORHER
BEI DER „RICHTIGEN“ GESCHWINDIGKEIT AB.

abfliegen, und sorgt für eine genau definierte Menge eines genau bekannten Pulvers. Wenn beide Werte ideal gut eingehalten werden könnten, würde die Rakete mit voller Genauigkeit ins Ziel fliegen. Leider

ist das aber gerade bei der Antriebsenergie, die im wesentlichen von dem Pulvertreibsatz bestimmt wird, nicht immer so genau möglich. Dazu kommt, daß bei sehr großen Reichweiten der Einfluß der Geschwindigkeit noch größer ist, als wir ihn vorhin geschildert haben.

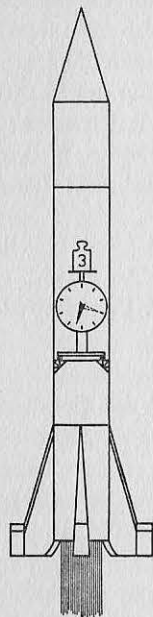
Deshalb haben sich die Raketentechniker, um genau zu treffen, ein anderes Verfahren ausgedacht, das sich besonders gut bei Flüssigkeitsraketen anwenden läßt. Da es so sehr genau auf die Brennschlußgeschwindigkeit ankommt, mißt man die Geschwindigkeit während der ganzen Antriebsbahn und schaltet den Antrieb der Rakete künstlich ab, bevor der Treibstoff verbraucht ist, nämlich in dem Augenblick, in dem die »richtige« Geschwindigkeit erreicht ist. Die »richtige« Geschwindigkeit, mit der also das Ziel genau erreicht wird, können die Mathematiker schon vor dem Start errechnen. Soll die Abweichung der Rakete im Ziel klein sein, zum Beispiel nur ein Tausendstel der Reichweite (das heißt bei 5000 Kilometern Reichweite 5000 Meter Abweichung), so werden an die Messung der Geschwindigkeit und an die Exaktheit der Antriebsabschaltung sehr große Anforderungen gestellt.

Der Scharfsinn von Hunderten von Mathematikern, Physikern und Ingenieuren hat für die Geschwindigkeitsmessung der fliegenden Rakete eine ganze Reihe von Verfahren ausgearbeitet. Bei einigen dieser Verfahren bedarf es einer ständigen Funkverbindung zwischen der Startstelle und der Rakete. In manchen Fällen aber hatte man den Wunsch, ohne eine solche Verbindung auszukommen und die Geschwindigkeit der Rakete durch ein bordfestes Gerät allein zu messen. Ein solches Geschwindigkeitsmeßgerät befindet sich etwa in derselben Lage wie ein Eisenbahnpassagier, der im geschlossenen Zug bei heruntergelassenen Fenstervorhängen feststellen soll, welche Geschwindigkeit der Zug hat. Das ist unmöglich. Weder mit unseren Sinnen noch mit Geräten können wir Geschwindigkeiten messen, wenn sie nicht an außerhalb unseres Gefährtes liegenden Punkten abzulesen sind. So hat bisher kein Mensch die ungeheure Geschwindigkeit der Erde auf ihrem Weg um die Sonne (30,6 km/s) empfunden, und die Messungen dieser Geschwindigkeit beruhen auf einer Beobachtung von Körpern außerhalb unserer Erde.

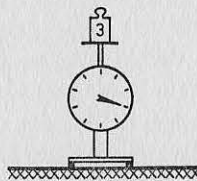
Trotzdem gibt es ein Verfahren, mit dem wir die Geschwindigkeit zwar nicht direkt messen, aber ermitteln können. Wenn wir wieder an den Eisenbahnpassagier denken, so stellen wir fest, daß er zwar nicht die Geschwindigkeit, wohl aber die Beschleunigung oder das Bremsen des Eisenbahnzuges feststellen kann. Im beschleunigten Zug wird er, wenn er in Fahrtrichtung sitzt, fest an seine Rücklehne gepreßt, bremst der Zug dagegen, so wird er mit dem Gesicht voraus von seinem Rücksitz

abgeschleudert. Ein schlecht untergebrachter Koffer wird zum Beschleunigungsmeßgerät, wenn er bei plötzlichem Bremsen aus dem Gepäcknetz heraus und uns auf die Füße springt. Im Gegensatz zu Geschwindigkeiten sind also Beschleunigungen im Inneren eines Gefährtes durchaus meßbar.

Wir haben vorhin schon eine Beschleunigung – die Erdbeschleunigung – gemessen, nämlich als wir die Abhängigkeit des Gewichtes von seiner Höhe über dem Erdboden feststellten. Die gleiche Federwaage kann man auch zum Messen der Raketenbeschleunigung benutzen. Ein



IN DER BESCHLEUNIGTEN RAKETE WIRD EIN GEWICHT SCHWERER ALS ES AUF DEM ERDBODEN WIEGT. DURCH DIE GEWICHTSZUNAHME KANN MAN DIE BESCHLEUNIGUNG MESSEN.



Gewicht auf der Federwaage wird in der beschleunigten Rakete schwerer, weil außer der Erdbeschleunigung noch die der Rakete darauf wirkt. Der Zusatzdruck auf die Schale der Waage entspricht dem Druck, den der Eisenbahnpassagier unseres Beispiels an seinen Sitz preßt. Eine ganze Reihe von Beschleunigungsmessern sind nichts anderes als zweckentsprechend aufgebaute Federwaagen.

Mit der Beschleunigungsmessung allein ist es aber nicht getan. Um die Reichweite der Rakete festzulegen, müssen wir die Geschwindigkeit kennen. Das Verfahren, aus der Beschleunigung die Geschwindigkeit zu ermitteln, lauschen wir der Natur ab, indem wir uns daran erinnern, wie

die Raketengeschwindigkeit selbst entsteht. Die Rakete steht zunächst unbeweglich in der Startstelle. Nach Einschalten des Triebwerkes beginnt die Geschwindigkeit der Rakete zu steigen. Wir wissen schon aus dem Beispiel des fallenden Steines, daß die Geschwindigkeit der Rakete in jeder Sekunde um einen bestimmten Betrag größer wird, falls die Beschleunigung sich nicht ändert. Andererseits wissen wir aber auch bereits, daß die Beschleunigung einer Rakete auf ihrer Antriebsbahn dauernd zunimmt. So kann sich aus der Messung der Beschleunigung mit der Federwaage zum Beispiel folgende Tabelle ergeben:

Beschleunigung der Rakete

in der 1. Sekunde	10 m/s je Sekunde
in der 2. Sekunde	11 m/s je Sekunde
in der 3. Sekunde	12 m/s je Sekunde
in der 4. Sekunde	13 m/s je Sekunde

Da die Beschleunigung einen Geschwindigkeitszuwachs bedeutet, kann man die Geschwindigkeit der Rakete dadurch ermitteln, daß man zu der Anfangsgeschwindigkeit Null der in der Startstelle ruhenden Rakete die Zuwächse hinzuzählt und, genau wie die Natur, die Geschwindigkeit allmählich aufbaut. Wir erhalten als Ergebnis:

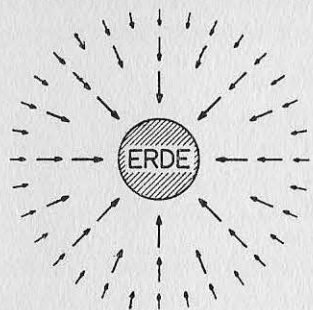
Geschwindigkeit der Rakete

Beim Start	0 m/s
nach 1 Sekunde	$0 + 10 = 10$ m/s
nach 2 Sekunden	$0 + 10 + 11 = 21$ m/s
nach 3 Sekunden	$0 + 10 + 11 + 12 = 33$ m/s
nach 4 Sekunden	$0 + 10 + 11 + 12 + 13 = 46$ m/s

Diesen einfachen Vorgang nennen die Mathematiker »Integration«, auf deutsch »Zusammenfügen«. Da an Bord der Rakete bislang noch keine Menschen mitfliegen, die die Skala der Federwaage ablesen und die Werte zusammenzählen können, läßt man diese Aufgabe von Geräten erledigen, die auf die Bezeichnung »Integratoren« hören. Sie lesen die Beschleunigung nicht nur jede Sekunde, sondern in viel kürzeren Zeitabschnitten ab, so daß die Geschwindigkeit viel genauer ermittelt wird, als es einem Menschen möglich wäre.

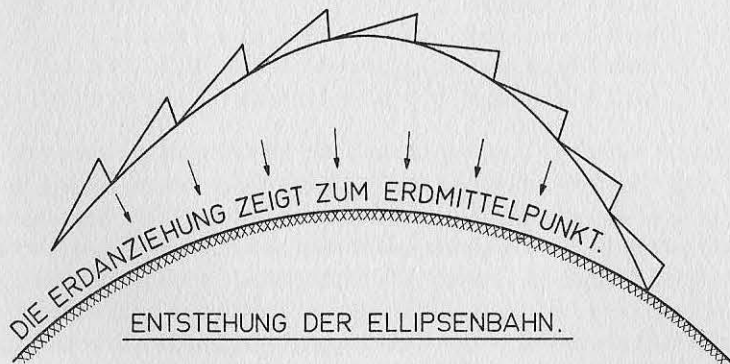
Die besten Meßmethoden für die Geschwindigkeit der Rakete bleiben jedoch ohne Sinn, wenn wir die Freiflugbahn nicht vorausrechnen können. Bei großen Reichweiten müssen wir unser primitives Parabelbild der Flugbahn verbessern und vor allem unsere Vorstellung von der

Erdbeschleunigung der Wirklichkeit besser anpassen. Das im Weltraum um die Erde herum ausgespannte Feld der Erdbeschleunigung sieht aus wie das Schwerfeld aller Himmelskörper, überhaupt eines jeden Körpers im Raum. Von allen Seiten zeigt die Erdbeschleunigung auf den Erdmittelpunkt. Sie ist, wie wir schon wissen, in der Nähe der Erdoberfläche am größten, und nimmt allmählich nach außen ab. Das haben wir in unserer Zeichnung durch die immer kleiner werdenden Pfeile angedeutet.



DIE SCHWERKRAFTLINIEN ZEIGEN AUF DEN ERDMITTELPUNKT. NACH AUSSEN NIMMT DIE ERDBESCHLEUNIGUNG AB, OHNE JE GANZ ZU VERSCHWINDEN

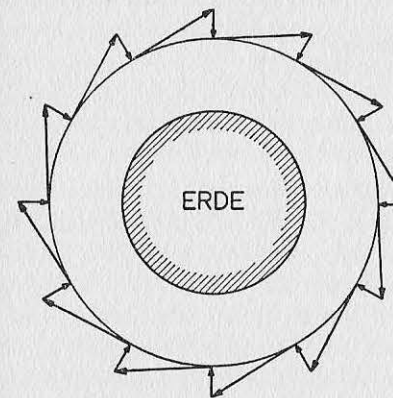
Wenn die Erde als einziger Himmelskörper frei im Raume schwebte, müßte ein Stein, auch wenn er sich in außerordentlich großer Entfernung von der Erde im Raume befände, allmählich von ihr angezogen werden und auf sie herunterfallen. Die Kraft, die die Erde auf ihn ausübt, ist aber bei großer Entfernung außerordentlich gering.



Wenn wir das Gedankenexperiment, das uns zur parabelförmigen Flugbahn einer Rakete führt, nun noch einmal wiederholen und dabei die wirkliche Richtung der Erdanziehung, nämlich die zum Erdmittelpunkt hin berücksichtigen, so ergibt sich der im Bild gezeigte Bahn-

verlauf. Der Unterschied gegenüber der Parabelbahn ist für den Nicht-mathematiker kaum sichtbar, doch erkennt man, daß sich die Richtung der Erdanziehung verändert.

Ein ganz anderes Bild dagegen erhalten wir, wenn wir von sehr großen Anfangsgeschwindigkeiten der Rakete ausgehen. Im Gegensatz zu unserer früheren primitiven Vorstellung von einer ebenen Erde, auf die die Rakete auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten immer zurückfallen muß, ergibt sich aus der jetzigen Konstruktion ganz zwangsläufig, daß sie bei einer sehr hohen Geschwindigkeit auf die kugelförmige Erde gar nicht mehr zurückfallen kann. Obwohl die Erdanziehung die Rakete ständig wieder der Erde näher bringt, ist sie nicht in der Lage, ihre Bahn bis zum Erdboden zu krümmen. In jedem von uns gedachten Schritt vermag sie



DER SCHWUNG ERGIBT EINEN HÖHENGEGWINN, DER VON DER ERDANZIEHUNG WIEDER ZUNICHTE GEMACHT WIRD.

nur den Höhengewinn auszugleichen, den die Rakete durch ihren Schwung erreicht hat. Damit haben wir das Urbild einer Satellitenbahn und gleichzeitig auch ein Bild von der Bahn des Mondes um die Erde oder eines Planeten um die Sonne gefunden.

Dies ist jedoch nicht die einzige Erklärung für die Tatsache, daß ein Satellit oder der Mond nicht auf die Erde fallen, sondern sie ständig umkreisen. In früheren Zeiten, als man noch glaubte, daß die Menschen das innere Wesen der Natur ergründen könnten, wenn sie physikalische Gesetze aufstellten, war man bekümmert, wenn man für ein und dieselbe Erscheinung zwei verschiedene Erklärungen fand. Heute, nachdem wir wissen, daß alle unsere Menschenkunst sich darauf beschränkt, die Naturvorgänge möglichst anschaulich zu beschreiben, so daß wir sie verstehen können, ist man gern bereit, mehrere Erklärungen zuzulassen.

Wenn ein Körper wie der Mond die Erde umschwebt, ohne auf sie

herunterzufallen, ist man geneigt, dies auf eine Kraft zurückzuführen, die ihn auf seiner einsamen Höhe festhält. Diese Kraft wird man, da sie vom Mittelpunkt der Erde wegzeigt, die Zentrifugalkraft nennen, auf deutsch: »die Kraft, die aus dem Mittelpunkt flieht«. Wir alle kennen sie aus dem täglichen Leben. Ein fröhliches Beispiel zeigt unser nächstes

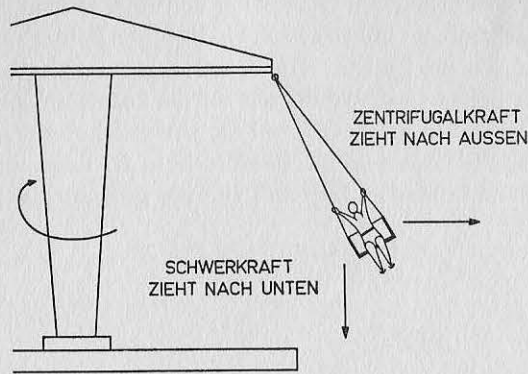
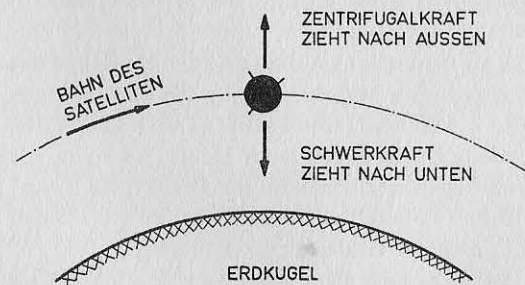


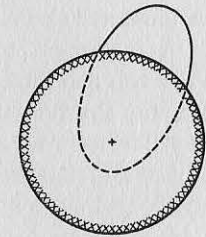
Bild. Wenn eines der bekannten, heute etwas veralteten Kettenkarussells auf dem Jahrmarkt noch in Ruhe ist, so hängen die Sitze senkrecht nach unten herab, bis die kühnen Fahrer Platz genommen haben. Beginnt das Karussell sich zu drehen, so entsteht eine Zentrifugalkraft, die – von der Achse der Drehung aus gesehen – nach außen wirkt und die Sitze nach außen zieht. Diesem Zug wirkt die Schwerkraft entgegen, so daß jeder Sitz sich eine Gleichgewichtslage sucht. Die Zentrifugalkraft ist also eine Kraft, die immer dann auftritt, wenn ein Körper sich um eine Achse oder einen Mittelpunkt dreht, und die von diesem Mittelpunkt oder der Achse aus immer nach außen weist.

Ein natürlicher oder künstlicher Satellit dreht sich um den Mittelpunkt der Erde und erzeugt durch diese Drehung eine Zentrifugalkraft, die



ihn nach außen ziehen will. Er sucht sich, wie unser etwa maßstäbliches Bild es zeigt, eine Bahn, auf der die Schwerkraft, die diesem Zug entgegenwirkt, der Zentrifugalkraft gerade das Gleichgewicht hält.

Alle Raketenbahnen, auch die mit sehr kleinen Reichweiten, sind in Wirklichkeit solche Bahnen und entstehen aus dem Zusammenspiel von Zentrifugalkraft und Erdanziehung. Es sind die gleichen Kurven, die auch die Planeten um die Sonne durchfliegen, und sie haben alle den gemeinsamen Namen »Ellipsen«. Ein Sonderfall einer Ellipsenbahn, der bei den künstlichen Satelliten um die Erde, aber auch bei den Planetenbahnen um die Sonne beinahe erreicht wird, ist der Kreis. Kreise und Ellipsen aber sind geschlossene Figuren, und die Frage liegt nahe, wieso Raketenbahnen, die doch auf der Erdoberfläche anfangen und wieder auf ihr enden, Ellipsen sein können. Nun, die Freiflugbahnen von Raketen, die zur Erde zurückkehren, sind natürlich keine ganzen Ellipsen, sondern nur Stücke von ihnen. Wie unsere Abbildung zeigt, verläuft ein mehr oder weniger großer Teil der Ellipse im Erdinneren.



ALLE FREIFLUGBAHNEN SIND STÜCKE VON ELLIPSEN.

Da die Schwerkraft der Erde mit größerem Abstand von der Erdoberfläche immer stärker abnimmt, vermindert sich auch die Zentrifugalkraft, die ihr das Gleichgewicht halten kann, immer mehr, je weiter wir uns von der Erde entfernen. Da ferner zu einer geringeren Zentrifugalkraft auch eine geringere Geschwindigkeit gehört, benötigen also Satelliten der Erde eine um so geringere Bahngeschwindigkeit, je höher sie über der Erdoberfläche fliegen. Wie man aus der folgenden Tabelle erkennt, müßte ein Satellit, der dicht über der Erdoberfläche, also in der Höhe 0 fliegt, eine Bahngeschwindigkeit von 7900 m/s besitzen, während ein Satellit in 2000 Kilometern Höhe nur noch knapp 7000 m/s Geschwindigkeit haben muß. Der Mond schließlich, der natürliche Satellit der Erde, der sie in einer Entfernung von 384000 Kilometern umkreist, braucht nur noch 1 km/s Geschwindigkeit.

Bahndurchmesser	Höhe über Erdboden	Geschwindigkeit	Umlaufzeit
12740 km	0 km	7900 m/s	85 Minuten
14740 km	1000 km	7360 m/s	105 Minuten
16740 km	2000 km	6900 m/s	144 Minuten
85000 km	36000 km	3160 m/s	24 Stunden
778000 km	378000 km	1000 m/s	27 Tage

Die geringere Bahngeschwindigkeit der höher fliegenden Satelliten bedeutet leider keine Erleichterung für die Raketenkonstruktoren, die künstliche Satelliten auf ihre Bahn bringen wollen. Denn hierfür ist ja

nicht nur die Energie erforderlich, die dem Satelliten die notwendige Geschwindigkeit erteilt, sondern auch die Energie, die ihn auf die notwendige Höhe bringt. Wenn man beide Anteile an Energie berücksichtigt, so erhöht sich die benötigte Gesamtenergie mit steigender Höhe, obwohl doch die Geschwindigkeit des Satelliten auf seiner Bahn abnimmt.

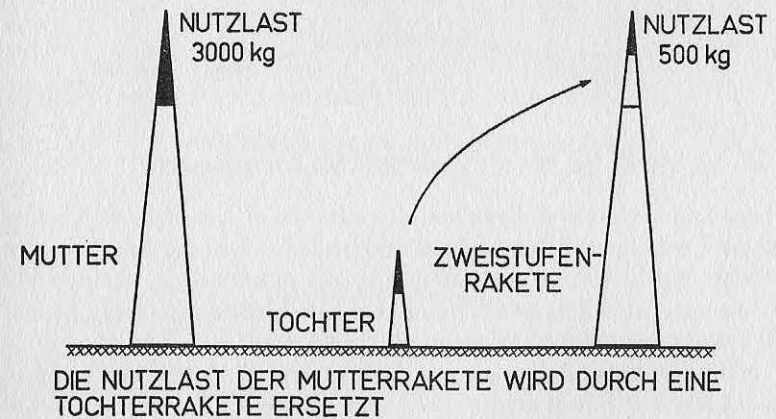
In unserer Tabelle haben wir auch die Durchmesser der Satellitenbahnen eingetragen, und gerade aus diesen Zahlen erkennt man deutlich, daß die von den künstlichen Satelliten bisher erreichten Höhen im Vergleich zum Erddurchmesser gar nicht so sehr groß sind. Eine Höhe von 2000 Kilometern ist noch relativ dicht über der Erdoberfläche. Kennt man den Durchmesser einer Satellitenbahn, so kennt man auch ihren Umfang, und wenn man den Umfang kennt sowie die Geschwindigkeit, mit der die Bahn durchflogen wird, kann man ausrechnen, welche Zeit der Satellit braucht, um sie einmal zu durchmessen. Auch diese Zahlen haben wir angegeben und können an ihnen manches Interessante ablesen. Die Satelliten der Jahre 1957 und 1958 liegen in Höhen um 1000 bis 2000 Kilometer über der Erdoberfläche, sie haben also Umlaufzeiten in der Größe von etwa 2 Stunden. Der am weitesten entfernte Satellit der Erde, nämlich unser Mond, hat eine Umlaufzeit von 27 Tagen.

Zwischen diesen beiden extremen Werten gibt es noch einen recht eigenartigen Fall, nämlich den Satelliten mit einer Höhe von 36000 Kilometern, der eine Umlaufzeit von genau 24 Stunden hat. Wäre er vom Äquator aus abgeflogen, so würde er die Erde in genau der gleichen Zeit umkreisen, die sie selbst braucht, um sich einmal um ihre Achse zu drehen. Mit anderen Worten, ein solcher Satellit stünde wie festgenagelt über einem Punkt des Äquators am Himmel. Für derartige scheinbar feststehende Satelliten gibt es eine Reihe von praktischen Anwendungsmöglichkeiten, über die wir später noch sprechen werden.

Die Aufzählung der Einflüsse, die die Erde auf die Raketenbahnen hat, wäre nicht vollständig, wenn wir den der Erddrehung nicht erwähnten. Bekanntlich dreht sich die Erde in 24 Stunden einmal um ihre eigene Achse. Daher besitzen alle Punkte der Erdoberfläche (außer den Polen) verschieden große Geschwindigkeit. Die größte Geschwindigkeit hat die Erdoberfläche am Äquator. Sie läßt sich leicht errechnen. Der Erdumfang am Äquator beträgt 40 Millionen Meter, und diese werden von einem Punkt der Erdoberfläche in 24 Stunden, das heißt in 86 700 Sekunden, durchmessen. Hieraus ergibt sich eine Geschwindigkeit von 461 m/s, und zwar in Richtung von West nach Ost. Wie alle anderen Gegenstände, die dort auf der Erdoberfläche stehen, hat natürlich auch

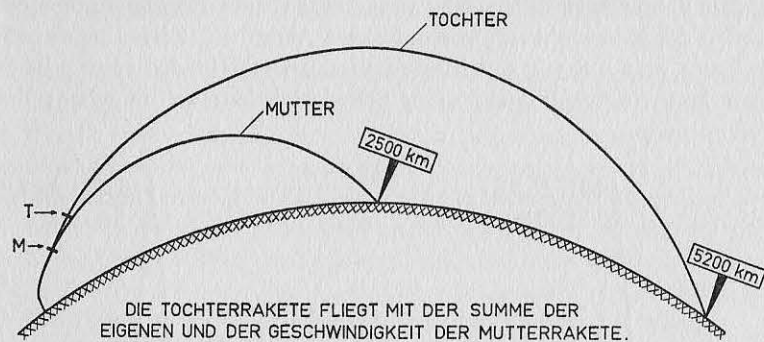
eine Rakete, die vom Äquator gestartet wird, während des Startvorganges diese Geschwindigkeit. Lenkt man sie nach Osten um, so erzielt man damit also einen Gewinn an Geschwindigkeit von 461 m/s, der ein Geschenk der Erdumdrehung ist und nicht vom Triebwerk erzeugt zu werden braucht.

Wenn man die Geschwindigkeiten der Satelliten mit den Geschwindigkeiten vergleicht, die wir früher für sehr geschickt aufgebaute Raketen errechnet haben, so erkennt man eine große Lücke. Die Geschwindigkeiten, die für Raketen sehr großer Reichweite, für Raketen, die Satelliten auf ihre Bahn tragen sollen, oder endlich für Raumfahrzeuge nötig sind, würden die Konstrukteure vor unlösbare Aufgaben stellen, wenn man die heute verwendeten Antriebe voraussetzt. Glücklicherweise gibt es einen konstruktiven Trick, diese Schwierigkeiten zu umgehen: das Stufenprinzip.



Die Vorschrift für den Bau einer Stufenrakete besteht einfach darin, daß die Nutzlast einer Rakete (Mutter-Rakete) durch eine kleinere Rakete (Tochter-Rakete) ersetzt wird. Die Tochter-Rakete wird nach Ausbrennen der Mutter-Rakete gezündet und setzt den Flug fort. Der Erfolg läßt sich an einem einfachen Beispiel ablesen. Wir nehmen an, wir hätten eine Mutterrakete mit einer Brennschlußgeschwindigkeit von 4500 m/s und einer Nutzlast von 3000 Kilogramm. Außerdem haben wir eine Tochterrakete, die in vollgetanktem Zustand gerade 3000 Kilogramm wiegt und vom Boden gestartet eine Brennschlußgeschwindigkeit von 1500 m/s erreichen würde. Ersetzt man nun bei der Mutterrakete die Nutzlast durch die gleich schwere Tochtterrakete, so verläuft die Antriebsbahn

der Mutterrakete genauso wie mit der früheren Nutzlast. Beim Brennschluß der Mutterrakete, also wenn ihr Treibstoff verbraucht ist, wird die Tochterrakete abgetrennt. Die Mutterrakete fliegt allein weiter und erreicht die Reichweite, die ihrer Brennschlußgeschwindigkeit entspricht, nämlich 2500 Kilometer. Die Tochterrakete wird nach dem Abtrennen gezündet, ihr Triebwerk beginnt zu arbeiten und erzeugt, bis ihr Treibstoffvorrat verbraucht ist, einen Geschwindigkeitszuwachs von 1500 m/s. Er kommt zu der Geschwindigkeit hinzu, die die Tochterrakete schon im Augenblick der Trennung hatte, nämlich 4500 m/s. Mit der Summe



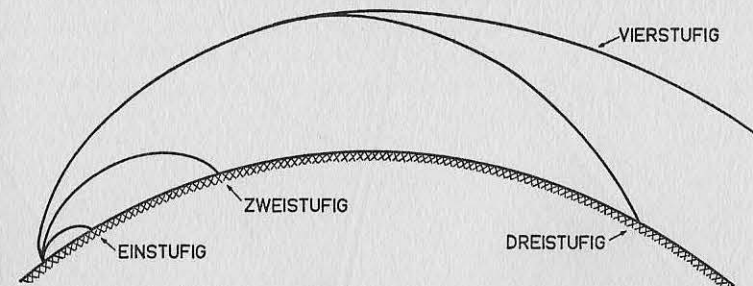
dieser beiden Geschwindigkeiten, also mit 6000 m/s, erreicht die Tochterrakete ihren eigenen Brennschluß und ist dadurch in der Lage, eine viel größere Reichweite zu durchmessen als die Mutterrakete, nämlich 5200 Kilometer. Allerdings ist die Nutzlast, die sie in dieses Ziel trägt, kleiner; sie beträgt nur noch 500 Kilogramm.

Natürlich beschränkt sich der Aufbau von Stufenraketen nicht auf Raketen mit nur zwei Stufen. Drei- und vierstufige Raketen sind es, die die amerikanischen Satelliten »Explorer« und »Vanguard« auf ihre Bahn gebracht haben. Für Forschungszwecke hat man bereits fünf- und sechsstufige Raketen gebaut; geplant sind Raketen mit bis zu einem Dutzend Stufen.

Die Wirksamkeit des Stufenprinzips wollen wir an einem stark vereinfachten Beispiel zeigen, dessen Voraussetzungen allerdings fiktiv sind, also im Gegensatz zu den praktischen Möglichkeiten des Raketenkonstruktors stehen. In der Konstruktionspraxis des Raketenentwicklers wird das Massenverhältnis, also der Treibstoffanteil einer Rakete, um so günstiger ausfallen, je größer die Rakete ist. Für die Stufenraketen bedeutet dies, daß der Geschwindigkeitszuwachs, den die Tochterrakete liefert, kleiner ist als der der Mutterrakete, und der der Enkelin wiederum

kleiner als der der Tochter. Nehmen wir aber einmal an, einem genialen Konstrukteur sei es gelungen, alle Stufen mit dem gleichen Treibstoffanteil und gleich wirksamen Triebwerken auszustatten. Auf dieser Grundlage bauen wir eine Reihe von mehr oder weniger zusammengesetzten Raketen auf, die alle das gleiche Anfangsgewicht von 100 000 Kilogramm besitzen mögen.

Zunächst die einstufige Rakete, sie trägt eine Nutzlast von 15 000 Kilogramm über eine Reichweite von 450 Kilometern.



Die Tochter einer zweistufigen Rakete überbrückt 1900 Kilometer, bringt aber nur die kleinere Nutzlast von 2300 Kilogramm mit.

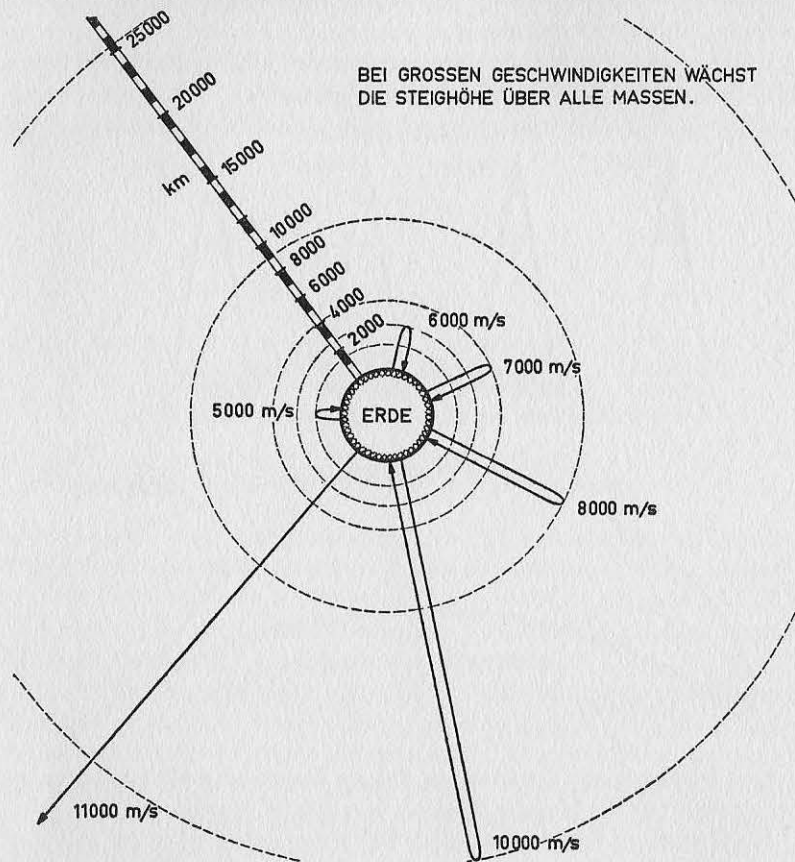
Noch weniger Nutzlast, nämlich 340 Kilogramm, trägt die Enkelin einer dreistufigen Rakete, sie hält aber den Entfernungsrekord mit 6300 Kilometern.

Die Urenkelin einer vierstufigen Rakete schließlich kehrt überhaupt nicht mehr zur Erde zurück, ihre winzige Nutzlast von 50 Kilogramm umschwebt die Erde in einem geringen Abstand als neuer Satellit.

Auf unserem Bild wurden die vier verschiedenen Rakentypen vom gleichen Ort gestartet, so daß ihre Leistungen gut miteinander vergleichbar sind.

Die wissenschaftlichen Grundlagen

Das Stufenprinzip erlaubt uns, sehr hohe Brennschlußgeschwindigkeiten zu erzeugen. Was kann man nun mit diesen Geschwindigkeiten beginnen? Zunächst untersuchen wir mit der uns von früher vertrauten Steilbahn, welche Steighöhen eine Rakete bei verschiedenen Geschwin-

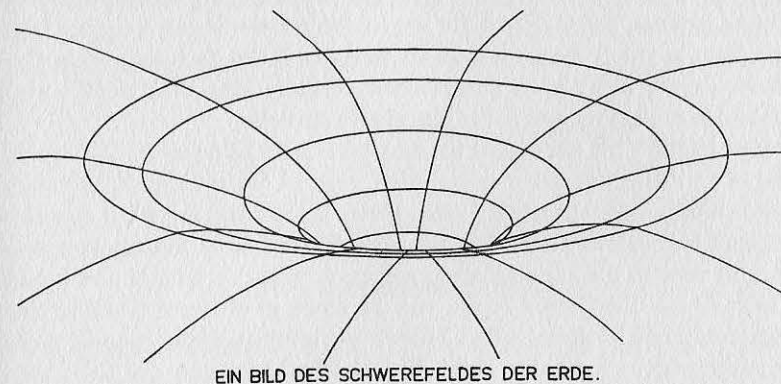


digkeiten erreicht. Unser Bild zeigt, daß wir uns mit »kleinen« Geschwindigkeiten unter 5000 m/s gar nicht abgeben wollen. Mit 5000 m/s Anfangsgeschwindigkeit erreicht die Rakete eine Steighöhe von 1570 Kilometern, ehe sie umkehrt und auf die Erde zurückfällt. Mit 6000 m/s sind es schon 2550 Kilometer Höhe. Wird die Geschwindigkeit weiter gesteigert, so entfernt sich der Gipfelpunkt der Bahn immer weiter von der Erde. Bei etwa 11000 m/s verschwindet die Rakete sogar auf Nimmer-

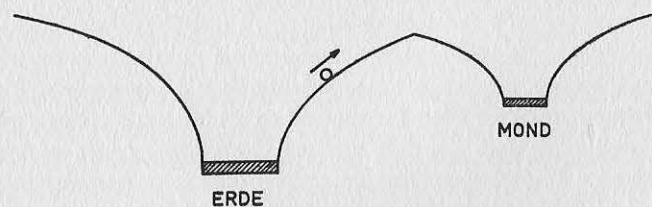
Schwerefelder

wiederschen und kehrt nicht zur Erde zurück. Wie können wir uns diese Erscheinung erklären?

Es gelingt uns »spielend«, wenn wir dazu den soeben erfundenen Weltraumgolfplatz besuchen. Unser Bild zeigt einen Ausschnitt davon.



Von einem normalen Golfplatz unterscheidet sich der neu erfundene vor allem dadurch, daß der Golfball nicht von der Spitze eines kleinen Sandhügels, sondern aus einer Vertiefung herausgeschlagen wird. Das Schnittbild zeigt den Vorgang deutlich. Schlagen wir sanft zu, so rollt die Kugel



an der Wand ein wenig hoch und kehrt in die Vertiefung zurück. Bei stärkeren Schlägen erreicht der Ball den abgeflachten Teil des Trichters, und eine weitere leichte Verstärkung des Schlages genügt, um den Ball sehr weit zu treiben.

Der Vergleich zum Schwerfeld der Erde ist leicht zu ziehen. Der Ball entspricht der Rakete, die Schlagstärke der Brennschlußgeschwindigkeit. Die Neigung der Böschung entspricht der Schwerkraft. Wie diese

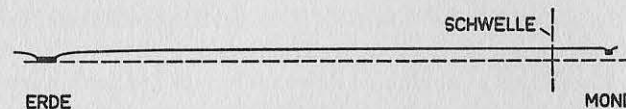
nimmt sie nach außen stark ab, ohne je ganz zu verschwinden. In dieser starken Abnahme der Schwerkraft ist der Grund dafür zu suchen, daß bei großen Brennschlußgeschwindigkeiten ein wenig mehr an Geschwindigkeit eine enorme Steigerung der Steighöhe der Rakete hervorruft.

Bei etwa 11 km/s Brennschlußgeschwindigkeit rollt, um bei unserem Bild zu bleiben, der Golfball die immer flacher werdende Steigung hinauf, ohne je zur Ruhe zu kommen, weil die flache Steigung seine Geschwindigkeit nicht ganz aufzuzehren vermag. Der Ball verläßt also seinen Ursprungsort und kehrt nie wieder zurück.

Nun ist die Erde aber nicht der einzige Himmelskörper im Weltraum, und es erscheint uns daher notwendig, unseren Weltraumgolfplatz auch durch andere Planeten zu ergänzen. Unser Schnittbild zeigt nur den einfachsten Fall eines zweiten Weltkörpers, der zur Erde hinzugekommen ist, und zwar ist die Schnittlinie so gelegt, daß sie durch Erde und Mond hindurchgeht. Der Mond bildet, wie die Erde, in unserem Golfplatz eine Vertiefung, nur ist diese, seiner kleineren Anziehungskraft wegen, nicht so ausgeprägt wie die der Erde. Ein Golfball, der von der Erde zum Mond fliegen soll, braucht nicht den gesamten Wall der Erdschwere zu erklimmen, es genügt, wenn er bis über die Schwelle zwischen Erde und Mond gelangt. Hinter der Schwelle fällt er von selbst auf den Mond herunter. Natürlich ist die hierzu erforderliche Geschwindigkeit auch etwas geringer als diejenige, die nötig ist, um eine Rakete von der Erde in den Weltraum zu schicken.

Wegen der im Bild deutlich sichtbaren Schwelle zwischen Erde und Mond scheint es gar keine große Schwierigkeit zu sein, eine Rakete zum Mond zu schicken. Sie hat ja sozusagen ihre Straße und kommt gar nicht in Versuchung, etwa am Mond vorbeizufiegen. Hier unterliegen wir aber einer Täuschung, weil das Bild unseres Golfplatzes nicht maßstäblich gezeichnet ist. Eine maßstäbliche Darstellung der Schwerfelder zwischen Erde und Mond zeigt uns das nächste Schnittbild. Daraus erkennen wir, daß die Schwerechwelle zwischen Mond und Erde kaum mehr sichtbar, daß das Gelände zwischen beiden und natürlich auch außerhalb dieses Gebietes fast eben ist. Die Führung, die der Golfball auf der Verbindungslinie zwischen Mond und Erde nach Überschreitung der Schwelle zwischen den Schwerfeldern erhält, ist außerordentlich schwach. Und tatsächlich verhält es sich so, daß eine Rakete, die nur noch 700 m/s Geschwindigkeit besitzt und dem Mond bereits auf 50000 Kilometer nahe gekommen ist, fünf Sechstel des Weges also bereits durchlaufen hat, immer noch am Mond vorbeifliegen kann, wenn sie nicht genau die richtige Richtung hat.

Entsprechendes gilt für den Raum zwischen den Planeten und noch mehr für den Raum zwischen den Sonnensystemen. Alle Schwerfelder der einzelnen Himmelskörper reichen an sich bis in die Unendlichkeit des Raumes. Da sie aber in verhältnismäßig geringem Abstand bereits sehr schwach werden und sich gegenseitig überdecken, wird ihre Wirkung auf einen fliegenden Körper so klein, daß sie nicht berücksichtigt zu werden braucht. Man kann sich also bei einem Weltraumflug einer Rakete



DIE GLEICHE SCHWELLE MASZSTÄBLICH.

nicht allzusehr darauf verlassen, daß sie schließlich von dem angesteuerten Planeten oder vom Mond auf die richtige Bahn gezwungen wird. Es ist im Gegenteil notwendig, zusätzliche Steuermöglichkeiten vorzusehen, um die Fahrt der Rakete im Weltraum ein oder mehrere Male zu korrigieren. Gerade in den letzten Jahren vor der Verwirklichung der Mondfahrt mit unbemannten Raketen wurden hierüber zahlreiche Arbeiten und Untersuchungen gemacht.

Das Problem wird noch ungleich verwickelter, wenn wir daran denken, daß der Weltraum im Gegensatz zu unserem Golfplatz nicht nur in zwei, sondern in drei Richtungen ausgedehnt ist, und wenn wir außerdem bedenken, daß die Himmelskörper nicht, wie unsere Golfplätze, ruhig am Ort verharren, sondern sich bewegen, daß es also außer einem örtlichen auch ein zeitliches Problem ist, einen Himmelskörper zu treffen. So hat man errechnet, daß eine Mondrakete, die mit einer nur um ein Zehntausendstel größeren als der richtigen Geschwindigkeit von der Erde abfliegt, zwei Stunden zu früh an dem vereinbarten Treffpunkt mit dem Mond ankommt. Da der Mond aber in einer Stunde mehr als 3400 Kilometer zurücklegt, ist er zu diesem Zeitpunkt noch fast 7000 Kilometer entfernt.

Die Treffschwierigkeiten, die sich bei Fahrten zu den benachbarten Planeten oder ferneren Sternen noch gewaltig erhöhen, werden sich dadurch beseitigen lassen, daß man die Rakete auf ihrem Wege zu diesen Sternen steuert.

Doch treten noch andere Schwierigkeiten auf, die schwerer zu bewältigen sind. Verlangt man, daß die Rakete auf dem Zielstern sicher

landen und nicht auf ihm zerschellen soll, so muß man für diese Landung Bremsmöglichkeiten vorsehen, das heißt der Rakete Triebwerke und Treibstoff mitgeben, die eine Bremsung bei der Landung ermöglichen. Verlangt man darüber hinaus, was bei bemannten Raketen im allgemeinen der Fall sein wird, daß die Mannschaft wieder zur Erde zurückkehren kann, so muß man ihr Tochterraketen mitgeben, die von dem Zielstern starten und auf der Erde mit Bremsung wieder landen können. Durch alle diese Forderungen wird das endgültige Massenverhältnis zwischen der letzten Nutzlast und der ursprünglich gestarteten Rakete, geht man dabei von den heute bekannten Triebwerken aus, außerordentlich schlecht. So läßt sich etwa für eine Reise zum Mars und zurück errechnen, daß man Raketen mit einem Gesamtgewicht von etwa einer halben Million Tonnen von der Erde starten muß, damit die erfolgreichen Erforscher des Mars schließlich mit einem Raumschiff von etwa 10 Tonnen Gewicht auf die Erde zurückkehren können.

Faßt man die Fahrten zu den entfernteren Planeten oder gar zu anderen Sonnensystemen ins Auge, so zeigt sich, daß es nicht genügt, die Geschwindigkeit der Raketen so stark zu erhöhen, daß man die Erde verlassen kann, daß vielmehr jene fernen Ziele auch mit den erhöhten Geschwindigkeiten noch nicht in vernünftigen Zeiträumen erreichbar sind. Daher ist in den letzten Jahren sehr viel von Raketen gesprochen worden, deren Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist. Solche Reisegeschwindigkeiten sind aber weder nach dem heutigen noch nach dem überschaubaren zukünftigen Stand der Technik realisierbar. Von den heute verfügbaren Triebwerken ausgehend, würde es eine Verbesserung auf das Tausendfache bedeuten, wollte man auch nur einen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit erreichen.

Daher können wir es uns hier versagen, auf die Probleme einzugehen, die bei einer Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit auftreten. Denn auch die hübsche Erzählung von den zwei Zwillingenbrüdern, von denen der eine sich ein Jahr lang auf einem so schnellen Schiff im Weltraum tummelt und den Bruder nach seiner Rückkehr um 70 Jahre gealtert vorfindet, ist wohl physikalisch reizvoll, aber für die von uns überschaubare Zeit ohne jede praktische Bedeutung.

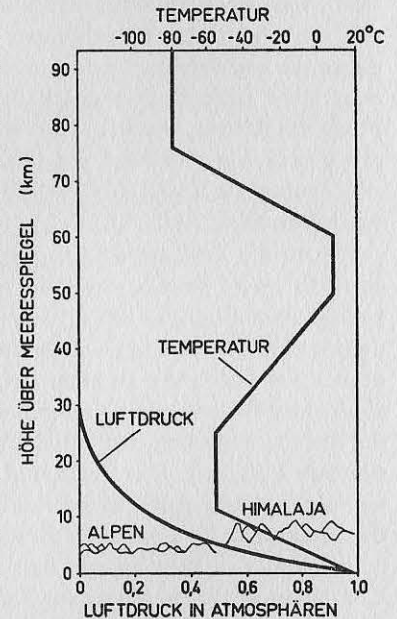
Nach unserem Ausflug in den Weltraum wollen wir noch einmal zu den Wirkungen der Erde und ihrer nächsten Umgebung auf die Raketenbahn zurückkehren. Von den Kräften, die von der Erde ausgehen, haben wir bisher nur die Schwerkraft betrachtet. Nun besitzt aber die Erde eine Lufthülle, und auch diese übt auf die Rakete während ihres Auf- und Abstieges Kräfte aus, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Raketen – Aerodynamik

Wie sieht denn unsere Lufthülle aus? Unser Bild zeigt das Gebiet bis etwa 100 Kilometer Höhe, denn die darüberliegenden Schichten interessieren zwar die Meteorologen und die Höhenforscher, doch ist die Luft über dieser Grenze bereits so dünn geworden, daß wir die Rückwirkungen auf die Rakete und ihre Bahn nicht zu berücksichtigen brauchen. Das ergibt sich leicht aus der in das Bild eingezeichneten Hauptkurve, die den Druck über der Höhe anzeigt.

Während der Druck am Erdboden eine Atmosphäre beträgt, nimmt er mit der Höhe sehr rasch ab und ist in der Höhe von 100 Kilometern nur noch etwa zwei Millionstel davon. Trotzdem erstreckt sich die Lufthülle von dieser Stelle an noch weit in den Raum hinaus, wie uns die Nordlichter anzeigen, die bis zu einer Höhe von 1000 Kilometern erscheinen. Nordlichter sind leuchtende Atome, also leuchtende Luftteilchen. Je weiter man sich von der Erde entfernt, um so seltener werden die Luftteilchen, und schließlich werden sie so selten wie im übrigen Weltraum. Aber von einer wirklichen Grenze der Lufthülle kann man nicht sprechen. Auch die vorhin festgesetzte Wirkungsgrenze der Luft von 100 Kilometern ist willkürlich; sie gilt für Raketenbahnen. Für Satelliten, die für beliebig lange Zeiten der Wirkung der Luftreibung ausgesetzt sind, liegt sie viel höher.

Eine zweite wichtige Kurve ist in das Schaubild eingetragen: die Temperaturkurve, zu der sich die Skala am oberen Rand befindet. Natürlich gibt es je nach der Jahreszeit und je nach der Lage auf dem Erdball verschiedene Temperaturkurven. Die hier eingezeichnete ist gültig als Standardkurve für mittlere Breiten und die mittlere Jahrestemperatur. Wie man deutlich erkennt, nimmt die Temperatur bis etwa 10 Kilometer zunächst ständig ab, bleibt dann unverändert bis etwa 30 Kilometer Höhe, um dann allmählich wieder zuzunehmen. Ein zweites Feld un-

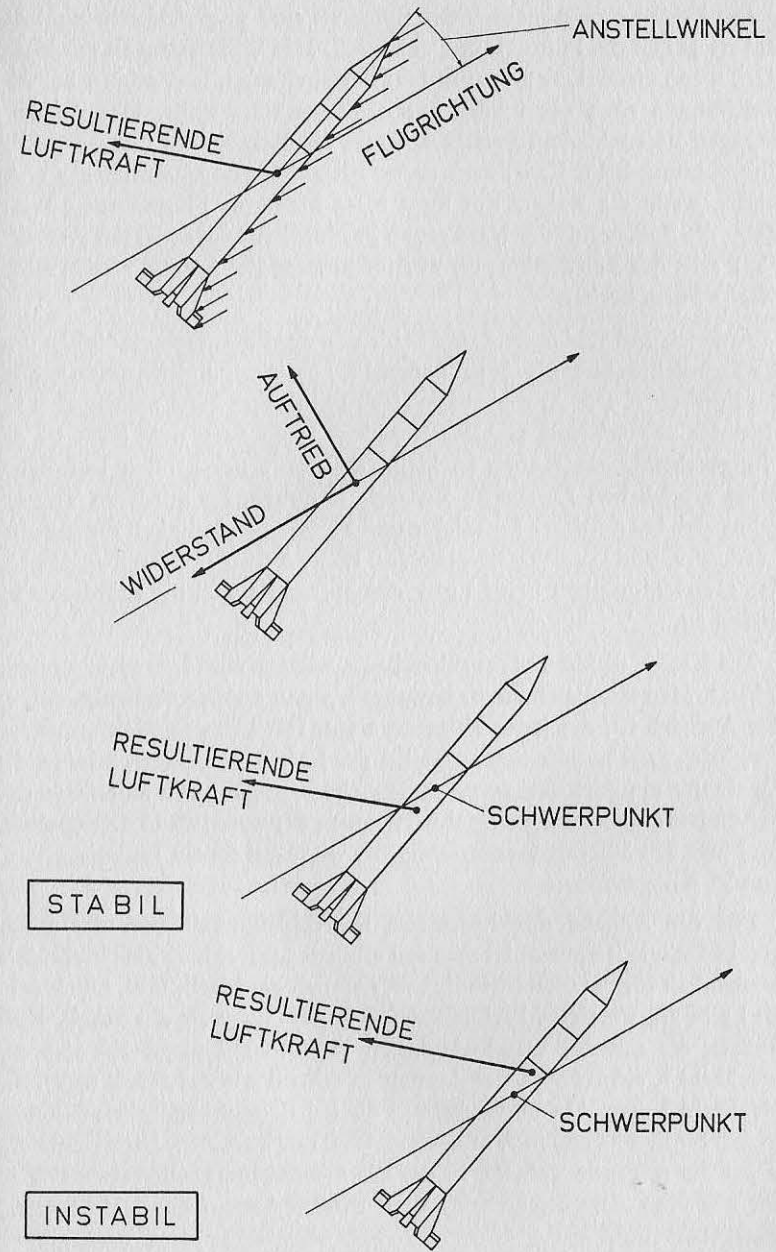


veränderlicher Temperatur gibt es in etwa 50 Kilometern Höhe, dann fällt sie wieder. Außerhalb unseres Schaubildes, in über 100 Kilometern Höhe, ist der Stoff, dessen Temperatur man messen möchte, nämlich die Luft, so dünn geworden, daß es Schwierigkeiten macht, festzulegen, was man unter Temperatur verstehen will.

In der Lufthülle ist die Rakete Kräften ausgesetzt, die durch den Fahrtwind oder auch durch natürliche Winde hervorgerufen werden. Sie greifen, teils als Druckkräfte, teils als Sogkräfte, an der ganzen Oberfläche an. Man kann sich ihre Wirkung in *einer* Luftkraft vereinigt denken, die an einem bestimmten Punkt der Rakete angreift. Diese sogenannte »resultierende« Luftkraft braucht nicht in der Flugrichtung oder einer anderen von der Rakete bevorzugten Richtung zu liegen. Fliegt die Rakete, wie wir es aus früheren Betrachtungen schon kennen, mit einem Anstellwinkel zur Flugrichtung, so wird die Luftkraft im allgemeinen auch von der Flugrichtung aus gesehen nach oben zeigen, wie in unserem Bild.

Die zweite Schemazeichnung zeigt uns, wie der Techniker die Luftkraft in zwei Anteile, zwei »Komponenten«, zerlegt. Solche Kraftzerlegungen nimmt er häufig vor. Sie stellen den umgekehrten Vorgang dessen dar, was sich bei der Zusammensetzung aller an der Rakete angreifenden Luftkräfte zu einer Resultierenden vollzieht. Die bei dieser Zerlegung entstehenden Komponenten müssen, wenn sie gemeinsam an der Rakete angreifen, die gleiche Wirkung ausüben wie die eine resultierende Luftkraft. Die Zerlegung geschieht so, daß die eine Komponente genau gegen die Flugrichtung zeigt, die andere genau senkrecht dazu steht. Die Komponente, die entgegengesetzt zur Flugrichtung liegt, nennt man den Widerstand. Sie verzögert den Flug der Rakete. Die Komponente, die senkrecht zur Flugrichtung steht, nennt man den Auftrieb. Sie wirkt der Schwerkraft entgegen und hebt die Rakete an, die sonst unter deren Wirkung nach unten abbiegen würde.

Diese Darstellung stimmt, wenn die Luftkraft wirklich, wie eingezeichnet, im Schwerpunkt der Rakete angreift. Im allgemeinen fällt jedoch der Mittelpunkt der Luftkräfte nicht mit dem Schwerpunkt zusammen. Liegt er, wie im nächsten Bild gezeigt ist, unterhalb des Schwerpunktes der Rakete, so versucht die resultierende Luftkraft sie in die Flugrichtung zu drehen. Die Luftkraft wirkt also stabilisierend auf die Rakete. Liegt dagegen, wie das letzte Bild zeigt, der Mittelpunkt der Luftkräfte *vor* dem Schwerpunkt, so ist die Rakete instabil. Die Luftkraft versucht, die Rakete mit der Spitze aus der Flugrichtung zu drehen, also umzukippen.



Die beiden Komponenten der Luftkraft sind vom Anstellwinkel der Rakete gegen die Flugrichtung abhängig. Der Widerstand ist am kleinsten, wenn die Rakete genau in Flugrichtung zeigt, und wächst bei Abweichungen nach oben oder unten, rechts oder links. Der Auftrieb dagegen ist nach oben gerichtet, wenn die Rakete ihre Nase über die Flugrichtung hebt. Er ist nach unten gerichtet, also eigentlich ein »Abtrieb«, wenn die Rakete mit ihrer Nase unter die Flugrichtung zeigt. Zeigt die Rakete mit der Nase genau in Flugrichtung, so ist der Auftrieb Null, falls der Raketenkörper, wie auf unserer Zeichnung, eine symmetrische Form besitzt.

Auftrieb und Widerstand sind beide von der Fluggeschwindigkeit und der Luftdichte abhängig. Je größer die Fluggeschwindigkeit, umso größer die Luftkräfte. Die Antriebsbahn einer Fernrakete kann man in drei ineinander übergehende Gebiete einteilen: Kurz nach dem Start ist die Fluggeschwindigkeit noch so klein, daß trotz der großen Luftdichte keine erheblichen Luftkräfte zustande kommen, im mittleren Teil ergeben sich bei mittlerer Luftdichte und Fluggeschwindigkeit die größten Luftkräfte, und kurz vor Brennschluß können trotz der rasch ansteigenden Geschwindigkeit keine Luftkräfte auftreten, weil die Luftdichte zu gering ist.

Die Kräfte, die die Luft ausüben kann, werden vom Laien leicht unterschätzt. Man kann sich davor bewahren, wenn man daran denkt, daß es der Auftrieb ist, der jedes Flugzeug trägt. Für kleinere Raketen, deren Flugbahn ganz in den dichten Teilen der Lufthülle verläuft, können die Luftkräfte ein Mehrfaches vom Gewicht betragen. Die amerikanische M8-Pulverrakete zum Beispiel wiegt nach Brennschluß 16 Kilogramm. Im Fluge mit 305 m/s Geschwindigkeit wirkt auf sie ein Luftwiderstand von 32 Kilogramm.

Für die Angabe der Luftkräfte in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit verwendet man seit einigen Jahrzehnten eine besondere Maßeinheit für die Geschwindigkeit, nämlich die Mach-Zahl. Die Machzahl gibt an, wievielmals schneller eine Rakete fliegt als der Schall. Eine Rakete, die mit der Geschwindigkeit des Schalles fliegt, hat also die Machzahl 1, ein Körper, der doppelt so schnell wie der Schall fliegt, die Machzahl 2 usw. Am Boden beträgt die Schallgeschwindigkeit 340 m/s, so daß Mach 2 = 680 m/s, Mach 3 = 1020 m/s bedeuten. Eine Übersicht bietet die folgende Tabelle, in der die Geschwindigkeitswerte auch in der uns vom Kraftwagen vertrauten Einheit km/h (Stundenkilometer) angegeben sind.

Machzahl	Meter/Sekunde	Kilometer/Stunde
0,1	34	122
0,5	170	610
1,0	340	1220
5,0	1700	6100
10	3400	12200

Schallgeschwindigkeit und Machzahl sind nicht von der Luftdichte, aber von der Temperatur abhängig. Wie aus unserem Schaubild hervorgeht, ändert sich die Temperatur mit der Höhe; das heißt, daß auch die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen verschieden ist. Zwei Raketen, die, eine am Erdboden, die andere in großer Höhe, mit der gleichen Geschwindigkeit fliegen, haben also verschiedene Machzahlen.

So scheint die Einführung der Machzahl zunächst nur eine Unbequemlichkeit mit sich zu bringen. Sie hat aber ihren guten Grund. Da sich alle Störungen in der freien Atmosphäre – der Schall ist eine von ihnen – höchstens mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen können, bildet die Schallgeschwindigkeit eine deutliche Grenze zwischen hohen und niedrigen, zwischen Über- und Unterschallgeschwindigkeiten. Wenn ein Körper mit geringer, also mit Unterschallgeschwindigkeit fliegt, so breitet sich die von ihm verursachte Störung in der Atmosphäre vor ihm aus, sie kann ihm (da sie mit Schallgeschwindigkeit läuft) vorauslaufen. Bei einem überschallschnellen Flugkörper ist das nicht möglich.

Zwischen beiden Geschwindigkeitsbereichen, also bei der Machzahl 1, treten seltsame Erscheinungen auf, die Gegenstand intensiver, experimenteller Untersuchungen sind. Für die Raketentechnik ist die vielleicht wichtigste Erscheinung ein starker Anstieg des Luftwiderstandes, dem im Gebiet der Überschallgeschwindigkeiten ein allmählicher Abfall folgt. Der Luftwiderstands-Beiwert in der Nähe der Machzahl 1 kann je nach der Form der Rakete das Zwei- bis Vierfache des Widerstandes im Unterschallgebiet betragen.

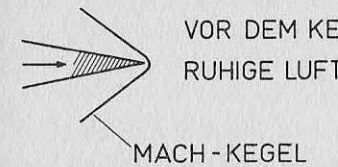
Auf der Antriebsbahn sind die aerodynamischen Einflüsse der Lufthülle für weit reichende Raketen nicht so sehr schlimm: ein wenig Auftrieb, der hilft, die Rakete auf ihrer Bahn zu halten, etwas Widerstand, der unangenehm ist, weil er einen Teil der Leistung des Triebwerkes verzehrt. Die Einflüsse sind aber nicht entscheidend für den Raketenflug. Anders ist es beim Wiedereintauchen der Rakete in die Lufthülle. Der Unterschied liegt darin, daß die Rakete während der Antriebsbahn, wie wir gesehen haben, die dichten Luftschichten mit nur geringen Geschwindigkeiten durchfliegt, beim Eintauchen hingegen mit großer

Geschwindigkeit aus dem Raum zurückkommt und nahezu die ganze Lufthülle mit ihr durchfährt, falls man sie nicht künstlich bremst.

Was Körpern geschieht, die mit sehr großer Geschwindigkeit in die Lufthülle eintauchen, wissen wir von den Sternschnuppen und Meteoren. Einem ganz geringen Teil von Meteoren gelingt es überhaupt, die Erdoberfläche zu erreichen. Die meisten werden durch die Reibung mit der Lufthülle so stark erhitzt, daß sie zu glühen beginnen und, bevor sie die Erde erreichen, bereits verdampft sind. Denselben Vorgang erleben wir bei den künstlichen Erdsatelliten, die, wenn sie allmählich in tiefere Luftschichten heruntergekommen sind, schließlich auch verglühen und verschwinden. Fernraketen haben im allgemeinen die Aufgabe, ihre Nutzlast möglichst unversehrt am Zielort abzugeben, seien es nun militärische Fernraketen, bei denen die Nutzlast aus Sprengstoff besteht, oder friedliche Fernraketen, deren Nutzlast Frachtgut oder gar Menschen bilden. Daher hat es nicht an Versuchen gefehlt, diese Nutzlast beim Eintauchen in die Lufthülle gegen die hohe Reibungswärme zu schützen. Der Schutz kann darin bestehen, daß man ein hoch-hitzebeständiges Material, zum Beispiel einen keramischen Baustoff, verwendet. Andere Vorschläge sehen eine Kühlung durch Wasser vor, das durch die Poren eines Werkstoffes hindurchgedrückt und ausgeschwitzt wird, oder eine Kühlung durch Stoffe, die schmelzen und beim Schmelzen einen großen Teil der Reibungswärme verzehren. Einen besseren Weg haben aber die Aerodynamiker gefunden, und zwar durch eine genaue Betrachtung des Vorganges, der beim Eintauchen auftritt.

Die Bremsung eines durch die Luft fliegenden Körpers geschieht, wie wir schon wissen, durch den Luftwiderstand. Wie immer beim Bremsen wird hierbei Bewegungsenergie in Wärme umgesetzt. Der gleiche Vorgang spielt sich auch in den Bremsstrommeln unseres Kraftwagens ab, die ja bei jedem Bremsen warm werden. Ein schnellfliegender Flugkörper wird aber nicht nur durch die Reibung der Luft an seiner Oberfläche gebremst. Wenn wir einen Stein ins Wasser werfen, erzeugt er eine Störung, die sich kreisförmig über die ganze Wasseroberfläche hinzieht. Genau die gleichen Störungen erzeugt ein durch die Luft fliegender Flugkörper mit seiner Spitze. Sie breiten sich kugelförmig mit Schallgeschwindigkeit um den Entstehungsort aus. Bei einer mit Überschall fliegenden Rakete bilden diese Störungen einen Kegel um ihre Spitze. Dies liegt daran, daß sich die Rakete schneller vorwärtsbewegt als die Störungen, die sich ja nur mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen können. Vor diesem Kegel ist die Luft in Ruhe, sie weiß noch nichts von dem Ereignis, das auf sie hereinstürmt. Die Begrenzung des Kegels ist

eine Stoßwelle, und in dieser Stoßwelle – übrigens der gleichen Stoßwelle, die wir als scharfen Knall hören, wenn ein Überschalljäger über uns dahingebraust ist – wird ein großer Teil der Bewegungsenergie in



Wärme umgesetzt. Wir haben also bei einer schnellen Rakete außer der Bremsung direkt an der Oberfläche noch eine weitere Bremsung, die weiter draußen liegt.

Die Kanten an den Tragflächen von Überschalljägern und die Spitzen von Raketen sind scharf oder spitz, damit der Luftwiderstand möglichst gering ist. Bei diesen scharfen Kanten oder Spitzen legt sich der Machkegel ganz dicht an den Flugkörper heran. Verwendet man dagegen stumpfe Spitzen, das heißt abgerundete Flugkörper, so legt sich die Stoßwelle in einigem Abstand um diese Rundungen. Das heißt aber, daß die Wärmeezeugung ebenfalls in einigem Abstand vom Flugkörper stattfindet und infolgedessen nicht mehr zur Aufheizung beitragen kann.



Die Folgerung, die man daraus für den Bau von Raketen-Nutzlasten zog, war die Abkehr von scharfen Kanten und spitzen Ecken und der Übergang zu stumpfen Körpern. Den Wert solcher »stumpfer Spitzen« haben die Vereinigten Staaten 1958 durch eine Reihe eindrucksvoller Raketenflüge demonstriert.

Zur gleichen Zeit, als der Erfolg dieser Maßnahmen gebucht werden konnte, ergaben sich aus physikalischen Überlegungen schon wieder neue Möglichkeiten, die Schwierigkeiten beim Eintauchen zu überwinden. Dabei gingen die Physiker von der Frage aus, ob nicht noch andere Kräfte zur Verzögerung wirksam gemacht werden könnten. Sie stellten in Rechnung, daß die Luft, die die eintauchende Nutzlast umgibt, sehr stark erhitzt wird und ihre einzelnen Moleküle in positive und negative Teilchen, »Ionen« genannt, zerrissen werden. Nun wirkt eine Ionenwolke, also eine Wolke elektrisch geladener, beweglicher Teilchen wie ein elektrischer Leiter. Die Nutzlast schafft sich also während ihres Fluges einen elektrisch leitenden Mantel. Bringt man in ihr einen Dauermagneten an, so wird dieser, wie der Anker eines Fahrraddynamos (auch ein Dauermagnet), in dem Leiter einen Strom erzeugen. Hierbei wird die Nutzlast (wie der Dynamo-Anker) gebremst, und zwar durch magnetische Kräfte, die zur Aufheizung des Körpers nicht beitragen. Noch

wird diese theoretische Überlegung nicht in die Praxis umgesetzt, aber schon hat sich ein neues Gebiet der Wissenschaft, die Magneto-Aerodynamik, herausgebildet.

Raketen – Thermodynamik

In unseren bisherigen Betrachtungen haben wir den Antrieb einer Rakete als eine Maschine geschildert, die einen Rückstoß dadurch hervorruft, daß sie einen Massenstrahl mit sehr hoher Geschwindigkeit ausstößt. Dieser Massenstrahl kann auf sehr verschiedene Art und Weise erzeugt werden. Ein sehr einfaches Beispiel für einen solchen Massenstrahl, das gleichzeitig auch die Wirkung des Rückstoßes zeigt, ergibt sich, wenn man einen Kinderluftballon aufbläst und ihn dann plötzlich losläßt. Die stark gespannte Gummihülle des Ballons drückt die Luft, die man hineingeblasen hat, wieder durch den Ballonstutzen heraus und erzeugt auf diese Weise einen kräftigen Luftstrahl, der das Mundstück des Ballons verläßt. Der Rückstoß, den dieser Luftstrahl hervorruft, ist so groß, daß der Ballon in mehr oder minder gleichförmiger Bewegung beschleunigt wird und davonfliegt. Prinzipiell ließe sich dieses Verfahren auch auf Raketen übertragen, wenngleich die erzielbaren Austrittsgeschwindigkeiten, die erzielbaren Massendurchsätze und damit die erzielbaren Raketengeschwindigkeiten außerordentlich klein bleiben würden. Man findet es in Spielzeugraketen verwirklicht.

Ein anderes nichtchemisches Triebwerk, in dem die zum Antrieb verwendete Energie in der Form von Wärmeenergie gespeichert wird, ist das Heißwasser-Strahltriebwerk. Bei diesen Geräten wird in einem abgeschlossenen Behälter Wasser so hoch erhitzt, daß es unter normalem Druck Dampf werden müßte, also weit über 100 Grad. Solange dieses Wasser unter starkem Druck in dem abgeschlossenen Behälter steht, bleibt es trotz seiner hohen Temperatur in flüssigem Zustand. Nun wird der Behälter aber durch ein Ventil zur Düse hin geöffnet. Damit ist das überhitzte Wasser in der Lage, sich nach einer Seite zu entspannen, es entsteht Wasserdampf, der mit großer Geschwindigkeit aus der Düse auströmt und einen Massenstrahl darstellt. Derartige Antriebe können als Hilfsantriebe für Flugzeuge, als Starthilfen, verwendet werden.

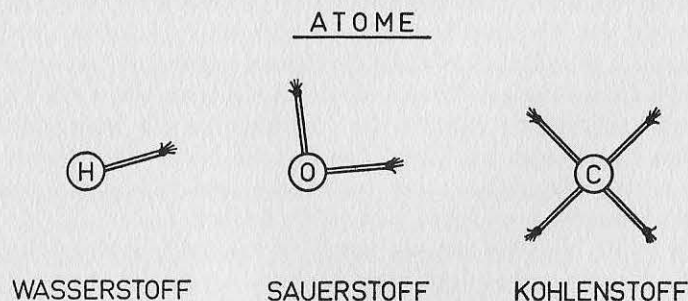
Der Massenstrahl, der aus der Rakete herausschießt, besitzt eine Bewegungsenergie. Je größer sie ist, desto stärker ist auch der Antrieb, den er der Rakete erteilt. Nun kann bekanntlich Energie nicht aus dem Nichts entstehen, sie muß also schon vorher in ruhender Form gespeichert

gewesen sein. Im Falle des Luftballons packen wir die Energie durch das Aufblasen hinein. Sie wird gespeichert in der starken elastischen Spannung, die in der Ballon-Gummihülle herrscht, und in dem Druck der im Ballon enthaltenen Luft. Im Falle der Heißwasser-Starthilfe handelt es sich um Wärmeenergie, die in die Starthilfe hineingebracht wird, indem man die Wassermengen aufheizt. In beiden Fällen ist die Energie zunächst in Ruhe und wird dann umgewandelt in Strömungsenergie des austretenden Strahles.

Die wichtigste Methode, Energie freizusetzen und sie in Strömungsenergie des austretenden Massenstrahles zu verwandeln, ist (bis heute) die chemische Methode. Wir alle wissen, daß bei bestimmten chemischen Reaktionen, so zum Beispiel bei der Verbrennung, Energien frei werden. In jedem Stubenofen reagiert der Kohlenstoff der Feuerungskohle mit dem Sauerstoff der Stubenluft, erzeugt ein Gas, das Kohlendioxyd, und gibt gleichzeitig Energie ab, die uns zur Heizung des Zimmers dient. Es gibt auch andere chemische Reaktionen, die mit einer Wärmeentwicklung, also einer Energieabgabe vor sich gehen, doch nehmen unter ihnen die Verbindungen mit Sauerstoff, also die Verbrennungen eine weit überragende Stellung ein.

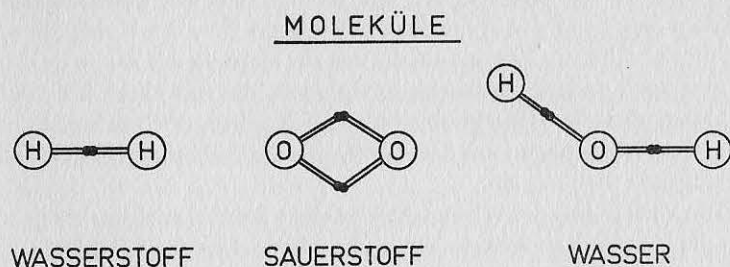
Zum Verständnis der Wirkungsweise eines Raketentriebwerkes gehört also die Kenntnis einiger einfacher Grundtatsachen der Chemie.

Seit die ersten Atombomben über Japan das Ende des zweiten Weltkrieges unterstrichen, ist der Öffentlichkeit bewußt geworden, daß man



Atome spalten kann. Die Physiker wußten schon einige Jahrzehnte früher, daß die Atome, die sie einstmals als kleinste Teilchen aller Materie betrachtet hatten, zerlegbar sind. Für die Vorgänge, die wir hier betrachten wollen, nämlich die chemischen Vorgänge im Raketentriebwerk, genügt es aber, auf die alten Vorstellungen zurückzugehen, das heißt, die Atome als kleine, unteilbare Kugeln anzusehen, von denen es etwa

hundert verschiedene Arten gibt, mit Massen oder Gewichten, die sich wie 1:300 verhalten. Atome des gleichen Stoffes sind völlig gleich und nicht unterscheidbar, Atome verschiedener Stoffe unterscheiden sich nicht nur durch ihre sehr verschiedene Masse, sondern außerdem durch ihre Wertigkeit. Die Wertigkeit drückt ihre Fähigkeit aus, mit anderen Atomen Verbindungen einzugehen. Wir stellen uns vor, daß die kleinen Kugeln, die wir als Modelle unserer Atome im Gedankenexperiment verwenden wollen, Arme besitzen, mit denen sie die Arme anderer Atome ergreifen können. Die Zahl der Arme, die eine Atomkugel besitzt, ist sehr unterschiedlich, ein Wasserstoffatom hat zum Beispiel nur einen Arm, ein Sauerstoffatom zwei, ein Kohlenstoffatom vier Arme. Unter normalen Umständen suchen die Atome ihre offenen Hände stets



mit anderen offenen Händen zu vereinigen, suchen also die Atome stets Moleküle zu bilden. Wenn sich zwei Wasserstoffatome die Hand reichen, so entsteht das Wasserstoffmolekül, das also aus zwei Atomen besteht. Reichen sich zwei Sauerstoffatome die Hände, so entsteht das Sauerstoffmolekül. Und wenn ein Sauerstoffmolekül mit jeder Hand ein Wasserstoffatom ergreift, so entsteht das Molekül des uns wohlbekannten Wassers. Unter normalen Umständen legt die Natur Wert darauf, daß keine Hände offenbleiben, aber auch nicht zwei Hände nur eine ergreifen. Jede Hand soll genau eine andere finden.

Alle Stoffe, die wir kennen, bestehen aus solchen Molekülen. In manchen Stoffen sind Moleküle verschiedener Art miteinander gemischt. Andere Stoffe, wie Silber, Benzol, Wasser, bestehen nur aus Molekülen einer einzigen Art. Auch die Moleküle eines Stoffes ziehen sich untereinander an, sie halten zusammen. Dieser Zusammenhalt ist sehr stark von der Temperatur abhängig. Wir wollen das an einem einfachen Beispiel demonstrieren. Nehmen wir das Wassermolekül, das aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen besteht, von dem wir vorhin gesprochen haben. Bei Temperaturen unter null Grad bildet dieses Mole-

kül das Eis. Eis ist ein fester Körper, alle Moleküle liegen fest und können sich kaum von ihrem Platz bewegen. Es gehört sogar in eine besondere Klasse von festen Körpern, die man Kristalle nennt. Die Moleküle in einem solchen Kristallblock liegen nicht regellos zusammengepackt, sondern in regelmäßigen Abständen, sie bilden eine schöne symmetrische Figur, in der jedes Molekül von den Nachbarmolekülen an seinem Platz gehalten wird. Das Ganze sieht etwa so aus wie das Stahlgerüst eines Hochhauses, in dem die Knotenpunkte jeweils ein Molekül enthalten.

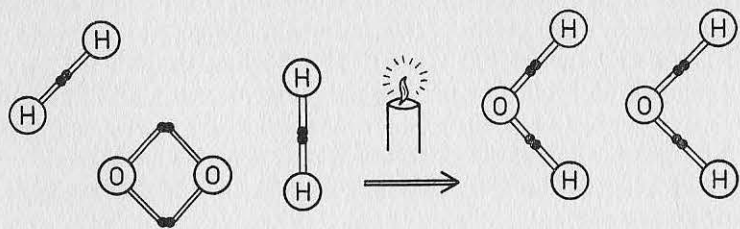
Erwärmt man das Eis, so schmilzt es, wie wir wissen, bei der Temperatur von null Grad zu Wasser. Im Wasser sind die einzelnen Moleküle nicht mehr so fest eingelagert wie im Eis, sie können sich gegeneinander bewegen, und daher nimmt das Wasser immer die Form des Gefäßes an, in das man es gießt. Erwärmt man das Wasser, so bewegen sich die Moleküle rascher und rascher, bis sie schließlich einen Punkt erreichen, wo es sie nicht mehr bei ihren Nachbarn hält. Diesen Punkt nennen wir 100 Grad Celsius. Bei 100 Grad Celsius beginnt das Wasser zu verdampfen, die Moleküle trennen sich endgültig voneinander. Der Dampf, der aus einem Kessel herausströmt, dehnt sich in der Küche aus, verteilt sich im ganzen Raum, die einzelnen Wassermoleküle mischen sich mit den Molekülen der Luft, eine Bindung zwischen den Molekülen ist nicht mehr festzustellen.

Immer noch aber sitzen die beiden Wasserstoffatome, die dem Sauerstoffatom die Hand gereicht haben, fest mit diesem zusammen, immer noch ist das einzelne Molekül wirklich ein Wassermolekül, auch wenn es als Dampf unsichtbar in der Stubenluft herumschwirrt. Wenn wir derartigen Wasserdampf aber immer weiter erhitzen bis zu einer Temperatur von zum Beispiel 3000 Grad Celsius, also einer Temperatur, die nur wenige Stoffe aushalten, ohne zu schmelzen, so passiert etwas Merkwürdiges. Die unter natürlichen Umständen so feste Verbindung zwischen den Wasserstoffatomen und dem Sauerstoffatom zerrißt, die Atome trennen sich voneinander. Dieser Vorgang heißt in der Sprache der Physiker: »Dissoziation«. Der Grund für diese Dissoziation liegt, wie wir sehen werden, darin, daß die Temperatursteigerung den Molekülen Energie zugeführt hat und diese Energie sie schließlich platzen läßt.

Solange die Atome ihren Molekülverband noch nicht zerrissen haben, verwenden sie die ihnen zugefügte Energie in anderer Weise. Wenn man einen Ball stößt, so fliegt er davon. Die im Muskel gespeicherte Energie hat sich in Bewegungsenergie des Balles umgesetzt. Ähnlich ist es bei den Molekülen eines Gases, wenn ihnen Wärmeenergie zugeführt wird. Die

Moleküle, die sich sowieso in einer dauernden Zickzackbewegung befinden, bald mit ihresgleichen, bald mit den Wänden des Raumes, in dem sie eingeschlossen sind, zusammenstoßen, werden schneller und schneller, je mehr Wärmeenergie man ihnen zuführt, das heißt, je höher ihre Temperatur wird.

Von den vielen chemischen Umsetzungen, die in der Natur und auch in der Technik vor sich gehen, ist für den Menschen die Verbrennung eine der wichtigsten. Wir knüpfen an unsere Modelle an, wenn wir einen besonders einfachen Fall der Verbrennung schildern, nämlich die Verbrennung von Wasserstoff. Wasserstoff ist ein sehr leichtes Gas, das häufig zum Füllen von Kinderluftballons benutzt wird. Es besteht natürlich aus Wasserstoffmolekülen, wie wir sie aus unseren Bildern schon kennen. Zu einer Verbrennung gehört immer ein zweiter Stoff, der Sauerstoff, dazu. Wir wissen bereits, daß der Sauerstoff zweiwertig ist, also



WASSERSTOFF VERBRENNT MIT SAUERSTOFF ZU WASSER.

daß das Sauerstoffatom zwei Hände besitzt und dementsprechend auch das Sauerstoffmolekül aus zwei Sauerstoffatomen aufgebaut ist, die sich mit beiden Händen gefaßt halten. Mischt man nun Sauerstoffgas und Wasserstoffgas in einem Verhältnis von zwei Litern Wasserstoff auf einen Liter Sauerstoff, und zündet man dieses Gemisch an, so gibt es eine furchtbare Explosion. Diese Explosion entsteht dadurch, daß sich der Wasserstoff mit dem Sauerstoff verbindet. Einige Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle werden durch die Hitze des zündenden Streichholzes auf kurze Zeit zersprengt und finden sich sofort, aber anders als vorher, wieder zusammen. Jedes Sauerstoffatom greift sich zwei Wasserstoffatome und bildet mit ihnen das Molekül Wasser. Aus den zwei Wasserstoffmolekülen und dem Sauerstoffmolekül sind nach der Reaktion zwei Wassermoleküle geworden. Die einmal durch die Entzündung eingeleitete Reaktion bleibt aber nicht bei den wenigen unmittelbar betroffenen Molekülen stehen. Während der Bildung der Wassermoleküle geben die

Wasserstoff- und Sauerstoffatome viel mehr Energie ab, als zur Zerlegung der ursprünglich vorhandenen Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle notwendig war. Diese Wärmeenergie verursacht den Zerfall von weiteren Wasserstoff- und Sauerstoffmolekülen in Atome, die sich wiederum zu Wassermolekülen verbinden. So greift in Bruchteilen von Sekunden ein allgemeiner Zerfall und Neuaufbau um sich. Es wird sehr viel Wärmeenergie frei, das Gas erhitzt sich, dehnt sich aus, und die Explosion ist fertig.

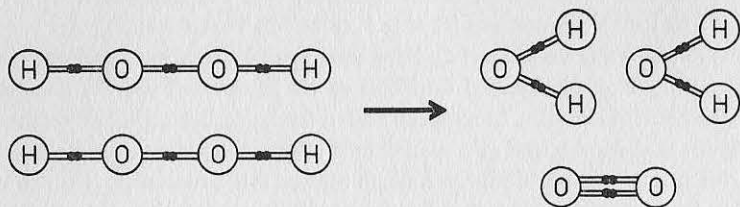
Nicht jede Verbrennung ist eine Explosion. Voraussetzung der Explosion ist, daß der Brennstoff und der Sauerstoff im richtigen Verhältnis gut miteinander gemischt sind und daß es ein Brennstoff ist, der genügend Wärmeenergie abgibt. In anderen Fällen ist die Verbrennung ungefährlich wie im Stubenofen und gibt trotzdem Wärme an die Umgebung ab.

Nicht nur die Verbindungen eines Stoffes mit Sauerstoff, also die Verbrennungen, spielen in der Raketentechnik eine Rolle. Zu Antriebszwecken können auch andere Reaktionen gebraucht werden, bei denen Wärmeenergie entsteht.

So gibt es Reaktionen, die nicht einmal zweier Stoffe bedürfen, um Wärme zu erzeugen; es gibt Stoffe, die so künstlich, so unnatürlich zusammengesetzt sind, daß sie nach einem Anstoß durch einen Zündfunken zerfallen und hierbei Wärmeenergie abgeben. Sie haben als Treibstoffe für die Rakete manche Vorzüge, da man für sie ja nur *einen* Behälter und nur *ein* Förderungssystem braucht. Leider ist der Energiegehalt dieser Stoffe meist nicht besonders hoch und ihre Handhabung häufig außerordentlich schwierig. Sie zerfallen leider nicht nur dann, wenn sie sollen, nämlich in der Brennkammer, sondern auch schon vorher, während des Transportes, des Umfüllens oder der Förderung.

Einer der harmlosesten dieser Stoffe zerfällt, wenn er mit einem bestimmten festen Körper in Berührung kommt, ohne daß dieser sich bei der Reaktion verändert. Es ist das Wasserstoffperoxyd, die gleiche Flüssigkeit, mit der sich die Damen die Haare blond färben. Im Aufbau schließt es sich logisch an unsere Molekülmodelle an. Es besteht nämlich aus zwei Wasserstoffatomen und zwei Sauerstoffatomen und ist so aufgebaut, daß die beiden Sauerstoffatome sich eine Hand reichen und mit der jeweils freien anderen Hand je ein Wasserstoffatom halten. Während im Wassermolekül, wie wir wissen, jedes Sauerstoffatom sozusagen Bigamist ist, weil es mit zwei Wasserstoffatomen eine Ehe eingegangen ist, so ist im Molekül des Wasserstoffperoxyds zwangsweise Monogamie eingekehrt, weil sich jeweils noch ein Sauerstoffatom in die Kette hineingezwängt hat. Solche zwangsweise erzeugten Zustände sind natürlich nicht sehr stabil, und das Wasserstoffperoxyd nimmt daher auch jede Gelegenheit

wahr, in Wasser und Sauerstoff zu zerfallen. Wir können uns den Zerfall noch einmal im Formelbild ansehen: Zwei Wasserstoffperoxyd-Moleküle scheiden je ein Sauerstoffatom aus und werden hierdurch zu Wassermolekülen. Die beiden Sauerstoffatome finden sich zu einem Sauerstoffmolekül zusammen. Weil das Wasserstoffperoxyd-Molekül sozusagen froh ist, seinen unnatürlichen Zustand aufgeben zu können, gibt es bei



WASSERSTOFFPEROXYD ZERFÄLLT IN WASSER UND SAUERSTOFF.

diesem Zerfall Wärme ab, und diese Wärme verwandelt alle entstehenden Stoffe in heißen Dampf. Dieser Dampf wird in der Raketentechnik häufig (nicht nur als Antriebsstrahl) verwendet.

Für die Verbrennung von Stoffen ist nicht immer reiner Sauerstoff erforderlich, sie kann auch dadurch geschehen, daß der Brennstoff mit einem Stoff zusammengebracht wird, der gern Sauerstoff abgibt. Solche Stoffe sind das eben genannte Wasserstoffperoxyd oder die Salpetersäure.

In den letzten Jahren beginnen in der Raketentechnik besondere chemische Reaktionen eine Rolle zu spielen, die man nicht gut als Verbrennungen, als Oxydationen bezeichnen kann, weil sie nämlich auf den Sauerstoff, den Oxydator, ganz verzichten. An die Stelle des Sauerstoffatoms tritt in diesen Fällen das Boratom, uns aus dem Borax bekannt, oder das Fluoratom, das wir als Bestandteil der Flußsäure, mit der man Glas ätzen kann, kennen.

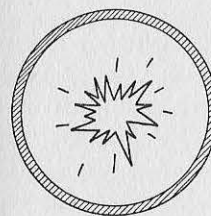
Wir müssen hier darauf verzichten, alle praktisch verwendeten oder theoretisch berechneten Reaktionen in die Bildersprache unserer Modelle zu übersetzen. Alle diese chemischen Umsetzungen interessieren den Raketentechniker deshalb, weil Wärmeenergie dabei frei wird – je mehr, desto besser. Eine große Anzahl von Treibstoffkombinationen sind schon auf ihre Energieabgabe hin untersucht worden. Das Ergebnis für einige von ihnen findet sich in der folgenden Tabelle.

In dieser Tabelle ist die Energieabgabe von einem Kilogramm des untersuchten Treibstoffgemisches in Kilo-Kalorien angegeben. Bekannt-

lich kann die Energie in mehreren verschiedenen Formen, als mechanische, elektrische oder Wärmeenergie, auftreten. Bei chemischen Reaktionen wird sie als Wärmeenergie frei, man nennt sie den »Heizwert« und mißt sie in »Kalorien«. Eine Kilokalorie (Kcal) ist nämlich die Wärmeenergie, die man aufwenden muß, um einen Liter Wasser (= 1 kg) um ein Grad Celsius zu erwärmen. Mit 80 Kcal könnte man einen Liter Wasser von Zimmertemperatur (20 Grad) bis zum Sieden (100 Grad) erhitzen.

Treibstoff	Heizwert
Wasserstoff + Sauerstoff	3200 Kcal
Petroleum + Sauerstoff	2300 Kcal
Alkohol + Sauerstoff	2100 Kcal
Benzin + Wasserstoffperoxyd	1900 Kcal
Nitrozellulose (Feststoff)	1600 Kcal
Methanol + Salpetersäure	1500 Kcal
Schwarzpulver (Feststoff)	700 Kcal

Die energieliefernde chemische Reaktion eines Raketenantriebes geht im kugelförmigen Kopf der Brennkammer vor sich. Wo bleibt nun die entstandene Energie? Das wird uns sofort klar, wenn wir vorläufig annehmen, der Brennkammerkopf sei allseitig geschlossen und wir hätten diese Kugel einmal mit den Treibstoffen gefüllt und entzündet. Die Reaktion verläuft mehr oder weniger explosionsartig, und wir wollen annehmen, daß die Kugel die Explosion übersteht. Nach der Reaktion können wir zweierlei feststellen:



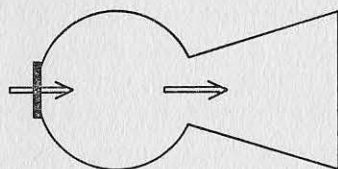
IM GESCHLOSSENEN VERBRENNUNGS-
RAUM TEILT SICH DIE ENTSTEHENDE
WÄRMEENERGIE ALLEN MOLEKÜLEN MIT

1. Es ist kein Treibstoffatom entwichen, die Stoffmasse in der Kugel hat sich also nicht verändert.
2. Die entstandene Wärmeenergie ist von den neuentstandenen Molekülen aufgenommen worden (wo soll sie sonst hin?).

Die Moleküle der Verbrennungsprodukte werden also aufgeheizt von den in ihren Vorgängern schlummernden chemischen Energien. Was ist das nun: ein »heißes Molekül«?

Wie wir schon wissen, fliegen die Moleküle in Gasen frei herum, bis sie mit ihresgleichen oder der Wand zusammenstoßen. »Heiße Moleküle« sind nun nichts anderes als *schnelle* Moleküle. Hier zeigt sich die Verwandtschaft zwischen Wärmeenergie und mechanischer Energie. Wärmeenergie ist nichts anderes als Bewegungsenergie der Moleküle. Je höher die Temperatur, um so toller wird der Tanz der Moleküle. So lange sie nur unter ihresgleichen zusammenstoßen, macht sich das nach außen nicht bemerkbar. Anders ist es bei den Stößen gegen die Wand. Stellen wir uns eine Kerkerwand vor, gegen die Millionen von Gefangenen in unregelmäßigen Abständen anspringen. Genau das ist die Situation der im Kopf der Brennkammer eingeschlossenen Moleküle. Hier wie dort ist das Resultat ein Druck auf die Wand, und es ist leicht einzusehen, daß dieser Druck um so größer ist, je mehr Moleküle eingeschlossen sind und je höher die Geschwindigkeit der Moleküle, das heißt die Temperatur der Gasfüllung ist.

Nun ist der Kopf einer Brennkammer nicht wie die Kugel unseres Beispiels geschlossen, sondern nach einer Seite hin geöffnet. Trotzdem spielt sich in ihr der Vorgang genauso ab, wie wir es eben geschildert haben, denn die abströmenden Verbrennungsprodukte werden laufend



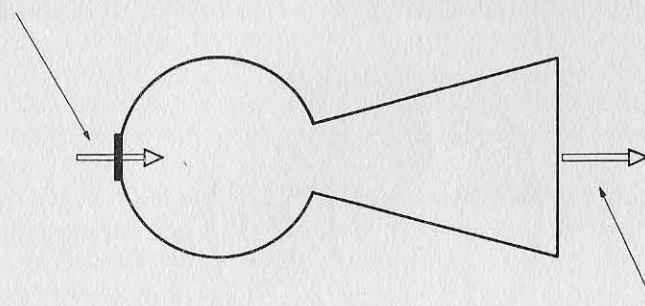
ABSTRÖMENDE VERBREN-
NUNGSPRODUKTE WERDEN
DURCH FRISCHE TREIB-
STOFFE ERSETZT.

durch frisch zugeführte Treibstoffe ersetzt. Das gilt nicht nur für die Masse der abströmenden Gasmengen, auch die von ihnen mitgeschleppte Energie ergänzt sich dadurch, daß sich die frischen Treibstoffe nach ihrem Zufluß miteinander verbinden und Wärmeenergie abgeben.

Überspringen wir zunächst einmal alle inneren Einzelvorgänge in der Brennkammer, und stellen wir fest, wie sich ihr »Stoffwechsel«, von außen gesehen, darstellt: In ihren Kopf strömen Treibstoffmengen, die einen ungenutzten, verborgenen Inhalt von chemischer Energie mitbringen. Am untersten Düsenende tritt ein Antriebsstrahl heraus, der die gleiche Masse besitzt wie die zugeführten Treibstoffmengen, denn unterwegs ist ja nichts verlorengegangen. Die verborgene chemische Energie hat sich umgesetzt und ist zu mechanischer, der Bewegungsenergie des Antriebsstrahles geworden. Diese mechanische Energie zu erzeugen, ist die einzige Aufgabe des Triebwerkes.

Die Aufgabe eines *guten* Triebwerkes ist es, möglichst viel Antriebsenergie zu erzeugen, also dem Antriebsstrahl eine möglichst hohe Austrittsgeschwindigkeit zu erteilen. Wenn man von allen Verlusten absieht, die ein Raketentriebwerk – wie jede technische Maschine – hat, so gibt es eine natürliche Grenze, die sich auch mit dem besten Triebwerk nicht überschreiten läßt: Der Antriebsstrahl kann höchstens so viel Energie enthalten, wie chemische Energie in den Treibstoffen verborgen war.

EINTRETENDE TREIBSTOFFE BRINGEN CHEMISCHE ENERGIE MIT



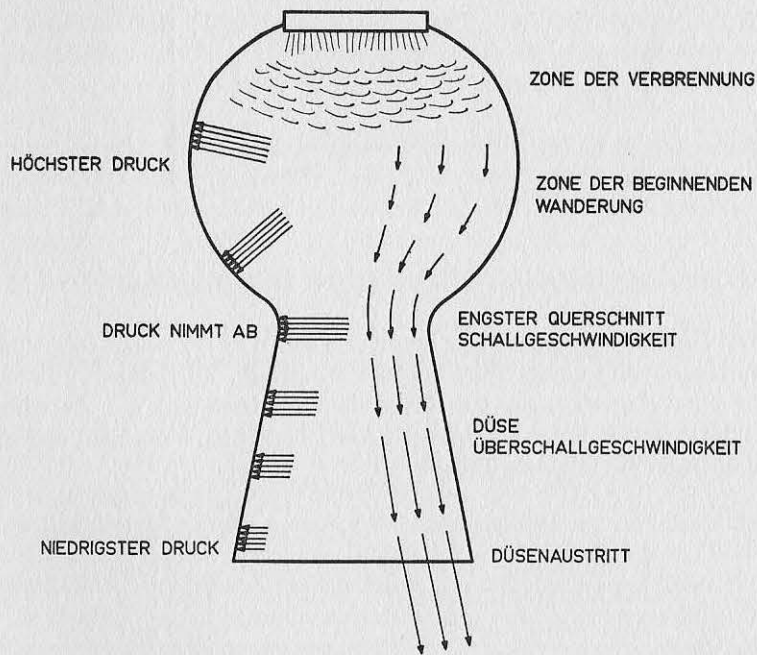
AUSTRETENDER MASSENSTRAHL NIMMT BEWEGUNGSENERGIE MIT

Diese Energie kennen wir aber schon und haben sie für einige Treibstoffkombinationen in einer Tabelle zusammengefaßt. Wir können nun aus den dort eingetragenen Energieinhalten (Heizwerten) die Austrittsgeschwindigkeiten der zugehörigen Antriebsstrahlen berechnen und erhalten dann die folgende Tabelle:

Treibstoff	theoretische Austrittsgeschwindigkeit
Wasserstoff + Sauerstoff	5200 m/s
Petroleum + Sauerstoff	4400 m/s
Alkohol + Sauerstoff	4200 m/s
Benzin + Wasserstoffperoxyd	4000 m/s
Nitrozellulose (Feststoff)	3700 m/s
Methanol + Salpetersäure	3500 m/s
Schwarzpulver (Feststoff)	2400 m/s

Ehe wir die im Raketenantrieb auftretenden Verluste betrachten, um die viel zu schönen Zahlen dieser Tabelle zu korrigieren, wollen wir uns nun doch den Vorgang in der Brennkammer eines Flüssigkeitstriebwerkes etwas genauer ansehen.

Die flüssigen Treibstoffe treten durch eine Vielzahl von kleinen Bohrungen in den oberen Teil des Brennkammerkopfes ein, vermischen sich miteinander, werden durch die in der Brennkammer herrschende Hitze verdampft und reagieren schließlich miteinander, wobei sie ihren Anteil zur Wärmeentwicklung beitragen. Die heißen Verbrennungsprodukte üben einen Druck auf die Kammerwandung aus, der sie selbst wiederum veranlaßt, dem Ausgang des Brennkammerkopfes, dem »engsten Querschnitt«, zuzustreben. Hierbei wächst ihre Geschwindigkeit und erreicht genau im engsten Querschnitt die Schallgeschwindigkeit. Auch im Triebwerk also spielt diese Geschwindigkeit eine wichtige



Rolle! In dem sich nun anschließenden trichterförmigen Teil der Brennkammer, der Düse, steigt die Geschwindigkeit der Gase weiter, sie wird also größer als Mach 1. Schließlich verläßt der Gasstrahl die Düse mit einem Vielfachen der Schallgeschwindigkeit durch den Düsenaustritt. Schon in der Zone der beginnenden Wanderung ist der Druck des Gases kleiner geworden, er fällt im engsten Querschnitt und in der Düse weiter ab und erreicht im Düsenaustritt seinen kleinsten Wert.

Denken wir noch einmal an die Leidtragenden dieses ganzen Vorganges, die Moleküle. Was bedeuten diese Vorgänge in der Brennkammer für sie? In der Zone der Verbrennung werden sie, wie wir schon wissen, aufgeheizt und erzeugen ihrer hohen Geschwindigkeit wegen beim Aufprall auf die Wandung der Brennkammer den Innendruck der Kammer. Bei ihrer Wanderung zum Düsenaustritt wird ihre ursprünglich völlig regellose Bewegung allmählich gleichmäßig in die Austrittsrichtung gelenkt. Ihre Geschwindigkeit nimmt also nicht zu, sie wird nur in der Richtung beeinflußt. Dadurch stoßen natürlich viel weniger Moleküle als vorher auf die Wandungen: der Druck wird kleiner. Da auch die Gas-Temperatur in der *ungeordneten* Bewegung der Moleküle besteht, sinkt sie ebenfalls ab. Würde man eine feste Wand quer in den austretenden Strahl halten, so könnte man an dieser wieder den ursprünglichen Druck und die ursprüngliche Temperatur der Verbrennungszone messen.

Ein ideales Triebwerk würde die gesamte chemische Energie in Bewegungsenergie des Antriebsstrahles verwandeln. Eine reale Brennkammer hat, wie gesagt, Verluste, von denen wir einige jetzt kennenlernen wollen.

Der austretende Strahl ist zwar kälter als das Gas in der Verbrennungszone, aber bei weitem nicht auf Zimmertemperatur abgekühlt, sonst bliebe das Bild des feurigen Strahles einer aufsteigenden Rakete aus. In der Form hoher Temperatur schleppt dieser Strahl vielmehr einen Teil der chemischen Energie heraus, der dem Antrieb der Rakete verlorengeht.

Wir dürfen auch nicht vergessen, daß für das Verdampfen der eintretenden Flüssigkeiten ebenfalls Energie aufzuwenden ist, die nicht wieder zurückerstattet wird, da der Antriebsstrahl die Rakete selbstverständlich nicht flüssig verläßt.

Eine weitere Verlustquelle ist der Druck, mit dem der Antriebsstrahl den Düsenaustritt verläßt. Der niedrigste Druck des Gases richtet sich, wie aus unserem Bild ersichtlich ist, nach der Düsenlänge. In einer sehr langen Düse würde der Austrittsdruck des Gasstrahles nahezu den Wert Null, also den »Druck« des Vakuums erreichen. Nun fliegt aber auch eine Fernrakete während der Antriebsbahn nicht nur im Vakuum. Daher lastet auf dem Düsenaustritt während eines Teiles der Flugbahn der äußere Luftdruck. Außerdem hat eine lange Düse ein hohes Gewicht und verschlechtert das Massenverhältnis. Aus diesen Gründen verzichtet man darauf, den Antriebsstrahl sich bis auf den Druck Null ausdehnen zu lassen. Bei kleinen Raketen wählt man als Druck im Düsenaustritt

den Luftdruck am Boden, also eine Atmosphäre. Bei Fernraketen wählt man einen Wert zwischen einer halben und einer ganzen Atmosphäre.

Die Abnahme des äußeren Luftdrucks mit der Höhe ist die Ursache dafür, daß der Schub einer Fernrakete zwischen Start und Brennschluß nicht ganz konstant ist. Der äußere Druck stemmt sich sozusagen dem austretenden Strahl entgegen. Je höher die Rakete steigt, um so geringer ist der Widerstand, den der Antriebsstrahl erfährt. Daher steigen die effektive Austrittsgeschwindigkeit und der Schub trotz gleichbleibendem Durchsatz mit der Höhe an.

Aber selbst die Bewegungsenergie des Strahles kommt der Rakete nicht voll zugute. Da die Düse kegelig ist, strömen die randnahen Teile des Strahles schräg aus ihr heraus und verschwenden einen Teil ihrer Geschwindigkeit auf diese seitliche Bewegung. Man kann die Düse verlängern und eine Gleichrichtung des Strahles hervorrufen, doch wird sie dann schwer, und deshalb sieht man meist davon ab.

Bei den sehr hohen Temperaturen in der Verbrennungszone können die gerade erst entstandenen Moleküle zum Teil wieder zerreißen – Dissoziation haben wir diesen Vorgang genannt. Die kurze Reisezeit durch die Brennkammer reicht nicht aus, um sie (trotz der Abkühlung) wieder zusammenzuführen. Sie nehmen für die Dissoziation Energie aus der vorhandenen Wärmeenergie und geben sie nicht wieder her. Auch diese Energie geht dem Antrieb verloren.

Moleküle, die aus mehreren Atomen bestehen, haben noch einige unangenehme Methoden, Energie zu verstecken, die sich allerdings nicht bei allen bemerkbar machen. Die Atome in einem Molekül können nämlich umeinander kreisen oder gegeneinander schwingen. Die hierzu erforderliche Energie entnehmen sie ebenfalls der mitgebrachten chemischen Energie.

Schließlich kommt der Gasstrahl auf seinem Weg zum Düsenaustritt natürlich auch mit der Wandung der Brennkammer in Berührung. Hierbei gibt er durch Reibung und Wärmeübertragung Energie an sie ab, die bei Feststoffraketen ganz, bei Flüssigkeitsraketen zum Teil für den Antrieb verlorengeht. Auch die nicht wandnahen Teile des Gasflusses versuchen Energie loszuwerden und schicken sie als Licht- oder Wärmestrahlung den Wandungen zu, die sie bereitwillig verschlucken.

Wenn wir auch einen großen Teil der Verluste der Brennkammer aufgezählt haben – die Reihe der Triebwerksverluste ist damit noch lange nicht erschöpft. Reibungsverluste in den Rohrleitungen, Energie, die zur Förderung der Treibstoffe verbraucht wird, Verluste durch die Ab-

lenkung des Antriebsstrahles zum Steuern der Rakete und viele andere verschlechtern die Energiebilanz. Aber auch, wenn wir diese »äußeren« Verluste nicht rechnen, ist das Ergebnis traurig genug. Wir stellen zwei theoretische Austrittsgeschwindigkeiten den praktisch gemessenen gegenüber, die Zahlen sprechen für sich selbst.

Zur Ehrenrettung der Theorie müssen wir jedoch bemerken, daß sich die Austrittsgeschwindigkeiten des Antriebsstrahles natürlich viel besser berechnen lassen, als wir es hier getan haben. Die Lücke zwischen Theorie und Praxis, die in unserer Tabelle noch 1 : 2 zu sein scheint, ist durch die genaue Analyse aller Vorgänge so weit geschlossen, daß die theoretischen Voraussagen nur noch um wenige Prozent von den praktisch erzielbaren Ergebnissen abweichen.

Treibstoff	Austrittsgeschwindigkeit	
	theoretisch	praktisch
75 prozentiger Alkohol + Sauerstoff	4100 m/s	2000 m/s
Gasöl + Salpetersäure	3900 m/s	1800 m/s

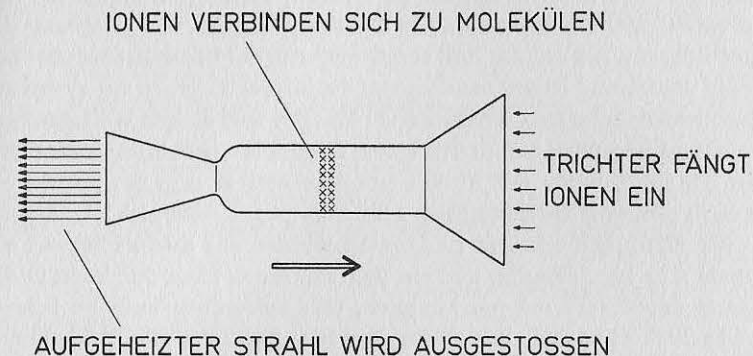
Ist die Grenze der Ausströmungsgeschwindigkeit für die chemischen Antriebe auch bei weitem noch nicht erreicht, so machen die Triebwerksleute doch intensive Anstrengungen, über die Möglichkeiten, die der chemische Antrieb bietet, hinauszukommen.

Ein sehr moderner Vorschlag, der sich relativ dicht an die chemischen Reaktionen anschließt, beruht auf folgender Überlegung: Die chemischen Treibstoffe und die Sauerstoffträger, also zum Beispiel Spiritus und flüssiger Sauerstoff, bestehen aus Molekülen, die wiederum aus Atomen zusammengesetzt sind. Zur Vorbereitung des Verbrennungsvorganges ist es notwendig, daß die Ausgangsstoffe, also der Brennstoff und der Sauerstoffträger, zunächst einmal zerfallen, damit die Atome, aus denen sie bestehen, frei werden und reagieren können. Dieser Zerfall der Moleküle erfordert natürlich Energie, und diese Energie geht in der Gesamtbilanz verloren. Also erhebt sich die Frage, ob es nicht möglich wäre, die Treibstoffe der Rakete bereits im aufgebrochenen Zustand, das heißt in der Form von Atomen oder Atomgruppen zu verwenden. Solche einzelnen Atome oder abgelöste Atomgruppen nennt man »freie Radikale«. Sie haben, und das erscheint uns selbstverständlich, nur die unangenehme Eigenschaft, daß sie nicht gerne allein bleiben, sondern sich möglichst bald mit anderen freien Radikalen zusammensetzen, um wieder komplette Moleküle zu bilden. Es ist also sehr schwierig, sie zu konservieren. Dennoch ist diese Konservierung in den letzten Jahren, wenigstens im Laboratoriumsmaßstab, gelungen. Die dazu brauchbare Methode be-

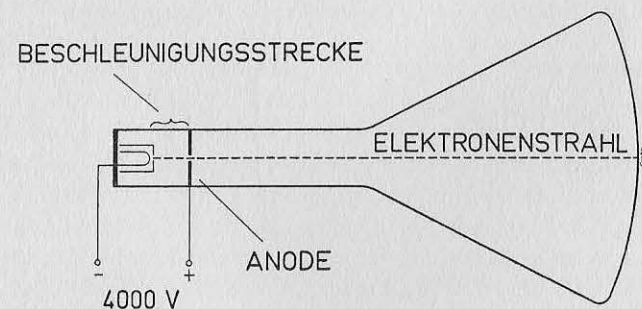
steht darin, daß man die freien Radikale kurz nach ihrer Erzeugung, also nach der Spaltung der Moleküle, auf ganz tiefe Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes bringt und sie gewissermaßen einfriert. Damit hemmt man ihre Bewegung und nimmt ihnen die Lust, sich zu Molekülen zusammenzuschließen. Der Vorschlag, solche freien Radikale für die Verbesserung von Raketenantrieben auszunutzen, ist zunächst noch sehr bescheiden. Er besteht darin, daß der wesentliche Teil der Treibstoffe nach wie vor in einer chemischen Umsetzung in der Brennkammer verarbeitet wird, daß nur ein kleiner Teil, zum Beispiel des flüssigen Sauerstoffes, durch einen »Radikalerzeuger« geschickt wird und diese Radikale dem heißen Gas im Ofen beigemischt werden. Auch kleine Mengen von freien Sauerstoffradikalen könnten die Austrittsgeschwindigkeit erheblich verbessern. Da aber die Erzeugung von Radikalen und insbesondere ihre Konservierung so außerordentlich schwierig ist, kann man in absehbarer Zeit an eine praktische Ausnutzung nicht denken. Die Berechnung von Raketenbahnen für Raketen, die mit freien Radikalen oder, wie es oft ausgedrückt wird, mit atomarem Wasserstoff, atomarem Helium oder anderen atomaren Stoffen arbeiten, sind daher vorerst noch als Utopien anzusehen.

Noch ein anderer Vorschlag will die große Energie ausnutzen, die bei der Bildung von Molekülen aus freien Atomen entsteht, und zwar sollen in diesem Fall die freien Atome sogar ionisiert, das heißt, sie sollen elektrisch geladen sein. Die Erzeugung von solchen Ionen und ihre Konservierung wären natürlich noch um ein Vielfaches schwieriger als die von freien Radikalen, die elektrisch neutral sind. Aber es gibt ein Gebiet in der Erdatmosphäre, das Ionen im Überfluß enthält. Das sind die ionisierten Schichten in größerer Höhe über der Erdoberfläche. In diesen Schichten zerschlägt die von der Sonne zugestrahlte Energie, insbesondere das Ultraviolettlicht, die vorhandenen Moleküle der Luft zu Ionen, und zwar so kräftig, daß es dort kaum nichtionisierte Atome oder Moleküle gibt. Die Ionen haben in dieser Höhe eine große Lebensdauer, weil sie in großen Abständen voneinander schweben und sich ihnen daher wenig Gelegenheit zur Wiedervereinigung bietet. Ihre Energie will man nun dadurch nutzbar machen, daß man mit einem »Staustrahltriebwerk« mit hoher Geschwindigkeit durch die ionisierten Schichten fährt. Dieses Triebwerk ist eigentlich nichts weiter als ein offenes Rohr, auf dem vorn ein Trichter und hinten eine Düse aufgesetzt sind. Mit dem Trichter fängt das Rohr eine große Menge der ionisierten dünnen Luft ein. Sie wird im Trichterhals zusammengepreßt, wodurch die Ionen einander näherkommen, und außerdem durch ein Gitter aus Platindraht

geführt, wodurch sie zur Wiedervereinigung angereizt werden. Die Wiedervereinigung erzeugt Wärme, und diese erhöht, wie in einer Brennkammer, den Druck des Gases. Die Drucksteigerung wird, wie wir es schon kennen, dazu ausgenutzt, das Gas mit erhöhter Geschwindigkeit



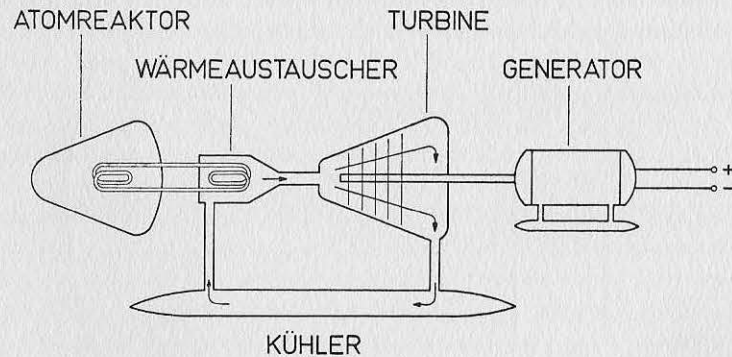
wieder aus dem Rohr auszustoßen. In den ionisierten Schichten ist die Dichte der Luft und damit auch die Zahl der ionisierten Atome sehr gering. In 1000 Kubikmetern findet man die Energie von einer Kilokalorie. Man kann daraus berechnen, daß ein Trichter von 10 Metern Durchmesser im Eintritt bestenfalls so viel Ionen einfangen könnte, daß ein Schub von 16 Kilogramm erzeugt würde. Natürlich sind die Anwendungsmöglichkeiten dieses Triebwerkes außerordentlich begrenzt,



da es an die ionisierte Schicht gebunden ist. Man könnte es allenfalls benutzen, um die Reibungsverluste, die niedrig fliegende Satelliten erleiden, durch den Wiedervereinigungsschub zu ergänzen, sofern es nicht aus anderen Gründen unmöglich ist, mit Satelliten diese Schichten aufzusuchen.

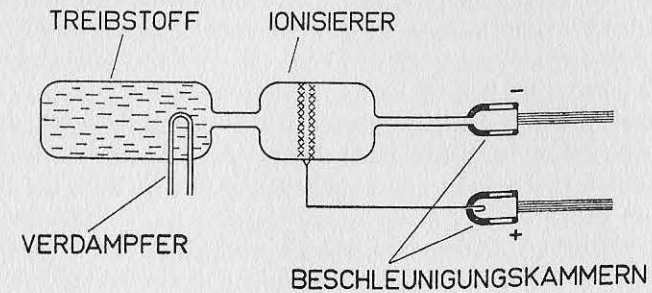
Ein sehr interessanter Vorschlag, der vielleicht einmal für Raumschiffe brauchbar wird, wurde in den letzten Jahren unter dem Namen »Ionen-triebwerk« beschrieben. Während alle bisher beschriebenen Triebwerke die Energie einer chemischen Umsetzung ausnutzen, um den Antriebsstrahl auf hohe Geschwindigkeit zu bringen, wird hier ein anderes Prinzip verwendet. Wir kennen es aus der Fernschröhre. Der Ursprung des Leuchtfleckes, der uns das Bild auf den Schirm der Fernschröhre zaubert, ist die sogenannte Elektronenkanone, die im wesentlichen aus einem abgeschirmten, geheizten Wolframdraht besteht. Aus diesem Wolframdraht dampfen Elektronen heraus und treten durch die Abschirmung ins Freie. Der Austrittsöffnung der Abschirmung gegenüber liegt die Anode. Sie ist stark positiv geladen, zieht also die negativ geladenen Elektronen mit großer Heftigkeit an. Die Elektronen werden auf ihrem Flugweg zur Anode sehr beschleunigt, und ein Teil von ihnen fliegt durch ein in der Anode angebrachtes Loch hindurch, fällt schließlich auf den Schirm der Fernschröhre und erzeugt dort den bekannten Lichtfleck. Man kann also ein Gas statt durch mechanischen Druck auch dadurch beschleunigen, daß man es starke elektrische Felder durchlaufen läßt, wenn es aus elektrisch geladenen Teilchen besteht.

Ein Raumschiff, das mit einem solchen Antrieb arbeiten soll, haben wir als Projekt schon in unserer Typenreihe kennengelernt. Hier wollen wir seinen projektierten Antrieb an Hand einer Schemazeichnung



studieren. Die wichtigste Aufgabe erscheint zunächst die Erzeugung einer hohen Spannung, die zur Beschleunigung der elektrisch geladenen Teilchen verwendet werden kann. In diesem Projekt ist die Hauptenergiequelle ein Atomreaktor. Die in ihm erzeugte Energie wird von einer Kühlflüssigkeit aufgenommen, die in einer Rohrschlange durch

den Reaktor geführt wird. Als Kühlflüssigkeit benutzt man ein flüssiges Metall: Natrium oder Kalium. Das Kühlmetall durchläuft dann, von einer Pumpe angetrieben, einen Wärmeaustauscher, in dem es seine Energie an ein Silikone-Öl abgibt und dieses zum Verdampfen bringt. Der Silikone-Dampf strömt aus dem Wärmeaustauscher in eine mehrstufige Turbine und treibt sie an. Am Ausgang der Turbine sammelt er sich und wird einem Kühler zugeführt, in dem er wieder verflüssigt wird,



um schließlich durch eine Pumpe dem Wärmeaustauscher wieder zugeführt zu werden. Die Turbine treibt einen elektrischen Generator an; dieser erzeugt endlich die gewünschte hohe Spannung. Auch er wird mit Öl gekühlt, das, nachdem es die Wärme aufgenommen hat, selbst einen Kühler durchlaufen muß. Übrigens müssen beide Kühler, da es im Weltraum keinen Fahrtwind gibt, ihre Wärme abstrahlen. Das bedingt sehr große Flächen, wodurch die Kühler die Form des ganzen Raumschiffes beeinflussen.

Die Erzeugung des Antriebsstrahles zeigt uns die nächste Schemazeichnung. Der Treibstoffbehälter enthält einen Stoff, der sich leicht und vollständig ionisieren läßt, das heißt, dessen Atome sich leicht in Ionen verwandeln lassen, und zwar wird an Rubidium oder Cäsium gedacht. Beide Stoffe gehören zu den sogenannten »seltene Erden« und zeichnen sich dadurch aus, daß sie neben ihrer leichten Ionisierbarkeit bei niedriger Temperatur verdampfen. Sie werden auf etwa 200 Grad erhitzt, dadurch verdampft, und der Dampfstrom wird auf ein heißes Platingitter gelenkt. Beim Zusammenstoß mit den Stäben des Platingitters laden sich die Atome positiv auf, während das Gitter sich zum Ausgleich negativ auflädt. Die Ionen gelangen nun in Beschleunigungskammern, die dem Beschleunigungsteil von Fernschröhren ähnlich sind. An den Beschleunigungsstrecken liegt die vom Generator erzeugte Spannung von nahezu 5000 Volt. Die Ionen durchlaufen das elektrische Feld und verlassen die

Kammern mit der sehr hohen Geschwindigkeit von etwa 80 km/s. Natürlich würde das Platingitter sich in kurzer Zeit sehr stark negativ aufladen und dann die positiven Ionen zurückhalten, statt sie an die Beschleunigungskammern abzugeben. Um dieses zu vermeiden, muß die im Gitter entstehende negative Ladung dadurch abgeführt werden, daß auch Elektronen aus dem Raumschiff abgestrahlt werden. Elektronenquellen sind viel leichter herzustellen als Ionenquellen. Es genügt, wie in der Fernröhre, ein Draht, der glühend gemacht wird und hierbei Elektronen verdampft. Diese werden mit einer kleinen Spannung ebenfalls in Kammern beschleunigt und verlassen die Rakete. Sie tragen zum Antrieb sehr wenig bei, weil sie eine vieltausendfach geringere Masse besitzen als die zum Antrieb verwendeten Atome. Kurz hinter den Beschleunigungskammern vereinigen sich die Atome und die Elektronen wieder miteinander, so daß dort ein neutrales Gas entsteht, das sich im Weltraum verteilt.

Mit derartigen Antrieben sind, wie wir bereits wissen, nur sehr geringe Schübe zu erzeugen, und außerdem benötigen sie ein fast vollkommenes Vakuum in der Umgebung, ohne das eine Abstrahlung der Ionen nicht möglich wäre. Aus beiden Gründen kann man sie nicht von der Erde aus starten lassen; sie müssen von einer Raumstation gestartet werden, von der aus sie die Erdschwere kaum noch zu überwinden haben und wo sie bereits beim Start ein vollkommenes Vakuum vorfinden.

Ein Zukunftsprojekt, dessen Verwirklichung vielleicht etwas näher liegt als die der bisher besprochenen, ist das »thermische Atomtriebwerk«. In ihm wird die Wärmeenergie durch einen Kernreaktionsvorgang statt durch einen chemischen Prozeß erzeugt – geradeso wie in den Atomkraftwerken elektrische Energie durch Kernprozesse hervorgebracht wird. Der Reaktor unterscheidet sich also nicht sonderlich von denen, die für den Einbau in Schiffe geplant werden oder schon verwirklicht sind. Die entstehende Wärmeenergie wird wie in anderen Reaktoren zur Dampferzeugung ausgenutzt. Der Dampf wird nun aber nicht einer Turbine zugeleitet, sondern als Antriebsstrahl aus einer Düse gestoßen.

Mit solchen Atomtriebwerken kann gegenüber den chemischen Triebwerken eine wesentliche Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit erzielt werden. Voraussetzung ist allerdings, daß die für hohe Strahlgeschwindigkeiten notwendigen Temperaturen beherrscht werden können, was heute noch nicht der Fall ist.

Selbst dann wachsen auch bei Atomtriebwerken die Bäume noch nicht in den Himmel. Infolge ihres großen Gewichtes lassen sich die Reaktoren

nur in überdimensionale Raketen einbauen. Außerdem genügt es ja nicht, Energie zu erzeugen, sondern die Rakete muß eine Masse, einen Treibstoff, mitführen, der ausgestoßen wird, und mit diesem Treibstoff kann sie nur begrenzte Zeit arbeiten.

Ein Antrieb, der noch als utopisch angesehen werden muß, ist das Photonen-Triebwerk. Unter Photonen versteht man in der Physik die kleinsten Teilchen eines Lichtstromes, und diese Vorstellung ist heute bekanntlich mit der zweiten Vorstellung von dem Licht als Wellenbewegung gleichberechtigt. Ein Photonen-Antrieb ist also eigentlich ein Lichtstrahlantrieb, wobei der Begriff Licht weit gefaßt werden muß. Es kann sich hierbei auch um andere elektromagnetische Strahlen handeln, die wir nicht als Licht sehen können, um Ultraviolettstrahlen oder Röntgenstrahlen etwa. Jeder Lichtstrahl übt einen Druck auf die Körper aus, auf die er fällt, und natürlich auch auf den Körper, von dem er ausgeht. Der Lichtstrahl, der einen Scheinwerfer verläßt, übt einen Rückstoß aus, ist also sozusagen ein Rückstoßantrieb für den Scheinwerfer. Leider sind aber die Kräfte, die man mit Lichtstrahlen erzeugen kann, so klein, daß sie für eine praktische Verwertung nicht in Frage kommen. Zwar lassen sie sich mit empfindlichen Instrumenten feststellen – ein Mittel dazu waren die »Lichtmühlen«, die vor etwa 50 Jahren häufig in den Schaufenstern standen, um Kunden anzulocken. Sie drehten sich unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung und wiesen hierdurch nach, daß es wirklich einen Strahlungsdruck gibt. Die stärksten Leuchtturm-Scheinwerfer werden von der Strahlung mit einer Kraft von etwa einem Hundertstel Gramm zurückgestoßen. Soll also der Strahlungsdruck zum Antrieb einer Rakete ausgenutzt werden, so bedarf es einer Steigerung der Lichtintensität um viele Größenordnungen. Besonders unangenehm ist, daß die uns bekannten Möglichkeiten, Spiegel herzustellen, sich fast ausschließlich auf die vom Licht her bekannten Wellenlängen beschränken. Das sichtbare Licht wird zum Beispiel von Silber außerordentlich gut reflektiert, doch möchte man für Strahlantriebe lieber die kurzwelligen, energiereicheren Strahlen, wie Röntgen- und Gammastrahlen, verwenden. Für sie haben wir aber leider keine Spiegel, also keine Möglichkeit, Scheinwerfer zu bilden und Strahlenbündel zu schaffen, die einen einseitig gerichteten Druck erzeugen könnten. Wenn also die Physik der Raketentechnik keine neuen Prinzipien zur Verfügung stellt, besteht für die Realisierung von Photonen-Triebwerken keine Aussicht.

Festigkeits-Lehre

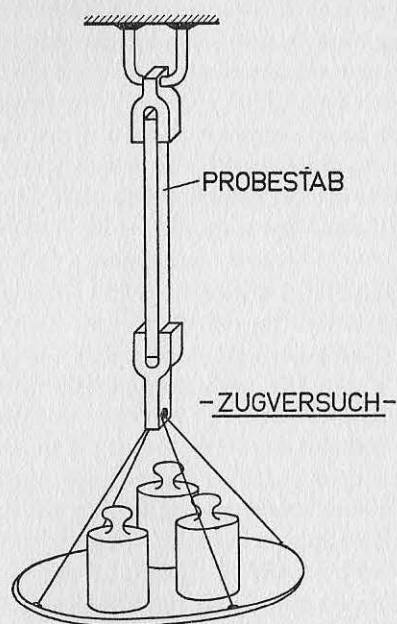
Zu Beginn unserer Betrachtung über die chemischen Vorgänge haben wir den Aufbau der festen Stoffe gestreift. In den festen Stoffen sind die Moleküle und Atome regelmäßig angeordnet und ziehen einander an. Jedes Atom ist von einer großen Anzahl von Nachbarn umgeben, die darauf achten, daß es auf seinem Platz bleibt, und das ist der Grund dafür, daß die festen Stoffe wirklich fest sind. Erwärmt man einen festen Stoff, wie wir es für das Eis erklärt haben, so nimmt die Festigkeit ab, weil die Atome und Moleküle auf ihren Plätzen unruhig werden, also die

ihnen zugeführte Wärmeenergie zu Schwingungen um ihre frühere Ruhelage verwenden. Wir kennen diese Festigkeitsabnahme von den Metallen. Stahl läßt sich schmieden, wenn er erwärmt wird; Blei schmilzt bereits bei relativ tiefen Temperaturen.

Da die innere Festigkeit der Stoffe, die wir auch Gefügefestigkeit nennen können, ihre Ursache darin hat, daß ein unternehmungslustiges Molekül oder Atom von seinen Nachbarn wieder auf seinen Platz gezogen wird, kann man sie am besten durch einen Zugversuch bestimmen. Hierzu stellt man aus dem zu untersuchenden Material einen Probestab her und spannt ihn in eine Vorrichtung, die ihn zu zerreißen versucht. Eine einfache

Vorrichtung dieser Art zeigt unser Bild. Der Probestab wird mit seinen Enden von zwei Zangen gepackt. Mit der oberen Zange wird die ganze Apparatur an der Zimmerdecke aufgehängt, an der anderen Zange hängt eine Wagschale mit Gewichten.

Ein solcher Zugversuch ist eigentlich eine dramatische Geschichte, dramatisch vor allem für die kleinsten Gefügeteilchen des Probestabes. Legen wir zunächst kleine Gewichte auf, so rücken alle Gefügeteilchen etwas auseinander; der Probestab verlängert sich ein wenig. Nimmt man ihm die Gewichte wieder ab, so rücken die Gefügeteilchen wieder zu-



sammen, die Verlängerung verschwindet. Wenn wir mehr Gewichte auflegen, wird die Dehnung des Probestabes größer, verschwindet aber trotzdem beim Abnehmen der Gewichte. Solange dies gut geht, sagen wir, daß wir uns im »elastischen« Bereich befinden; der Stab wird elastisch gedehnt, elastisch verformt.

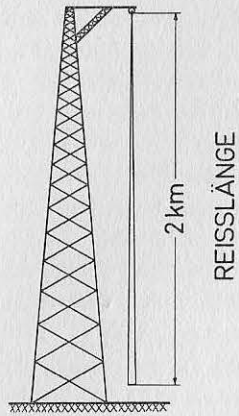
Sehr große Lasten gehen aber über die Kräfte der Gefügeteilchen hinaus. Es ist, als ob man ihnen die Arme, mit denen sie sich gegenseitig festhalten, ausrenkte. Nach der Entlastung sind sie nicht mehr in der Lage, ihre ursprünglichen Plätze einzunehmen – die Dehnung des Stabes bleibt bestehen. Diesen Bereich nennen wir den »plastischen« Bereich.

Bei wenig höherem Gewicht schnürt sich der Stab plötzlich an einer Stelle ein und reißt. Unter den Gefügeteilchen sind immer einige, die schwächer sind als der Durchschnitt, und diese lassen als erste ihre Nachbarn frei.

Natürlich kommt es bei diesem Zugversuch auf den Querschnitt des Probestabes an. Zwei Stäbe können doppelt so viel tragen wie einer, und entsprechend kann ein Stab mit doppeltem Querschnitt auch doppelt so stark belastet werden. Bei einem Vergleich verschiedener Stoffe muß man daher, wenn er ehrlich sein soll, die Belastungsfähigkeit auf den gleichen Querschnitt beziehen. In der Technik kennzeichnet man die verschiedenen Stoffe durch das Gewicht, das einen Draht von einem Quadratmillimeter (qmm oder mm^2) zum Zerreißen bringen würde, und nennt dies die Zugfestigkeit des Stoffes. Wie außerordentlich verschieden diese Festigkeitswerte sein können, zeigt die Tabelle, die einige in der Raketentechnik verwendete Stoffe enthält.

Werkstoff	Zugfestigkeit
Duraluminium	27– 40 kg/mm^2
Kupfer	35– 45 kg/mm^2
Perlon	40– 70 kg/mm^2
Hochwertiger Stahl	110–150 kg/mm^2

Alle Bauteile einer Rakete werden hoch beansprucht, meist höher als in anderen technischen Geräten. Eine genaue Kenntnis ihrer Festigkeit ist daher von entscheidender Bedeutung, noch wichtiger allerdings die ständige Fortentwicklung in der Metallurgie und Kunststoffchemie mit dem Ziel, immer höher belastbare Werkstoffe herzustellen. Diese müssen zugleich möglichst leicht sein, denn, wie wir aus unseren Betrachtungen über die Flugbahn wissen, kommt es sehr darauf an, das Leergewicht einer Rakete möglichst niedrig zu halten. Will man nun Stoffe im Hinblick nicht nur auf ihre Festigkeit, sondern auch auf ihr Gewicht be-

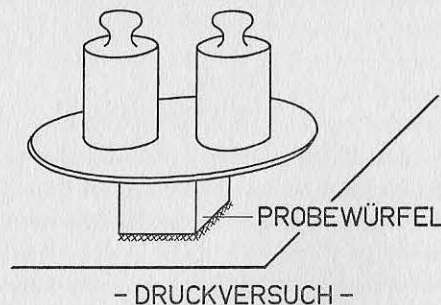


urteilen, so hilft eine sehr anschauliche Größe: die »Reißlänge«. Man stellt sich in Gedanken aus dem zu charakterisierenden Stoff einen Draht mit beliebigem (aber gleichbleibendem) Querschnitt her und hängt ihn an einem Turm auf. Bei einer bestimmten Länge, man nennt sie die Reißlänge, wird der Draht unter der Belastung durch sein eigenes Gewicht reißen. Die Reißlänge kombiniert offensichtlich Festigkeit und Gewicht, sie gibt an, mit welchem Gewicht man eine verlangte Festigkeit bei den verschiedenen Werkstoffen erkaufen muß. Daher wird sie gerade in der Raketentechnik gern für die Beurteilung von Stoffen herangezogen. Wie die Tabelle zeigt, schneiden die metallischen Werkstoffe bei dieser – wichtigen – Beurteilung gar nicht besonders gut ab, und wenn in den letzten Jahren die Kunststoffe in die Raketentechnik eingedrungen sind, so hat das ernste Gründe.

Werkstoff	Reißlänge
Duraluminium	10–16 km
Kupfer	4– 5 km
Perlon	40–60 km
Hochwertiger Stahl	14–19 km

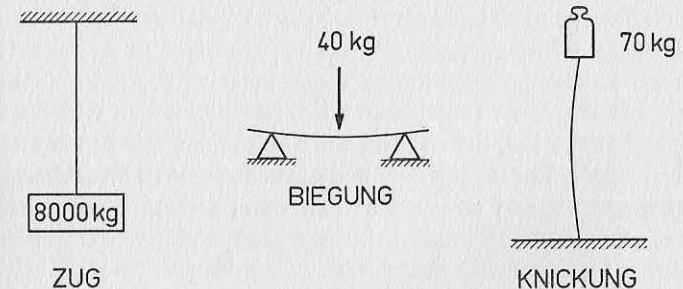
Versucht man die Festigkeit eines Stoffes dadurch zu ergründen, daß man einen Würfel dieses Materials durch eine Last zerdrückt, so ergeben sich für viele Stoffe ganz ähnliche Verhältnisse wie beim Zugversuch.

Bis zu einer bestimmten Belastung wird der Würfel nur elastisch nachgeben und nach der Entlastung wieder seine frühere Gestalt annehmen. Bei höherer Belastung wird er durch das Gewicht gestaucht werden, das heißt seine Gefügesteifigkeit wird dem Gewicht nicht mehr standhalten können. Die Gefügeteilchen werden sich gegeneinander verschieben, der Würfel wird kürzer und dafür dicker werden, und diese Verkürzung und Verdickung nach der Entlastung von den Gewichten nicht mehr zurückgehen. Wir befinden uns wieder im



plastischen Bereich. Steigern wir die Belastung noch weiter, so wird der Würfel im wörtlichen Sinne zerquetscht. Für viele Stoffe, insbesondere für die meisten Metalle, sind die Belastungsgrenzen (gerechnet in Kilogramm je Quadratmillimeter) im Zug- und Druckversuch gleich groß. Die Kraft der Gefügeteilchen erlahmt bei der gleichen Beanspruchung. Es gibt aber auch Stoffe, bei denen der Zusammenhalt zwischen den Gefügeteilchen bei Druck viel besser ist als bei Zug. So hält ein Zementwürfel einen sehr großen Druck aus, ein Draht aus Zement dagegen kann, wie schon die Anschauung sagt, nicht auf Zug beansprucht werden.

Während die Tragfähigkeit eines mechanischen Teiles bei reinem Zug und reinem Druck wirklich nur von der Gefügesteifigkeit des Stoffes abhängt, aus dem er hergestellt ist, ist die Widerstandsfähigkeit gegen andere Belastungsarten sehr stark von der Form des Bauteiles abhängig. Wir können die Betrachtung solcher Belastungen unter das Kennwort »Formfestigkeit« stellen. Was sie bedeutet, läßt sich an einigen einfachen Beispielen darstellen. Ein dicker Stahldraht von einem Zentimeter Durchmesser trägt unter Zugbelastung ein Gewicht von 8000 Kilogramm. Ein 1 Meter langes Stück dieses Drahtes legen wir mit seinen beiden Enden erhöht auf, so daß es in der Mitte nicht unterstützt ist, und drücken



mit der Hand darauf. Obwohl wir mit der Hand keine Tonnengewichte ausüben können, gelingt es uns, den Draht zu verbiegen. Eine dauerhafte Verbiegung können wir bereits mit einer Kraft von 40 Kilogramm erzielen. Pflanzen wir den gleichen Stab fest in die Erde ein und belasten ihn oben mit einem Gewicht, so wird er bereits bei einer Last von 70 Kilogramm nach der Seite ausknicken. In beiden Fällen haben wir eine Belastungsfähigkeit, die von der Gestalt abhängig ist. In beiden Fällen geben lange Stäbe eher nach als kurze.

Ähnliche Vorgänge treten bei den für den Aufbau von Raketen viel verwendeten Körpern aus Blechen auf. Lange bevor die ihrem Quer-

schnitt entsprechende Gefügefestigkeit erreicht ist, beginnen die Bleche zu beulen und ihre Festigkeit zu verlieren.

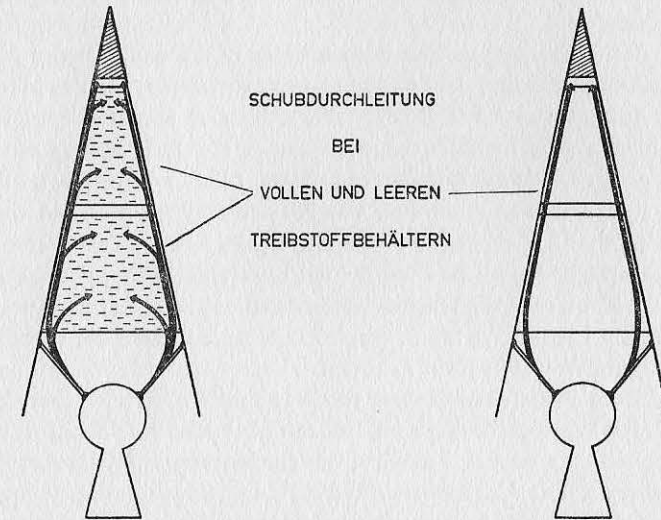
Da es die Gefügefestigkeit nur mit Stoffwerten zu tun hat, die Formfestigkeit aber mit der Unzahl verschiedener Formen, die den Köpfen der Konstrukteure entspringen, ist es kein Wunder, daß Physik und Mathematik der Formfestigkeit außerordentlich viel verwickelter sind als die der Gefügefestigkeit. Schon für das Knicken eines Stabes, wie auf unserem Bild, kommt man mit einfachen Überlegungen nicht mehr aus. Die Berechnung der Festigkeit von Blechschalen ist bereits eine recht schwierige Angelegenheit. Die Theorie solcher blechförmigen Gebilde, die sogenannte Schalentheorie, ist außerordentlich kompliziert und mathematisch verwickelt. Immerhin ist man heute in der Lage, auch kompliziertere Gebilde in ihrer Festigkeit zu berechnen. Zur Erleichterung dieser Arbeit haben insbesondere die modernen elektronischen Rechenmaschinen beigetragen. Sie ermöglichen es, Rechnungen, die früher einfachliegen blieben, weil sie mit Menschenkraft zu lange gedauert hätten, wirklich durchzuführen und ihre Ergebnisse für die Praxis auszuwerten.

Aus unserem Beispiel können wir entnehmen, daß man mit einem Bauteil die größten Kräfte aufnehmen kann, wenn man es bis zur Grenze seiner Gefügefestigkeit beansprucht, also den Einfluß der Form möglichst zurückdrängt. Hierauf gründet sich ein konstruktiver Trick, der bei ganz modernen Raketenkonstruktionen angewendet wird. Wenn ein Blechbehälter mit Druckluft aufgeblasen wird, treten in seinen Wänden Zugbeanspruchungen auf, die so groß werden können, wie es die Gefügefestigkeit zuläßt. Ein solcher Behälter wird von äußeren Druckbeanspruchungen, unter denen er, wenn er leer wäre, zerbeulen würde, nichts merken, solange sie kleiner sind als diese Zugspannung. Wir werden die Verwendung dieses Tricks in der Praxis noch kennenlernen.

Die Kenntnis der Gefügefestigkeit der Stoffe und der Formfestigkeit bestimmter Bauweisen ist aber nur eine Seite der Sache. Die zweite besteht in der Feststellung, welche Kräfte nun tatsächlich auf das betreffende Bauteil der Rakete, etwa auf die Zelle oder das Stützgerüst des Triebwerkes, wirken. Erst wenn wir sie kennen, können wir Form und Stoff für die Raketeile so auswählen, daß sie den Beanspruchungen standhalten.

Die größte konzentrierte Kraft, die sich auf die Raketenkonstruktion auswirkt, ist der Schub des Triebwerkes. Der Schub wird über die Bauteile der Zelle in alle Teile der Rakete geleitet, die nach dem Gesetz von Wirkung und Gegenwirkung Kräfte in entgegengesetzter Richtung aus-

üben, deren Summe genauso groß ist wie der Schub. Während der Schub bei den meisten Raketen für die ganze Antriebsbahn konstant ist und gleich bleibt, ist das für die einzelnen Massenkräfte nicht der Fall, denn die Massen der Rakete verschieben sich, und ihre Gesamtmasse nimmt allmählich ab. Während kurz nach dem Start die Massenkraft der Treibstoffbehälter die wichtigste Gegenkraft des Schubes ist, oder anders aus-



gedrückt: während kurz nach dem Start der Schub vor allen Dingen die mitgenommenen Treibstoffmengen beschleunigen muß, ist es kurz vor Brennschluß anders. Da sind die Treibstoffmengen, also auch die von ihnen ausgeübten Massenkräfte gering, und die Hauptgegenkraft wird von der Nutzlast ausgeübt. Kurz vor Brennschluß muß also die Schubkraft durch die ganze Zelle der Rakete hindurch bis vorn zur Nutzlast geleitet werden.

Noch weitere Teile der Rakete beanspruchen die Konstruktion. Das sind vor allen Dingen die Steuerorgane, deren Kräfte im Gegensatz zur Schubkraft nicht in der Achsrichtung, sondern quer zur Raketenachse liegen und Biegungen der ganzen Rakete verursachen.

Während des Fluges durch die Lufthülle greift an der Außenhaut der Rakete der Luftwiderstand an. Fliegt eine Rakete mit einem Anstellwinkel, so wirkt der Auftrieb, den wir früher schon kennengelernt haben. Auch diese Kräfte wirken zum Teil, wie die Massenkräfte, dem Schub entgegen, zum Teil, wie die Steuerkräfte, senkrecht zur Achse der Rakete.

Eine besondere Gruppe der Luftkräfte sind die Windkräfte. Schon die stetigen Winde, die durch Steuerkräfte ausgeglichen werden müssen, damit die vorgeschriebene Bahn eingehalten wird, sind eine Belastung. Neben den auch für langsamere Fahrzeuge gefährlichen Böen treten bei Raketen hoher Geschwindigkeit aber noch Stoßbeanspruchungen besonderer Art auf, dann nämlich, wenn die Rakete während des Aufstieges schnell durch übereinanderliegende Schichten wechselnder Windrichtung hindurchstößt.

Alle Beanspruchungen der Raketenzelle durch innere oder äußere Kräfte sind ferner unter dem Gesichtspunkt zu werten, daß das Material, das die Außenwand der Zelle darstellt, sich unter Umständen nicht auf Normaltemperatur befindet, sondern durch die Luftreibung erwärmt wird oder auch, wie die Wände der Behälter für flüssige Gase, sehr tiefe Temperaturen angenommen hat, was bei den meisten Metallen eine erhöhte Empfindlichkeit gegen Stöße und Schläge hervorruft. Veränderte Temperaturen bedeuten veränderte (meist verschlechterte) Festigkeit des Materials. Kann man die Wärmeeinflüsse nicht beseitigen oder durch die Verwendung besonderer Stoffe ausgleichen, so muß man die verminderten Festigkeitswerte in Kauf nehmen.

Sobald die Bahn einer Rakete festliegt und die wesentlichen Daten der äußeren Form gefunden sind, müssen über alle diese Beanspruchungen Unterlagen geschaffen werden, die der Konstruktion als Ausgangspunkt dienen. Die Unterlagen für die Festigkeitsrechnung nennt man »Lastannahmen«. Die Lastannahmen enthalten alle aufgeführten inneren und äußeren Kräfte, die auf die Konstruktion der Zelle wirken, wie auch die Temperaturbeeinflussung, und zwar stets die Größtwerte in der ungünstigsten Kombination für jeden Zeitpunkt der Antriebsbahn.

Aber nicht nur die Daten der Antriebsbahn dürfen den Lastannahmen zugrunde gelegt werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob bei anderen Vorgängen nicht höhere Lasten für die Rakete oder einzelne ihrer Teile auftreten, die ihre Konstruktion gefährden könnten. So muß etwa der Fall der auf dem Starttisch stehenden Rakete vor, während und nach der Betankung und der Fall der im Fahrzeug liegenden Rakete untersucht werden. Auch ob Transporterschütterungen auf der Eisenbahn oder auf der Straße sich zerstörend auswirken können, bedarf der Untersuchung. Schließlich ist bei den Konstruktionen für Fernraketen, die auf besonders niedriges Gewicht gezüchtet sind, sogar die Griff-Festigkeit, das heißt die Festigkeit gegenüber der Behandlung durch den Menschen, entscheidend.

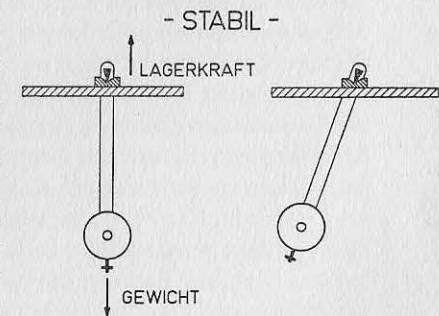
Zwischen den Kräften, die auf ein Bauteil der Rakete wirken, und der Festigkeit dieses Bauteils soll immer eine gewisse Spanne bestehen: die

Sicherheit. Natürlich ist die Sicherheit einer Raketenkonstruktion nie so groß wie etwa die einer Brückenkonstruktion. Für diese werden von den Behörden der Länder verschiedene Werte, mindestens aber doch eine mehrfache Sicherheit gefordert. Das heißt, jedes Teil der Brückenkonstruktion muß mehrmals so stark sein, als es auf Grund der Lastannahmen erforderlich wäre. Bei Geräten, die leicht gebaut sein müssen, wie bei Flugzeugen, wird diese Forderung schon stark verringert, und bei Raketen gar geht man teilweise mit der Sicherheit bis auf 1 herunter, hat also praktisch gegenüber den Lastannahmen keine zusätzliche Sicherheit mehr. Das setzt natürlich voraus, daß in den Lastannahmen wirklich die maximalen Kräfte und ihre ungünstigste Kombination enthalten und außerdem alle Fertigungstoleranzen, etwa Schwankungen der Blechdicke, schlechte Schweißnähte oder schlechte Nieten, schon in der Festigkeitsrechnung berücksichtigt sind.

Theorie der Steuerung

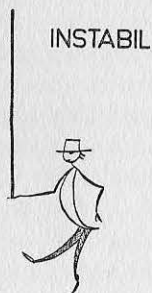
Der Einfluß der Luftkräfte auf Konstruktion und Festigkeit einer Rakete ist zwar nicht zu vernachlässigen, aber doch nicht von ausschlaggebender Bedeutung. Viel stärker ist ihre Einwirkung auf die Bahn und das Verhalten der Rakete auf der Bahn. Wir haben gelegentlich unserer aerodynamischen Betrachtung die Begriffe »stabil« und »instabil« geprägt. Hier wollen wir uns mit diesen Begriffen noch einmal auseinandersetzen, weil sie die Notwendigkeit von Raketensteuerungen begründen und die Wirksamkeit von Steuerungen mit ihnen beurteilt werden kann.

Wann ein Körper stabil ist, wann er instabil ist, das rufen wir uns mit einigen einfachen Beispielen ins Gedächtnis zurück. Ein Uhrpendel, das mit einer Schneide in einer Pfanne gelagert ist, sei unser Beispiel für einen stabilen Körper. Das schwere Pendelgewicht wird von der Erde angezogen, das Pendel würde unter dem Einfluß dieser Kraft auf die Erde fallen, wenn es nicht durch das Lager daran gehindert würde. Mit anderen Worten, das Lager übt eine entgegengesetzte, gleichgroße Kraft aus, so daß das Pendel in Ruhe bleibt. Wenn wir nun das Pendel ein wenig zur Seite drehen, so wird es nach dem Loslassen wieder in

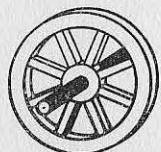


die Ruhelage zurückkehren, hin und her schwingen und schließlich in der Ruhelage stehenbleiben. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. Das Pendelgewicht wird von der Erde angezogen, es sucht sich also eine Lage, in der es möglichst tief hängt, und das ist die Ruhelage. Das heißt, die stabile Lage eines Körpers ist diejenige, in die er von selbst wieder zurückkehrt, wenn er durch eine Störung aus ihr herausgebracht wurde. Die Rückkehr wird bewirkt von einer Kraft (dem Gewicht), die unter (oder hinter) dem Aufhängepunkt angreift.

Ganz anders ist es bei dem Balancierakt im nächsten Bild. Das Gewicht liegt oben, und der Unterstützungspunkt, also die Hand des Artisten, darunter. In diesem Falle würde die Balancierstange umkippen, wenn der Artist seine Hand nicht immer wieder durch kleine Ausweichbewegungen genau unter das Gewicht brächte. Solch ein Verhalten nennt man instabil. Ein instabiler Körper kann also nur durch eine aktive Steuerung, wie der Artist sie ausübt, im Gleichgewicht gehalten werden.



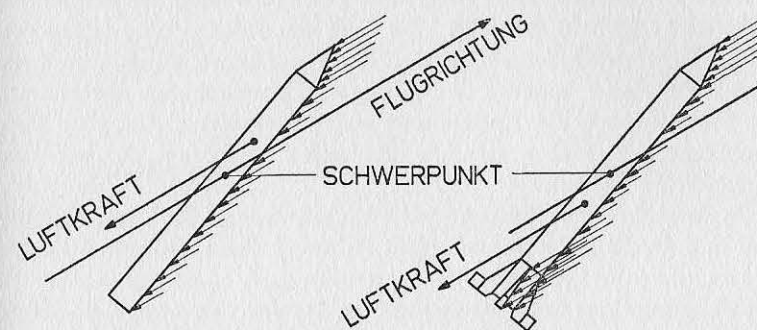
Eine dritte Möglichkeit zeigt uns jedes Rad, das sich auf seiner Achse dreht. Während beim Pendel und bei der Balancierstange die Kraft, das Gewicht, außerhalb des Unterstützungspunktes angreift, können wir uns das Gewicht beim Rad wegen der Symmetrie in der unterstützenden Achse vereinigt denken. Das Rad ist in allen Stellungen im Gleichgewicht und hat keine Tendenz zu pendeln oder sich von selbst zu drehen. Man nennt ein solches Gleichgewicht indifferent.



Bei einem freifliegenden Körper wie einer Rakete gibt es natürlich keinen Unterstützungspunkt. Den Punkt, der ihn ersetzt, also der Punkt, um den sich eine Rakete dreht oder um den sie schwingt, nennt man den Massenmittelpunkt oder Schwerpunkt. Auf ihn bezieht man alle Kräfte, die an der Rakete angreifen, und so haben wir bei der Besprechung der Luftkraft auch ihre Lage zum Schwerpunkt studiert. Betrachten wir noch einmal ein extremes Beispiel: Eine zylindrische Rakete mit einer kegelförmigen Spitze auf ihrer Bahn. Wie die eingezeichneten Pfeile zeigen, konzentriert sich der Angriff der Luft auf die Kegelspitze, die als erste vorstößt. Kein Wunder, wenn die resultierende Luftkraft weit vorn, also vor dem Schwerpunkt, liegt und die Rakete daher instabil ist. Nun wissen wir aber bereits, wie man große Luftkräfte erzeugen kann: nämlich durch Tragflächen. Will man also dafür sorgen, daß die Re-

sultierende der Luftkräfte nicht in einem Punkt vor dem Schwerpunkt, sondern möglichst hinter ihm angreift, so muß man am hinteren Ende, am Heck, Tragflächen anbringen; das sind die Flossen. An ihnen entstehen große Auftriebskräfte. Dadurch rutscht der Angriffspunkt der Luftkräfte hinter den Schwerpunkt, und die Luftkraft versucht, die Rakete in Flugrichtung zu drehen; die Rakete wird stabil.

Neben der Frage, ob die Luftkraft, der Auftrieb, stabilisierend oder destabilisierend wirkt, interessiert ihre Größe. Daß die Luftkraft um so wirksamer auf die Drehung der Rakete einwirken kann, je stärker sie



FLOSSEN ZIEHEN DEN LUFTKRAFTANGRIFFSPUNKT NACH HINTEN

selbst ist und je weiter ihr Angriffspunkt vom Schwerpunkt entfernt liegt, ist leicht einzusehen. Am Anfang der Antriebsbahn einer Rakete, kurz nach dem Start, sind die Luftkräfte sehr gering, weil die Rakete dann noch wenig Geschwindigkeit besitzt und der Fahrtwind klein ist. Mit steigender Geschwindigkeit steigen sie rasch an. Schließlich aber fallen sie wieder fast auf Null ab, nämlich wenn die Rakete in die dünneren Luftschichten vorstößt, die ihr keinen Widerstand mehr bieten. Von besonderer Wichtigkeit ist also die mittlere Antriebsbahn. Die Kunst des Raketenkonstruktors besteht darin, durch geeignete Formgebung und geeignete Massenverteilung dafür zu sorgen, daß in diesem Gebiet Schwerpunkt und Mittelpunkt der Luftangriffskräfte möglichst dicht beieinander liegen und die an sich großen Luftkräfte sich somit doch nicht stark auf die Rakete auswirken können.

In der Pionierzeit der Raketentechnik war man vielfach der Meinung, die Größe der Luftkraft sei unerheblich, wenn sie nur stabilisierend auf die Rakete wirke. Das trifft in gewissem Umfang für ungesteuerte

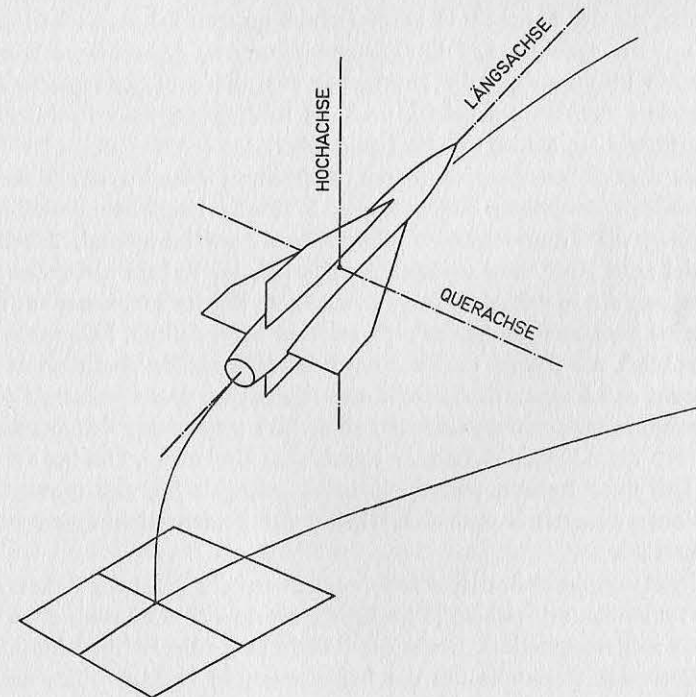
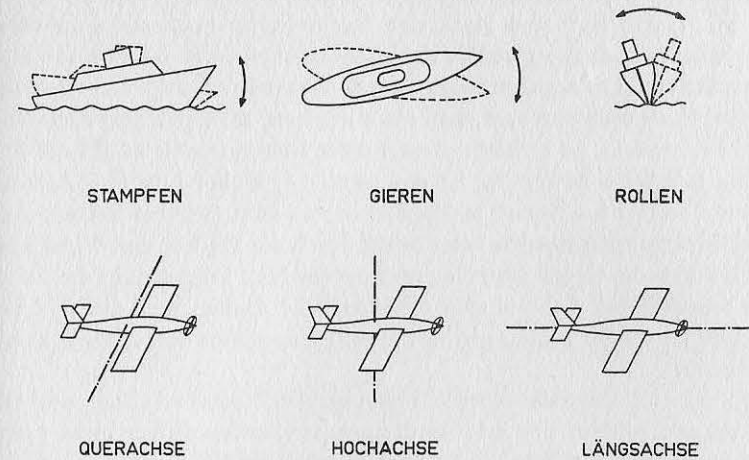
Raketen zu. Für gesteuerte Raketen gilt es nicht, denn eine sehr stabile Rakete braucht zur Lenkung große Steuerkräfte. Die Veränderung der Bahn ist schon bei Fernraketen, mehr noch natürlich bei Raketen für bewegliche Ziele, eine Hauptaufgabe der Steuerung.

Neben der Stabilität spielt noch eine zweite Eigenschaft der Rakete für ihr Verhalten auf der Bahn eine große Rolle. Betrachten wir noch einmal das Pendel! Ein normales Pendel, das angestoßen wurde, wird lange hin und her schwingen, ehe es wirklich zur Ruhe kommt. Bringen wir an dem Pendel quergestellte Flächen aus starkem Karton an, so wird die Luftreibung dafür sorgen, daß es nur wenige Schwingungen macht und sehr bald stillsteht. Man muß also dafür sorgen, daß an der Rakete auftretende Schwingungen rasch gedämpft werden und sie schnell zur Ruhe kommt. Bei geeigneter Formgebung übernimmt, wie beim Pendel, die Luftreibung einen Teil dieser Aufgabe. Den wesentlichen Teil aber erledigt die aktive Steuerung, die wir nun kennenlernen werden.

Die Steuerung von Fahrzeugen ist ein schwieriges Problem. So muß man erst (nach einer langwierigen Prüfung) einen Führerschein erwerben, ehe man ein Kraftfahrzeug steuern darf. Noch schwieriger ist die Erlangung eines Steuermannspatentes, das einen berechtigt, ein Schiff zu steuern, oder gar die Ausbildung zum Flugzeugführer. Natürlich wird die Aufgabe nicht einfacher, wenn sie nicht mehr vom Menschen, sondern von einer automatischen Einrichtung gelöst werden soll.

Dies bedeutet aber nicht, daß die Wirkungsweise einer Steuerung schwer zu verstehen sei. Sie ist relativ leicht zu begreifen, wenn man sich die Grundbegriffe, die bei jeder Besprechung von Steuerungsanlagen auftreten, gründlich zu eigen gemacht hat. Die Steuerung beeinflusst die Lage des Fahrzeuges, in unserem Falle also der Rakete, im Raum. Daher muß man sich zunächst einmal in diesem Raum orientieren können.

Das erste vom Menschen gebaute Fahrzeug, das sich relativ frei im Raum bewegen konnte, war das Schiff. Daher stammen auch die wichtigsten Bezeichnungen, die man für die Steuerung von Flugzeugen und Raketen verwendet, aus der Schifffahrt. Eine wichtige Aufgabe der Raketensteuerung ist das Korrigieren von Schwingungen, die die Rakete, wie ein Schiff oder ein Flugzeug, um ihren Schwerpunkt ausführt. Um diese Schwingungen anschaulich zu machen, kann man so tun, als stünde das Fahrzeug, das man betrachtet, im Augenblick der Betrachtung still, das heißt, als habe es keine Vorwärtsgeschwindigkeit. Ein Schiff, das man auf diese Weise betrachtet, kann drei Bewegungen ausführen, die bei den



Passagieren Seekrankheit hervorrufen. Die Bewegung, bei der es so schwingt, daß Bug und Heck sich wechselweise hoch aus dem Meer emporheben, um dann wieder tief hineinzutauchen, nennt man »Stampfen«. Schwingt es dagegen so, daß der Schornstein oder der Mast in Ruhe bleibt, Heck und Bug aber, von oben gesehen, auf der Wasseroberfläche hin und her wedeln, so bezeichnet man diese Bewegung als »Gieren«. Die dritte mögliche Bewegung ist das »Rollen«, wobei Luv und Lee abwechselnd fast ins Wasser tauchen oder steil zum Himmel steigen. Alle drei Bewegungen werden beim Schiff durch die Wellen, den Wind oder auch durch die eigene Fahrt hervorgerufen. Man kann sich in das Schiff ein unsichtbares Achsenkreuz eingezeichnet denken und die drei Bewegungen als Schwingungen um jeweils eine dieser drei Achsen kennzeichnen.

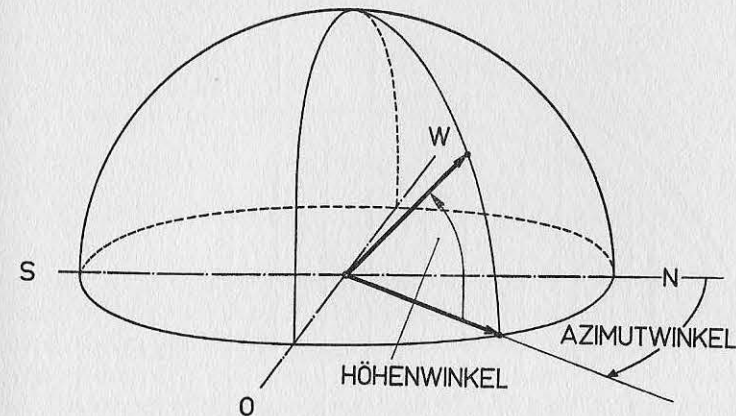
In der Flugzeugtechnik spricht man gern von diesen Achsen, und wir haben den Bildern des Schiffes die entsprechenden Bilder eines Flugzeuges zugeordnet, denen man die Bezeichnung der drei verschiedenen Achsen sofort entnehmen kann. Führt das Flugzeug Nickschwingungen aus, die wir wie beim Schiff Stampfschwingungen nennen, schwingt es also um die Querachse. Die Gierschwingungen, das seitliche Wedeln, führt ein Flugzeug um die Hochachse aus, die dem Schornstein oder Mast eines Schiffes entspricht, und die Rollschwingungen schließlich, genauso wie ein Schiff, um die Längsachse.

Die drei Achsenbezeichnungen übernimmt man in der Raketentechnik mit denselben Bedeutungen. Während beim Schiff und beim Flugzeug die Längsachse im allgemeinen etwa horizontal, das heißt parallel zum Erdboden verläuft, ist das bei der Rakete nicht der Fall. Wenn man die in der Abbildung gezeichnete Rakete rückwärts auf ihrer Bahn bis zum Startpunkt verfolgt, erkennt man, daß die Längsachse im Augenblick des Startes und während des senkrechten Aufstieges senkrecht auf der Erdoberfläche steht und Hochachse und Querachse durch nichts voneinander unterschieden sind. Ihre gesonderte Bedeutung bekommen diese beiden Achsen erst nach dem Umlenken. Das liegt daran, daß bei einer Rakete, sofern sie nicht geflügelt ist, der Querschnitt rotationssymmetrisch und daher keine der beiden Richtungen ausgezeichnet ist.

Hieraus ergibt sich, daß sich Störungen auf die Bahn der Rakete sehr unterschiedlich auswirken, je nachdem, ob sie vor oder nach dem Umlenken aufgetreten sind. Dreht die Rakete sich zum Beispiel kurz nach Verlassen der Startstelle um die Längsachse, so bedeutet dies, daß sie in eine ganz falsche Richtung fliegt, während eine solche Drehung

– Drall genannt – nach dem Umlenken nur wenig Einfluß auf ihre Flugrichtung hat.

Während uns die genannten drei Achsen helfen, uns bei der Orientierung der Rakete um ihren Schwerpunkt zurechtzufinden, so kommen bei der Orientierung auf der Bahn noch zwei weitere Begriffe hinzu, die wir kennenlernen müssen.

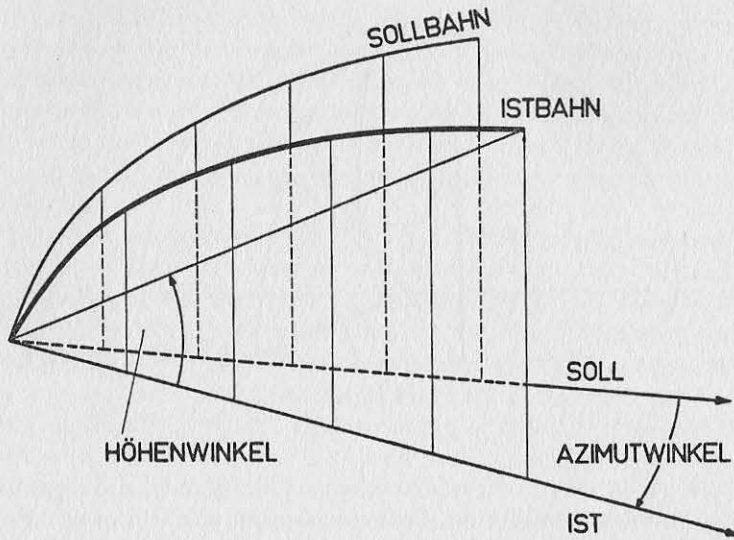


Dabei gehen wir von der astronomischen Orientierung, also eigentlich wieder von der Schifffahrt aus. Peilt ein Seemann von seinem Schiff aus einen Stern an, so legt er ihn durch zwei Winkelgrößen fest. Über der ebenen Erde, die durch seinen Horizont begrenzt ist, denkt er sich den Himmel etwa wie eine Käseglocke aufgespannt und den Stern als leuchtenden Punkt in dieser Käseglocke. Er richtet das Fernrohr, seinen Sextanten, auf diesen Stern und kann nun die Richtung dieses Fernrohres durch zwei Winkel festlegen: den Höhenwinkel, der ihm anzeigt, wie steil er das Fernrohr aufrichten muß, und den sogenannten Azimutwinkel, der ihm anzeigt, wie stark er es aus der Nordrichtung herausdrehen muß.

Diese beiden Winkel übernimmt man in der Raketentechnik für die Bahnbeschreibung einer Rakete. Der Höhenwinkel ist genauso definiert wie der eines Sternes, die Rakete wird also einfach als Stern betrachtet, und der Höhenwinkel ist ein Maß dafür, wie stark man ein Fernrohr, mit dem man sie verfolgt, nach oben schwenken muß. Beim Azimutwinkel besteht insofern ein Unterschied, als er im allgemeinen nicht, wie beim Stern, von der Nordrichtung aus gezählt wird, sondern von der Sollbahn der Rakete. Das gilt insbesondere für Raketen, deren Richtung

von vornherein festgelegt ist, die also keinem beweglichen Ziel nachfliegen.

Wie wir, muß sich auch die Steuerung in diesen Koordinatensystemen zurechtfinden, sie muß Abweichungen der Rakete von ihrer Sollbahn feststellen und korrigieren.



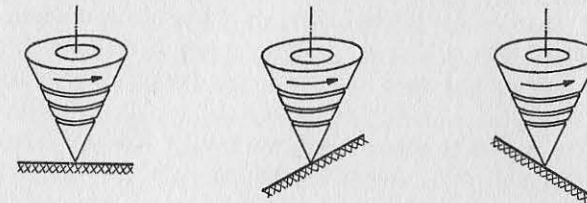
Für die Messung von Abweichungen steht eine Vielzahl von Mitteln zur Verfügung, die wir im technischen Teil kennenlernen werden. Hier sollen uns nur die Prinzipien der vielseitig verwendeten Kreiselgeräte und einiger Funkgeräte beschäftigen. Aber auch für die Korrektur der Raketenbahn gibt es viele Methoden. Allen gemeinsam ist ihre Auswirkung auf den Raketenkörper, die wir zum Schluß unseres Grundlagenstudiums untersuchen wollen.

Wer kennt ihn nicht von uns, den Kinderkreisel, der, von der Schnur getrieben, sich heftig um sich selbst drehte und dabei doch so sicher auf seinem einen Bein stand. Daß er auf der Spitze stehen konnte, ohne umzufallen, war ja gerade das Auffällige an ihm und machte ihn zum Spielzeug. Allerdings hatte er diese Eigenschaft nur, solange er rasch rotierte. Deshalb hieß es auch immer hurtig mit der Peitsche zuschlagen, um ihn in Drehung zu halten.

Die Standfestigkeit des Kreisels war nicht abhängig von der Unterlage, auf der er lief. Wenn man ihn beispielsweise auf ein Brett trieb, dieses

Brett in die Hand nahm, es kippte und schwenkte, so behielt er doch seine senkrecht stehende Achse stets bei.

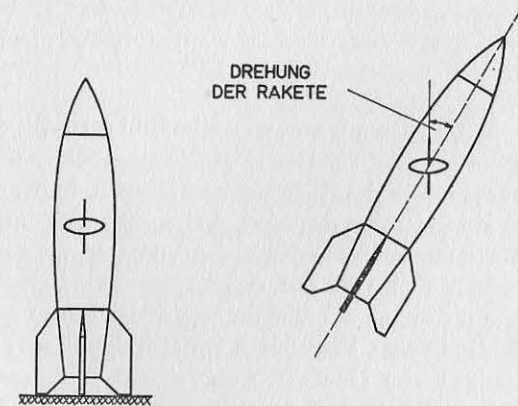
Die Eigenschaft des Kreisels, seine Achse stets beizubehalten, haben sich nicht nur die Raketentechniker, sondern schon vorher die Flugzeug-



EIN KREISEL BEHÄLT STETS SEINE DREHACHSE BEI.

techniker und die Schiffsbauer zunutze gemacht. Ein Kreisel, der so in seinem Gehäuse befestigt ist, daß er sich völlig frei drehen und wenden könnte, nutzt diese Freiheit nicht aus. Im Gegenteil, wenn man sein Gehäuse schwenkt und dreht, behält er seine Achsrichtung hartnäckig bei. Man kann daher sogar feststellen, wieviel und in welcher Richtung das Gehäuse gedreht wurde, indem man einfach prüft, in welche Ecke die feststehende Kreiselachse nach der Drehung zeigt.

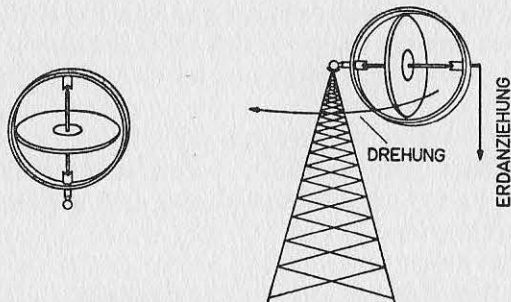
Ist das Gehäuse aber im Inneren einer Rakete befestigt, so läßt sich aus der Lage der Kreiselachse in ihm erkennen, wohin und um wieviel sich die Rakete gedreht hat. Wenn man diese Feststellung automatisch trifft, kann man sie den Steuerorganen zuleiten und für eine Korrektur der Raketenlage sorgen.



Der Kreisel hat noch eine andere interessante Eigenschaft, die für die Raketentechnik von Bedeutung ist. Wir schildern sie wiederum am besten an Hand eines Spielzeuges. Auf Jahrmärkten konnte man früher einen Kreisel kaufen, der in einen Rahmen eingebaut war, so

daß man ihn, auch wenn er sich drehte, gut anfassen konnte. Zu diesem Kreisel wurde ein kleiner »Eiffelturm« geliefert, auf dessen Spitze man den Kreisel aufsetzen konnte. Legte man ihn, so wie es die Zeichnung vorschreibt, mit einem Ende seiner Achse quer auf den Eiffelturm, so fiel er natürlich sofort herunter, wenn er nicht aufgezogen war. Lief der Kreisel aber, so fiel er nicht, sondern machte im Gegenteil eine ganz eigenartige Bewegung, er drehte sich nämlich langsam im Kreise, und zwar mit der Spitze des Eiffelturms als Mittelpunkt.

Wir wollen hier nicht untersuchen, warum der Kreisel nicht umfällt, warum er versucht, seine Achse im Raume stabil zu halten. Die Erklärungen, die man dafür geben könnte, wären doch unzulänglich. Wer es genauer kennenlernen will, der lese es in einem beliebigen Physikbuch nach, aber nicht ohne die dazugehörige Mathematik nachzurechnen.



Wir wollen uns nur, wie es im Bild getan ist, den Vorgang noch einmal ganz klarmachen. Die Erdanziehung, die auf den Kreisel wirkt, versucht ihn in der Richtung umzukippen, in die der Pfeil zeigt. Statt umzukippen, führt der Kreisel aber eine Drehung in der eingezeichneten Richtung aus. Wenn wir den Vorgang mit genauen Messungen beobachten, stellen wir fest, daß die Geschwindigkeit, mit der sich der Kreisel um die Spitze des Eiffelturmes dreht, um so größer ist, je schwerer der Kreisel wiegt. Vergrößern wir also das Gewicht des Kreisels durch Anhängen von Gewichten an seine freie Spitze, so wird die Drehung schneller. Die Drehgeschwindigkeit ist geradezu ein Maß für die Kraft, die auf die freie Spitze des Kreisels wirkt.

Wir haben also mit dieser Anordnung ein Gerät erfunden, mit dem man Kräfte messen kann. Ein solches Gerät brauchen wir aber, um die Geschwindigkeit im Innern der Rakete zu bestimmen. Wir wissen,

daß man sie nicht direkt, sondern daß man nur die Beschleunigung messen kann.

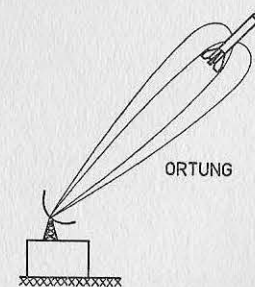
Die Beschleunigung erhöht, wie wir aus den Versuchen mit der Federwaage gesehen haben, das Gewicht aller Körper in der Rakete, also auch das des quergestellten Kreisels. Daher kann man mit ihm die Beschleunigung messen. Ja – man kann noch mehr mit ihm machen. Nehmen wir an, der Kreisel sei so konstruiert, daß er sich bei einer Beschleunigung von 1 m/s je Sekunde einmal in der Sekunde um die Spitze des Eiffelturmes dreht. Dann können wir auf die Rakete unseres früheren Beispiels zurückgreifen und feststellen, wie der Kreisel umlaufen würde, wenn er in dieser Rakete eingebaut wäre. Aus den alten Beschleunigungswerten und den Umlaufzahlen des Kreisels ergibt sich folgende Tabelle:

	Beschleunigung	Zahl der Umläufe des Kreisels in dieser Sekunde
in der 1. Sekunde	10 m/s je Sekunde	10
in der 2. Sekunde	11 m/s je Sekunde	11
in der 3. Sekunde	12 m/s je Sekunde	12
in der 4. Sekunde	13 m/s je Sekunde	13

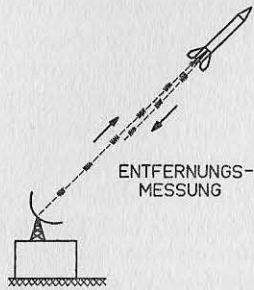
Zählt man die ganzen Kreiselumläufe zusammen, so erhält man sechsundvierzig Umläufe. 46 m/s ist aber nach unserem früheren Beispiel die Geschwindigkeit der Rakete nach 4 Sekunden. Wir können unsere Erfindung also ausbauen. Es bedarf nur eines Zählers für die Umläufe, und der Geschwindigkeitsmesser ist fertig. Diese Tätigkeit des Kreisels haben wir früher »Integration« genannt. Der so verwendete Kreisel heißt daher auch »Integrationskreisel«. Er ist ein Hauptbestandteil der jetzt so oft genannten »Trägheitsnavigation«.

In vielfältiger Beziehung steht die Hochfrequenztechnik zur Raketen-technik. Wenn man nicht gezwungen ist, die Steuerung der Rakete von bordfesten Einrichtungen vornehmen zu lassen, dann bietet die Funktechnik eine Reihe hervorragender Verfahren für die Fernlenkung.

Die Lage einer Rakete im Raum kann man mit Ortungsgeräten feststellen, die genauso arbeiten wie die Radarschirme, auf denen Flugzeuge festgestellt werden. Wie bei diesen kann man das Resultat der Fernmessung am Boden gewinnen, man kann aber auch – und das sind die sogenannten Leitstrahl-Verfahren – das



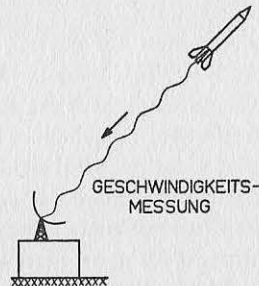
Ergebnis der Ortung an Bord der Rakete gleich selbst gewinnen und verarbeiten. Bei Raketen, die auf bewegliche Ziele gerichtet sind, werden im allgemeinen zwei solcher Ortungssysteme verwendet, eines für das Ziel und ein zweites für die Rakete selbst. In diesem Falle werden die beiden



Spiegel der Radaranlage dem Ziel und der Rakete wie Scheinwerfer nachgeführt (Grobpeilung), außerdem wird die Abweichung des Zieles oder der Rakete von der Mitte des Scheinwerferstrahles gemessen (Feinpeilung). Diese Messung ergibt zwei Winkel, die man, wie wir schon wissen, Azimut- und Höhenwinkel nennt.

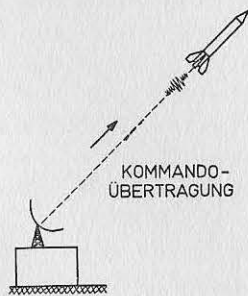
Da diese beiden Angaben für die Festlegung des Ortes noch nicht ausreichen, verwendet man außerdem noch ein Entfernungsmessverfahren. Bekanntlich breiten sich die elektromagnetischen Wellen, also Lichtwellen und auch Radiowellen, nicht mit unendlich großer Geschwindigkeit im Raume aus, sondern mit der – allerdings sehr hohen – Geschwindigkeit von 300000 km/s. Schickt man also von einer Bodenstation einen kurzen Impuls zur Rakete und fängt den von der Rakete reflektierten Impuls am Boden wieder auf, so kann man aus der Zeit, die der Impuls hin und zurück gebraucht hat, die Entfernung der Rakete errechnen.

Bei ballistischen Fernraketen, bei denen es besonders auf die Messung der Geschwindigkeit ankommt, verwendet man ein Verfahren, das nach dem Physiker Doppler »Doppler-Verfahren« heißt und auf das wir unten noch zurückkommen werden.



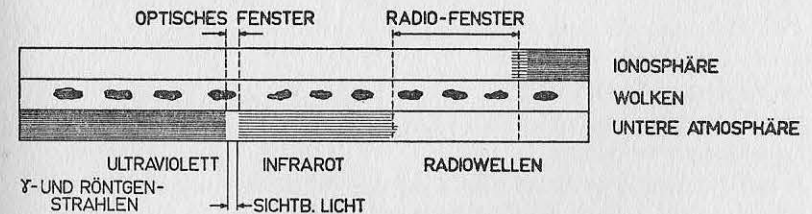
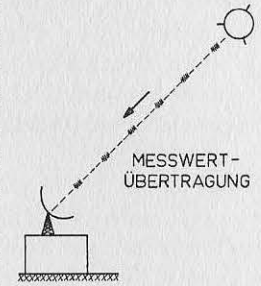
Werden die Ortsangaben der Rakete am Boden ausgewertet, so muß man ihr das Ergebnis als Kommando mitteilen, ihr also einen Befehl übermitteln, der ihre Steuerung beeinflusst und sie bei Abweichungen wieder auf die richtige Bahn zurückführt. Hierzu dient eine Kommandoübertragung mit einem Sender am Boden und einem Empfänger an Bord.

Sehr wichtig für Versuch und Forschung ist ein Verfahren, das gerade in umgekehrter Richtung arbeitet, nämlich die Meßwertübertragung.



Alle Meßwerte, die aus dem Inneren der Rakete stammen oder die die Rakete in der Außenwelt gemessen hat, wie Temperaturen, Drücke, Beschleunigungen und Winkelwerte, werden in elektrische Größen umgewandelt und dann einem Hochfrequenzsender aufmoduliert. Dieser Sender an Bord der Rakete sendet das gesamte Meßprogramm auf die Erde hinunter, wo es von einem Spezialempfänger empfangen und schließlich registriert wird. Dieselbe Bedeutung haben die sogenannten Piep-Piep-Töne der Satelliten. Auch hier werden die Meßwerte, die von den Satelliten in den hohen Schichten der Atmosphäre gemessen werden, auf die Erde heruntergeschickt.

Nicht alle Frequenzen eignen sich gleich gut für die Übertragung zwischen der Erde und Raketen oder Satelliten. Die Atmosphäre läßt nur einen Bruchteil der elektromagnetischen Strahlungen aus dem Weltraum oder in den Weltraum durch. Ein Gebiet ist diejenige Strahlung, die wir das sichtbare Licht nennen. Das zweite Gebiet liegt im Bereich der Radiowellen und erstreckt sich von etwa ein Zentimeter bis etwa ein Kilometer Wellenlänge. Allen übrigen Strahlungen der ausgedehnten Skala ist der Weg durch die Strahlenschranke unserer Atmosphäre versperrt.



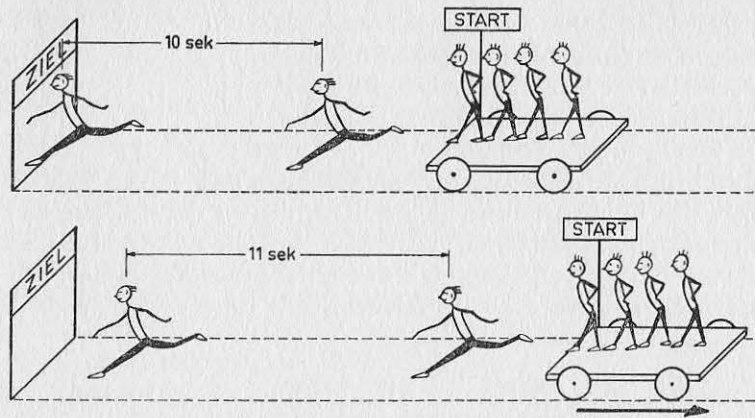
Wir sagten schon, daß für die Messung der Geschwindigkeit von Fernraketen der Doppler-Effekt ausgenutzt wird. Er spielt in der Astronomie und in der Physik bereits seit langem eine bedeutende Rolle. Seine technische Ausnutzung begann erst im Zeitalter der Raketen. Die Verfahren sind aber in den letzten Jahren auch für die Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten (Straßenkontrolle!) und natürlich für Flugzeuggeschwindigkeiten mit Erfolg verwandt worden.

Wir können uns das Wesen dieser Erscheinung an einem sehr einfachen Beispiel klarmachen. Auf der Aschenbahn eines Sportplatzes sei ein Gerüst aufgebaut, von dem die Läufer abspringen, ehe sie dem Ziel zulaufen. Außerdem haben sich die Läufer verabredet, daß genau alle

Die wissenschaftlichen Grundlagen

10 Sekunden einer das Gerüst verläßt und daß alle Läufer mit der gleichen Geschwindigkeit dem Ziel zueilen. Unter diesen Bedingungen wird auch alle 10 Sekunden ein Läufer das Ziel erreichen.

Nun nehmen wir an, das Gerüst sei auf Räder gesetzt, sei also ein flacher Wagen, und werde in der Zeit, in der die Läufer starten, entgegen der Laufrichtung weggefahren. Dies bedeutet, daß jeder Läufer eine größere Strecke zurückzulegen hat als sein Vorgänger. Aus diesem Grunde kommen die Läufer, obwohl sie alle 10 Sekunden gestartet sind, nicht mehr mit 10 Sekunden Abstand am Ziel an, sondern der Abstand



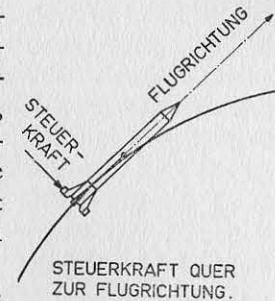
vergrößert sich. Die Vergrößerung ist um so stärker, je schneller der Wagen bewegt wird, und man kann aus ihr die Wagengeschwindigkeit errechnen.

Die Übertragung dieses Bildes auf die Raketentechnik ist leicht. Der Wagen ist die Rakete, das Ziel der Funkempfänger in der Startstelle. Die Läufer stellen Funkimpulse dar. Würde die Rakete im Raume ruhen, so würden die Impulse mit dem gleichen zeitlichen Abstand im Empfänger auf dem Erdboden eintreffen, mit dem sie die Rakete verlassen haben. Fliegt die Rakete davon, so ändert sich das Bild. Die Impulse haben im Empfänger einen größeren zeitlichen Abstand als bei der Aussendung. Aus dieser Abstandsvergrößerung kann man die Geschwindigkeit der Rakete ermitteln.

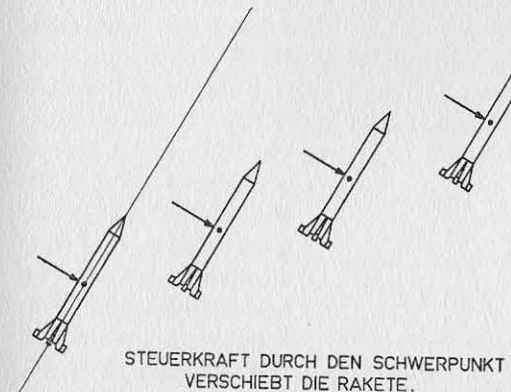
Die Messung der Abweichungen der Rakete von ihrer Sollbahn und aus ihrer Soll-Lage auf dieser Bahn sind Ausgangswerte für die Korrekturkommandos. Das Ziel des Kommandos sind die Steuerorgane. Wie wir später in unseren technischen Betrachtungen sehen werden,

Doppler-Effekt

können die Steuerorgane sehr verschieden ausgebildet sein. Manche gleichen den vom Flugzeug bekannten Lufrudern, andere sind entsprechende Ruder, die im Antriebsstrahl liegen, wieder andere sind als Miniatur-Triebwerke ausgebildet. Gemeinsam ist ihnen allen, daß sie an der Rakete eine Kraft hervorrufen, die nicht mit der Bahnrichtung, welche die Rakete im Augenblick hat, übereinstimmt.

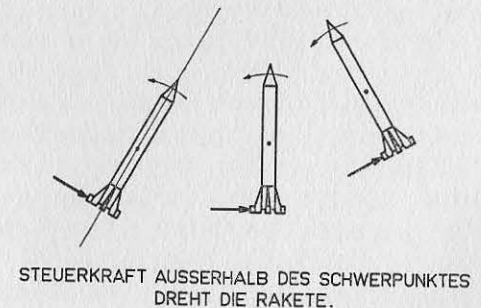


Wenn diese von einem Steuerorgan ausgeübte Kraft genau durch den Schwerpunkt einer Rakete ginge, so würde sie die Lage der Rakete um ihren Schwerpunkt unverändert lassen und nur ihre Bahn verändern, sie würde die Rakete allmählich von der ursprünglichen Bahn wegschieben und eine neue Bahn erzwingen. In den meisten Fällen zeigt die Kraft eines Steuerorgans aber am Schwerpunkt vorbei. Sie verursacht daher gerade so, wie wir es von der Luftkraft kennen, eine Drehung der Rakete. In fast allen wichtigen Fällen ist es diese Drehung, die die weitere Bahn der



Rakete bestimmt. Da die Rakete im luftgefüllten oder im luftleeren Raum, mit oder ohne Antrieb fliegen kann, ergeben sich eine Reihe von Fällen, in denen sich die Steuerorgane verschieden auswirken.

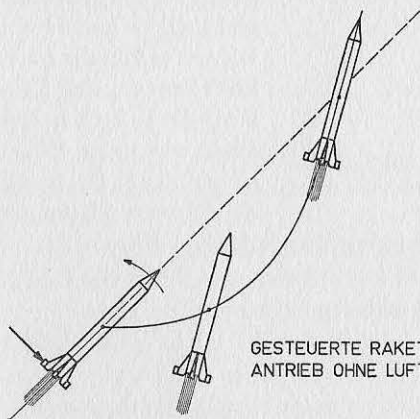
Wenn sich die Rakete als Raumfahrzeug im luftleeren Raum befindet, wenn außerdem der Brennschlußpunkt bereits überschritten ist und der Antrieb nicht mehr arbeitet, dann ist die Lage der Rakete um ihren Schwerpunkt wirklich gleichgültig. In diesem Falle wäre es



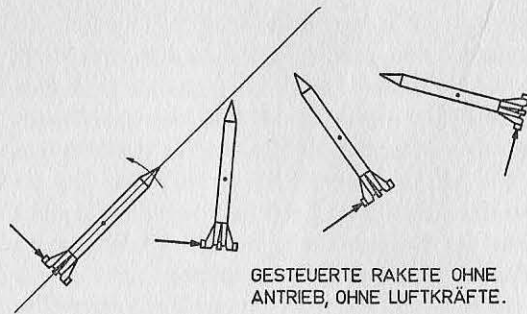
am zweckmäßigsten, wenn die Steuerkräfte wirklich durch den Schwerpunkt der Rakete gingen und dadurch eine Verschiebung der Bahn hervorriefen. Tun sie es nicht, dann erzeugen sie außer der Bahnveränderung noch eine

Drehung der Rakete, die im luftleeren Raum nicht gebremst wird. Die Rakete muß durch andere Mittel zur Ruhe gebracht werden, da sie sich sonst auf der ganzen Bahn um ihren Schwerpunkt drehen würde. Im übrigen aber hat diese Drehung keinen Einfluß auf die Bahn. Diese wird ausschließlich durch die seitliche Verschiebung verändert.

Ganz anders ist die Situation bei einer Rakete, die zwar den Luftkräften nicht unterworfen ist, sich also im freien Raum befindet, bei der aber das Triebwerk noch arbeitet. Die durch das Steuerorgan hervorgerufene Drehung der Rakete um ihren Schwerpunkt ändert gleichzeitig die Richtung des Antriebsstrahles, und da die Schubkraft um ein Vielfaches größer ist als die von den Steuerorganen ausgeübte Kraft, wirkt sie bahnbestimmend und läßt die Rakete gerade nach der entgegengesetzten Richtung von ihrer bisherigen Bahn abweichen. Während die Steuerkraft eine Bewegung nach rechts verursachen würde, erzeugt die durch die Drehung geänderte Richtung des Schubes eine Abweichung der Bahn nach links. Diese Betrachtung ist nicht nur für Raumfahrzeuge gültig, sondern auch für jede Rakete, die von der Erde startet, und zwar für den ersten Teil der Fahrt, auf dem die Luftkräfte noch nicht wirksam sind, weil die Geschwindigkeit der Rakete nicht ausreicht, und für den



GESTEUERTE RAKETE MIT ANTRIEB OHNE LUFTKRÄFTE.



GESTEUERTE RAKETE OHNE ANTRIEB, OHNE LUFTKRÄFTE.

letzten Teil der Bahn, bei dem die Rakete sich bereits in so dünner Luft bewegt, daß auch hier wieder die Luftkräfte nahezu unwirksam sind.

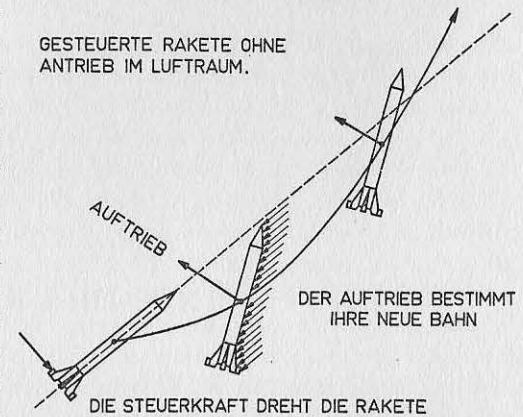
Interessanterweise liegt der Fall für einen fliegenden Körper, bei dem Luftkräfte wirksam sind, der aber nicht angetrieben wird, ganz ähnlich. Auch hier ist die von den Steuerorganen erzeugte Drehung wirksam. Die Drehung eines solchen Körpers ändert nämlich die Anströmrichtung, also den Anstellwinkel und damit den Auftrieb der Rakete. Die durch den Auftrieb hervorgerufenen Kräfte sind wesentlich größer als die eigentlichen Steuerungskräfte und bestimmen die Bahn. Man erkennt aus unserer kleinen Skizze, daß die Wirkung der Auftriebskräfte ganz ähnlich ist wie die Wirkung des Schubes.

Eine im Heck angebrachte Steuerkraft, die die Rakete eigentlich nach rechts drücken würde, bewirkt eine Drehung der Rakete. Der dadurch erzeugte Auftrieb läßt die Bahn nach links ausweichen.

Auf der Antriebsbahn von Raketen überlagern sich im allgemeinen die beiden zuletzt geschilderten Fälle, nämlich der Flug mit Antrieb und der Flug mit Luftkräften.

Da die Wirkung der Steuerorgane in beiden Fällen die gleiche ist, läßt sich das Zusammenspiel beider Kräfte ohne Schwierigkeiten abschätzen.

Unser Streifzug durch die Hilfswissenschaften der Raketentechnik hat uns vom Prinzip des Raketenantriebes über die ballistischen und aerodynamischen Vorgänge, über die Vorgänge bei der Verbrennung der Treibstoffe und über die Grundlagen der Steuergeräte wieder zur Bahn der Rakete zurückgeführt. Manches der sich aufdrängenden Probleme konnte nicht bis zu Ende durchgedacht werden, weil das entweder zuviel Raum beansprucht hätte oder ohne die dazu notwendige Mathematik nicht möglich gewesen wäre. Trotzdem glauben wir uns nun gerüstet genug, in die eigentliche Raketentechnik einzudringen. Alle die Prinzipien, die sich wie Fäden zu einem großen Netz zusammenflechten, tragen schließlich die Technik. Sie sind die Basis, von der aus die von Menschenhand geschaffenen Gebilde heute und in Zukunft in den Weltraum vorstoßen.

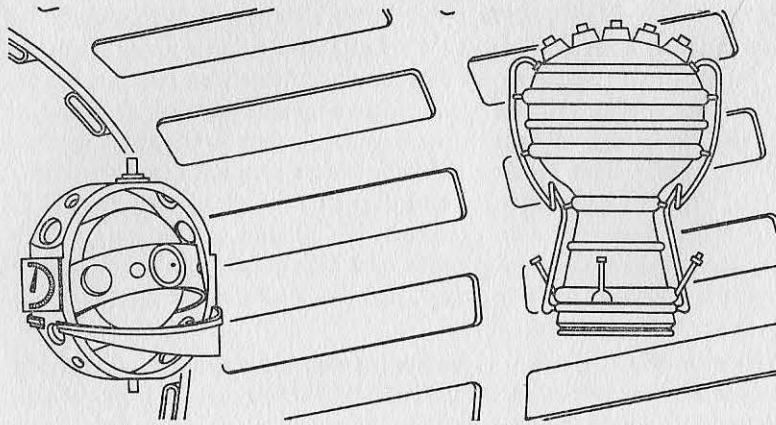


GESTEUERTE RAKETE OHNE ANTRIEB IM LUFTRAUM.

AUFTRIEB

DER AUFTRIEB BESTIMMT IHRE NEUE BAHN

DIE STEUERKRAFT DREHT DIE RAKETE



Kapitel 3

DIE TECHNIK DER RAKETEN

Die Technik lebt von der Wissenschaft, sie baut auf Naturgesetzen auf, die oft schon Jahrhunderte früher gefunden wurden, und ersinnt Möglichkeiten, diese zum Nutzen des Menschen anzuwenden. Welches die wissenschaftlichen, das heißt die physikalischen und chemischen Grundlagen sind, die das Fundament der Raketentechnik darstellen, haben wir jetzt in großen Zügen erfahren. Die Technik selbst, die Geräte und Maschinen, aus denen sich die Raketen aufbauen, sollen uns auf den nächsten Seiten beschäftigen.

Bei einer Analyse der Rakete kommen wir mit einer einfachen Aufzählung nach dem Schema »Eine Rakete zerfällt in ...« nicht voran. Ihr komplizierter Organismus benötigt Verknüpfungen und Verbindungen, denen man damit nicht immer gerecht wird. Würde man die großen Teile einer Rakete, also die Baugruppen, in der Reihenfolge betrachten, die sich bei einer Demontage ergibt, so würden häufig eng zusammengehörende Teile getrennt oder es blieben nicht zusammenwirkende Bauteile beieinander. Die wirkliche Analyse muß eine Rakete in ihre »funktionellen« Baugruppen zerlegen, das heißt in Baugruppen, von denen jede eine andere Hauptfunktion in der Rakete erfüllt. Wir werden sehen,

daß auch diese Aufteilung bei aller Sorgfalt der Überlegung nicht immer frei von Willkür sein kann, insbesondere wenn ein Bauteil mehrere Funktionen zugleich hat.

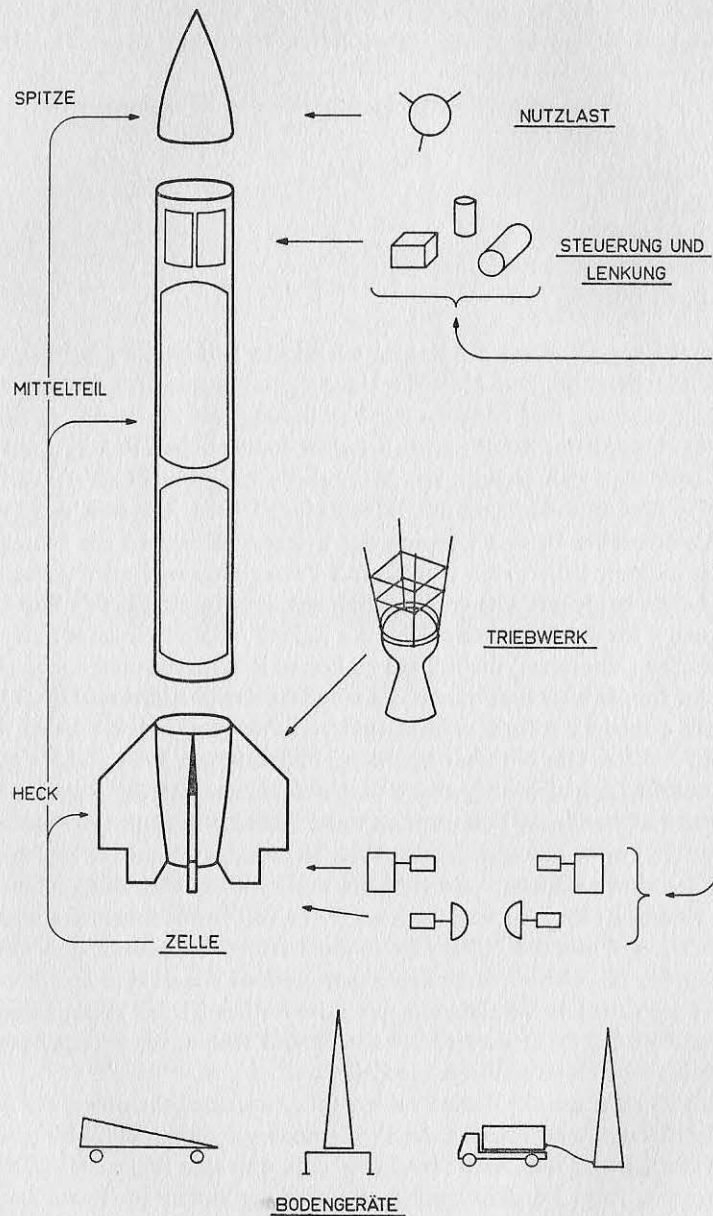
Die Aufteilung einer Rakete in funktionelle Baugruppen führt zu folgendem Schema:

1. Nutzlast,
2. Zelle,
3. Triebwerk,
4. Steuerung und Lenkung,
5. Bodengeräte.

Der für den Benutzer der Rakete wichtigste Teil ist die *Nutzlast*, die »zahlende Fracht«. Die Nutzlast einer Forschungsrakete besteht aus Meßinstrumenten und Sendern zur Verbindung mit der Erde, sie kann auch ein kompletter Satellit sein. Bei einer militärischen Rakete wäre es – so sehr man sich sträubt, das Wort dafür zu gebrauchen – der beförderte Sprengstoffkörper mit seinen eingebauten Zündern oder gar die Atombombe. In den Utopien der Science Fiction ist die Nutzlast in den meisten Fällen eine Kabine mit Passagieren und allem, was sie zum Leben brauchen. Oft ergeben sich aus der Nutzlast bestimmte Bedingungen für die Form oder Bahn der Rakete – so dürfen zum Beispiel Lebewesen (Menschen) nicht einer zu hohen Beschleunigung ausgesetzt werden. Immer aber bestimmen das Gewicht der Nutzlast und der Ort, den sie erreichen soll, den konstruktiven Aufbau und die Bahn der ganzen Rakete. Die Nutzlast legt den »Flugauftrag« einer Rakete fest.

Die *Zelle* ist gleichzeitig Haut und Knochengerüst der Rakete. Sie verbindet alle anderen Baugruppen untereinander und gibt der Rakete die äußere Form. Ihr wichtigster Abschnitt ist das Mittelteil, in dem – bei Flüssigkeitsraketen – die riesigen Treibstoffbehälter untergebracht sind. Häufig ist im Mittelteil auch noch ein Teil der Steuergeräte untergebracht. – Wenn die Nutzlast mit ihrer Außenhaut nicht eine Fortsetzung des Mittelteiles darstellen kann, muß sie durch eine Spitze verkleidet werden. Die Verkleidung des Triebwerkes ist das Heck, in dem oft der Rest der Steuergeräte, wie Ruder und Antennen, untergebracht ist. Spitze und Heck gehören zur Zelle.

Zum *Triebwerk* einer Rakete zählen außer der Brennkammer, die den Antrieb für die Rakete liefert, das Förderungssystem, mit dem die Treibstoffe in die Brennkammer gebracht werden, und eine Reihe zusätzlicher Armaturen. Zum Förderungssystem wären eigentlich auch die Treibstoffbehälter zu rechnen, die wir bei Flüssigkeitsraketen allerdings im



Zusammenhang mit der Zelle besprechen werden. Ganz eindeutig verhält es sich dagegen bei den Feststoffraketen. Hier werden die Treibstoffe nicht in die Brennkammer gefördert, sondern liegen von Anbeginn in dem zum Behälter erweiterten Kopf der Brennkammer.

Die Baugruppe *Steuerung und Lenkung* ist über den ganzen Raketenkörper verteilt. Ihre ortsunabhängigen Teile sind meist in einem Steuerungszentrum zusammengefaßt, die ausführenden Organe (Ruder und dergleichen) und die Funkantennen hingegen können, ihrer Funktion entsprechend, nur an bestimmten Orten der Rakete angebracht werden. Erfolgt die Lenkung der Rakete vom Boden über Funk oder andere Strahlungen, empfiehlt es sich, die zugehörigen Bodenanlagen mit den Bordgeräten zusammen zu besprechen, da sonst die Wirkungsweise der Anlagen nicht verständlich wird.

Zu einer Rakete gehören schließlich noch eine ganze Anzahl von (oft motorisierten) *Bodengeräten*, ohne die ein Start nicht denkbar ist. Die wichtigsten von ihnen dienen dazu, die Rakete zu transportieren, sie aufzurichten, sie zu betanken, sie vor dem Start zu prüfen und schließlich den Start der Rakete zu ermöglichen.

Die Zelle

Für die tragenden Gerüste von technischen Konstruktionen hält die Natur zwei verschiedene Vorbilder bereit. Das eine ist im Säugetier, also auch im Menschen verwirklicht: ein Skelett, um das herum der Organismus aufgebaut ist und das den Organismus stützt. Es besteht aus einzelnen Stäben, den Knochen, die in den Endpunkten fest oder beweglich miteinander verbunden sind. Nach dem Vorbild des Skelettes von einem Säugetier wird in der Technik das Gerüst einer Brücke oder eines Hauses aufgebaut. Auch diese Gerüste bestehen aus einzelnen Stäben, die in ihren Knotenpunkten verbunden sind.

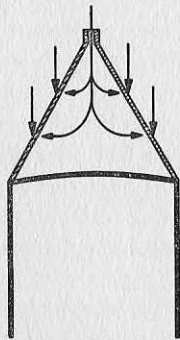
In Fällen, in denen die Natur auf Leichtbau Wert legt, bietet sie eine andere Form tragender Gerüste an. Am deutlichsten, und zwar als erstaunliche Höchstleistung, ist sie bei den Insekten ausgeprägt. So wiegen zum Beispiel dreißig ausgewachsene Ohrwürmer, die doch immerhin über einen Zentimeter lang sind, nur ein Gramm. Eine Libelle wiegt im ausgewachsenen Zustand ein fünftel Gramm. Die Insekten besitzen kein Skelett, sondern ihre Stabilität wird durch einen äußeren Panzer, durch eine Schale gewährleistet. Diese Form der Konstruktion haben der Flugzeugbauer und natürlich auch der Raketenkonstrukteur

übernommen. Das Ergebnis ist die Zelle eines Flugzeuges oder einer Rakete. Raketen enthalten also kein tragendes Gerüst, sondern ihre Festigkeit, ihre Steifigkeit wird durch die äußere Schale, die Zelle gewährleistet. Die Zellen der Raketen sind aus einzelnen, meist gebogenen Blechen zusammengenietet, geschweißt oder geklebt und tragen sich selbst. Ganz ähnlich wie bei den Insekten oder auch bei den Blättern eines Baumes werden die einzelnen Bleche durch Rippen verstärkt, die man je nach ihrer Richtung Spante oder Stringer nennt. Die Spante sind die ringförmigen, die Stringer dagegen die in Längsrichtung verlaufenden Rippen.

In vielen Fällen kann die Nutzlastspitze so ausgebildet werden, daß sie das Mittelteil der Zelle nach vorn organisch ergänzt. Das ist zum Beispiel mit geringen Ausnahmen bei den militärischen Nutzlastspitzen der Fall. Ist es aber nicht möglich, wie bei den amerikanischen Satelliten des Vanguard-Projektes, die bekanntlich eine kugelförmige Gestalt mit zwar umgeklappten, aber doch herausragenden Antennen haben, dann muß die Nutzlast durch eine Schutzspitze verkleidet werden. Diese Verkleidung soll die aerodynamische Form der Rakete für jenen Teil der Bahn vollständig machen, auf dem sie durch die Lufthülle stößt, damit dort keine allzu hohen Luftwiderstände auftreten; außerdem soll sie die Nutzlast selbst vor den Einflüssen des Luftdruckes auf diesem Bahn-

abschnitt schützen. Hat die Rakete die Lufthülle verlassen, können die Verkleidungen von der Nutzlast getrennt werden.

An den Spitzenverkleidungen treten – durch den Luftdruck – während des Fluges bedeutende Kräfte auf. Um ihnen zu begegnen, muß die Spitze kräftig ausgeführt werden, wird also nicht so leicht, wie es der Raketenkonstrukteur bei »nicht-zahlenden« Verkleidungsspitzen gern sähe. Hier gibt es einen einfachen Ausweg: Da die auf die Spitze wirkenden

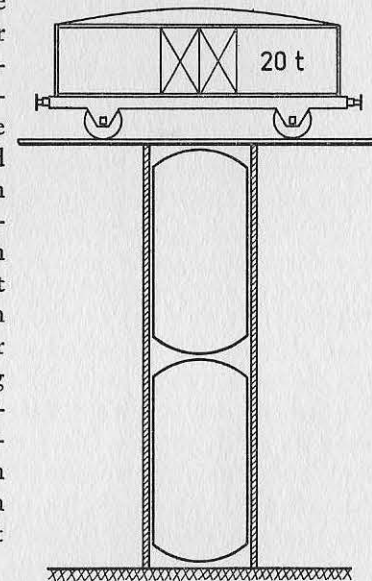


STABILISIERUNG EINER VERKLEIDUNGSSPITZE DURCH STAUDRUCK

Kräfte nur durch den äußeren Luftdruck verursacht werden, muß man dafür sorgen, daß dieser sich selbst kompensiert, das heißt, daß die Wirkungen, die er von außen auf die Verkleidung ausübt, durch ihn selbst von innen aufgehoben werden. Die Folgerung ist ganz einfach die, daß man diese Verkleidungsspitze ganz vorn mit einer kleinen Öffnung

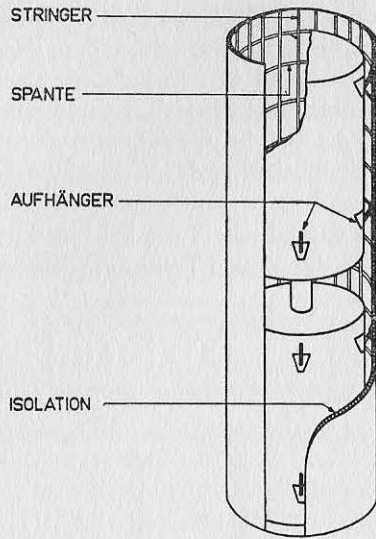
verseht und durch sie den Staudruck eintreten läßt. Dann bildet sich im Inneren der Verkleidung ein Druck aus, der, genau wie die äußere Beanspruchung, abhängig ist von Luftdichte und Geschwindigkeit der Rakete. Da der Druck im Inneren der Verkleidung aus aerodynamischen Gründen immer ein wenig größer ist als die Drücke, die auf der Außenseite der Verkleidung auftreten, ist die Stabilisierung der Verkleidungsspitze gesichert.

Der weitaus größte Teil der Zelle ist das Mittelteil, das bei Flüssigkeitsraketen, wie gesagt, die Aufgabe hat, die großen Treibstoffbehälter aufzunehmen: Weiterhin muß es die Kräfte, die das Triebwerk erzeugt, zur Nutzlastspitze durchleiten und schließlich den während des Fluges auftretenden Biegekräften standhalten. Die durchzuleitenden Schubkräfte sind außerordentlich hoch. Wir können uns durch ein einfaches Rechenexempel davon überzeugen. Nehmen wir eine ballistische Fernrakete mit einer Nutzlast von 2 Tonnen, die am Ende ihrer Antriebsbahn, kurz vor Brennschluß, eine Beschleunigung vom Zehnfachen der Erdbeschleunigung besitzt. Dann besitzt die Nutzlast ein scheinbares Gewicht von 20 Tonnen, die das Mittelteil aushalten muß. 20 Tonnen ist das Gewicht eines Güterwagens der Eisenbahn.



Bei den ballistischen Raketen treten während des Fluges nur relativ geringe Biegekräfte am Mittelteil auf, insbesondere in der Zeit der Umlenkung, und wenn starke böige Winde an der Rakete herumzerren. Anders ist es dagegen bei Raketen, die sich auf ihrer Bahn willkürlich steuern lassen, wie Flugabwehraketen. Sie sind mit Flügeln ausgerüstet, die sie befähigen sollen, enge Kurven zu fliegen, um Ausweichmanövern der Ziele zu folgen. Natürlich kommt es dabei zu sehr starken Beanspruchungen der Zelle. Da jedoch bei diesen Raketen die Forderung auf Leichtbau glücklicherweise nicht so streng ist, kann die Zelle stets kräftig genug gebaut werden.

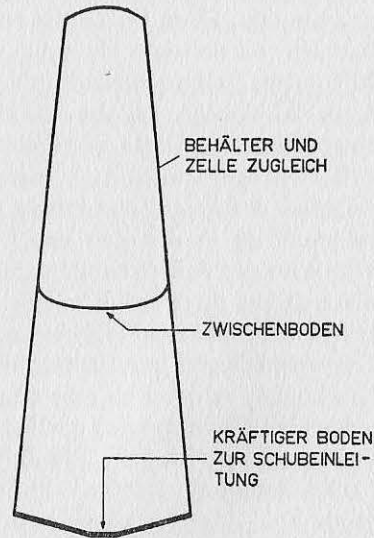
Die Stamm-Mutter der ballistischen Fernraketen, die V2, und eine große Zahl ihrer Nachfolgerinnen zeigen einen konstruktiven Aufbau



des Mittelteiles, der für seine beiden Aufgaben, die Aufnahme der Treibstoffe und die Durchleitung der Kräfte, zwei verschiedene Konstruktionselemente aufweist. Die eigentliche Zelle ist ein zylindrischer oder nahezu zylindrischer, oben und unten offener Körper, der in Flugzeugbauweise aus Blechen, Rippen und Spanten zusammengesetzt ist. Genau wie bei der Flugzeugzelle sind hier und da mit Türen verschlossene Aussparungen vorgesehen; durch sie sind die im Inneren des Mittelteiles eingebauten Armaturen und elektrischen Verbindungen zugänglich. Die Treibstoffbehälter selbst sind meist aus Leichtmetall gefertigt und

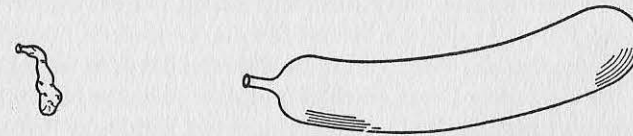
an mehreren Punkten mit Aufhängern in der Zelle befestigt. Bei einigen Raketentypen wird der Behälter für den flüssigen Sauerstoff noch mit einer Wärmeisolierung umgeben, die zwischen der Behälterwand und der Zelleninnenwand liegt, damit die Verdampfungsverluste während des Stehens der betankten Rakete nicht zu groß werden. Diese von der V2 übernommene Konstruktion hat sich gut bewährt. Sie hat aber den Nachteil, ein hohes Konstruktionsgewicht notwendig zu machen, so daß besonders leichte Raketen mit ihr nicht zu erzielen sind.

Ein geringeres Gewicht des Mittelteiles ergibt sich, wenn man seine beiden Aufgaben von ein und demselben Konstruktionselement erfüllen läßt, also auf die Trennung von Zelle und Behälter verzichtet. Damit wird eine doppelte Ausführung der großen zylindrischen Wände vermieden und natürlich erhebliches Gewicht erspart. Eine



weitere Gewichtsersparnis wird dadurch erzielt, daß die konstruktiven Verstärkungen der Zelle und der Behälter fortfallen, die notwendig sind, wenn der Schubkraftanteil, der während der Antriebsbahn auf die transportierten Flüssigkeiten übertragen werden muß, bei getrennten Behältern über die Aufhängung zu leiten ist. Stellt die Zelle selbst gleichzeitig den Behälter dar, so sind sie nicht mehr erforderlich und »fallen nicht ins Gewicht«. Wenn die Außenwand der Behälter gleichzeitig Außenwand der Rakete ist, ist es natürlich nahezu unmöglich, unterkühlte Gase wie flüssigen Sauerstoff noch gegen den Einmarsch der Wärme von außen zu isolieren. Hierdurch ergibt sich während der Startvorbereitung ein Sauerstoffverlust durch Verdampfen, der kurz vor dem Start von der Bodenstation gedeckt werden muß. Die während der Antriebsbahn auftretende Verdampfung führt nicht zu Verlusten.

Noch einen Schritt weiter geht das Prinzip der halbstarren Bauweise, das bereits aus der Zeit der ersten Zeppeline bekannt ist. Wir können es uns an einem einfachen Beispiel veranschaulichen. Nehmen wir einen länglichen, wurstförmigen Kinderluftballon, so zeigt dieser vor dem Aufblasen gar keine Stabilität. Man kann ihn biegen und zusammendrücken, ohne daß er diesen Kräften Widerstand leistet. Anders dagegen



WURSTBALLON WIRD DURCH AUFBLASEN STABIL.

nach dem Aufblasen. Da benimmt er sich wie ein starrer Körper, es ist sehr schwer, ihn zusammendrücken, und es ist ebenso sehr schwer, ihn zu biegen. Dann nämlich ruft der innere Überdruck des Luftballons in den Außenwänden starke Zugspannungen hervor, und äußere Kräfte werden erst wirksam, wenn sie als Druckspannungen größer sind als die bereits vorhandenen Zugspannungen.

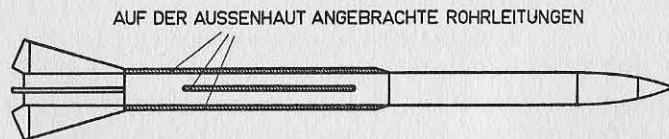
Überträgt man dieses Prinzip auf ein Raketenmittelteil, so ergibt sich, daß beide Treibstoffbehälter, die ja in diesem Fall gleichzeitig das Mittelteil darstellen, mit Überdruck zu füllen und dadurch zu stabilisieren sind. Die in den Wandungen bei der Schubdurchleitung auftretenden Druckspannungen, die den Behälter zusammendrücken versuchen, werden aufgewogen und überkompensiert durch die Zugspannungen,

die der innere Überdruck erzeugt. Stünde ein solcher Behälter nur unter dem Einfluß von Druckspannungen, so würde er längst vor Erreichen der Festigkeitsgrenze des Materials beulen oder knicken. Durch die Kompensation mit Zugspannungen wird die Festigkeitsgrenze wirklich ganz ausgenutzt. Die Anwendung dieses Prinzips trägt also erheblich zur Gewichtserleichterung des Mittelteiles einer Rakete bei.

Der Mehraufwand an Rohrleitungen und Armaturen ist nicht erheblich. Selbst wenn man das Prinzip nicht anwendete, müßte man die während der Antriebsbahn verbrauchten Treibstoffmengen in den Behältern laufend durch ein Gas ersetzen. Man müßte, wie der Fachmann sagt, die Behälter »begasen«. Eine nicht sehr umfangreiche Verbesserung dieser Begasungseinrichtungen erlaubt es, in den Behältern den Druck zu erzeugen, der ihre Stabilität hervorruft.

Auch für die Stabilisierung mit innerem Überdruck könnte die Natur Pate gestanden haben. Wir alle wundern uns, wie die Grashalme bei ihrem kleinen Querschnitt und ihrer großen Höhe den Kräften des Windes standhalten können, und wie sie sich immer wieder aufrichten. Hier hat die Natur eine Druckstabilisierung geschaffen; sie arbeitet mit Flüssigkeitsdrücken, die weit über dem liegen, was wir in der Raketen-technik anwenden.

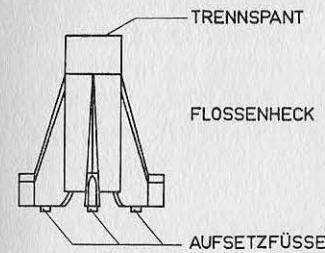
In nahezu allen Raketen mit Flüssigkeitsantrieb hat das Mittelteil eine zylindrische Form, in der die beiden für die Treibstoffe notwendigen Behälter hintereinander aufgereiht sind. Während bei den ersten Raketen peinlich auf die äußere Form geachtet und dabei manche Komplikation im Inneren des Mittelteiles in Kauf genommen wurde, geht man jetzt mehr und mehr dazu über, Rohrleitungen, Armaturen und sonstige im Inneren störende Bauteile einfach auf die Außenhaut zu verlegen. Man kann dies tun, nachdem man erkannt hat, daß die aerodynamische Form der Rakete keine so entscheidende Rolle spielt, insbesondere nicht bei Raketen, deren Bahn in der Hauptsache im luftleeren Raum verläuft.



Unter den Leitungen, die so auf der Außenhaut der Rakete aufgebaut werden, befinden sich die beiden Begasungsleitungen für die beiden Treibstoffbehälter, die elektrischen Leitungen, die von einer vorn im

Mittelteil untergebrachten Steuerungszentrale zum Heck führen, und andere pneumatische oder elektrische Verbindungen.

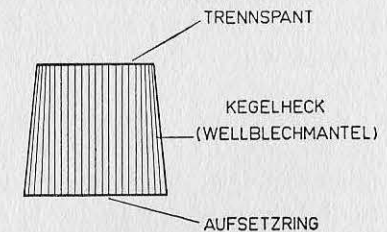
Das dritte Bauteil der Zelle, das Heck, trug in seiner früheren Form wesentlich zu der imposanten Erscheinung der großen Raketen bei. Bei



modernen Raketen ist das eigentliche Heck verschwunden und nur noch eine unscheinbare zylindrische oder kegelförmige Schürze zu sehen, die das Triebwerk notdürftig abdeckt. Auch hier zeichnet sich wieder ein Wandel in der Auffassung von der Notwendigkeit aerodynamischer Formen ab.

Das Heck einer Rakete hat zwei Aufgaben. Es dient zur Unterstützung der Rakete beim Aufstellen, sofern sie, wie die meisten größeren Raketen, freistehend gestartet wird. Außerdem ergänzt es die aerodynamische Form der Zelle nach hinten. Bei allen Raketentypen, die ihren Weg im wesentlichen, wie die Flugabwehrraketen, im Luftraum vornehmen müssen, ist das Heck daher auch heute noch in seiner ursprünglichen Form als Flossenheck zu finden. Bei

vielen Fernraketen sind mit ihm nicht nur die Flossen, sondern auch die Luftruder gefallen, die bei Flugabwehrraketen natürlich benötigt werden und daher besonders groß und auffallend ausgebildet sind. Den Typus der heute mehr und mehr verwendeten einfachen Form des flossenlosen Hecks zeigt die Kegelrakete R14. Ihr Heck ist ein oben und unten offener kegelliger Körper, ganz aus Wellblech gefertigt, um während des Aufstellens der Rakete eine höhere Steifigkeit zu erreichen. Ähnliche Heckformen finden sich bei den amerikanischen Raketen Vanguard, Atlas und Thor.



Das Triebwerk

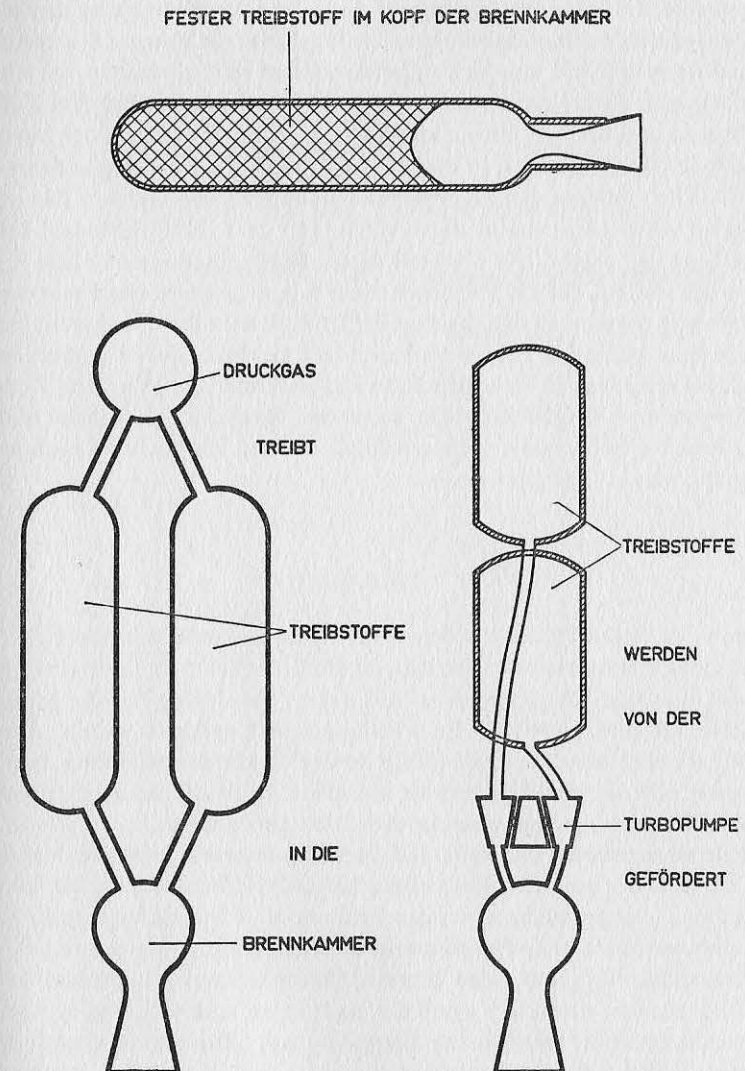
Die Hauptaufgabe des Triebwerkes ist es, der Rakete die für den Flug notwendige Beschleunigung zu erteilen. Wir sagen Hauptaufgabe, weil man gerade in modernen Konstruktionen den Triebwerken auch noch andere Aufgaben, insbesondere die Steuerung der Rakete, übertragen hat.

Uns erscheint es heute ganz selbstverständlich, daß die Triebwerke am hinteren Ende der Rakete, im Heck, angebracht sind. Das ist auch ihre natürliche Lage, denn der Strahl soll nicht auf andere Teile der Rakete treffen und sie beschädigen. Trotzdem hat es in der Pionierzeit der Raketentechnik Flugkörper gegeben, bei denen das Triebwerk in der Spitze angebracht wurde, die Rakete also hinter sich herzog. Der Grund für diese uns heute seltsam anmutende Konstruktionsform lag in der mangelnden Stabilität der damaligen Raketen im Fluge. Weder hatten sie eine eingebaute Steuerung, noch waren sie drallstabilisiert. Mit einem vor die Rakete gespannten, ziehenden Triebwerk war das Taumeln und Umschlagen ausgeschlossen.

In der Mannigfaltigkeit der Triebwerke lassen sich mühelos zwei große Klassen erkennen, die deutlich voneinander abgegrenzt sind: Triebwerke mit festen Treibstoffen, also Feststoff- oder Pulvertriebwerke, und Triebwerke mit flüssigen Treibstoffen.

Trotz mancher kühner Vorschläge hat man in der Praxis eine Förderung fester Treibstoffe in die Brennkammer bisher noch nicht versucht. Bei allen bekannten Feststofftriebwerken ist der Kopf der Brennkammer gewaltig aufgebläht und nimmt den gesamten Treibstoff auf, womit alle Förderungsprobleme entfallen. Das macht die Feststoffraketen so anziehend. Wir werden auf die zur Zeit wieder steigende Bedeutung dieses Typs später zurückkommen.

Bei den Flüssigkeitstriebwerken dient der Brennkammerkopf nur der Aufbereitung und Verbrennung der Treibstoffe. Beide, Brennstoff und Sauerstoffträger, sind in zwei von der Brennkammer getrennten Treibstoffbehältern untergebracht. Je nach der Art, wie der Treibstoff aus ihnen in die Brennkammer gefördert wird, lassen sich die Flüssigkeitstriebwerke in zwei deutlich unterschiedene Varianten einteilen. Bei kleineren Raketen wird meist die Druckförderung angewendet. Beide Treibstoffbehälter sind mit einem Druckgaserzeuger oder -behälter verbunden, der während des Brennvorganges das Druckgas liefert, das die Treibstoffe aus ihren Behältern in die Brennkammer drückt. Der Vorteil einer solchen Anlage besteht in dem geringen Aufwand an Ventilen und Armaturen, in dem einfachen und störungsunempfindlichen Aufbau. Der Nachteil liegt darin, daß sowohl der Druckgaserzeuger oder -behälter als auch vor allen Dingen die beiden Treibstoffbehälter stark genug sein müssen, um dem inneren Überdruck standzuhalten. Dieser innere Überdruck muß ja größer sein als der Brennkammerdruck, sonst würden die Treibstoffe nicht in die Brennkammer fließen. Trotz aller Erfolge der modernen Materialtechnik werden solche Behälter so



Die Technik der Raketen

schwer, daß man diese Art der Förderung für größere Raketen aus Gewichtsgründen nicht gern verwendet.

Raketen für große Reichweiten haben meist die Turbopumpenförderung. Die Treibstoffe befinden sich unter geringem Druck in den Behältern, die daher dünnwandig und leicht gebaut sein können. Sie werden von dort zwei Kreispumpen zugeführt. Diese Kreispumpen, die auch sonst in der Technik verwendet werden, saugen den Treibstoff aus den Behältern und bringen ihn auf einen Druck, der größer ist als der Innendruck der Brennkammer, in die die Austrittsstutzen der Pumpen führen.

Natürlich müssen diese Kreispumpen angetrieben werden. Für den Antrieb verwendet man im allgemeinen Gas- oder Dampfturbinen. Und hier liegt der eigentliche Nachteil dieses Förderungssystems. Das Gas oder der Dampf, der die Turbine treiben soll, muß gespeichert sein oder hergestellt werden. In den meisten Fällen stellt man ihn auf chemischem Wege her, wofür im Triebwerk besondere Gasgeneratoren vorgesehen sind. Sie erfordern einen hohen Aufwand an Armaturen, Ventilen, Rohrleitungen und dergleichen, der zwar das Gewicht der Rakete nicht wesentlich erhöht, aber doch erheblich zu den Kosten und auch zur Unsicherheit im Betrieb beiträgt.

Die Brennkammer

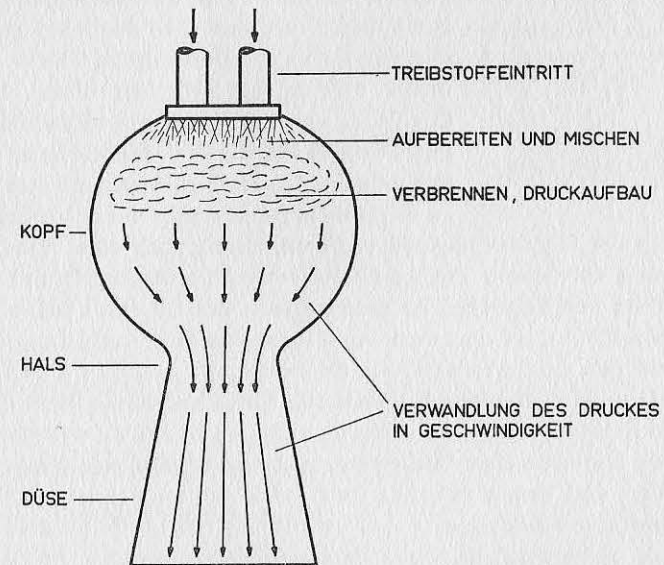
Von den vielen Teilen, aus denen ein Flüssigkeitstriebwerk im Gegensatz zum Feststofftriebwerk besteht, ist die Brennkammer der wichtigste. In der Pionierzeit der Raketentechnik war sie der einzige Teil der ganzen Rakete, an dem ernsthafte Entwicklungsarbeit geleistet wurde. Auch heute ist ihre zentrale Bedeutung in der Raketenentwicklung unbestritten, obwohl die Arbeiten an ihr nicht mehr alle anderen für die Rakete notwendigen Arbeiten in den Schatten stellen.

Die wichtigsten Aufgaben der Brennkammer sind in der kleinen Skizze deutlich gemacht. Die beiden Treibstoffkomponenten, die in sie eintreten, müssen aufbereitet, das heißt in eine feinere Verteilung gebracht werden als sie sie beim Eintritt besitzen. Gleichzeitig müssen diese feinverteilten Tröpfchen der Treibstoffkomponenten miteinander vermischt werden, damit sie dann um so leichter und vollständiger verbrennen können. Der Verbrennungsvorgang, also die Reaktion der beiden Treibstoffkomponenten miteinander, erfüllt fast den gesamten Kopf der Brennkammer. Die freiwerdende chemische Energie erzeugt die für den Druckaufbau notwendigen hohen Temperaturen. Im Hals

Arbeitsweise der Brennkammer

der Brennkammer und in der Düse wird die Druckenergie in Energie der Bewegung umgewandelt, so daß der Strahl der immer noch heißen Verbrennungsprodukte die Brennkammer schließlich mit hoher Geschwindigkeit verläßt.

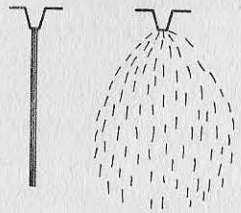
Zu der Erzeugung des Rückstoßes aus chemischer Energie kommt noch eine andere, unvermeidliche Aufgabe hinzu. Die Temperatur, die während der chemischen Reaktion entsteht oder durch Reibung des



strömenden Gases an den Wänden der Brennkammer erzeugt wird, muß durch geeignete Kühlmethoden so niedrig gehalten werden, daß die Brennkammer für die Zeit des Verbrennungsvorganges ihre Funktion aufrechterhalten kann. Tatsächlich bildet die Ausarbeitung eines ausreichenden Kühlsystems den Hauptanteil der Schwierigkeiten, die bei der Entwicklung von Brennkammern überhaupt entstehen.

In der modernen Raketenentwicklung hat die Brennkammer darüber hinaus noch weitere Aufgaben übernommen. In einigen Fällen übernimmt sie die Steuerung der Raketen in zwei Ebenen. Auch ihre Verwendung als Gaserzeuger ist in manchen modernen Triebwerken vorgesehen; das im Kopf der Brennkammer entstehende, heiße hochgespannte Gas läßt sich nach entsprechender Kühlung zum Antrieb der Turbopumpe verwenden.

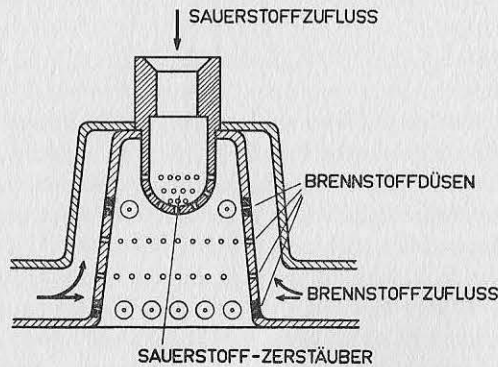
Die Treibstoffe werden dem Verbrennungsraum durch die Einspritzsysteme zugeführt. Für ganz kleine Raketenbrennkammern, wie sie im Laboratorium oder von Bastlern verwendet werden, genügt ein System, das für jede der beiden Treibstoffkomponenten eine Einspritzdüse vorsieht. Solche Düsen kennen wir als Mundstücke des Gartenschlauches.



STRAHL-DÜSE ZERSTÄUBUNG-DÜSE

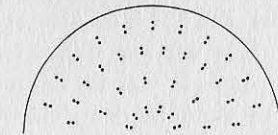
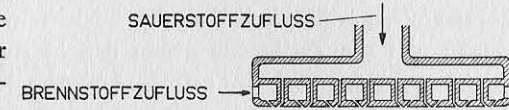
Sie können sehr verschiedene Wirkungen auf die durchströmenden Flüssigkeiten haben, können den Strahl glatt durchlassen, ihn sogar zusammenfassen, ihn aber auch bei entsprechender Form der Bohrung zu einem feinen Nebel zerstäuben. Zwischen diesen beiden Grenzfällen gibt es eine ganze Skala von Ausfluß-Formen. Für die Verbrennung ist es natürlich günstig, den Treibstoffstrahl möglichst fein zu zerstäuben. Andererseits soll er hierbei nicht seine ganze Geschwindigkeit verlieren, damit auch eine vernünftige Mischung der beiden Treibstoffe zustande kommt. Auf Grund vieler Tausender von Versuchen ist man heute in der Lage, für jeden Treibstoff eine Düse mit beliebigem, vorgeschriebenem Zerstäubungsgrad zu konstruieren.

Im Grunde genommen bestehen alle Einspritzsysteme, auch die der großen Raketen, aus solchen einzelnen Düsen. In der V2 war eine Vielzahl von Düsen zu einer Vorkammer zusammengefaßt, einem sogenannten Topf, von denen es im Kopf der V2-Brennkammer achtzehn gab. In diesen Vorkammern kam es zu einer ersten intensiven Mischung und teilweisen Verbrennung der beiden Treibstoffe. Das teilweise verbrannte Gemisch wurde aus den Vorkammern in den eigentlichen Verbrennungsraum gestoßen, wo dann die restliche Verbrennung stattfand. Die Vorkammern sollten sicherstellen, daß die beiden Treibstoffe sich wirklich einwandfrei mischten und nicht etwa einzelne Strahlen im Kopf der großen Brennkammer aneinander vorbeiglichen, ohne daß es zur Vermischung und Verbrennung



kam. Die Zahl der Düsenanordnungen ist Legion. Derartige Einspritzsysteme können nicht nur nach den physikalischen Gegebenheiten entworfen werden, sie sind auch sehr stark von fertigungstechnischen Gesichtspunkten beeinflusst.

Eine andere weitverbreitete Form, die »Mischdüse«, zeigt unsere kleine Skizze. In diesem Fall hat man auf die Vorkammern verzichtet. Sämtliche Einspritzdüsen sind in einer ebenen Platte untergebracht, und zwar so, daß immer eine Treibstoff- und eine Sauerstoffdüse sich gegenüberstehen, damit sich die beiden Strahlen intensiv mischen.



Die Brennkammer ist aus einer Reihe von Gründen einer der schwersten Teile der Rakete. Deshalb ist man natürlich bestrebt, sie so klein wie möglich zu machen. Doch gibt es Grenzen für diese Verkleinerung. Betrachten wir zunächst den Kopf der Brennkammer. In ihm müssen die Aufbereitung, die Mischung und der Brennvorgang stattfinden, und der Brennvorgang soll möglichst vollständig ablaufen, das heißt, möglichst alle in den Treibstoffen steckende Energie soll in Druckenergie umgewandelt werden.

Nun kann man für jede Brennkammer abschätzen, wie lange die Treibstoffe in ihr verweilen. Die »Verweilzeit« ergibt sich aus folgender Überlegung: Der Kopf einer Brennkammer faßt eine gewisse Menge heißen Gases, die von seinem Volumen und dem Druck abhängt. Andererseits durchfließt die Brennkammer, festgelegt durch die Menge der eintretenden Treibstoffe (oder auch den austretenden Gasstrahl), jede Sekunde eine bestimmte Menge Treibstoffgemisch. Diese Zahl nennt man »Durchsatz«. Da die Aufnahmefähigkeit des Brennkammerkopfes bekannt ist, kann man aus dem Durchsatz errechnen, wie lange ein Treibstoffteilchen in ihm verweilt. Diese Verweilzeit ist unter anderem ein Maß dafür, wie weit der Verbrennungsvorgang und der Druckaufbau, also die Ausnutzung der in den Treibstoffen steckenden chemischen Energie geht. Für jedes Treibstoffsystem und für jeden Druck lassen sich durch experimentelle Untersuchungen die mindest-notwendigen Verweilzeiten bestimmen und mit ihnen die mindest-notwendige Größe des Brennkammerkopfes festlegen.

Entscheidend für die Konstruktion der Brennkammer ist die Wahl des Brennkammerdruckes, des Druckes also, der sich im Kopf aufbaut. Ein hoher Druck erhöht auch die Austrittsgeschwindigkeit des Antriebsstrahles, verbessert also die Leistung der Brennkammer und erlaubt außerdem, sie kleiner zu bauen. Andererseits steigt mit dem Druck zugleich die Temperatur des Gases, und die bereits durch hohen Druck stark beanspruchten Brennkammer-Innenwände werden von einem erhöhten Wärmeeinmarsch bedroht. Gleichzeitig wird von dem Förder-system, das die Treibstoffe gegen den höheren Druck in die Brennkammer pumpen muß, eine größere Leistung verlangt. Die ersten großen Raketen hatten Brennkammerdrucke zwischen 10 und 20 Atmosphären. Die unter den heutigen Verhältnissen vernünftige obere Grenze dürfte bei etwa 50 bis 60 Atmosphären liegen.

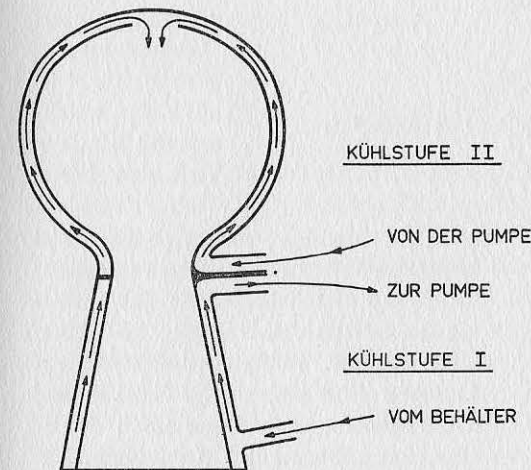
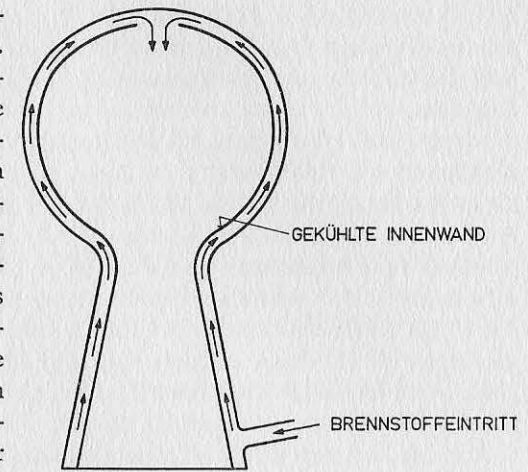
Wie wir aus unseren früheren Betrachtungen wissen, erreicht das strömende Gas im engsten Querschnitt gerade Schallgeschwindigkeit, um dann in der sich weitenden Düse immer höhere Überschallgeschwindigkeiten zu erreichen. Die Grenze ist gegeben, wenn der Druck des Gases den Außendruck erreicht. Da dieser beim Aufstieg einer Rakete stetig abnimmt – von einer Atmosphäre am Erdboden bis auf Null –, kann man die Düse verschiedenen Außendrucken anpassen. Bei Fernraketen entscheidet man sich für einen niedrigeren als den Atmosphärendruck, z. B. für vier Fünftel von diesem. Gewählt wird nicht immer der mathematisch errechenbare Druck für die beste Anpassung an den Druckverlauf während des Aufstiegs. Man zieht es oft vor, eine zu kurze Düsenlänge zu wählen, weil nämlich das Optimum, das man durch eine Verlängerung der Düse erreichen würde, wieder durch das wesentlich erhöhte Gewicht der ganzen Brennkammer zunichte gemacht wird.

Die beim Verbrennungsvorgang entstehende Wärme wird zu einem kleinen Bruchteil an die Wandungen der Brennkammer abgegeben. Dieser Teil reicht immerhin schon aus, sie in Sekundenschnelle zum Schmelzen, ja Verdampfen zu bringen, falls man nicht energische Kühlungsmaßnahmen trifft. Die wichtigste Kühlmethode besteht darin, daß man auf der Außenseite des Bleches, das den Innenmantel darstellt, in der den Gasen entgegengesetzten Richtung eine Flüssigkeit vorbeiströmen läßt, welche die durch das Blech hindurchwandernde Wärme aufnimmt. Im Laboratorium und auf dem Prüfstand verwendet man hierzu häufig eine Fremdflüssigkeit, in der fliegenden Rakete dagegen meist einen der beiden Treibstoffe, im allgemeinen den Brennstoff. Die Wärme, die der Brennstoff bei dem Kühlvorgang aufnimmt, kommt letzten Endes sogar dem Verbrennungsvorgang wieder zugute, geht

also in der Gesamtenergiebilanz nicht verloren. Um eine intensive Kühlung zu erzielen, müßte die Innenhaut der Brennkammer möglichst dünn sein, damit sie dem Wärmedurchgang einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzt. Das aber stößt auf Schwierigkeiten, denn die gleiche Innenhaut muß den Druck in der Brennkammer aufnehmen. Dieser Druck beginnt mit dem

hohen, durch die Verbrennung erzeugten Wert im Brennkammerkopf und verringert sich zum Düsenende hin bis auf etwas unter eine Atmosphäre. Der Treibstoff, der letzten Endes in die Brennkammer einströmen soll, muß aber einen Druck besitzen, der größer ist als der Innendruck. Bei den meisten Ausführungen herrscht daher im Brennkammerkopf fast ein Gleichgewicht zwischen dem Innendruck im Brennraum und dem Druck im Kühlmantel. In der Düse dagegen ist der Kühlmanteldruck größer als der Gasdruck und versucht den Innenmantel einzubeulen.

Daher ist manchmal ein geteiltes Kühlsystem zweckmäßig, bei dem mit Brennstoff verschiedenen Druckes gearbeitet wird. In solchen Systemen wird der untere Düsenrand mit direkt aus dem Behälter kommendem Treibstoff, der Kopf der Brennkammer, wie vorher, mit dem aus der Pumpe gelieferten Brennstoff gekühlt. So ist es möglich, den Druck des Kühlmittels



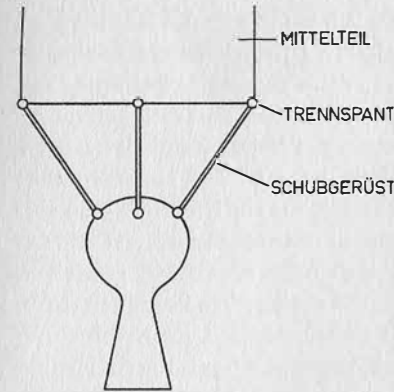
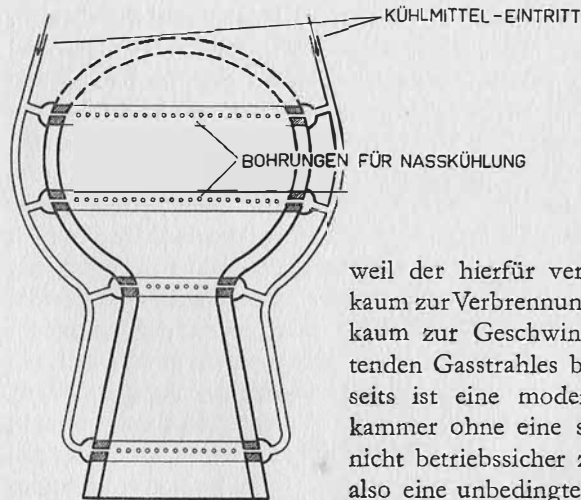
überall ungefähr dem Innendruck der Brennkammer anzupassen und somit auf geringe Wandstärken der Innenhaut zu kommen, was natürlich eine Verbesserung des Wärmedurchganges durch die Innenhaut zur Folge hat.

Neben den hier geschilderten »Radial«-Verfahren, bei denen das Kühlmittel den Kühlmantel »von unten nach oben« längs der Mantellinien der Brennkammer durchläuft, hat sich in einigen Fällen die Kühlung in Schraubenlinien eingebürgert, bei der das Kühlmittel in Serpentin zum Brennkammerkopf aufsteigt. Die letzte Konsequenz aus diesem Verfahren zieht eine Konstruktion, bei der die Brennkammer aus einem schraubenförmig gewickelten Rohr besteht. Diese Bauweise verbessert die Kühlung, verlangt aber ein höheres Gewicht als ein ausgeklügeltes Radialkühlverfahren. Es scheint vor allem für kleine Hochdruckbrennkammern zweckmäßig zu sein.

Alle Maßnahmen dieser »Trockenkühlung« vermögen eine Brennkammer nicht ausreichend zu kühlen. Zumal in ihrem engsten Querschnitt würde ihre Innenwand den entstehenden Temperaturen nicht standhalten. Daher sieht man sich gezwungen, daneben noch eine Naßkühlung vorzusehen, die einfach darin besteht, daß in den Brennraum geringe Mengen von Treibstoff eingespritzt werden, die an der eigentlichen chemischen Umsetzung kaum oder gar nicht teilnehmen, sondern sich nach ihrer Verdampfung als dünner Film längs der Innenwandung der Brennkammer ausbreiten. Dort schirmen sie, mitgerissen von der

Strömung, die Innenwand gegen die eigentlichen Verbrennungsgase ab. Die Naßkühlung bedeutet natürlich einen Verlust an chemischer Energie,

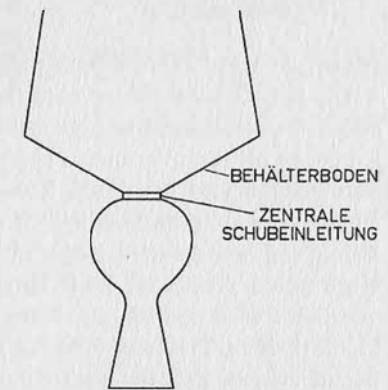
weil der hierfür verwendete Treibstoff kaum zur Verbrennung kommt und daher kaum zur Geschwindigkeit des austretenden Gasstrahles beisteuert. Andererseits ist eine moderne Raketenbrennkammer ohne eine solche Naßkühlung nicht betriebssicher zu gestalten. Sie ist also eine unbedingte Notwendigkeit.



Die in der Brennkammer entstehende Schubkraft liegt als Druck auf der Innenwandung, wird vom Kühlmittel aufgenommen und von ihm auf die Außenhaut der Brennkammer übertragen. Von dieser muß sie an die Zelle weitergegeben werden. Die Weiterleitung übernimmt in vielen Fällen ein »Schubgerüst«, mit dem die Brennkammer an der Zelle befestigt ist. Als Befestigungspunkte bieten sich an: an der Verbrennungskammer der innere Rand des Kopfes,

an der Zelle der zwischen Mittelteil und Heck liegende Trenns pant.

Leitet man die Schubkraft an einigen Stellen – drei, vier oder sechs Punkten – in die Zelle, so ergibt sich eine ungleichförmige Kraftverteilung im Trenns pant, die man umgehen kann, wenn man die Übertragung durch eine ringförmige Schale oder zentral vornimmt. Eine solche zentrale Einleitung der Schubkraft in den Boden der Behälter, die gleichzeitig die Zelle bilden, zeigt unsere Abbildung.

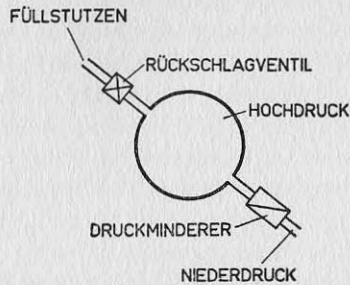


Fördersysteme

Ein wichtiger Bestandteil von Triebwerken, in denen die Treibstoffe aus den Vorratsbehältern durch Druckgas in die Brennkammer angetrieben werden, sind Druckbehälter oder Druckerzeuger, die das zu diesem Zweck notwendige Druckgas in ausreichender Menge und mit genügendem Druck zur Verfügung stellen. Druckgas kann in der Rakete noch eine Vielzahl von Aufgaben, zum Beispiel den Antrieb von pneumatischen Maschinen und Armaturen, leisten. Daher findet man Druckgasbehälter auch in Raketen mit anderen Treibstoff-Fördersystemen.

Die einfachere Lösung ist der Druckbehälter. Da die Kugel infolge ihrer Symmetrie derjenige Körper ist, der den höchsten Druck mit der

geringsten Wandstärke auszuhalten vermag, werden Druckbehälter gern als Kugeln gefertigt. Sie sind ein typisches Beispiel für die Werkstoffauswahl nach dem Begriff »Reißlänge«, denn es kommt bei ihnen nur darauf an, bei geringstem Gewicht ein Höchstmaß an Festigkeit zu erzielen. Da Bänder und Schnüre eine besonders hohe Festigkeit besitzen, werden Druckbehälter gern mit ihnen armiert, das heißt, auf eine dünne



Blechschale, die für Dichtigkeit zu sorgen hat, wird ein sehr reißfestes Band aus Stahlblech oder Kunststoff gewickelt, das für die notwendige Festigkeit sorgt.

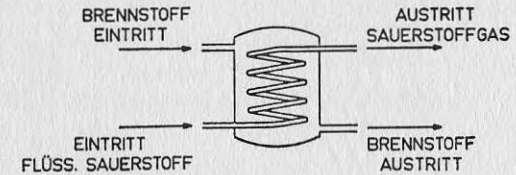
Als Druckgas wird meist Stickstoff, oder in Amerika, wo es billig ist, Helium verwendet. Beide Gase zeichnen sich dadurch aus, daß sie sich sehr schwer verflüssigen lassen und sehr schwer mit anderen Stoffen reagieren.

Da ein Druckbehälter natürlich infolge seines Raumbedarfs und seines Gewichtes ein unangenehmer zusätzlicher Passagier der Rakete ist, hat es nicht an Versuchen gefehlt, das Druckgas während des Fluges zu erzeugen und hierdurch Raumbedarf und Gewicht herabzusetzen. Eine relativ einfache Möglichkeit der Druckgaserzeugung, die auch mit Erfolg angewendet wird, ist die Verbrennung von Pulver. Man verwendet einen festen Treibstoff, der in einer kleinen Kammer untergebracht und verbrannt wird und hierdurch ein heißes Gas erzeugt, das als Druckgas in die beiden Treibstoffbehälter geschickt wird. Natürlich muß man darauf achten, daß die Verbrennung vollständig ist, damit keine entzündlichen Gemische in den Treibstoffbehältern entstehen können.

Statt der Verbrennung fremder Treibstoffe kann auch die der Raketentreibstoffe zur Gaserzeugung herangezogen werden. Sie vollzieht sich in einer besonderen kleinen Brennkammer, deren Verbrennungsprodukte nicht als freier Strahl herausgeführt, sondern über Rohrleitungen in die Behälter geschickt werden. Das im Kopf der Hauptbrennkammer erzeugte Gas läßt sich ja leider nicht zum Austreiben der Treibstoffe aus ihren Vorratsbehältern verwenden, denn dazu bedarf es eines größeren Druckes, als er dort herrscht. Deshalb muß das Druckgas in einer gesonderten Brennkammer mit höherem Druck erzeugt werden.

Da bei den kleinen Raketentypen die Druckförderung vorherrschend ist, sind viel mehr verschiedene, teilweise sehr ingenieus ausgedachte Förderungssysteme projektiert oder auch praktisch eingesetzt worden, als wir sie hier besprechen können.

Wird das Druckgas nicht zum Austreiben der Treibstoffe, sondern nur zum Betrieb pneumatischer Maschinen benötigt, und wird im Triebwerk flüssiger Sauerstoff als einer der beiden Treibstoffe verbraucht, so kann man ein brauchbares Druckgas durch Verdampfen von Sauerstoff erzeugen. Man leitet hierzu einen kleinen Teil des für die Brennkammer bestimmten und daher unter hohem Druck stehenden flüssigen Sauerstoffs durch einen Wärmeaustauscher, der aus einem Gefäß mit eingebauter Rohrschlange besteht. Durch das Gefäß strömt ein Stoff von Normaltemperatur, zum Beispiel Brennstoff. In die Rohrschlange tritt flüssiger Sauerstoff ein; er wird durch den Brennstoff aufgeheizt und – da er schon bei minus 183 Grad Celsius siedet – verdampft. Derartige Wärmeaustauscher werden uns in Raketentriebwerken häufiger begegnen.

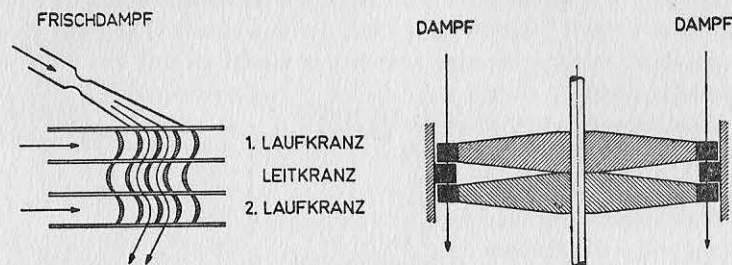


Der Zuwachs, den die Rakete mit der Turbopumpe erhält, ist nicht besonders erfreulich. In einem Gerät, in dem es fast nur ruhende und wenig bewegliche Bauteile gibt, wird mit der Turbopumpe eine große rotierende Maschine eingebaut, die unter den Bedingungen des Raketenfluges natürlich zu allen möglichen Störungen Anlaß geben kann. Der Einbau ist aber erforderlich bei Raketen für sehr große Reichweiten, weil die Ausführung mit Druckförderung zu schwer würde.

An sich sind die Turbo-Kreiselpumpen bekannte Bauelemente der Technik. Nur werden in der Rakete besondere Forderungen gestellt, vor allem die auf große Leistung bei sehr geringem Gewicht, wobei die Konzession einer geringen Lebensdauer möglich ist, denn die Turbopumpen werden in der praktischen Verwendung ja höchstens einige Minuten gebraucht. Erschwerend kommt allerdings hinzu, daß die zu fördernden Stoffe sehr häufig chemisch angriffslustig sind oder sich durch besonders tiefe Temperaturen unangenehm auszeichnen.

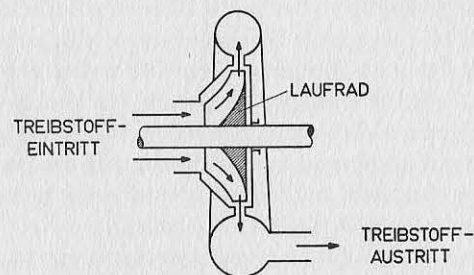
Eine Turbopumpe vereinigt, wie ihr zusammengesetzter Name verrät, Turbine und Pumpe in einem Gerät. Turbinen werden seit vielen Jahrzehnten als motorischer Antrieb in Kraftwerken verwendet. Sie sind entfernt verwandt mit den Flügelrädern der Windmühlen oder den Wasserrädern der Wassermühlen. Die Arbeitsweise einer modernen Dampfturbine erklärt unsere Skizze. Der Dampf strömt durch eine Reihe kleiner Düsen ein, die ganz so aussehen wie die Düse der Brennkammer. Er verläßt sie (wie der Antriebsstrahl der Rakete) als Strahl

mit Überschallgeschwindigkeit und prallt zunächst gegen die als Kranz auf dem ersten Laufrad angeordneten Schaufeln. Diese Schaufeln lenken seine Richtung um, was natürlich nicht ohne einen Gegendruck des Dampfstrahles auf die Schaufeln abgeht. Der Gegendruck bringt den Turbinenläufer in Drehung. Der Dampf, froh seine Arbeit geleistet zu



haben, trifft, nachdem er den ersten Laufkranz durchströmt hat, auf einen Kranz fest stehender Schaufeln, die ihn wieder in die alte Richtung zwängen. Mit ihr stürzt er sich auf einen zweiten Laufkranz, der auf der gleichen Welle sitzt wie der erste und dessen Drehung verstärkt. So kann der Dampf einigemal hin und her gezerrt werden und schließlich seine ganze Energie verlieren, bis er als Abdampf von niedrigem Druck die Turbine verläßt.

Auch die Kreiselpumpe ist in der Technik kein Neuling, etwa speziell für den Einsatz in Raketen erfunden. Ihre Wirkungsweise zeigt die



Skizze. Der Treibstoff wird in der Nähe der Achse in das Pumpengehäuse eingeführt. Er gerät zwischen die Schaufeln des rasch umlaufenden Laufrades und wird von diesem zunächst in seiner schnellen Umdrehung mitgenommen. Durch die Zentrifugalkraft

nach außen geschleudert, gelangt er in das Spiralgehäuse und verläßt die Pumpe mit hohem Druck durch den Austrittsstutzen. Besondere Schwierigkeiten macht die Sauerstoffpumpe. Hier darf nämlich sowohl für die Lager als auch für die Stopfbuchsen, die ein Austreten des geförderten Sauerstoffs verhindern sollen, keinerlei Fett verwendet werden, das mit dem Sauerstoff zur Explosion führen könnte.

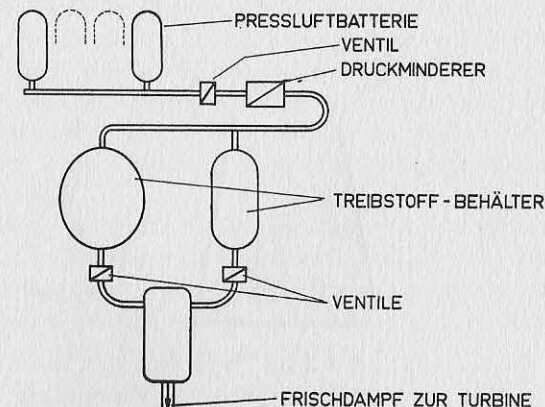
Bei beiden Pumpen ist es notwendig, die durch die Lager hindurchtretenden Leckmengen besonders sicher abzuführen, damit sie nicht etwa in den Triebwerksraum hineinlaufen und dort Explosionen verursachen.

Die Leistungen einer Turbopumpe können durch einige erstaunliche Zahlen belegt werden, die für die Turbopumpe der V2 gelten. Die Umdrehungszahl der Turbopumpe ist 5000/Sekunde, ihre Leistung 680 PS, sie fördert in einer Zeit von einer Minute etwa 7800 Kilogramm Brennstoff und verbraucht dazu 95 Kilo Dampf. Würde man die Treibstoffe nicht in die Brennkammer schicken, sondern mit einer Feuerwehrspritze hoch in die Luft aufsteigen lassen, so ergäbe sich eine Strahlhöhe von etwa 200 Metern.

Die Turbopumpe, mit der die Treibstoffe in die Brennkammer gepumpt werden, wird mit Dampf angetrieben wie jede andere Turbine auch. Nun ist es natürlich nicht möglich, an Bord der Rakete einen normalen Dampfkessel mitzunehmen; dazu ist er viel zu schwer. Sehr verbreitet ist daher das System der chemischen Dampferzeugung, so wie es in der Rakete V 2 eingebaut war. Das Schema einer solchen Dampfanlage sieht verwickelter aus, als es in Wirklichkeit ist.

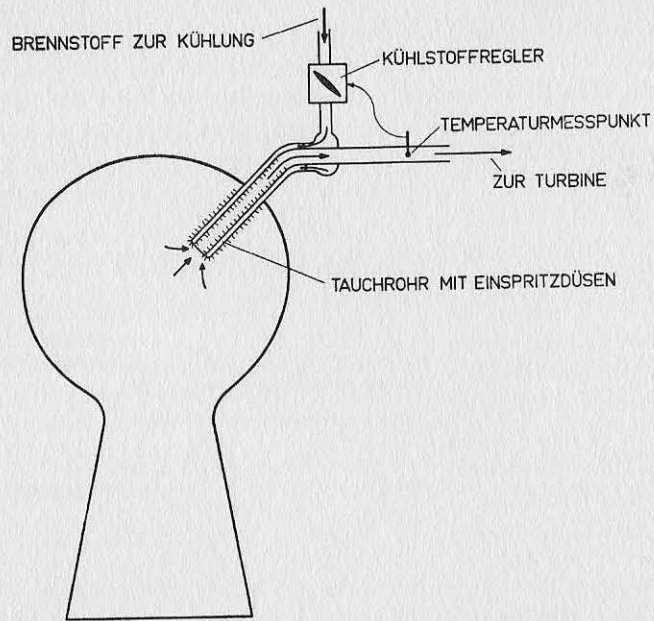
Aus Stahlflaschen strömt über einen Druckminderer Druckgas, meist Stickstoff, in zwei

kleine Treibstoffbehälter. In diesen befinden sich zwei Sondertriebstoffe – bei der V2 waren es eine Lösung von Kaliumpermanganat und hochkonzentriertes Wasserstoffperoxyd –, die dadurch ausgezeichnet sind, daß sie miteinander unter starker Wärmeentwicklung reagieren, es jedoch nicht bis



zu einer so hohen Temperatur kommen lassen, wie sie in der Brennkammer herrscht. Es sind die gleichen Treibstoffe, die auch für die sogenannten »kalten« Raketentriebwerke verwendet werden. Sie werden aus ihren Behältern in eine Reaktionskammer gedrückt und setzen dort ihre chemische Energie in Druck und Temperatur um. Dabei entsteht ein heißer, hochgespannter Dampf, der der Turbine zugeleitet wird und sie antreibt.

Schon lange bestand der Wunsch, diese gesonderten Gaserzeugungsanlagen in der Rakete zu vermeiden, weniger ihres Gewichtes wegen – sie tragen nicht sehr zum Leergewicht der Rakete bei – als vielmehr wegen der Notwendigkeit, zwei weitere Treibstoffe mitbefördern und tanken zu müssen, und wegen der Kompliziertheit der Gasanlage mit ihren Armaturen und Ventilen. Daher lag der Gedanke nahe, das heiße, hochgespannte Gas in der Brennkammer zum Antrieb der Turbine auszunutzen; doch konnte er erst nach langwierigen, experimentellen Untersuchungen verwirklicht werden. Die Entnahme des Ofengases und seine Kühlung auf eine der Turbine zuträgliche Temperatur ist nämlich ein Problem,



das sich nicht am grünen Tisch lösen läßt. Einen Vorschlag, wie man ein solches Gasentnahmesystem unter Verwendung der Brennkammer und der Turbopumpe der V 2 ausbilden kann, zeigt die Skizze. Eine der Vorkammern der Brennkammer der V 2 wird durch ein tief in den Brennraum hineinragendes Tauchrohr ersetzt. Durch das doppelwandige Tauchrohr strömt Brennstoff; er kann durch viele innen und außen angebrachte Spritzdüsen austreten und ergibt dann eine zusätzliche Film- oder Schleierkühlung für das Tauchrohr. Der an der Spitze und im Inneren ausgespritzte Treibstoff kühlt das durch das Tauchrohr ent-

weichende heiße Verbrennungsgas auf seinem Weg zur Turbine. Damit diese Kühlung weder zu stark noch zu schwach ist, liegt vor der Turbine ein Temperaturfühler, der die Kühlstoffmenge über eine Drosselklappe reguliert.

Auch bei Triebwerken mit Turbopumpenförderung ist es notwendig, die während der Antriebsbahn leer werdenden Treibstoffbehälter mit einem Druckgas niedrigen Druckes nachzufüllen. Täte man das nicht, so fielen die Behälter beim Ausfließen des Treibstoffes in sich zusammen, würden dadurch leak oder bekämen Risse. Außerdem verlangen die Turbopumpen im Augenblick des Startes einen gewissen Vordruck, da sonst die Gefahr besteht, daß die Pumpenflügel in der Flüssigkeit herumwirbeln und sie schaumig rühren. Besonders wichtig ist die Gasfüllung natürlich bei den aufgeblasenen tragenden Behältern, die ja nur durch ihren inneren Überdruck stabil genug sind, die auftretenden Kräfte aufzunehmen. Ist also eine Druckgasfüllung der Behälter für den Betrieb notwendig, so darf andererseits der Druck nicht höher als unbedingt nötig sein. Für einen zu hohen Druck müßten die Behälter fester und damit schwerer gebaut werden, außerdem hat auch das die Behälter bei Brennschluß füllende Druckgas sein Gewicht. In einer großen interkontinentalen Rakete befinden sich bei Brennschluß zwei Zentner Druckgas in den leeren Treibstoffbehältern, manchmal auch mehr.



Was man zur Begasung der Behälter verwendet, richtet sich natürlich nach den Treibstoffen in den Behältern und den Gasen, die zur Verfügung stehen. Für den Behälter mit flüssigem Sauerstoff nimmt man im allgemeinen gasförmigen Sauerstoff, der aus dem flüssigen durch Vergasung in einem Wärmeaustauscher hergestellt werden kann.

Läßt man in Fernraketen die Treibstoffbehälter nackt, also unisoliert, um Gewicht zu sparen, so erwärmt sich während des Aufstieges die Außenwand durch die Luftreibung. Hierdurch kann in einem Sauerstoffbehälter eine »natürliche« Vergasung auftreten, die die Begasungsanlage entlastet.

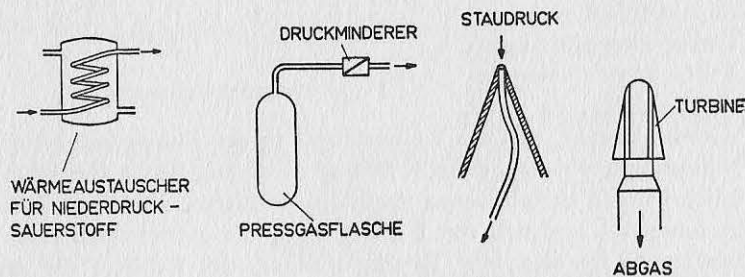
Für den Treibstoffbehälter eignet sich Sauerstoffgas natürlich nicht, da die Gefahr besteht, daß sich über dem Treibstoffspiegel ein explosionsfähiges Gemisch bildet. Hier verwendet man gern Stickstoff- oder

Heliumgas, das in besonderen Druckflaschen mitgeführt und über einen Druckminderer auf den notwendigen niedrigen Druck entspannt wird, ehe es dem Behälter zufließt.

In der Zeit, in der die Rakete durch die Atmosphäre fliegt, kann man auch den sich natürlich aufbauenden Staudruck der Luft ausnutzen. Eine solche Belüftung war bei der Rakete V 2 für die erste Hälfte der Flugbahn vorgesehen.

besonders brauchbar. Die auf den folgenden Seiten versuchte Rekonstruktion aus dem Gedächtnis dürfte nicht in allen Einzelheiten mit dem Projekt übereinstimmen, sie zeigt aber deutlich, an wie viele Einzelheiten ein Triebwerks-Konstrukteur schon im Entwurf denken muß.

QUELLEN FÜR NIEDERDRUCKGAS



Ein Gas, das sozusagen nichts kostet, ist das Turbinenabgas, also der Dampf, der die Turbine getrieben hat und dann von ihr ausgestoßen wird. Man kann es zur Begasung des Treibstoffbehälters verwenden. Der Verzicht auf besondere Druckbehälter ergibt eine beträchtliche Gewichtseinsparung.

In den meisten Fällen muß der Druck des Belüftungsgases in den Behältern in engen Grenzen gehalten werden. Er läßt sich auf zwei verschiedene Arten regeln. Die Regelung auf der Zufuhrseite arbeitet so, daß sie nur gerade so viel Gas in die Behälter läßt, wie nötig ist, um den Druck aufrechtzuerhalten. Das ist, was den Gasverbrauch betrifft, die sparsamste Methode. Einfachere Armaturen für die Regelung des Druckes sind Überströmventile, die bei zu hohem Druck das überschüssige Gas einfach ablassen.

Bevor wir uns Aufbau und Wirkungsweise der viel einfacheren Feststoffraketen ansehen, wollen wir das Zusammenspiel aller Bauteile eines Flüssigkeitstriebwerkes, die wir kennengelernt haben, an einem Beispiel betrachten. Das im Rahmen des Projektes R 14 entworfene Triebwerk weist eine Reihe sehr moderner Züge auf und erscheint daher als Beispiel

Das Triebwerk der Rakete R 14

Das Triebwerk R 14 war entworfen worden für die konventionellen Treibstoffe Spiritus-Wasser-Gemisch und flüssiger Sauerstoff, für einen Schub von etwa 100 Tonnen bei einem Brennkammerdruck von etwa 60 Atmosphären. Die Aufgabe, mit einer einstufigen Rakete eine große Reichweite zu erzielen, läßt sich nur mit einem extrem geringen Konstruktionsgewicht erreichen. Ein wesentliches Merkmal des Projektes ist daher die Einsparung aller unnötigen Gewichte.

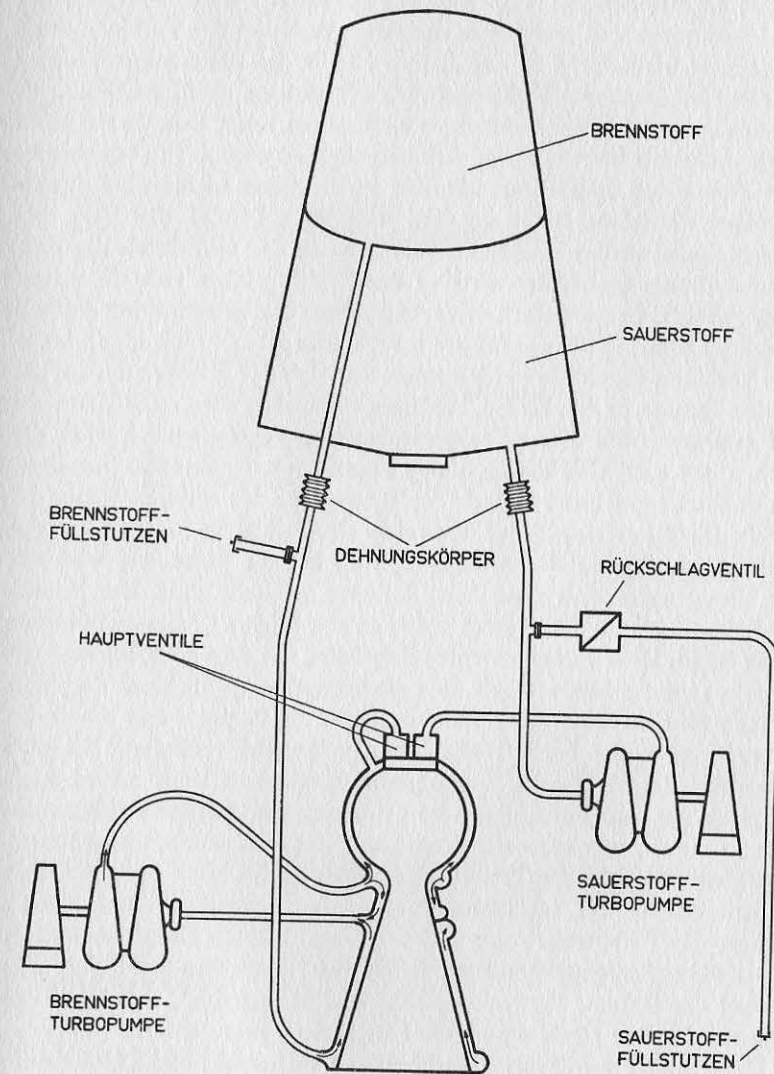
Das Funktionsschema eines Fernraketentriebwerkes ist auch dann, wenn die untergeordneten Einzelheiten, wie in unseren Zeichnungen, nicht dargestellt werden, zu kompliziert und zu unübersichtlich, um sich in einem Bild wiedergeben zu lassen. Wir haben daher die Funktionen des R-14-Triebwerkes in vier verschiedene Gruppen unterteilt und werden für jede dieser Funktionsgruppen eine eigene Darstellung wählen.

Die Schemazeichnungen enthalten natürlich nicht alle zum Triebwerk gehörigen Baugruppen und -teile. Die gezeigten finden wir in einer Anordnung, die das Verständnis erleichtert, die aber nicht dem konstruktiven Aufbau entspricht. Daher sei die im Projekt festgelegte konstruktive Anordnung mit ein paar Worten geschildert. In der Rakete R 14 waren die beiden Treibstoffe in zwei einen länglichen schlanken Kegel bildenden Behältern untergebracht. Die Behälterwand war gleichzeitig Außenwand der Rakete. Beide Behälter waren durch einen Zwischenboden voneinander getrennt. Der Boden des unteren Brennstoffbehälters war ein Kegel, in dessen Mitte der Schub des Triebwerkes eingeleitet wurde. Die oberste Kuppe des Brennkammerkopfes drückte über eine Kreuzschneide auf die Mitte dieses kegelförmigen Bodens. Der Schub wurde über den Boden gleichmäßig in die Zelle eingeleitet. Die Zwischenschaltung einer Kreuzschneide an der Schubübertragungsstelle hatte den Zweck, das Triebwerk in beiden Richtungen schwenkbar zu machen, um es zum Steuern heranzuziehen. Jeder der beiden Treibstoffe wurde durch eine eigene Turbopumpe gefördert, beide Turbopumpen waren am Kopf der Brennkammer befestigt. Ebenso waren alle

anderen Armaturen am Kopf der Brennkammer befestigt und wurden mit ihr geschwenkt.

Das erste Schema des Triebwerkes zeigt uns den Treibstofffluß. Der Brennstoff strömt unter dem Einfluß der Schwerkraft, während der Antriebsbahn auch unter dem Einfluß der Raketenbeschleunigung, durch ein Fallrohr aus dem oberen Behälter der Brennkammer zu. Am unteren Rande der Brennkammerdüse strömt er in einen Auffangwulst, der an der Einströmstelle dicker ist und sich, allmählich verlaufend, um die ganze Düsenmündung zieht. Von dort fließt er den Kühlmantel der Düse aufwärts bis etwa zum Düsenhals. Hier, am Ende der ersten Kühlzone der Brennkammer, wird der Treibstoff herausgeführt und der Saugseite einer zweistufigen Kreiselpumpe zugeleitet. Der Brennstoff wird durch beide Stufen der Pumpe auf einen hohen Druck gebracht und in den Einlaufwulst des Kühlmantels vom Brennkammerkopf gedrückt. In diesem Einlaufwulst wird ein kleiner Nebenstrom abgezweigt und der Kühlzone des Brennkammerhalses zugeführt. Diese Kühlzone hat besonders geformte, sehr dünne Durchlässe, so daß der Brennstoff auf seinem kurzen Weg einen sehr starken Druckabfall erleidet, seinen Druck also fast vollständig verliert. Der aus den engen Kanälen der Kühlzone herausfließende Brennstoff vereinigt sich wieder mit dem Brennstoff aus dem Düsenkühlmantel und fließt mit ihm in die erste Stufe der Kreiselpumpe zurück. Wir haben die Begründung für die geteilte Kühlung schon einmal besprochen. Der Innendruck der Feuergase ist im Kopf der Brennkammer einigermaßen konstant, nimmt während des Durchganges der Gase durch den Brennkammerhals sehr stark, im Düsenteil dann schwächer ab. Bei der soeben geschilderten dreistufigen Kühlung verhält sich der Kühlmitteldruck, also der Druck des Brennstoffes im Doppelmantel, genauso. Im Kühlmantel der Düse herrscht ein einigermaßen konstanter Druck, der nur durch Schwerkraft und Beschleunigung bedingt und daher niedrig ist. Der Druck in der Kühlzone des Brennkammerhalses nimmt, wie gefordert, von oben nach unten ab, und der Druck in der Kühlzone des Brennkammerkopfes ist höher als der Innendruck der Brennkammer und konstant. Nachdem der Brennstoff den Kühlmantel des Brennkammerkopfes durchlaufen hat, wird er dem Brennstoffhauptventil zugeleitet und fließt von dort über das Einspritzsystem in die Brennkammer selbst.

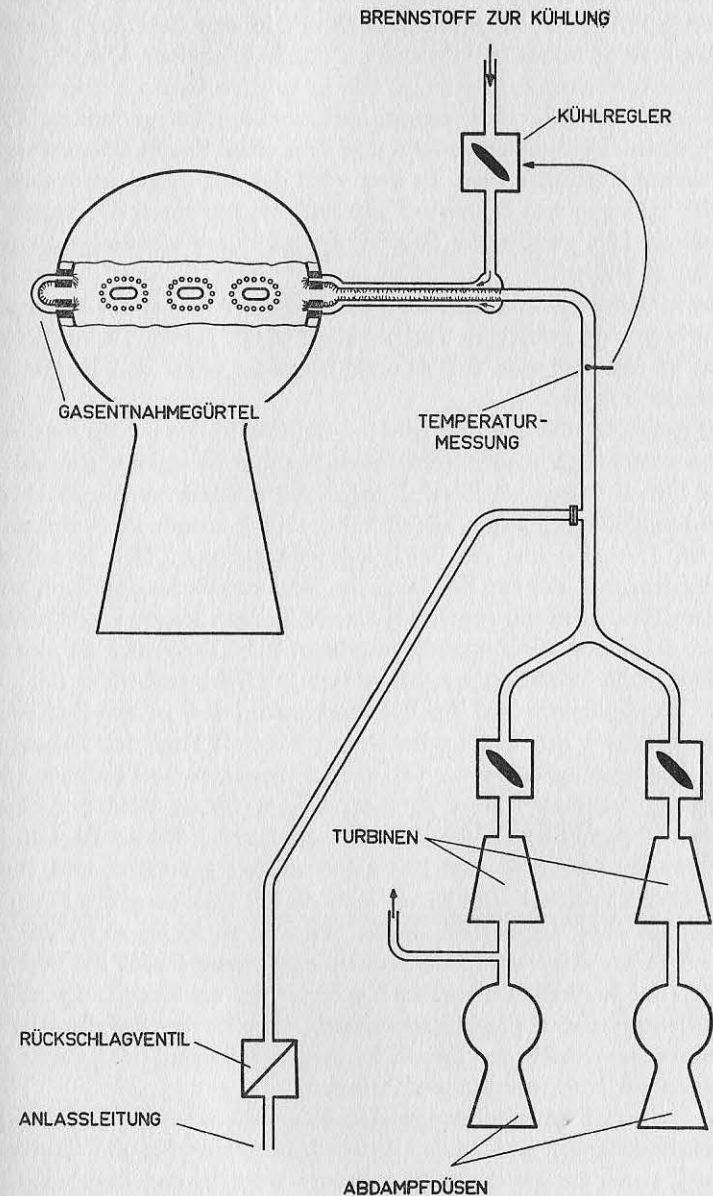
Etwas weniger kompliziert ist der Weg des Sauerstoffs. Der Sauerstoff strömt aus dem oberen Behälter über einen Dehnungsausgleicher zur Saugseite der zweistufigen Pumpe, verläßt die Hochdruckseite dieser



Pumpe und fließt durch das Sauerstoffhauptventil und die Einspritzorgane in die Brennkammer.

Das nächste Schema zeigt uns, wie der Dampf für den Antrieb der Turbinen gewonnen und wie er nach dem Verlassen der Turbinen noch ausgenutzt wird. Etwa an der dicksten Stelle des Brennkammerkopfes ist ein Gasentnahmegürtel angebaut, mit einigen großen Öffnungen, durch die heißes Brennkammergas entweichen kann. Der Vorteil eines solchen Gürtels besteht darin, daß man ein Gasgemisch aus verschiedenen Zonen des Brennkammerkopfes erhält, während man bei punktförmiger Entnahme leicht ein Gas bekommen könnte, das nicht den Durchschnittswerten entspricht. Schon wenn das Gas durch die Entnahmeöffnungen abfließt, wird es durch Einspritzen von Brennstoff stark gekühlt. Es durchfließt dann ein trocken- und naßgekühltes doppelwandiges Rohr, in dem es auf die Temperatur gebracht wird, mit der es den Turbinen zugeführt werden kann. Ehe sich der Frischdampf auf die beiden Turbinen verzweigt, wird seine Temperatur gemessen, und dieser Temperaturmessung entsprechend wird die Menge des dem Gas zur Kühlung zugesetzten Brennstoffes reguliert. Steigt aus irgendeinem Grunde die Temperatur des Entnahmegases, so regelt der Temperaturfühler über eine Drosselklappe sogleich die zur Kühlung zugesetzte Brennstoffmenge auf höhere Werte ein, wodurch die Temperatur wieder auf ihren Sollwert gebracht wird. Der Frischdampf gelangt nun durch zwei Rohre zu den beiden Turbinen. In jedem Rohr ist ein Drosselklappenregler eingebaut, mit dem die Dampfmenge reguliert werden kann. Regelt man die Dampfmenge für beide Turbinen gleichmäßig, so wird der Durchsatz durch die Pumpen und durch die Brennkammer für beide Treibstoffe gleichmäßig verändert. Da aber getrennte Regler für beide Turbinen vorgesehen sind, ist es auch möglich, die Durchsatzmengen von Brennstoff und Sauerstoff verschieden zu regeln, was etwa zur Einhaltung eines bestimmten Mischungsverhältnisses der beiden Treibstoffe erforderlich ist. Nach getaner Arbeit verläßt der Dampf entspannt, mit nur noch wenigen Atmosphären Druck, die Turbinengehäuse und wird zwei kleinen Düsen zugeführt. Sie sitzen auf entgegengesetzten Seiten dicht unter dem Stabilisierungsmantel der Rakete, sind schwenkbar und dienen dazu, den Drall der Rakete, also ihre Drehung um die Längsachse, auszusteuern.

Die Turbine der Sauerstoffturbopumpe verbraucht mehr Gas als die der Brennstoffturbopumpe. Ein Teil ihres Abgases wird vor dem Eintritt in die Steuerdüse abgezweigt und dient, wie wir aus dem nächsten Schema sehen werden, zur Begasung des Brennstoffbehälters.



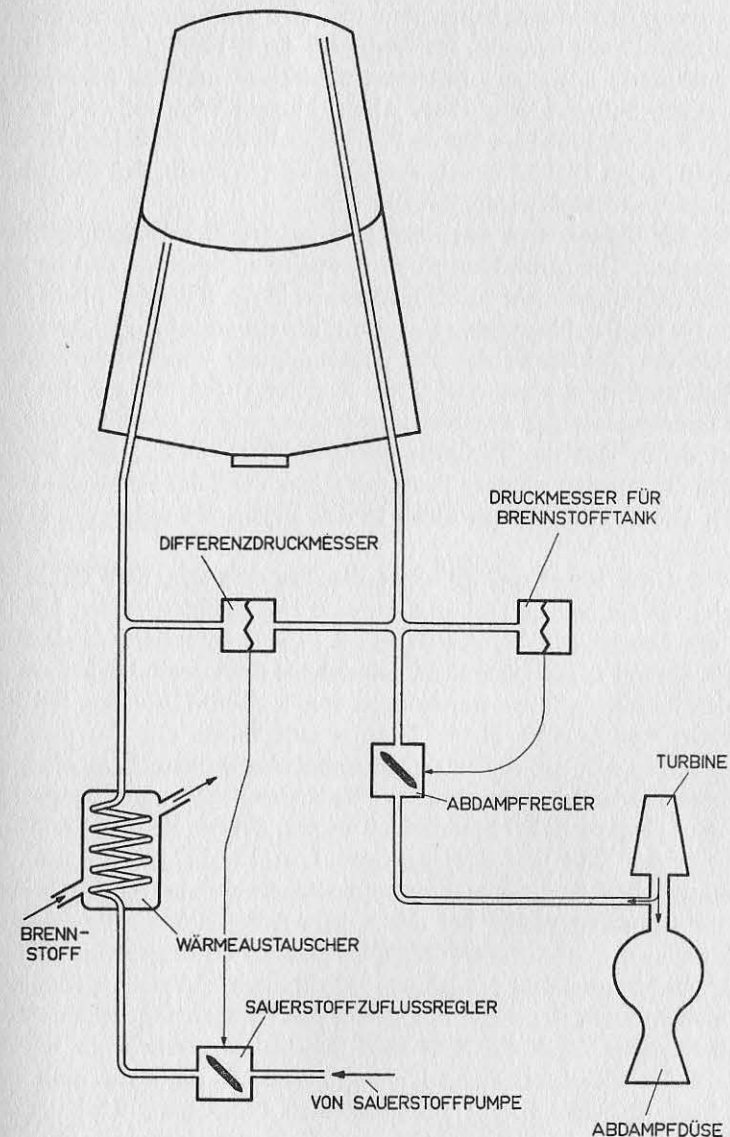
Die Begasung erfolgt, um den während der Antriebsbahn verbrauchten Treibstoff zu ersetzen und den Druck in den Behältern, der ihre mechanische Stabilität gewährleistet, aufrechtzuerhalten. Die Begasung des Sauerstoffbehälters geschieht, wie in solchen Fällen immer üblich, mit Sauerstoffgas. Es wird erzeugt, indem etwas flüssiger Sauerstoff aus der Hochdruckleitung abgezweigt und über einen Regler einem Wärmeaustauscher zugeführt wird. In ihm wird die mit flüssigem Sauerstoff gefüllte Schlange von Brennstoff umspült und hierdurch der Sauerstoff verdampft. Der verdampfte Sauerstoff wird durch ein Steigrohr dem Behälter zugeführt.

Wie wir schon feststellten, wird ein Teil des Abgases der zur Sauerstoffturbopumpe gehörigen Turbine abgezweigt. Dieses Turbinenabgas strömt in einer dünnen Rohrleitung bis dicht unter den Deckel des Brennstoffbehälters.

Die Aufrechterhaltung des richtigen Druckes in den beiden Behältern ist von ausschlaggebender Wichtigkeit für ihre Festigkeit. Ein zu geringer Druck würde sie instabil gegen die Anforderungen durch die Schubdurchleitung machen, ein zu hoher Druck könnte sie zum Platzen bringen. Deshalb sind die Behälterdrücke geregelt. Der Druck des Turbinenabgases, das zur Begasung des Brennstoffbehälters dient, wird vor dem Eintritt in ihn gemessen. Das Meßorgan steuert eine Drosselklappe, die in der Zuführungsleitung liegt. Wird der Druck zu niedrig, so öffnet es die Drosselklappe, bei zu hohem Druck schließt es sie.

Der empfindlichste Teil der Behälterkonstruktion ist der Zwischenboden zwischen den beiden Behältern. Niemals darf der Druck im unteren Behälter größer werden als der im oberen, er muß vielmehr stets um einen bestimmten Wert darunter liegen. Daher wird mit einem weiteren Meßgerät die Druckdifferenz zwischen den beiden Begasungsleitungen für Sauerstoff- und Brennstoffbehälter gemessen, und dieser Differenzdruck steuert ein kleines Ventil in der Zuleitung des flüssigen Sauerstoffes zum Wärmeaustauscher. Wird er zu klein, so ist das ein Zeichen dafür, daß im Sauerstoffbehälter zu wenig Druck ist, und das Ventil in der Sauerstoffleitung wird geöffnet. Ist der Druck zu groß, so wird es entsprechend geschlossen. Durch diese beiden Regelorgane ist also ein vorgeschriebener Druck in beiden Behältern und damit die Festigkeit der Konstruktion gewährleistet.

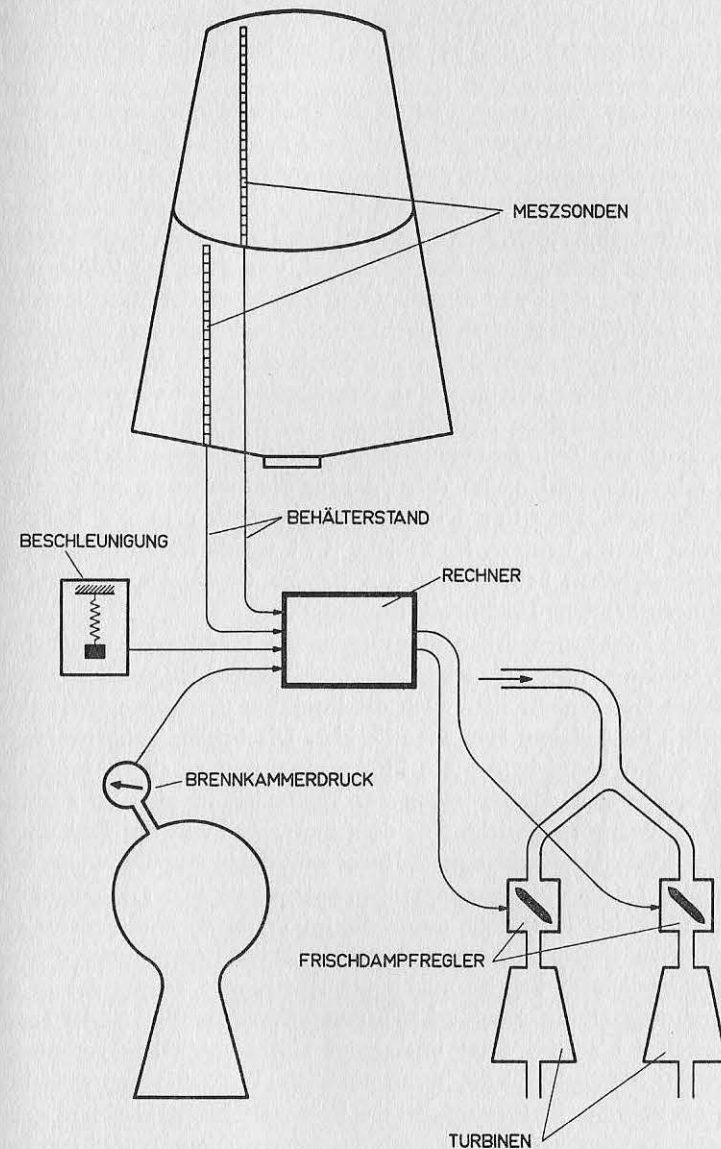
Das nächste Schema gibt uns eine Übersicht über die Schub- und Durchsatzregelung. Die beiden Frischdampfregler für die Turbinen können, wenn sie gleichsinnig gesteuert werden, zur Regelung des Brennkammerdrucks dienen. Bei allen Brennkammern ist der Innen-



druck im Brennkammerkopf ein Maß für den Schub. Will man den Brennvorgang konstant halten, muß man also dafür sorgen, daß dort ein konstanter Druck herrscht. Im Triebwerk der R 14 wird der Druck der Brennkammer mit einem Instrument gemessen und das Meßergebnis mit einem Sollwert verglichen. Abweichungen vom Sollwert werden einem Rechner gemeldet. Dieser Rechner stellt dann die beiden Drosselklappen in den Turbinenfrischdampfzuleitungen so ein, daß der richtige Brennkammerdruck wieder erreicht wird.

Bei der Rakete R 14 war noch eine weitere Steuerungsmöglichkeit vorgesehen. Die ganze Konstruktion war so empfindlich, daß sie hohe Beschleunigungen nicht aushielt. Daher ist in der Rakete R 14 ein Meßgerät für die Beschleunigung eingebaut, das ein Signal abgibt, sowie die Rakete das Zehnfache der Erdbeschleunigung überschreitet. Dieses Signal wird dem eben erwähnten Rechner zugeführt, auf den auch der Druckmesser des Brennkammerdruckes wirkt. Der Rechner sorgt dann dafür, daß die Turbinen weniger Dampf bekommen, infolgedessen die Pumpen weniger Treibstoff fördern und der Schub allmählich sinkt. Dieser Vorgang spielt sich in den letzten Sekunden vor Brennschluß ab.

Der dritte Regelvorgang nutzt die Tatsache aus, daß die beiden Regler für die beiden Turbinen getrennt beaufschlagt werden können. Da das Leergewicht bei der Rakete R 14 eine so entscheidende Rolle spielt, kommt es auch darauf an, daß sich bei Brennschluß in keinem der beiden Behälter größere Restmengen von Treibstoff befinden. Bei allen Raketen wirken sich kleine Unregelmäßigkeiten der Pumpen und Turbinen so aus, daß der eine Treibstoff früher verbraucht wird als der andere. Hierdurch entsteht in einem der beiden Behälter eine Restmenge, die das Leergewicht bei Brennschluß erhöht. Bei den riesigen Treibstoffmengen der R 14 und dem geringen Leergewicht der Konstruktion wirkt sich diese Restmenge stark auf die Reichweite aus. Ähnlich kritisch ist die Restmengenfrage bei der Rakete Atlas. Hiervon ist sogar die Öffentlichkeit unterrichtet worden, als nämlich als Ursache für die mißglückten Mondschüsse des Jahres 1958 ein ungleichförmiger Treibstoffverbrauch durch ungleiche Förderung der Pumpen angegeben wurde. In beiden Behältern der R 14 sind Sonden vorgesehen, die die Abnahme der Flüssigkeitsspiegel messen. Verläuft sie nicht nach dem für beide Behälter vorher ausgerechneten Programm, wird die Abweichung von der vorgeschriebenen Sinkgeschwindigkeit über den Rechner den Drosselklappen für beide Turbinen zugeführt. Die Drosselklappen werden durch dieses Meßergebnis gegensinnig verstellt und



bevorzugen nun entweder die Sauerstoffförderung oder die Brennstoffförderung. Hierdurch wird die ungleichmäßige Entleerung der beiden Behälter wettgemacht, und bei Brennschluß findet sich in keinem von ihnen eine Restmenge.

Neben seiner Hauptaufgabe leistet das Triebwerk noch eine Reihe von Hilfsdiensten. Die Steuerung der Rakete in Seite und Höhe wird durch Schwenken des ganzen Triebwerkes verursacht. Hierzu ist der Kopf der Brennkammer beweglich gegen den unteren Behälterboden des Sauerstoffbehälters abgestützt. In zwei um 90 Grad versetzten Richtungen ist der Brennkammerkopf mit dem Mittelteil, und zwar mit Punkten am Trennsant von Heck und Mittelteil durch hydraulische Maschinen verbunden. Diese hydraulischen Maschinen sind nichts anderes als einfache Zylinder mit Kolben, in denen der durch elektromagnetische Ventile gesteuerte Hochdruckbrennstoff als Antriebsflüssigkeit verwendet wird. Je nachdem, in welche Zylinderkammer er gedrückt wird, wird der Kolben aus dem Zylinder heraus- oder in ihn hineingepreßt. Das Triebwerk folgt ihm und macht dabei die für die Steuerung notwendigen Schwenkungen. Derartige Kolbenmotoren werden in der Raketensteuerung häufig benutzt. Im Projekt R 14 wurde im Gegensatz zum allgemein üblichen kein Öl für den Betrieb verwendet, sondern der ohnehin vorhandene Hochdruck-Brennstoff.

Um das Zusammenwirken aller Organe des Triebwerkes plastisch zu sehen, spielen wir Start, Antriebsbahn und Brennschluß der R 14 durch. Bei dieser Gelegenheit wird auch die Funktion der bisher etwas stiefmütterlich behandelten Hauptventile klar. Die beiden Treibstoffhauptventile haben nämlich mehrere Funktionen, und an ihnen zeigt sich deutlich, wie sehr das Bestreben zur Vereinfachung sich im Entwurf eines Triebwerkes auswirkt. Vor dem Start, während der Betankung, sind beide Ventile geschlossen, und zwar wird ihnen vom Boden her über eine dünne Leitung Preßgas zugeführt, das sie zudrückt. Die Betankung erfolgt für beide Treibstoffe durch die im Treibstoff-Fluß-Schema eingezeichneten Betankungsrohre, deren Anschlußstutzen unter der das Heck darstellenden kegelförmigen Schürze liegen. Wegen der in der Vorbereitungszeit unvermeidlichen Sauerstoffverdampfung ist der Sauerstoffbehälter bis zum Start mit einem »Nachtankgefäß« verbunden, das in der Startstelle bleibt, wenn auch die Tankfahrzeuge abrücken. Kurz vor dem Start wird zunächst das Brennstoffhauptventil und später über eine Verzögerungsstrecke auch das Sauerstoffhauptventil geöffnet, und zwar gehen sie beide in ihre eigentliche Ruhestellung, die sogenannte »Vorstufenstellung«. In ihr fließen aus den Behältern geringe

Mengen von Treibstoffen in die Brennkammer. Nach der Zündung brennt die Vorstufenflamme, die zur Zündung der Hauptstufe dient.

Nun werden mit Preßgas über die Anlaßleitung, ein dickes Rohr, vom Boden her die Turbinen angelassen, da ja für sie, solange die Brennkammer noch nicht in Funktion ist, kein Dampf zur Verfügung steht. Die Turbinen drücken die beiden Treibstoffe in die Brennkammer, wobei die beiden Hauptventile unter dem erhöhten Druck aufgehen und den Zufluß zu ihr völlig öffnen. Im gleichen Maße wie der Druck in der Brennkammer steigt, übernimmt die Gasentnahmeanlage den Betrieb der Turbinen. Wenn diese fast auf ihrer vollen Drehzahl sind, ist der Schub der Brennkammer so stark gewachsen, daß die Rakete sich abhebt und die Hilferregung der Turbinen vom Boden unterbrochen wird.

Während der Antriebsbahn werden die verschiedenen Regelorgane wirksam. Die Temperatur des Entnahmegases wird laufend überwacht und durch den Regler für den Kühlbrennstoff auf konstanter Höhe gehalten. Wenn sich aus irgendeinem Grunde der Durchsatz durch die Turbinen ändert, also die Turbinenregler in Funktion treten, so wird der Kühlbrennstoffregler direkt von den Turbinenreglern benachrichtigt, damit er die Kühlbrennstoffmenge entsprechend einstellen kann. Während des überwiegenden Teils der Antriebsbahn wird der Innendruck der Brennkammer konstant gehalten, um konstante Brennverhältnisse zu erzielen. Die Regelung des Brennkammerdruckes erfolgt, wie schon besprochen, über die beiden Turbinenregler.

Die Beschleunigung der Rakete, die zunächst sehr niedrig ist, steigt mehr und mehr an und erreicht kurz vor Brennschluß die für die Rakete gefährliche Grenze vom Zehnfachen der Erdbeschleunigung. Von nun an wird die Regelung nach dem Brennkammerinnendruck ersetzt durch die mit dem Beschleunigungsmesser, der den Brennkammerinnendruck und damit den Schub durch Drosselung des Turbinenfrischdampfes allmählich herunterschraubt, so daß das Zehnfache der Erdbeschleunigung nicht überschritten werden kann.

Die Raketengeschwindigkeit wird bei der R 14 durch das Doppler-Effekt-Verfahren gemessen, das später beschrieben wird. Hat die Bodenanlage festgestellt, daß die der Reichweite entsprechende Geschwindigkeit der Rakete erzielt ist, so gibt sie an die Rakete ein Funkkommando, den Brennschluß durchzuführen. Dieses Funkkommando leitet der Bordempfänger unmittelbar den beiden Hauptventilen zu. In ihnen befinden sich zwei kleine Pulverkammern, in denen ein Treibsatz entzündet wird. Der hierdurch erzeugte Druck schließt beide Hauptventile sehr rasch. Da durch die strömenden Treibstoffe in den Rohren ein starker Wasser-

schlag auftreten würde, der die Rohre unter Umständen zum Zerreißen bringen könnte, sind Umwegleitungen vorgesehen, die sich in diesem Moment öffnen und den dahinschießenden Treibstoff in die von den Behältern kommenden Rohrleitungen zurückführen.

Feststoff-Triebwerke im Vormarsch

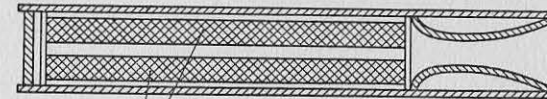
Im zweiten Weltkrieg hatten die Pulverraketen ihre militärische Bedeutung, die sie einhundert Jahre zuvor schon einmal gehabt hatten, erneut bewiesen und wieder erobert. Daß man sie einfach lagern und über lange Zeit unversehrt halten kann, ohne sie zu warten, machte sie für den militärischen Gebrauch besonders wertvoll. Auch ist der Umgang mit den Pulverraketen weniger gefährlich als mit einigen der Treibstoffe für Flüssigkeitsraketen; die Vorbereitungszeit vor dem Abfeuern ist viel kürzer als bei Flüssigkeitsraketen, die im allgemeinen erst noch getankt werden müssen, die Massenproduktion einfacher und billiger, weil die Triebwerke wesentlich einfacher aufgebaut sind. Alle diese Gründe führten dazu, daß zu Ende des zweiten Weltkrieges die kürzeren Reichweiten bis etwa 100 Kilometer die Domäne der Pulverraketen geworden waren.

Das galt nicht in gleichem Maße für längere Reichweiten. Sie erfordern ein günstiges Massenverhältnis, das heißt einen großen Treibstoffanteil. Bei Feststoffraketen jedoch sind Brennraum und Treibstoffbehälter ein und dasselbe Bauteil, und die im Brennraum herrschenden großen Drucke und hohen Temperaturen müssen vom ganzen Treibstoffbehälter aufgenommen werden können. Bei Fernraketen mit großen Treibstoffmengen ergeben sich also große, schwere Behälter, mit denen sich ein günstiges Massenverhältnis nicht erreichen läßt.

Als Beispiel hierfür seien die in den USA verwendeten Flugzeug-Starthilferaketen genannt, die aus einem Triebwerk bestehen, das unter den Flugzeugflügeln angebracht wird. Die kleinste von diesen Starthilfen mit dem Namen Loki liefert etwa 1,4 Tonnen Schub über eine Zeitdauer von 0,8 Sekunden und wiegt 8 Kilogramm. Der Treibstoffinhalt wiegt 2,5 Kilogramm, mithin beträgt der Treibstoffanteil 31 Prozent. Die größte gebräuchliche Starthilfe ist die OKSH 47000. Sie liefert einen Schub von 21 Tonnen über eine Zeitdauer von 3 Sekunden, sie wiegt 63 Kilogramm und enthält 30 Kilogramm Pulvertreibstoff. Der Treibstoffanteil ist in diesem Falle 47 Prozent. In beiden Fällen liegt er weit unter dem, was für Fernraketen üblich und möglich ist; so hatte zum Beispiel die V 2 einen Treibstoffanteil von 70 Prozent.

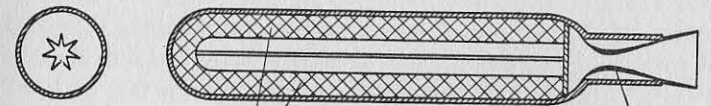
Als der amerikanische Raketenzer William Holladay Anfang 1958 die Wehrmachtsteile zum Wettrennen in oder um den Raum aufrief und um Vorschläge bat, reichte die Air Force einen Vorschlag ein, der eine Feststoffrakete für eine Reichweite von 8000 Kilometern vorsah. Was war inzwischen geschehen, daß ein solcher Vorschlag gemacht werden konnte?

Entscheidend war ein konstruktiver und fabrikatorischer Fortschritt, nämlich die Eingießtechnik. Er brachte eine wesentliche Verbesserung



TREIBSATZ LOSE EINGESETZT

des Massenverhältnisses. Während früher die Pulverstäbe außen und innen gleichzeitig brannten, wie man es aus der Technik der Pulver für Geschütze übernommen hatte, wurden Aufbau und Brennvorgang durch die Eingießtechnik völlig umgestaltet. Früher lagen die Pulverkörper nicht fest an der Behälterwand an, daher wurde die Brennraumwand vom Brennbeginn an durch Temperatur und Druck belastet. Jetzt, nachdem der Feststoff in den Brennraum fest eingegossen ist, kann eine solche Belastung erst am Schluß des Brennens für kurze Zeit auftreten.



TREIBSATZ FEST EINGEGOSSEN

SCHUTZBELAG

Der Block aus gegossenem, festem Raketentreibstoff brennt von innen heraus. Während fast der gesamten Brennperiode schützt also ein innerer Mantel von Raketentreibstoff die Wandung des Behälters. Er hält nicht nur die Temperaturen von ihr fern, sondern nimmt auch einen Teil des Druckes auf. Daher kann die Behälterwand so berechnet und aus solchem Material hergestellt werden, daß sie nur der kurzen Belastung am Ende des Brennvorganges Rechnung tragen muß.

Für die Düse ist dieses Verfahren natürlich nicht anwendbar. Hier folgen

die Verbesserungen daher auch den konventionellen Gedankengängen, wobei man allerdings neu geschaffene Werkstoffe anwendet. So kleidet man den Düsenhals mit feuerfestem Titan oder gut isolierendem Zirkon aus; dadurch werden die Düsen leichter, ohne an Festigkeit zu verlieren.

Der Erfolg dieser Maßnahmen zeigt sich in der Möglichkeit, Triebwerke mit einem Treibstoffanteil von 93 Prozent zu bauen. Mit derartig leichten Triebwerken lassen sich natürlich auch Fernraketen aufbauen, insbesondere, wenn die Außenwand des Triebwerkes gleichzeitig Zelle und Tragkörper der Rakete ist, so daß auch hier jede Gewichtszunahme vermieden wird.

Obwohl es also von der Seite des Massenverhältnisses möglich erscheint, Feststoff-Fernraketen zu bauen, bleiben doch noch intensive Anstrengungen erforderlich, um mit ihnen eine ausreichende Treffgenauigkeit zu erzielen. Die Steuerung einer Feststoffrakete kann kaum mit den gleichen Mitteln geschehen wie die einer Flüssigkeitsrakete. Hierzu ein Beispiel: die Reichweitensteuerung. Wie wir wissen, ist für die Treffgenauigkeit vor allem die Brennschlußgeschwindigkeit maßgebend.

Bei Flüssigkeitsraketen kann man diese Brennschlußgeschwindigkeit beeinflussen, indem man den Antrieb abschaltet, sobald die richtige Geschwindigkeit erreicht ist.

Bei Pulvertriebwerken läßt sich das gesamte Antriebsvermögen des Treibstoffes bei sorgfältiger Fertigung und »Konditionierung«, das heißt, wenn man den Treibstoff vor dem Start auf eine bestimmte, festgelegte Temperatur aufheizt oder abkühlt, auf etwa 3 Prozent genau einhalten. Das ist für kürzere Reichweiten eine erstaunliche Genauigkeit, genügt aber für große Reichweiten nicht. In Analogie zu den Flüssigkeitstriebwerken könnte man den Antrieb »abschalten«, indem man bei der richtigen Geschwindigkeit die Brennkammer in Stücke sprengt. Man könnte auch an ein Stufenprinzip denken, bei dem eine letzte Stufe mit vielen kleinen Feststoffraketen ausgerüstet wird, von denen eine bestimmte Anzahl je nach der durch Messung bestimmten Geschwindigkeit der vorhergehenden Stufe eingeschaltet wird und einen kurzen Zusatzimpuls gibt.

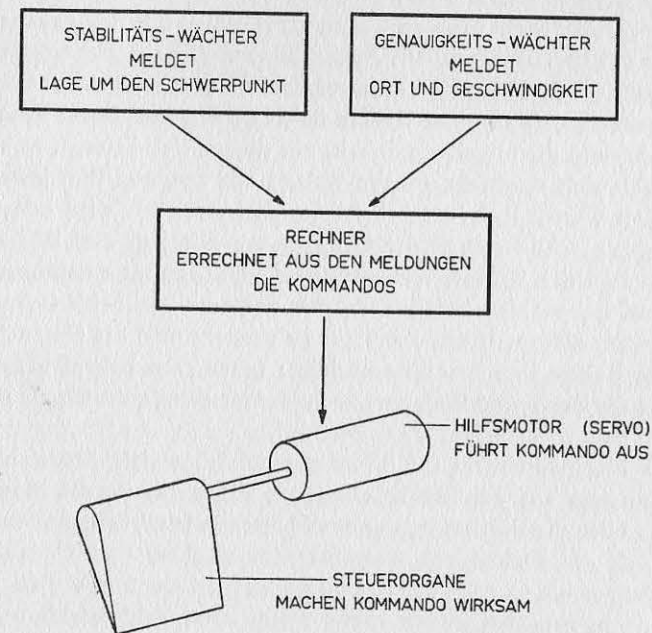
Es ist sicher, daß die nächsten Jahre einen erheblichen Schritt vorwärts in der Steuerung von Feststoffraketen bringen werden und daß das Rennen zwischen ihnen und den Flüssigkeitsraketen zur Zeit in keiner Richtung endgültig entschieden ist.

Die Steuerung

So verschieden wie die Bahnen der Raketen, so verschieden wie ihre Flugaufträge, so verschieden sind auch die Aufgabenstellungen für die Steuerung und Lenkung von Raketen.

Für relativ kurze Entfernungen, so etwa für das Wetterschießen oder für den Transport von Rettungsleinen auf gestrandete Schiffe, setzt man auch ungesteuerte Raketen ein. Sie werden oft durch eine besondere Anordnung des Triebwerkes in Drehung versetzt und halten daher, wie ein Kreisel, ihre Achse fest in einer Richtung. Hier wird also der gleiche Effekt ausgenutzt, der Gewehr- oder Kanonenkugeln zur Stabilisierung verhilft.

Bei gesteuerten Raketen hat die Steuerung im allgemeinen zwei Aufgaben zu erfüllen. Erstens muß sie dafür sorgen, daß die Rakete nicht um



ihren Schwerpunkt herum schwingt und taumelt und damit etwa zu einem Querschläger wird, mit anderen Worten, sie muß die Stabilität der Rakete während ihres Fluges sichern; zweitens muß sie die Rakete an das gewünschte Ziel bringen, das heißt, ihre Bahn so beeinflussen, daß die Rakete das feste oder bewegliche Ziel wirklich trifft. Für jede dieser

beiden Aufgaben ist ein Meßorgan notwendig, das die Abweichungen der Rakete von ihrer Soll-Lage feststellt. Das Meßorgan für die Stabilität oder, wie wir es nennen wollen, der Stabilitätswächter, ist etwa mit dem Gleichgewichtsorgan zu vergleichen, das im Ohr des Menschen eingebaut ist. Es sagt nichts über den Punkt im Raum aus, in dem wir uns befinden, es kann uns nicht sagen, ob wir uns auf der Straße oder im fünften Stockwerk eines Hauses bewegen, aber es kann uns etwas darüber aussagen, ob wir aufrecht gehen oder schief liegen oder gar die Horizontale einnehmen. Genauso meldet der Stabilitätswächter die Abweichung in der Lage der Rakete um ihren Schwerpunkt, ohne Rücksicht darauf, wo der Schwerpunkt der Rakete sich gerade befindet und wohin er sich bewegt.

Wenn wir die Analogie zum Menschen noch weiter treiben wollen, können wir das zweite Meßorgan, den Genauigkeitswächter, etwa mit unserem Gesicht, mit unseren Augen vergleichen. Die Augen sagen uns, wo wir uns befinden, mit den Augen können wir ein Ziel erfassen und uns vornehmen, dieses Ziel zu erreichen. Genauso überwacht der Genauigkeitswächter in einer Rakete den Ort der Rakete im Raum, die Richtung und die Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegt. Mit seiner Hilfe läßt sich ermitteln, ob die Rakete mit den von ihm jeweils gemessenen Werten das vorgeschriebene Ziel erreichen wird oder nicht.

An den geschilderten beiden Gruppen von Steuergeräten läßt sich der Unterschied der Begriffe »Steuerung« und »Lenkung« demonstrieren, während die verbleibenden Teile der Steueranlage beiden Aufgaben gemeinsam dienen. Unter »Steuerung« versteht man die Gerätegruppe, die der Rakete ihre Stabilität verleiht; unter dem Begriff »Lenkung« werden die Bord- und Bodengeräte zusammengefaßt, die für ein genaues Treffen verantwortlich sind.

Wie im menschlichen Körper das Gleichgewichtsorgan und die Sinnesorgane auf die Muskeln wirken, die ihrerseits das Wiederaufrichten oder die Fortbewegung des Menschen bewirken, genauso müssen auch die Meldungen vom Stabilitätswächter und Genauigkeitswächter auf die Organe der Rakete übertragen werden. Vorher werden sie jedoch, zunächst in der rohen Form einer Fehlermeldung, einem Rechner zugeleitet, der sie umrechnet und aus ihnen Kommandos bildet, die dann an die Muskeln der Rakete weitergeleitet werden können. Der Rechner hat eine ähnliche Funktion wie Teile unseres Gehirnes, die die Sinneseindrücke zunächst »umrechnen«, ehe sie als Kommandos an die Muskeln gehen.

Diese Muskeln der Rakete sind kleine Hilfsmotoren, auch Servo-

mechanismen genannt, die das Kommando, das sie vom Rechner erhalten, ausführen und nach diesem Kommando ein Steuerorgan, zum Beispiel ein Ruder, bewegen. Das Ruder macht das Kommando dann wirksam, es sorgt dafür, daß die Rakete wieder in die richtige Lage oder auf die Sollbahn kommt.

Alle Geräte, die zur Steuerung oder Lenkung gehören und nicht ortsgebunden sind, werden zu einem Steuerungszentrum zusammengefaßt, so etwa die Meß- oder Fühlorgane, mit denen sich Abweichungen feststellen lassen, weiterhin der Rechner und schließlich die Stromversorgung, die die Steuerorgane mit elektrischer Energie versorgt. Das Steuerungszentrum ist traditionell von jeher kurz hinter der Nutzlast angebracht worden, obwohl es dafür, mindestens bei einstufigen Raketen, keinen plausiblen Grund gibt. So findet sich bei einigen neueren Projekten einstufiger Raketen die Steuerung auch schon im Heck. Bei mehrstufigen Raketen muß das Steuerungszentrum natürlich in der letzten Stufe liegen, die noch gesteuert werden soll. Sonst müßte man ihre Geräte mehrfach einbauen, was man jedoch vermeidet, da auf die Steuergeräte ein hoher Anteil der Kosten für die gesamte Rakete entfällt.

Anders als die zum Steuerungszentrum gehörigen Geräte müssen die ausführenden Steuerorgane an Stellen untergebracht werden, wo sie auf die Lage und Richtung der Rakete Einfluß nehmen können. Das ist im allgemeinen im Heck. Nur in wenigen Fällen sind sogenannte Kopfruder verwendet worden, das heißt Luftruder, die im Vorderteil der Rakete untergebracht sind.

Raketen, die sich mit bestimmten Sinnesorganen ihr Ziel selbst suchen, benötigen natürlich für diese einen freien Sichtwinkel. Man muß die zur Steuerung gehörenden Sinnesorgane also in der Spitze der Rakete, meist sogar noch vor der Nutzlast, unterbringen. Bei Raketen dagegen, die über einen Funkweg mit dem Boden in Verbindung stehen, müssen die dem Boden zugewandten Antennen im Heck liegen, können also ebenfalls nicht im Steuerungszentrum vereinigt werden.

Nach der Vielgestaltigkeit der Steuerungsaufgaben lassen sich auch die Steuerungs- und Lenkungsanlagen in zahlreiche verschiedene Klassen einteilen. Wir wollen uns folgende Unterscheidung besonders merken:

Für Raketen, die einem festen Ziel zugesteuert werden, gibt es eine Gruppe von Lenkverfahren, die ohne eine zugehörige Bodenapparatur arbeiten, bei denen also alle Steuergeräte an Bord eingebaut sind. Solche Raketen werden nach dem Abschluß vom Boden her nicht mehr beeinflußt, sondern steuern sich selbst in das vorher eingestellte Ziel.

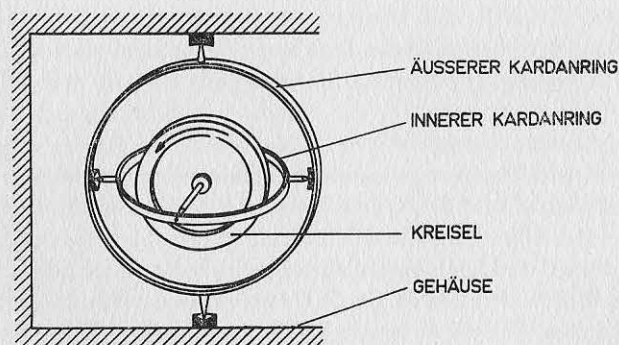
Eine zweite Gruppe von Lenkverfahren beeinflußt die Rakete wäh-

rend der gesamten Antriebsbahn vom Boden her über den Funkweg, und zwar bezüglich ihrer Lage im Raum und bezüglich ihrer Brennschlußgeschwindigkeit, damit sie das vorher festgelegte Ziel sicher erreicht.

Bei Raketen, bei denen die auf diese Weise erzielbare Treffgenauigkeit nicht ausreicht, muß man, wie oben erwähnt, Mittel vorsehen, mit denen sie sich, wenn sie einmal in die Nähe des Ziels gekommen sind, das Ziel selbst suchen. Das gilt vor allen Dingen für die Raketen der Flugabwehr, die im allgemeinen mit bordfesten Ortungsgeräten ausgerüstet sind, also mit Geräten, die das Ziel erkennen, erfassen und die Rakete auf dieses Ziel zulenken.

Kreiselgeräte

Seit Kolumbus' Zeiten ziehen Schiffe über die großen Ozeane fern von allen Küsten und finden ihren Weg. Auch bei unsichtigem Wetter, bei dem also weder die Sonne noch die Sterne zur Navigation zur Verfügung stehen, halten sie nach dem Kompaß ihren Kurs. In den vergangenen Jahrhunderten war der Kompaß eine Magnetnadel, die möglichst frei beweglich aufgehängt wurde und dann mit einem ihrer Pole nach Norden zeigte, so daß der Kurs, den das Schiff nahm, abgelesen werden konnte. Seit dem vorigen Jahrhundert wurde die Magnetnadel mehr und mehr, schließlich ganz durch den Kreiselkompaß ersetzt.

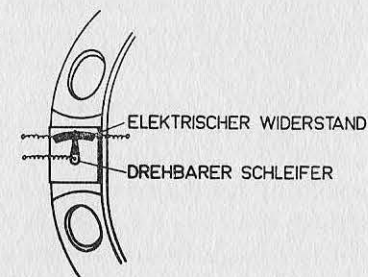


Aus unseren physikalischen Betrachtungen wissen wir, daß ein Kreisel bestrebt ist, seine Achse im Raum fest beizubehalten. Gibt man ihm also die Möglichkeit, sich unabhängig von seiner Umgebung seine Lage frei zu suchen, so behält er, wenn keine Störungen auftreten, eine einmal

gefundene Lage immer bei. Daß der Kreisel frei hängt, erreicht man bei den Kreiseln der Flugzeug- und Raketentechnik durch die »kardanische« Aufhängung. Wie sie wirkt, geht aus der kleinen Skizze hervor. Der Kreisel selbst, der rasch rotiert, ist mit seiner Achse in einem kreisförmigen Ring, dem sogenannten »inneren Kardanring«, gelagert, der seinerseits an den zu den Lagern des Kreisels entgegengesetzten Polen in einem größeren, dem »äußeren Kardanring« lagert. Der in unserer Skizze horizontal liegende innere Kardanring läßt sich mit dem Kreisel um eine horizontale Achse im äußeren Ring schwenken. Der äußere Ring ist mit einer vertikal stehenden Achse im Kreiselgehäuse gelagert und kann sich um diese Achse drehen. Wie man aus der Skizze oder mit einiger Überlegung leicht erkennt, kann der Kreisel infolge der beiden Ringe der kardanischen Aufhängung in jede beliebige Lage gebracht werden. Umgekehrt kann er seine Achse starr im Raum festhalten, wenn sein Gehäuse in beliebiger Richtung gedreht wird.

Will man einen solchen kardanisch aufgehängten Kreisel zur Steuerung verwenden, so muß man dafür sorgen, daß er die Änderung der Lage seines Gehäuses gegenüber der von ihm selbst festgehaltenen starren Drehachse weitermelden kann. Hierfür versieht man die Achse, mit der der innere Kardanring im äußeren

und die Achse, mit der der äußere Kardanring im Gehäuse befestigt ist, mit Abgriffen, die jede Verdrehung eines solchen Ringes als einen elektrischen Impuls weitermelden. In ihrer einfachsten Form sind derartige Abgriffe nichts weiter als kleine ver-



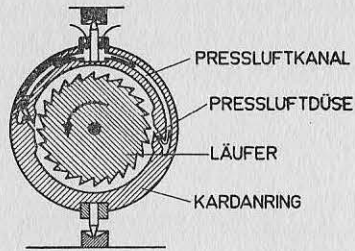
änderliche elektrische Widerstände, wie die »Potentiometer«, die zur Lautstärkeregelung im Radioapparat dienen. Deren Widerstandswert wird durch einen Schleifer abgegriffen und verändert sich bei jeder Drehung des Rahmens. Die von einem solchen Abgriff abgegebene elektrische Spannung ist also ein Maß dafür, wie weit sich der Kardanrahmen aus seiner ursprünglichen Lage herausgedreht hat, das heißt, wie weit sich das Gehäuse des Kreisels und, da dieses in der Rakete fest eingebaut ist, die ganze Rakete um die starr im Raum liegende Achse des Kreisels gedreht haben.

Mit einem solchen »Kurskreisel« kann man die Schwenkung in zwei Ebenen der Rakete feststellen, dagegen nicht eine Schwenkung in der dritten Ebene, also eine Drehung, die die Rakete um die Kreiselachse

selbst ausführt. Will man alle drei Ebenen überwachen, so braucht man mindestens einen zweiten Kreisel. Aus zwei Kreiseln bestand die Steuerung der V2, sie wurden damals »Horizont« und »Vertikant« genannt. Mit dem Horizont konnte die Drehung um die Querachse gemessen werden, während der Vertikant zwei Abgriffe hatte und die Drehung um die Hoch- und die Längsachse der Rakete meldete.

Die Genauigkeit eines Kreisels wird im allgemeinen um so besser, je höher seine Drehgeschwindigkeit ist. In sehr primitiven Steuerungen, wie man sie für Kurzstreckenraketen anwendet, genügt es oft, nur die Drehungen um die Längsachse zu überwachen. Man braucht also nur einen Kreisel, und der Antrieb dieses Kreisels kann ganz einfach sein. In solchen Fällen reicht es aus, wenn man ihn wie einen Spielkreisel mit der Schnur einmal mit der Hand aufzieht und dann die Rakete startet. Der Schwung, der im Kreisel steckt, genügt für die Zeit des Fluges.

Auch die sogenannten Pulverkreisel begnügen sich damit, den Kreisel einmal anzuwerfen und dann auslaufen zu lassen. Das Anwerfen geschieht hier mit einigen kleinen Pulvertreibsätzen, die den Kreiselkörper in Rotation versetzen, nachdem sie kurz vor dem Start der Rakete gezündet worden sind.



Aus der Flugzeugtechnik wurden die sogenannten Preßluftkreisel übernommen; auf ihrem Körper ist eine kleine Turbine angebracht, die ständig von einer Preßluftdüse in Rotation gehalten wird.

Die modernen Kreisel sind im allgemeinen elektrisch angetrieben, das heißt, der Kreisel stellt den Anker eines Elektromotors dar, während der Stator im inneren Kardanring befestigt ist. Die Drehgeschwindigkeit der Kreisel ist außerordentlich hoch. Umdrehungszahlen von 20000 bis 100000 pro Minute sind keine Seltenheit.

Ein ideal arbeitender Kreisel müßte völlig symmetrisch aufgebaut sein, dürfte keine Änderungen seiner Umdrehungsgeschwindigkeit erleiden, und vor allem müßten die Lager, mit denen die Kardanringe miteinander und im Gehäuse befestigt sind, gar keine Reibung besitzen. Doch ist es notwendig, dem Kreisel Energie zuzuführen und außerdem an den Kardanachsen Abgriffe anzubringen, um die Lage des Kreisels festzustellen. Alle diese Maßnahmen verursachen Reibung in den Lagern, und diese Reibung ist der Grund dafür, daß die Kreiselachse nicht, wie es die physikalische Forderung wäre, fest im Raum steht,

sondern sich allmählich dreht, daß sie auswandert. Hierdurch entstehen natürlich Meßfehler. Die Auswanderung der Kreiselachse täuscht eine Abweichung der Rakete von ihrer Soll-Lage vor, die sich auf die Steuerung der Rakete und damit auf die Genauigkeit ihrer Ankunft im Ziel auswirken kann.

Da es Steuerungssysteme gibt, bei denen die Treffgenauigkeit ausschließlich davon abhängt, ob die Kreisel akkurat arbeiten, haben sich die Techniker in den Jahren nach dem Kriege bemüht, die Güte der Kreisel erheblich zu verbessern. Mit allerhöchster Präzision in der Teilefertigung und durch rigorose Maßnahmen zur Erhöhung der Sauberkeit bei der Montage der Kreisel ist es einigen Werken gelungen, Kreiselgeräte mit ungeahntem, bis dahin unbekanntem Stehvermögen zu fertigen. Ein normaler Kreisel, an den keine besonderen Anforderungen gestellt werden, wandert in einer Minute um etwa eineinhalb Grad aus, und zwar geschieht das unter den durch das Rütteln und die Beschleunigung verschärften Bedingungen, die in einer Rakete herrschen können. Die hochgezüchteten Kreisel, die für die interkontinentalen Raketen entwickelt wurden, wandern um nur 0,0083 Grad in der Stunde aus. Diese geringe Auswanderung ist kaum vorstellbar. Man kann sie sich anschaulich machen, wenn man sich ausrechnet, wie lange es dauert, bis ein Kreisel sich infolge dieser Auswanderung einmal ganz herumgedreht hat: nämlich fünf Jahre.

Um diese unwahrscheinlich klingenden Genauigkeiten beizubehalten, müssen die Kreiselgeräte sofort nach ihrer Fertigstellung völlig von allen äußeren Einflüssen abgesperrt werden. Zu diesem Zweck lötet man sie in Blechbüchsen ein und füllt diese mit einem Gas, das keine große Reibung erzeugt und keinerlei chemischen Angriff auf die Werkstoffe des Kreisels ausübt.

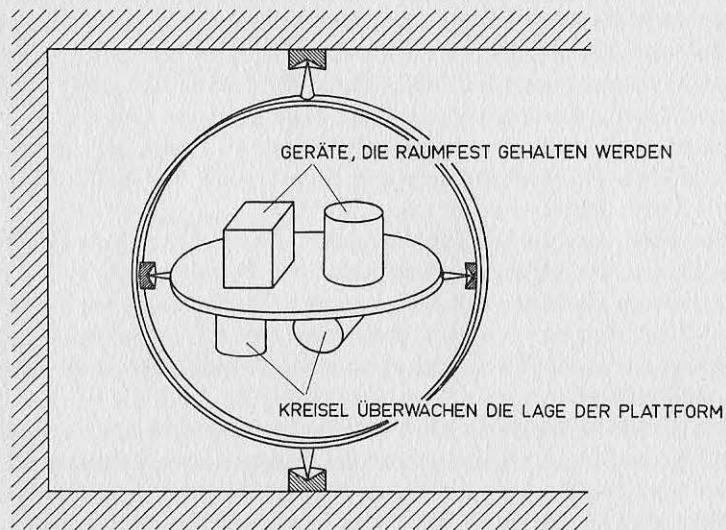
Ein Kreisel hält seine Achsrichtung fest im Raume, er legt also mathematisch eine Linie im Raum fest, an der man sich jeweils darüber orientieren kann, welche Lage die Rakete hat. Für manche Vorgänge, insbesondere aber für die später zu beschreibende Beschleunigungsmessung, ist es nicht nur notwendig, zur Orientierung eine solche *Linie* festzuhalten, sondern *Geräte* im Raume so zu fixieren, daß sie sich nicht mit der Rakete drehen können. Dieses Vorhaben ermöglicht die stabilisierte Plattform.

Eine stabilisierte Plattform ist so etwas wie ein Raketenmodell. Eine Metallplatte, auf der man Geräte montieren kann, ist, wie unsere sehr stark vereinfachte Prinzipskizze zeigt, kardanisch aufgehängt, so daß sie sich frei in jeder Richtung drehen könnte. Sie trägt zwei oder drei

Kreisel, die ihre Lage überwachen und durch ihre Kommandos dafür sorgen, daß die Plattform immer wieder in ihre ursprüngliche Ausgangslage zurückgeführt wird.

Da eine solche Plattform nicht wie die Rakete dem Luftwiderstand und dem Auftrieb ausgesetzt ist und da sie außerdem viel kleiner und leichter ist als die Rakete, wird sie natürlich mit viel größerer Genauigkeit in den Ausgangszustand zurückgebracht, als man sie bei der Steuerung einer Rakete erreichen kann.

Die stabilisierte Plattform läßt sich als ein fremdgesteuerter Kreisel betrachten, an dem man die Drehrichtung der Rakete abgreifen, das heißt, an dem man sich bezüglich der Lage der Rakete im Raum orientieren kann. Man kann aber auch direkt auf diese Plattform kleine Geräte montieren, die während der Antriebsbahn eine feste Richtung im Raum haben sollen. Das ist der Hauptzweck, dem die Plattform dient.

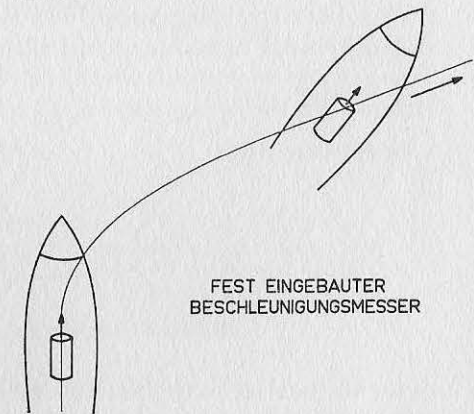


Die Entwicklung stabilisierter Plattformen, die bereits während des Krieges in Deutschland aufgenommen wurde, hat gewaltige Fortschritte gemacht. Insbesondere ist es gelungen, sehr kleine stabilisierte Plattformen zu entwickeln, wie man es verstanden hat, kleine Kreisel zu bauen. Die während des Krieges in Deutschland gebauten stabilisierten Plattformen waren so groß und unförmig, daß es sogar Schwierigkeiten machte, sie in der großen Rakete V2 vernünftig unterzubringen.

Eine neuere Entwicklung ist aber bereits so stark miniaturisiert, daß sie nicht viel größer ist als früher ein einzelner Kreisel. Die ganze Plattform ist in einem Zylinder untergebracht, der weniger als 30 Zentimeter lang ist und etwas über 20 Zentimeter Durchmesser hat. Trotz dieser erstaunlichen Verkleinerung sind die Leistungen der Plattform gegenüber den früheren Ausführungsformen noch stark gestiegen. Die stabilisierte Plattform behält ihre Richtung mit sehr großer Genauigkeit bei, was zum Teil natürlich auf die verbesserte Genauigkeit der sie steuernden Kreisel zurückzuführen ist: sie wandert unter Betriebsbedingungen nur 0,15 Grad in einer Stunde aus. Da die Plattform während der Antriebsbahn nur einige Minuten gebraucht wird, kann man sich leicht ausrechnen, wie gering die Abweichungen hier sind.

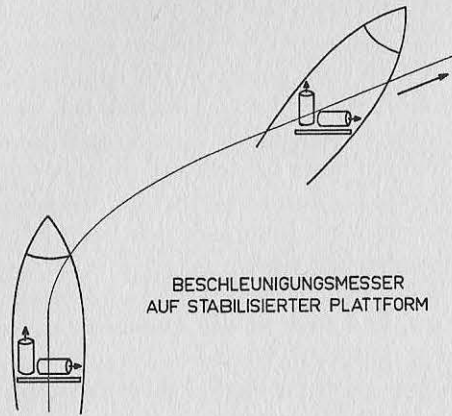
Wie wir wissen, wandert ein Kreisel, auf dessen Drehachse ein Moment ausgeübt wird, nach der Seite aus, und zwar ist die Auswanderungsgeschwindigkeit diesem Moment proportional. Wir haben uns außerdem schon überlegt, daß der Winkel, um den dieser Kreisel auswandert, ein Maß für die Geschwindigkeit der Rakete ist. Derartige Beschleunigungsmesser wurden während des Krieges schon in die V2 eingebaut und unter dem Namen Integrationsgerät in großen Mengen verwendet. Sie hatten das Anwachsen der Raketengeschwindigkeit zu verfolgen und bei der Sollgeschwindigkeit den Antrieb abzuschalten.

Die Messung solcher bordfest angebrachten Integrationsgeräte ist nicht besonders genau. Wir erinnern uns, daß die Rakete auf ihrer Antriebsbahn während des Senkrechtaufstieges überhaupt nicht und nach der Umlenkung nur ungefähr mit der Nase in ihrer endgültigen Flugrichtung fliegt. Ein Integrationsgerät, dessen Meßachse in Raketenlängsrichtung liegt, mißt also gar nicht die Raketenbeschleunigung in der endgültigen Flugrichtung und kann daher auch nicht die wahre Raketengeschwindigkeit ermitteln. Genauere Messungen sind möglich, wenn man statt eines Integrationsgerätes zwei verwendet und sie auf einer kreiselstabilisierten Plattform aufbaut, so daß sie unabhängig von allen Raketenbewegungen stets die vertikale und die horizontale Beschleunigung



Die Messung solcher bordfest angebrachten Integrationsgeräte ist nicht besonders genau. Wir erinnern uns, daß die Rakete auf ihrer Antriebsbahn während des Senkrechtaufstieges überhaupt nicht und nach der Umlenkung nur ungefähr mit der Nase in ihrer endgültigen Flugrichtung fliegt. Ein Integrationsgerät, dessen Meßachse in Raketenlängsrichtung liegt, mißt also gar nicht die Raketenbeschleunigung in der endgültigen Flugrichtung und kann daher auch nicht die wahre Raketengeschwindigkeit ermitteln. Genauere Messungen sind möglich, wenn man statt eines Integrationsgerätes zwei verwendet und sie auf einer kreiselstabilisierten Plattform aufbaut, so daß sie unabhängig von allen Raketenbewegungen stets die vertikale und die horizontale Beschleunigung

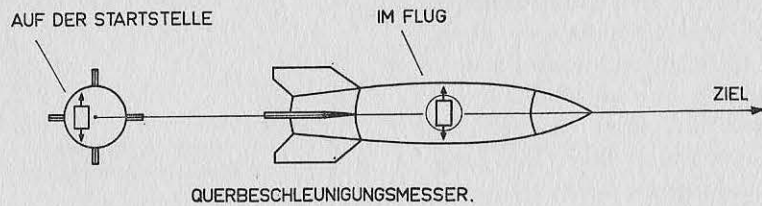
gung messen. Aus dieser Messung entstehen durch das Auswandern des Kreisels die horizontale und vertikale Teil-Geschwindigkeit. Aus den beiden Komponenten kann man mit einem



Rechengerät die wahre Fluggeschwindigkeit der Rakete zusammensetzen und den Antrieb abschalten, wenn der Sollwert erreicht ist.

Setzt man einen Beschleunigungsmesser so auf die stabilisierte Plattform, daß er in der Querachse mißt, so liefert er als Meßergebnis die Quergeschwindigkeit der Rakete. Nun soll aber eine ballistische Fernrakete gar keine Quergeschwindigkeit besitzen. Sie soll sich in einer

Ebene auf ihr Ziel zubewegen. Jede Quergeschwindigkeit, die auftritt, bedeutet ein Verlassen dieser Ebene und damit ein Abweichen von der Zielrichtung. Besser als mit einem normalen Kreisel, der ja nur die augenblickliche Lage der Rakete um ihren Schwerpunkt zeigt, kann also ein solcher Beschleunigungsmesser und Integrator die Abweichung einer Rakete von der Zielrichtung feststellen, allerdings nur, wenn er genau genug zu messen imstande ist. Die Beschleunigungsmesser, die Ende des Krieges zur Verfügung standen, hätten eine genaue Navigation nach



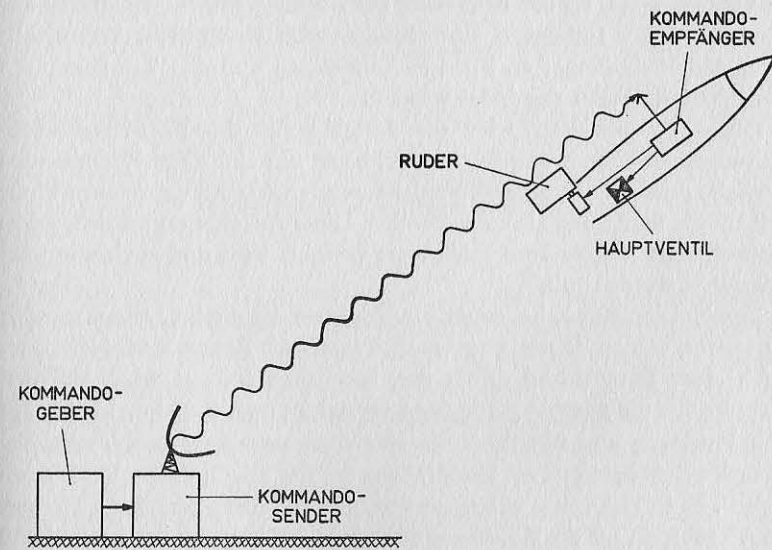
dieser Methode nicht erlaubt. Heute dagegen, infolge der Fortschritte, die mit den Kreiselgeräten erzielt worden sind, ist es möglich, eine Navigation aufzubauen, die sich völlig auf die Angaben solcher Beschleunigungsmesser verläßt.

Einige Zahlen mögen dies illustrieren. Der Meßfehler eines modernen Beschleunigungsmessers beträgt 1,5 Zehntausendstel der Erdbeschleunigung. Wollte man also mit ihm die Erdbeschleunigung messen, so ergäbe

sich hierbei eine Genauigkeit von wenig mehr als einem Zehntel pro Tausend. Eine Rakete, die sich mit einer so geringen Beschleunigung seitlich aus ihrer Bahnebene herausschiebt, hat nach einer Minute Flugzeit erst eine Abweichung von 17 Metern von dieser Sollebene. Diese Genauigkeit ist aber noch übertroffen worden. Die neuesten Geräte sind in der Lage, ein Hunderttausendstel der Erdbeschleunigung zu messen, also die eben genannte Zahl noch einmal um den Faktor 10 zu verbessern.

Funkgeräte

Eine leicht überschaubare Verbindung der Rakete mit dem Boden über den Funkweg stellt das Kommandoübertragungsverfahren dar. Ein in der Nähe der Startstelle aufgestellter starker Sender schickt Anweisungen an verschiedene Bordgeräte der Rakete hinauf. Ein Bord-



empfänger nimmt sie auf, entschlüsselt sie und leitet sie den gewünschten Bordgeräten als Kommandos zu. Die einfachste Form solcher Kommandos besteht in einer Ja-Nein-Aussage. Jeder Befehlsimpuls löst nach seinem Eintreffen an Bord einen einmaligen Vorgang aus. Für ein solches Kommandoübertragungsverfahren gibt es viele Aufträge.

Werden zum Beispiel mit einem größeren Raketentyp die ersten Versuche angestellt, so baut man für den Fall, daß die Rakete in eine Richtung fliegt, die nicht vorgesehen ist und in der sie Schaden anrichten könnte, einen Kommandoempfänger ein. Er übermittelt der Rakete in einem solchen Notfall etwa das Kommando »Brennschluß« und schaltet damit den Antrieb ab, oder er bringt die Rakete über eingebaute Sprengsätze zur Explosion.

Die Übertragung des Kommandos »Brennschluß« ist wichtig für ballistische Fernraketen, deren Geschwindigkeit vom Boden aus gemessen wird. Hierbei kommt es darauf an, der Rakete den Befehl nicht nur sicher, sondern auch rasch zu übermitteln, da die gemessene Raketen- geschwindigkeit, die das Kommando ausgelöst hat, durch Wartezeiten verfälscht wird.

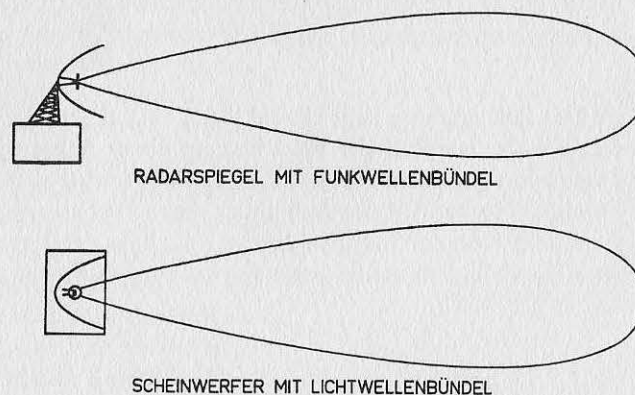
Bei der vierstufigen Rakete für den Explorer wurden die zweite, dritte und vierte Stufe gezündet, nachdem man auf Grund der Bahn der ersten Stufe den günstigsten Zeitpunkt dafür ausgerechnet hatte. Auch diese Zündung mußte, da die Rechnung am Boden erfolgte, von einem auf dem Erdboden stehenden Kommandosender übermittelt, von einem Kommandoempfänger an Bord aufgenommen und den Zündpatronen der Feststoffraketen zugeführt werden.

Etwas komplizierter wird die Aufgabe für das Kommandoübertragungsverfahren, wenn es sich nicht nur um einmalige Kommandos handelt, sondern um Steuerkommandos, die während der ganzen Flugzeit auf die Steuerung einwirken sollen. Diese Aufgabe ergibt sich, wenn die Bahn der Rakete vom Boden aus verfolgt wird und auch von dort korrigiert werden soll.

Fernlenkverfahren, bei denen ein Bodensender die Steuerkommandos aussendet, werden immer angewendet, wenn die Rakete nach Sicht oder nach einer Funkortung durch den Menschen gelenkt wird. Bei den Raketen für die Panzerbekämpfung verzichtet man manchmal sogar auf den Funkweg und überträgt die Kommandos über einen Draht. Bei Flugabwehrraketen ist die Handsteuerung, das »Knüppeln«, kaum noch üblich, es ist fast völlig von automatischen Verfahren verdrängt worden. Den Verfahren für die Kommandoübertragung haften keine besonderen Eigentümlichkeiten an. Einem Sender und Empfänger ist es ziemlich gleichgültig, welcher Art die »Information« ist, die er zu übertragen hat – ob Sprache oder Telegraphiezeichen oder die ihnen sehr ähnlichen Kommandos. Daher findet man in der Kommandoübertragungstechnik auch alle für die normale Nachrichtentechnik erfundenen Methoden, der Funkwelle die Information einzuprägen, also alle Methoden der »Modu-

lation«. Im allgemeinen wird das Kommando verschlüsselt heraufgegeben, das heißt, es wird dagegen gesichert, daß es durch zufällige oder willkürliche Beeinflussung fälschlicherweise ausgelöst werden kann. Allzu kompliziert darf man die Verschlüsselung aber nicht immer machen, da sonst die Auswertung an Bord der Rakete zu lange dauert, bestimmte Kommandos, wie das Brennschlußkommando, jedoch sofortige Ausführung verlangen.

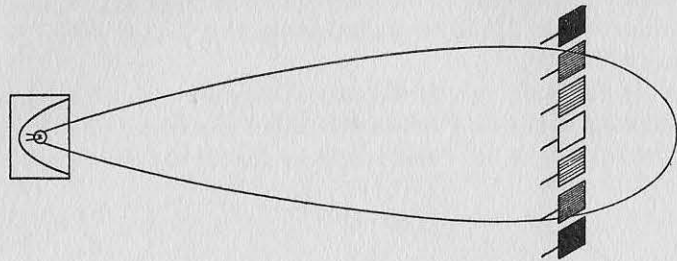
Für die Fernlenkung von Raketen ebenso wie für die Ortung fremder Flugkörper sind die Funk-Peilverfahren von Bedeutung. Eines der bekanntesten Geräte der Funktechnik ist der für das Peilen mit kurzen



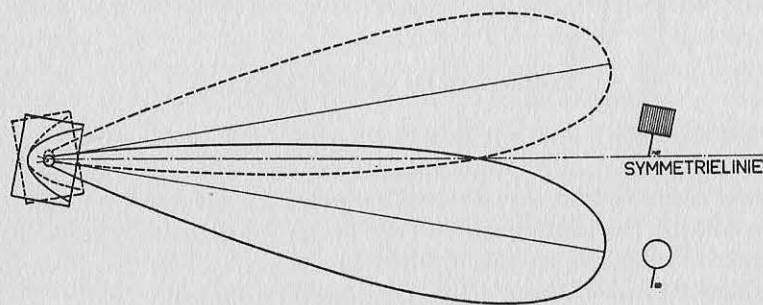
Wellen benutzte Radarspiegel. Ein Radarspiegel sieht wie eine Vergrößerung eines Scheinwerferspiegels aus und wirkt auch auf die für unser Auge unsichtbaren Funkwellen genau wie ein Autoscheinwerfer. Er faßt die Funkwellen, die von der in der Spiegelachse angebrachten Antenne ausgehen, zu einem Strahl zusammen wie der Scheinwerferspiegel die Lichtstrahlen, die von der Lampe ausgehen.

Stellen wir in den Kegel eines Scheinwerfers quer zur Achse des Lichtbündels eine Reihe kleiner Papptafeln, so ist die mittelste am hellsten erleuchtet, während die Helligkeit zum Rande hin rasch abfällt. Man könnte an der Helligkeit eines Täfelchens feststellen, ob es sich mitten im Scheinwerferstrahl auf seiner Symmetrieachse oder am Rande befindet. Diese Methode ist allerdings ziemlich ungenau, denn die Helligkeit der Täfelchen hängt nicht nur von ihrer seitlichen Verschiebung, sondern auch von ihrer Entfernung vom Scheinwerfer ab, und die Auswertung einer solchen Messung wäre recht schwierig. In der Praxis sind genauere Methoden notwendig.

Bisher stand der Scheinwerfer still. Die bisherige Mittelachse des Strahlenbündels wählen wir nun zur Symmetrieachse und schwenken den Scheinwerfer mit seinem Lichtbündel in raschem Rhythmus hin und her, von einer Endlage in die andere. Die Mittelachse des Lichtbündels,



also die stärkste Beleuchtung, liegt einmal links, einmal rechts von der Symmetrieachse. Das quadratische Täfelchen auf dieser Achse wird nie von der Mittelachse getroffen, also auch nie mit der stärksten Beleuchtung angestrahlt. Wie man aus der Abbildung aber sofort erkennt, ist es gleich hell erleuchtet, ob der Strahl nun rechts oder links der Symmetrieachse liegt; seine Helligkeit macht keine Schwankungen durch. Anders

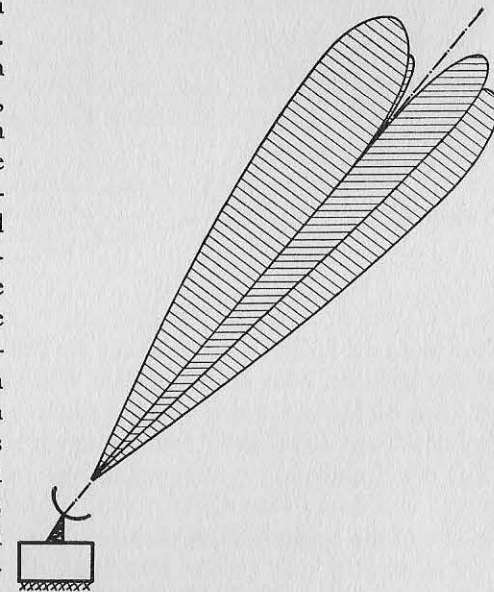


ist es mit dem runden Täfelchen, das nicht auf der Symmetrieachse liegt. Zeigt der Scheinwerfer nach rechts, so ist es im vollen Licht, zeigt er nach links, so ist es fast völlig dunkel. Die Helligkeitsschwankung ist also ein Maß dafür, ob und wie weit ein Täfelchen von der Symmetrieachse entfernt ist. Die Übertragung auf das Radargerät ist einfach. Das Funkwellenbündel aus dem Radarspiegel wird in raschem Takt hin und her geschwenkt. Hierzu braucht man nicht den ganzen Spiegel, sondern nur die Antenne zu bewegen – genau wie es beim Scheinwerfer genügen würde, mit der Glühbirne zu wackeln. In dem schwenkenden

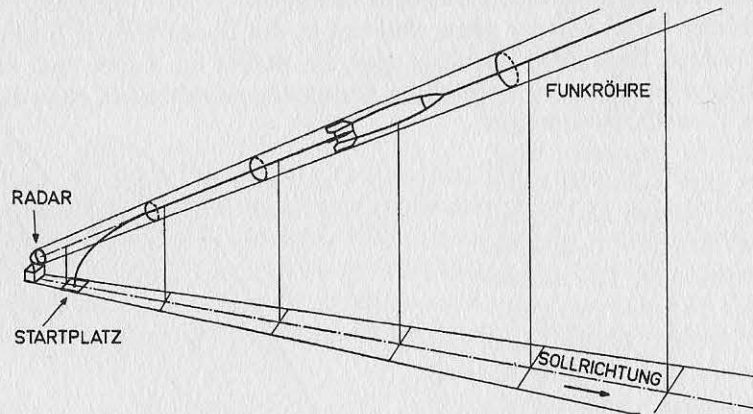
Funkstrahl fliegt die Rakete mit einem Empfänger an Bord. Der Empfänger hat (ähnlich wie die Täfelchen) einen dauernd schwankenden Empfang – außer wenn die Rakete sich genau auf der Symmetrielinie befindet. Die Schwankung des Funkempfangs zeigt also die Abweichung der Rakete von der Symmetrielinie, ihrer Sollflugrichtung, an. Diese Anzeige kann man an der Steuerung der Rakete wirksam werden lassen und die Rakete wieder auf die Symmetrielinie zurückbringen, sie also mit Hilfe eines solchen Peilempfängers zwingen, in einer durch die Bodenantenne festgelegten Leitebene zu fliegen.

Bisher haben wir das ganze Problem in der Ebene unseres Buches betrachtet. In Wirklichkeit fliegt aber die Rakete im Raum, und wir haben versucht, auch die räumliche Anordnung zu skizzieren, ohne daß das Vorstellungsvermögen allzusehr strapaziert wird. Um eine Rakete im Raum sicher steuern zu können, muß man zwei Leitebenen kombinieren. Die Rakete fliegt im Schnittpunkt dieser beiden Ebenen und wird durch den Peilempfänger immer wieder auf die Schnittlinie gezogen. Sie benimmt sich dabei genauso wie ein Hase, der sich auf der Landstraße im Scheinwerferstrahl eines Autos gefangen hat und nicht nach rechts oder links in den Schatten ausbrechen möchte. Das Ergebnis dieser Steuerung in zwei Leitebenen kann man sich auch so vereinfachen, als würde die Rakete in einem viele Kilometer langen Kanonenrohr, der »Funkröhre«, geführt. Die Leitstrahlstation ist hinter der Startstelle aufgebaut und sendet die Funkröhre in die Flugrichtung. Die Rakete startet und wird nach kurzem Senkrechtaufstieg in die Funkröhre eingelenkt, in der sie dann bis zum Brennschluß verbleibt.

Eine Umkehrung des Peilverfahrens ergibt sich, wenn man die Bodenstation wirklich als Radargerät verwendet und mit ihr nur feststellt, wo



die Rakete sich im Augenblick befindet. Das kann man dadurch unterstützen, daß man der Rakete statt eines Peilempfängers einen »Peilsender« beigibt, der ständig eine Hochfrequenzwelle abstrahlt und dadurch den Ort der Rakete deutlich markiert. Am Boden wird das gleiche Antennensystem verwendet, das in unserem Beispiel für die Aussendung des Peilstrahles diente, diesmal nur nicht zum Senden, sondern für den Empfang des »Peilsenders«. Dieses Antennensystem empfängt den Peilsender einmal laut, einmal leise, je nachdem, in welcher Stellung er gerade ist.

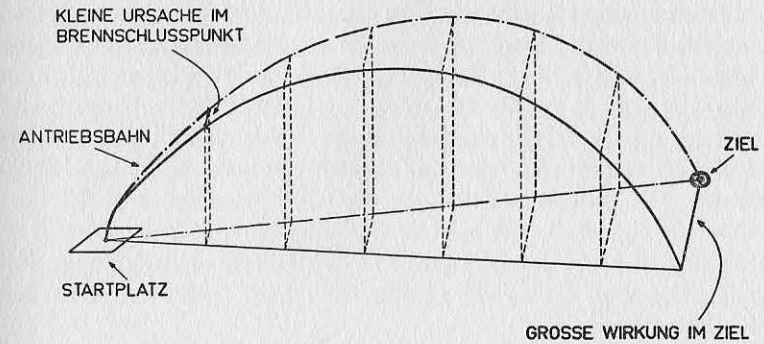


Nur wenn die Rakete sich genau auf der Peillinie befindet, schwankt der Empfang nicht. Man kann auf diese Weise feststellen, wie weit und in welcher Richtung sie sich von ihr entfernt hat, und es ist dann nicht weiter schwer, aus dieser Abweichung ein Kommando zu errechnen, es über die Kommandoübertragungsanlage an Bord der Rakete zu übertragen und dort so auf die Steuerung wirken zu lassen, daß die Rakete wieder in die Leitlinie zurückkehrt.

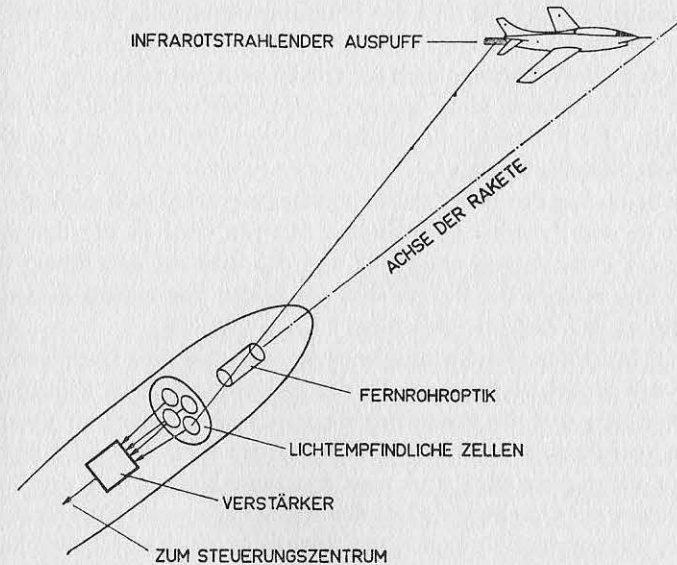
Wie wichtig eine genaue Steuerung der Antriebsbahn gerade von ballistischen Fernraketen ist, zeigt unsere Skizze, die natürlich in der gleichen Form auch für andere Steuerverfahren ohne Funkweg gilt. Die Antriebsbahn von ballistischen Fernraketen ist immer nur ein kleiner Bruchteil – weniger als ein Zehntel – der gesamten Flugbahn. Fehler, die im Brennschlußpunkt auftreten, vervielfachen sich mit dem Faktor zehn und mehr im Ziel. Bei den großen Flugweiten sind jedoch nur sehr geringfügige prozentuale Fehler im Ziel erlaubt. Daraus erklären sich die ungemein hohen Anforderungen an die Steuerverfahren.

Eine besondere Sorte von Steuergeräten benötigen Raketen, bei denen

eine besonders hohe Treffgenauigkeit auf ein bewegliches Ziel erforderlich ist, also Flugabwehrraketen. Mit Hilfe des beschriebenen Peilverfahrens kann man eine Flugabwehrrakete ziemlich dicht an das Ziel



heranführen. Auf dem letzten Stück der Bahn reicht aber die Genauigkeit, mit der man das Ziel und die Rakete vom Boden aus peilen kann,



nicht aus, um die Rakete wirklich zum Treffen zu führen. Hier müssen Geräte eingreifen, die in der Rakete selbst untergebracht sind.

Diese Geräte sollen das Ziel feststellen, es anpeilen und die Rakete nach dieser Peilung steuern. Derartige »Zielsuchköpfe«, wie man sie

nennt, können nach ganz verschiedenen Prinzipien arbeiten. Es gibt unter ihnen optische Geräte, mit denen das Ziel aufgefaßt und verfolgt wird. Von diesen haben sich Geräte, die für die unserem Auge nicht mehr sichtbaren Strahlen jenseits des Rot, die »infraroten« Strahlen, empfindlich sind, besonders bewährt. Infrarote Strahlung sendet jeder warme Körper aus, also auch ein Flugzeugauspuff. Sie durchdringt Nebel und Wolken besser als sichtbares Licht. Ein Infrarot-Zielsuchkopf besitzt eine Fernrohr-Optik, mit der das Bild des strahlenden Flugzeugauspuffs auf eine Platte geworfen wird, auf der sich vier lichtempfindliche Zellen befinden. Die getroffene Zelle gibt wie ein fotografischer Belichtungsmesser ein Signal ab, das nach Verstärkung dem Steuerungssystem zugeführt wird. Liegt das Ziel genau in der Raketen-Achsrichtung, dann melden alle vier Zellen die gleiche Helligkeit, und es entsteht kein Steuerkommando.

In der Praxis sind derartige Zielsuchköpfe viel komplizierter aufgebaut, als wir es hier schildern können. Obwohl sie nur für militärische Anwendung entwickelt wurden, bilden sie doch die Grundlage der Astronavigation, bei der statt des Flugzeugauspuffs die Sonne oder ein anderer Himmelskörper angepeilt wird. Die Astronavigation ist aber ein wichtiges Steuerungsverfahren, auch für friedliche Anwendungen.

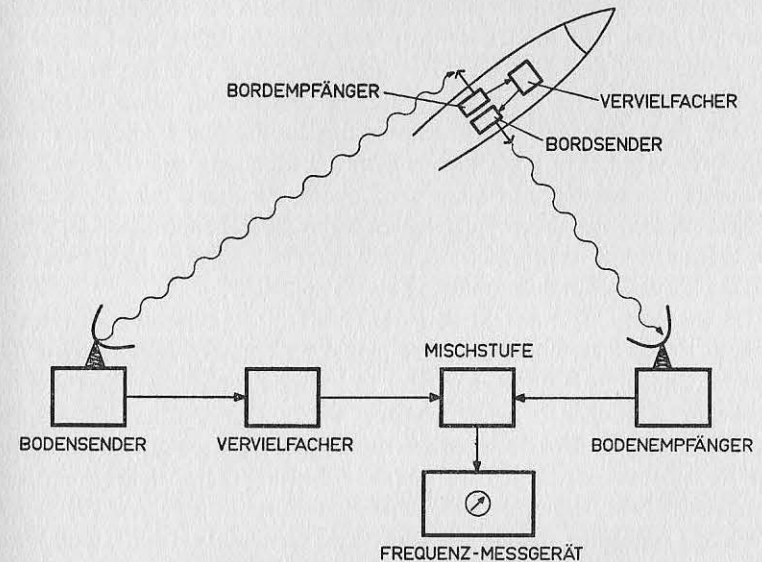
Statt mit infrarotem Licht können Zielsuchgeräte auch mit den längeren Wellen der Radartechnik arbeiten. Hierzu wird das Ziel mit einem Radarscheinwerfer bestrahlt.

Eine besondere Form des Zielsuchgerätes versucht einen mitfliegenden Piloten in der Rakete nachzuahmen. Hierfür wird in die Spitze der Rakete ein Fernsehgerät eingebaut und das Bild auf den Boden übertragen. Der »Pilot« der Rakete sitzt am Boden vor seinem Bildschirm und steuert das Ziel im Bildschirm an.

Das Prinzip der Geschwindigkeitsmessung mit dem Doppler-Effekt haben wir bereits besprochen. In der Darstellung dieses Prinzips war vorausgesetzt, daß die Frequenz, die von einem Sender an Bord der Rakete ausgestrahlt wird, am Boden mit der Frequenz eines anderen Senders verglichen wird und man aus dem Unterschied der beiden Frequenzen die Geschwindigkeit der Rakete ermittelt. Nun ist es sehr schwer, zwei Sender zu bauen, die genau die gleiche Frequenz haben, oder sich zumindest während längerer Zeit, etwa während der Flugzeit einer Rakete, so konstant verhalten, daß die Differenz ihrer Frequenzen bis auf winzige Bruchteile unverändert bleibt.

Deshalb ist das Prinzip des Doppler-Effektes in der anschaulichen Form, in der wir es kennengelernt haben, technisch nicht mit genügender

Genauigkeit zu verwirklichen. Doch kann man die Natur hier überlisten. Wenn man einen Funkwellenstrahl zur Rakete hinaufschickt und ihn dort reflektiert, also wieder aussendet, dann kann man ihn auf dem Boden wieder empfangen und mit dem vom Boden ausgesendeten Funkstrahl vergleichen. Stände die Rakete still, so wäre die Frequenz des ausgesendeten Strahles natürlich ganz genauso groß wie die des von der Rakete reflektierten Strahles. Da die Rakete aber vom Sender fortfliegt, tritt der Doppler-Effekt ein, und die Schwingungszahl der am Boden



empfangenen Funkwellen ist niedriger als die der zur Rakete hinaufgesendeten. Da bei diesem Verfahren nur ein Sender mit ins Spiel kommt, können die obengenannten Schwierigkeiten nicht auftreten, und die Meßgenauigkeit kann außerordentlich hochgetrieben werden.

Beobachtet man mit einem solchen Apparat fremde Flugkörper, so muß man sich mit dem Teil der Hochfrequenzwellen begnügen, der von den Metallteilen des Flugkörpers zurückgespiegelt wird. Bei der Raketensteuerung verläßt man sich nicht auf diese zufälligen Rückspiegelungen, sondern empfängt mit einem Funkempfänger an Bord der Rakete die Sendung vom Boden und überträgt sie einem Bordsender, der sie wieder zur Bodenstation abstrahlt. Auf diese Weise kann man aus der Rakete einen Funkstrahl mit viel stärkerer Energie abstrahlen, als er sich nach dem einfachen Reflexionsprinzip ergäbe.

Allerdings muß man auch hier wieder einen kleinen Trick anwenden. Würde man die gleiche Frequenz abstrahlen, die man empfangen hat, so würde die Bordsendeantenne die dicht benachbarte Empfangsantenne in der Rakete völlig mit Beschlag belegen, und der Empfänger könnte gar nicht mehr die ursprünglich vom Boden ausgesendete Frequenz aufnehmen. Der Trick besteht darin, daß man die vom Boden herkommende Frequenz nach dem Empfang vervielfacht, zum Beispiel verdoppelt. Wenn also der Bodensender eine Frequenz von 100 MHz aussendet, erzeugt man nach dem Empfang an Bord hieraus die doppelte Frequenz von 200 MHz und sendet sie aus. Der Doppler-Effekt wird durch die Vervielfachung nicht berührt. Die neue Frequenz von 200 MHz kann man nun über eine Bord-Sendeantenne ausstrahlen, ohne Gefahr zu laufen, daß der für die Bodensendung bestimmte Empfänger »zugestopft« wird. Am Boden kann man die Frequenz des Bodensenders ebenfalls verdoppeln und diese verdoppelte Frequenz mit der von der Rakete zurückgesendeten vergleichen. Wenn die Rakete stillstände, wären die beiden Frequenzen gleich; da die Rakete sich bewegt, ist die von der Rakete zurückgesendete Frequenz etwas niedriger.

Diesen Frequenzunterschied, der ein Maß für die Geschwindigkeit der Rakete ist, gilt es jetzt möglichst genau zu messen. Hierzu wird das gleiche Verfahren benutzt, mit dem in jedem Rundfunkapparat die sogenannte Zwischenfrequenz erzeugt wird: Die beiden Frequenzen werden in einer Elektronenröhre miteinander so geschickt gemischt, daß sie selbst verschwinden und aus der Schaltung nur noch ihr Frequenzunterschied herauskommt. Diese Differenzfrequenz wird einem Frequenzmeßgerät zugeleitet, das sie mit sehr hoher Genauigkeit mißt, womit die Messung der Raketengeschwindigkeit geschehen ist. Meßgenauigkeiten von einem Zehntausendstel des Meßwertes sind bei diesem Verfahren keine außergewöhnlichen Leistungen.

Die Messung der Raketengeschwindigkeit ist nur ein Teil, wenn auch der schwierigere der Aufgabe, die diese Anlage hat. Der andere Teil ist die Abschaltung des Antriebes, sobald die »richtige« Geschwindigkeit erreicht ist. Hierzu wird der Frequenzmesser mit einem (elektronischen) Schalter versehen, der – je nach der Entfernung, die die Rakete überbrücken soll – auf eine bestimmte Frequenz eingestellt wird: In dem Augenblick, in dem dieser Wert von der mit der Geschwindigkeit der Rakete ständig steigenden Frequenz überschritten wird, schaltet der Schalter den Kommandosender ein, und dieser überträgt das Kommando »Brennschluß« zur Rakete.

Das Doppler-Verfahren hat nicht nur für die Messung der Raketen-

geschwindigkeit Bedeutung, es läßt sich auch noch für die Beobachtung und Vermessung der Raketenbahn ausnutzen. Während bei den Beschleunigungsmessern eine Integration der Beschleunigung notwendig ist, um die Geschwindigkeit zu erhalten, ist bei der Messung nach dem Doppler-Verfahren die Geschwindigkeit bereits das erste Ergebnis der Messung. Auch diesen Meßwert kann man durch Integration umformen. Integration heißt, wie wir wissen, Zusammenzählen der in aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten auftretenden Werte. Hat eine Rakete in einem bestimmten Zeitabschnitt, einer bestimmten Sekunde, eine Geschwindigkeit von 800 m/s, so legt sie in dieser Sekunde einen Weg von 800 Metern zurück. Zählt man nun die Geschwindigkeitswerte in allen aufeinanderfolgenden Sekunden zusammen, so hat man in Wirklichkeit die in diesen Sekunden zurückgelegten Wege zusammengezählt, erhält also die Gesamtentfernung, die von der Rakete durchflogen wurde. Der Mathematiker sagt: Integration der Geschwindigkeit liefert den Weg. Eine derartige Summierung ist aber für Meßwerte, die in der Form von Frequenzen auftreten, besonders einfach. Erinnern wir uns, was die Angabe »200 Hz« bedeutet. 200 Hz heißt 200 Schwingungen in der Sekunde. Wenn bei einem Vorgang in der ersten Sekunde 200 Schwingungen, in der zweiten Sekunde 300 Schwingungen und in der vierten Sekunde 400 Schwingungen auftreten, so bedeutet eine Integration nichts weiter, als diese Schwingungszahlen zusammenzuzählen. Das Ergebnis ist: 900 Schwingungen. Nun, Schwingungen zu zählen ist keine schwierige Aufgabe. Wegen der hohen Zahl und der schnellen Aufeinanderfolge wird ein elektronischer Zähler verwendet, wie er gerade in den letzten zehn oder zwanzig Jahren in Hunderten von Spielarten gebaut worden ist.

Alle Zähler zählen auf ein Stück genau. In unserem Falle heißt das, daß die Integration der Geschwindigkeit auf eine Wellenlänge genau gemacht werden kann, also der Weg, den die Rakete zurückgelegt hat, auf eine Wellenlänge genau gemessen wird. Da man für das Doppler-Verfahren im allgemeinen kleine Wellenlängen von einigen Zentimetern benutzt, heißt das, daß man den Ort der Rakete mit diesem Verfahren auf einige Zentimeter genau ermitteln kann.

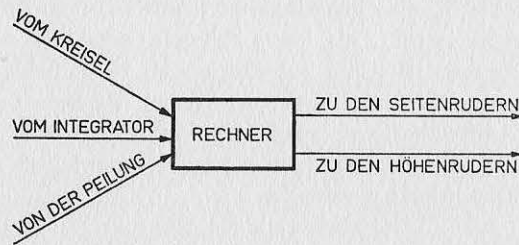
Diese hohe Genauigkeit setzt allerdings voraus, daß sich die Wellenlänge einer ausgesendeten Strahlung unterwegs nicht ändert. Die Veränderungen, die die Welle in normaler Luft erfährt, sind gering. Anders ist es dagegen mit den uns schon bekannten Ionosphärenschichten, die die Erdkugel in Schalen einschließen, in denen sich elektrisch geladene Teilchen tummeln. Diese Schichten können die Längen von Funkwellen

beträchtlich verändern und Fehler der Doppler-Messung verursachen. Kann man mit diesem Vermessungsverfahren von einer Station in der Startstelle die Entfernung der Rakete von dort, also den von der Rakete zurückgelegten Weg messen, so kann man mit mehreren (mindestens drei) solchen Stationen, die auf einem größeren Gelände verteilt sind, die Bahn der Rakete Punkt für Punkt verfolgen. Solche Vermessungsverfahren werden für die Erprobungsflüge von Raketen angewendet, sie sind genauer als ihre optische Konkurrenz.

Der Rechner

Die große Zahl von Überwachungsgeräten der Steuerung, von Geräten, die die Raketenlage, die Raketenbahn oder ihre Geschwindigkeit prüfen und kontrollieren, läßt sich einteilen in Geräte, die einen einmaligen Befehl wie »Brennschlußkommando« auslösen, und solche, die während der ganzen Antriebsbahn auf die Rakete einwirken sollen.

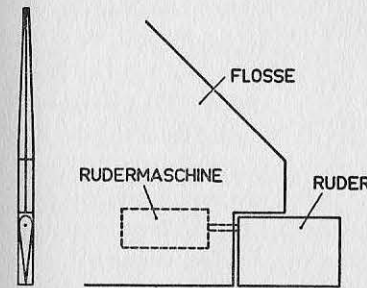
Wollte man die Feststellungen der verschiedenen Meßgeräte, der Kreisel- und Funkgeräte, ohne weitere Bearbeitung an die ausführenden Organe der Steuerung weitergeben, so entstünde ein heillosen Wirrwarr. Deswegen ist es notwendig, alle Meßwerte zunächst einem Rechner zuzuleiten, der aus ihnen die Kommandos errechnet, nach denen sich die Steuerorgane zu richten haben. Der Rechner hat die Aufgabe, die von den verschiedenen Meßgeräten kommenden Werte verschieden zu bewerten und miteinander zu mischen. Die Mischung richtet sich nicht nur nach den eingehenden Meßwerten. Sehr häufig übernehmen einzelne Steuerorgane mehrere Aufgaben zugleich, so daß ihnen die entsprechenden Kommandos bereits in kombinierter Form zugeführt werden müssen. Außerdem obliegt es dem Rechner, das Kommando so auszubilden, daß alle Bewegungen, die die Rakete ausführt, gedämpft verlaufen und nicht etwa wilde Schwingungen entstehen. Eine weitere Aufgabe des Rechners ist es, die oft sehr zarten und schwachen Signale, die von den Meßgeräten abgegeben werden, so zu verstärken, daß sie die robusten, ausführenden Steuerorgane wirklich zu beeinflussen vermögen.



Derartige Rechner haben daher eine Eingangsseite, in die alle Meßwerte eingeführt werden, eine Ausgangsseite, die die Kommandos für die Steuerorgane abgibt, und bestehen aus Netzwerken von Kondensatoren, Spulen und Widerständen mit den dazugehörigen elektronischen Verstärkern. Entstehen die Meßwerte nicht an Bord der Rakete, sondern auf dem Boden, wie es bei der Peilung der Fall sein kann, dann kann auch der Rechner oder ein Teil davon in der Bodenstation eingebaut sein. Das hat meistens Vorteile, weil ein solcher Rechner sich ohne Rücksicht auf Gewicht und Kosten komfortabler aufbauen läßt als ein Rechner an Bord.

Steuerorgane

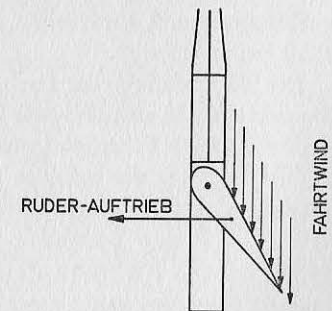
Vielfältig wie die Meßgeräte zur Überwachung der Rakete sind auch die Organe zu ihrer Beeinflussung. Aus unseren physikalischen Betrachtungen wissen wir, welche Leistung die Steuerorgane vollbringen müssen.



Um die Antriebsbahn einer Rakete zu ändern, muß die Rakete gedreht werden, damit der Schub sie in die neue, gewünschte Bahn bringt. Diese Drehung erzeugen die Steuerorgane, indem sie auf die Rakete eine Kraft ausüben, die nicht durch den Schwerpunkt geht.

Für Raketen kleiner Reichweite, die ihre Bahn im wesentlichen im luftgefüllten Raum zurücklegen, lassen sich natürlich die Steuerorgane der Luftfahrt übernehmen. Wie sie aussehen, ist von den Flugzeugen her bekannt. Aus den Schwanzflossen werden Stücke herausgeschnitten und durch bewegliche Ruder ersetzt. Ähnliche Ruder werden auch bei Raketen angewendet. Eines von ihnen zeigt unsere Skizze; es sitzt in einem Ausschnitt der Flosse und ragt über sie hinaus.

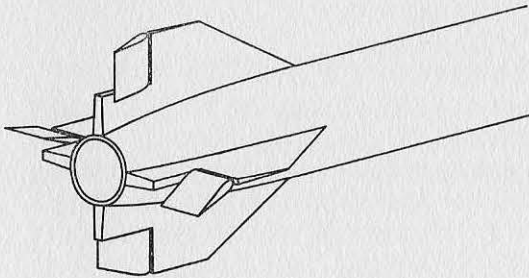
Die Wirkungsweise eines Lufruders läßt sich ableiten, wenn man es als kleine schwenkbare Tragfläche betrachtet. Wird das Ruder gegen den Fahrtwind angestellt, entsteht an ihm eine Auftriebskraft, das heißt eine quer zur



Flugrichtung liegende Kraft, die das für die Drehung der Rakete notwendige Moment um den Schwerpunkt erzeugt.

Das Ruder ist an einer kräftigen Achse befestigt, die von einem Motor gedreht wird. Sind große Korrekturen der Raketenlage notwendig, so wird es durch diesen Motor stark, für kleine Korrekturen nur gering ausgeschwenkt, gerade so, wie es dem vom Rechner zugesandten Kommando entspricht.

Die meisten Raketen haben vier Flossen mit vier Luftrudern, die, entsprechend ihrer Wirksamkeit, der Hoch- und der Querachse der Rakete zugeordnet sind. Um Fehler der Rakete in der Drallrichtung, das heißt um die Längsachse, auszugleichen, muß man zwei dieser Ruder oder alle vier gegensinnig schwenken, wie es die Skizze zeigt.



Genau wie bei jeder anderen Tragfläche ent-

steht auch beim Ruder nicht nur ein Auftrieb, der für die Steuerung der Rakete ausgenutzt wird, sondern auch ein Moment, in diesem Fall um die Drehachse des Ruders. Dieses Moment muß der Raketenmotor überwinden, wenn er das Ruder verstellen will. Wie wir wissen, ist es abhängig von dem Abstand, den der Mittelpunkt der Luftkräfte von der Drehachse hat. Der Konstrukteur ist also bestrebt, den Mittelpunkt der Luftkräfte, den man durch aerodynamische Messungen genau feststellen kann, möglichst nah an die Drehachse zu legen, damit die Momente, die der Motor zu überwinden hat, möglichst klein sind. Der Grund für dieses Bestreben ist natürlich wieder die Gewichtsersparnis. Ein Motor, der nur kleine Momente aufbringen muß, kann selbst klein und daher leicht sein und verbraucht auch wenig Energie.

Die Wirksamkeit aller Luftruder ist von zwei Bedingungen abhängig. Sie müssen eine ausreichende Luftdichte vorfinden, und die Rakete muß genügend hohe Fahrtgeschwindigkeit besitzen. Vom Auftrieb wissen wir bereits, daß nur der mittlere Teil der Antriebsbahn diese Bedingungen aufweisen kann. Auch dort aber ist der Auftrieb und damit die Wirksamkeit der Luftruder veränderlich. Infolge dieser im ganzen recht geringen Wirksamkeit, hat man die Luftruder bei modernen Fernraketen gänzlich weggelassen. Ihre Brauchbarkeit für Raketen kurzer

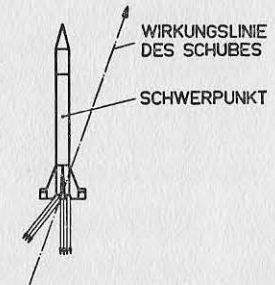
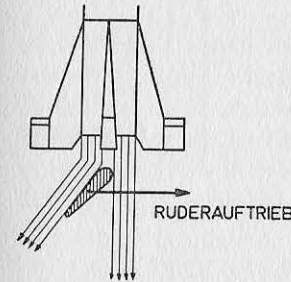
Reichweiten wie Flugabwehrraketen ist dagegen nach wie vor unbestritten.

Eine ganze Anzahl von Raketen kurzer Reichweiten verlassen sich überhaupt nur auf die Luftruder und verzichten auf andere Steuerorgane. In diesen Fällen ist es aber notwendig, der Rakete möglichst rasch eine hohe Geschwindigkeit zu erteilen, damit sie manövrierfähig wird, und sie auf dem ersten Teil ihrer Bahn durch ein Startgestell oder Gleitschienen mechanisch zu führen.

Die soeben geschilderten Schwierigkeiten mit den Luftrudern haben die Raketeningenieure schon früh auf die Idee gebracht, einen »Wind« auszunutzen, der während der ganzen Antriebsbahn der Rakete vorhanden ist, nämlich den Antriebsstrahl. Überträgt man das Prinzip des Luftruders auf das heiße Gas, so kommt man zum Strahlruder, das heißt zu einer kleinen drehbaren Tragfläche, die in den Strahl des Triebwerkes eintaucht und sich dort schwenken läßt. Genau wie ein Luftruder erzeugt sie durch Auftrieb die Querkräfte, die dann die Rakete um ihren Schwerpunkt drehen und Bahnänderungen hervorrufen.

Man kann die Wirkungsweise eines Strahlruders noch auf andere Weise erklären. Durch das Strahlruder wird ein Teil des Antriebsstrahles abgespalten und verläßt die Rakete unter einem anderen Winkel als der Hauptstrahl. Beide, der Hauptstrahl und der Nebenstrahl, haben eine gemeinsame Wirkungslinie, nur liegt diese nicht, wie die des ungestörten Hauptstrahles, in der Raketenachse, sondern weicht von ihr ab. Dadurch, daß die Wirkungslinie am Schwerpunkt der Rakete vorbeigeht, entsteht, wie immer, wenn Kräfte nicht durch den Schwerpunkt gehen, ein Drehmoment, das die Rakete dreht und die Steuerwirkung hervorruft.

Während Luftruder ganz ähnlich wie die übrige Zelle der Rakete aus Leichtmetall oder Stahlblech hergestellt werden können, ist das natürlich bei Strahlrudern nicht möglich. Der aus dem Triebwerk austretende Gasstrahl hat nicht nur eine hohe Geschwindigkeit, sondern auch eine sehr hohe Temperatur. Normale Blechruder würden in Bruchteilen einer Sekunde wegschmelzen. Man hat mit zahlreichen Werkstoffen für

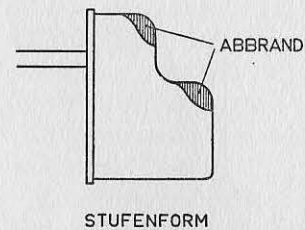
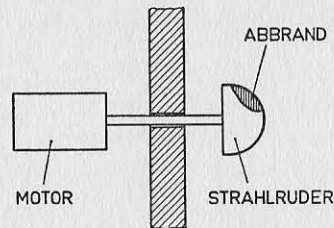


Strahlruder Versuche gemacht, mit schwerschmelzenden Metallen und mit keramischen Werkstoffen. Als bestes hat sich auf Grund dieser langwierigen Versuche ein Material herausgestellt, das auch sonst in der Technik verwendet wird, wenn es gilt, höchsten Temperaturen zu begegnen, nämlich Graphit. So wurde die V 2 mit vier Graphitrudern ausgerüstet.

Obwohl dieses Material außerordentlich widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen ist, unterlag es doch dem Angriff des Strahles und brannte während des Brennvorganges teilweise weg. Hierdurch verringerte sich natürlich der Auftrieb, den das Ruder erzeugte, und damit seine Wirksamkeit.

Das wäre an sich nicht schlimm gewesen, denn man konnte das Ruder ja von vornherein etwas überdimensionieren, so daß es bis zum Brennschluß wirksam genug war. Die Veränderung der Form hatte aber einen zweiten Nachteil zur Folge. Genau wie bei den Luftrudern

hatten die Konstrukteure die Form des Ruders so festgelegt, daß die Rudermaschine ein möglichst geringes Drehmoment überwinden mußte, und den Mittelpunkt der Strahlkräfte möglichst dicht an die Drehachse des Ruders gerückt. Da der Abbrand des Ruders nun nicht etwa gleichmäßig vor sich ging, sondern in der Hauptsache an der vorderen Kante stattfand, rutschte der Mittelpunkt der Strahlkräfte während des Brennvorganges nach hinten, vergrößerte den Hebelarm und damit auch das Moment, das der Motor für seine Steueraufgabe aufbringen muß.



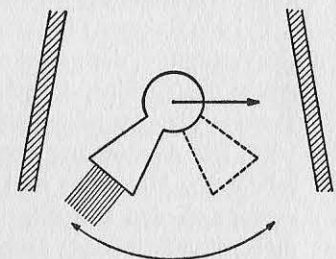
Diesem Übelstand begegnete man dadurch, daß man dem Ruder eine »Stufenform« gab. Sie zeigt dem Angriff des Strahles zwei Kanten, von denen eine über, die andere unter der Drehachse liegt. Da beide Kanten abbrennen, hält sich der Abbrand etwa die Waage, der Angriffspunkt der Strahlkräfte wird nicht verschoben, und der Motor muß während der ganzen

Brennzeit die gleiche Leistung aufbringen. Ein Strahlruder kann, wie ein Luftruder, mit den verschiedensten Arten von Motoren angetrieben werden. Oft verwendet man Elektromotoren, die aus einer Batterie gespeist werden und deren Bewegung durch Kontakte beeinflusst wird. Da sie sehr rasch umlaufen, sind starke Untersetzungsgetriebe notwendig, um die relativ langsamen Schwenkungen der Ruder zu erzeugen.

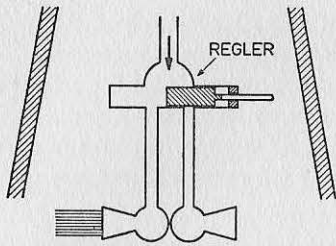
Es gibt aber auch langsame Motoren, wie die pneumatischen oder hydraulischen Maschinen, die in der Luftfahrt seit langem verwendet werden. Sie arbeiten mit einer Druckflüssigkeit, meist einem Öl oder einem Druckgas, und zeichnen sich durch langsame Geschwindigkeiten und sehr große Kräfte aus. Häufig ist ein Teil der Kommandoverstärkung in ihnen eingebaut, so daß man mit einem sehr schwachen Kommando eine sehr große Kraft steuern kann.

Die Steuerung einer Rakete bedeutet immer Verluste an Triebwerksenergie. Jede Umlenkung, jede Schwingung auf der Bahn bedeutet einen Verlust an Geschwindigkeit und Reichweite. Die Strahlruder erzeugen aber auch dann einen Verlust, wenn sie ihre Aufgabe gar nicht ausführen. Selbst wenn die vier Strahlruder einer Rakete ständig auf dem Winkel Null verblieben, also keine Steuerwirkung auf die Rakete ausübten, wie es etwa bei einem idealen Senkrechtstart der Fall wäre, lägen sie doch im Strahl und hätten genau wie jeder andere Körper, der in einem rasch bewegten Gas liegt, einen aerodynamischen Widerstand. Dieser Widerstand vermindert die Schubkraft des Triebwerkes. Der Schubverlust ist bei einer Hochleistungs-Fernrakete etwa so groß wie der Schubanteil, den sie zur Überwindung des Luftwiderstandes auf der Antriebsbahn aufbringen muß, also ein beträchtlicher Wert.

Die Strahlruder steuern die Rakete, wie gesagt, dadurch, daß sie einen Teil des Antriebsstrahles in eine andere Richtung zwingen, als sie der Hauptstrahl hat. Die gleiche Wirkung wie ein abgezwiegtter Nebenstrahl muß auch ein in einer getrennten Steuerdüse erzeugter Strahl haben, der schräg zum Hauptstrahl aus der Rakete austritt. Der Vorteil eines solchen Strahles wäre, daß man zu seiner Erzeugung keine Strahlruder benötigt, die durch ihren Widerstand Schubverlust hervorrufen.



Für die Steuerung einer Rakete mit Steuerdüsen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder sieht man Düsen vor, die ständig einen konstanten Schub erzeugen, also ständig einen konstanten Durchsatz haben und in ihrer Richtung schwenkbar sind, damit sie die verschiedenen Steuerkräfte hervorrufen können. Oder aber man verwendet fest in der Rakete angebrachte Düsen, deren Schub sich regeln läßt, so daß also verschieden große Steuerkräfte durch die Änderung des Schubes der verschiedenen Düsen hervorgerufen werden. Während man im ersten Fall nur einen Satz Steuerdüsen benötigt, muß man für den zweiten Fall



REGELBARE STEUERDÜSEN

die Zahl verdoppeln. Der Betrieb solcher Steurdüsen ist auf viele verschiedene Weisen möglich. Eine der einfachsten Lösungen ist, sie mit Preßgas aus einem Druckgasbehälter zu speisen. Der Vorteil liegt darin, daß das Preßgas einfach zu handhaben ist, sich keine Kühlungsprobleme ergeben und Ventile und Armaturen im Aufbau einfach werden. Andererseits bedeutet natürlich die Mitnahme des Preß-

gases und der dazugehörigen Vorratsbehälter eine erhebliche Vermehrung des Leergewichtes der Rakete.

Eine andere Lösung besteht darin, die Düsen als kleine separate Brennkammern auszubilden. In ihnen kann man die gleichen Treibstoffe miteinander reagieren lassen, die in der Hauptbrennkammer verbrannt werden. Oder man speist die Steurdüsen mit besonderen Treibstoffen, beispielsweise solchen, die ohne Zündung brennen.

Statt eines Druckgases aus einem Behälter können die Steurdüsen mit dem Druckgas betrieben werden, das in der Hauptbrennkammer entsteht, vor dem Eintritt in die Düsen allerdings gekühlt werden muß.

Die beiden zuletzt genannten Methoden haben den Nachteil, daß erhebliche Kühlungsprobleme auftreten. Hierdurch entsteht ein relativ hoher Aufwand, der Gewicht bedeutet und die Anlage sehr kompliziert.

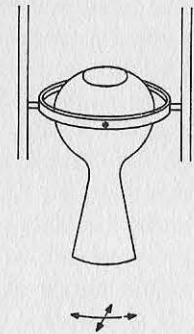
Bei den Raketen für größere Reichweiten steht im allgemeinen ein Gas zur Verfügung, das gemeinhin schon durch Düsen abgestrahlt wird: das Abgas der Turbine, der schon weitgehend entspannte Dampf, der in der Turbine die Antriebsarbeit geleistet hat und nun ins Freie abgestrahlt wird. Die Ausnutzung dieses Turbinenabgases für die Steurdüsen liegt sehr nahe. Allerdings sind die Kräfte, die mit diesem entspannten Gas erzeugt werden können, nicht allzu groß, sie genügen im allgemeinen nicht, eine Fernrakete nach Seite und Höhe wirksam zu steuern. Für die Drallsteuerung, das heißt die Steuerung um die Längsachse, reichen sie aber völlig aus.

Statt separater Steurdüsen kann man natürlich auch die Brennkammer des Haupttriebwerkes zur Steuerung heranziehen. Da sie aus begreiflichen Gründen zentral in der Rakete angebracht sein muß, kann man sie nicht verwenden, um den Drall auszusteuern, wohl aber um Seite und Höhe der Rakete zu steuern. Wenn ein Strahlruder die Wirkungslinie der Schubkraft um einen kleinen Winkel schwenkt, indem es einen Teil des Hauptstrahles in eine andere Richtung lenkt, wird bei der

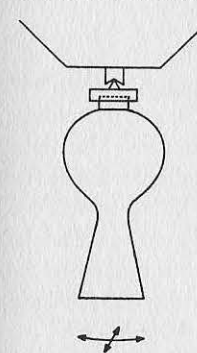
schwenkbaren Brennkammer oder dem schwenkbaren Triebwerk die gleiche Wirkung durch ein Ablenken des gesamten Strahles hervorgerufen.

Wie so oft in der Technik ist der Gedanke einfach, die Ausführung aber recht schwierig. Will man die Brennkammer oder das Triebwerk gegenüber der Raketenachse schwenken, so muß man sie schwenkbar aufhängen. Dabei darf man nicht vergessen, daß die größte Kraft, die in der Rakete auftritt, nämlich der Schub, über die Aufhängung in die Zelle weitergeleitet werden muß. Es gibt zwei mögliche Aufhängungen des Triebwerkes, die wir skizziert haben. Wir haben beide Aufhängungen für eine Brennkammer gezeichnet, ohne auf die anderen Teile des Triebwerkes Rücksicht zu nehmen.

Die kardanische Aufhängung kennen wir schon vom Kreisel her. Um die Brennkammer, etwa an ihrer dicksten Stelle, wird der innere Kardanring gelegt, mit dem sie durch zwei Tragzapfen verbunden ist. Sie kann also gegenüber diesem Kardanring in einer Ebene schwenken. Der Kardanring selbst besitzt wiederum zwei Tragzapfen; sie sind in einem »äußeren Kardanring« befestigt, der aber gleichzeitig einen Teil des Hecks darstellt. Um diese zwei Zapfen kann sich der innere Kardanring drehen, so daß die Brennkammer in beiden Ebenen schwenkbar ist.



Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Brennkammerkopf gegen einen festen Punkt auf der Achse der Rakete beweglich abzustützen.



Man könnte daran denken, einfach einen Gummipuffer oder eine starke Feder als übertragendes Glied zu benutzen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß das Schwenken der Brennkammer dann ein Zusammendrücken dieses Puffers oder der Feder auf der einen Seite und ein Auseinanderziehen der Feder auf der anderen Seite notwendig machte, wozu erhebliche Kräfte erforderlich sind. Sie müßten von den Steuermotoren aufgebracht werden, die infolgedessen schwer werden und viel Energie verbrauchen würden. Eine bessere Möglichkeit bietet die in unserer Skizze dargestellte Lagerung

in einer Doppelschneide. Schneidenlagerungen sind aus den gebräuchlichen Waagen beim Kaufmann und im Haushalt wohl bekannt. Stellt man zwei Schneiden über Kreuz, so entsteht eine Kreuzschneide, die eine Bewegung der Brennkammer in beiden Richtungen erlaubt. Die

Kreuzschneiden müssen aus hochwertigem Stahl und sehr sorgfältig gefertigt werden, damit sie in der Lage sind, den gesamten Schub, den das Triebwerk erzeugt, an das Mittelteil weiterzuleiten.

Unsere beiden Skizzen zeigen schwenkbare Brennkammern. In der Praxis erweist es sich aber oft als zweckmäßig, nicht nur die Brennkammer, sondern das gesamte Triebwerk zu schwenken. Der Grund dafür ist, daß die Zuführungsrohre für den Treibstoff zur Brennkammer unter hohem Druck stehen, die Biegung also bei ihnen ein ähnliches Problem darstellen würde wie bei dem vorhin genannten Gummipuffer zwischen Triebwerk und Mittelteil. Man nimmt daher besser das größere Gewicht in Kauf und schwenkt nicht nur die Brennkammer, sondern das Triebwerk mit allen Ventilen, Armaturen, Rohrleitungen und sogar den Turbopumpen.

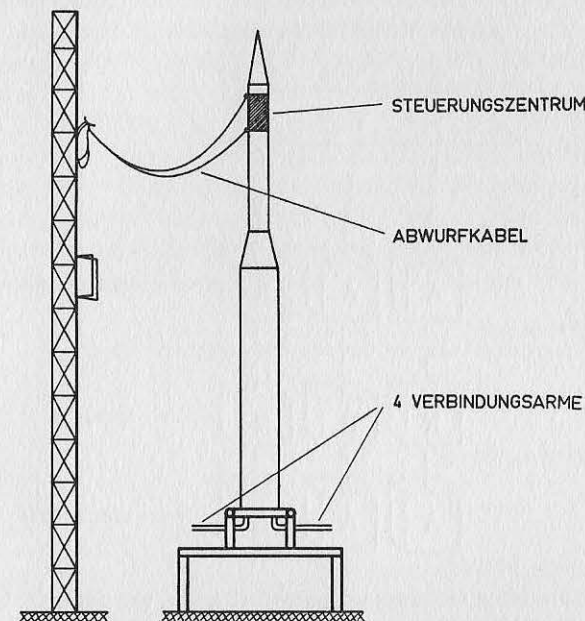
Da bei dieser Methode der gesamte Antriebsstrahl geschwenkt wird, sind die Winkel, um die er geschwenkt werden muß, natürlich kleiner als die Winkel, um die man ein Strahlruder auslenken muß, das nur einen kleinen Ausschnitt des Antriebsstrahles aus seiner Richtung ablenkt. Sie betragen kaum mehr als 5 Grad in jeder Richtung. Dementsprechend kann man auch die Motoren ausbilden. Da relativ große Kräfte notwendig sind, um das gesamte Triebwerk in kurzer Zeit in die gewünschte Schwenklage zu bringen, werden hierfür zweckmäßig hydraulisch betriebene Kolbenmotoren verwendet.

Steuerung der Vanguard-Rakete

Als Beispiel für das Zusammenwirken der Einzelgeräte wollen wir die Steuerung der Dreistufenrakete Vanguard betrachten, mit der einige amerikanische Satelliten auf ihre Bahn gebracht wurden. Da diese Steuerung für eine Satellitenrakete entworfen wurde, steht sie denen für Raumschiffe näher als den Steuerungen für ballistische, insbesondere für militärische Boden-zu-Boden-Raketen. Sie ist gleichzeitig ein ausgezeichnetes Beispiel dafür, daß man mit einem Minimum an Größe und Gewicht sehr vielfältige Aufgaben lösen kann und daß es notwendig ist, für jede Aufgabe immer wieder neue Methoden und Mittel zu finden.

Die Vanguard ist eine zwar dreistufige Rakete, von der aber nur die ersten beiden Stufen gesteuert werden. Der wichtigste Teil der Steuerung ist das Steuerungszentrum, das den vordersten Behälterraum der zweiten Stufe ausfüllt. In ihm sind alle Meßgeräte untergebracht, die die Abweichungen der Raketen von ihrer Soll-Bahn messen, ferner die Rechen-

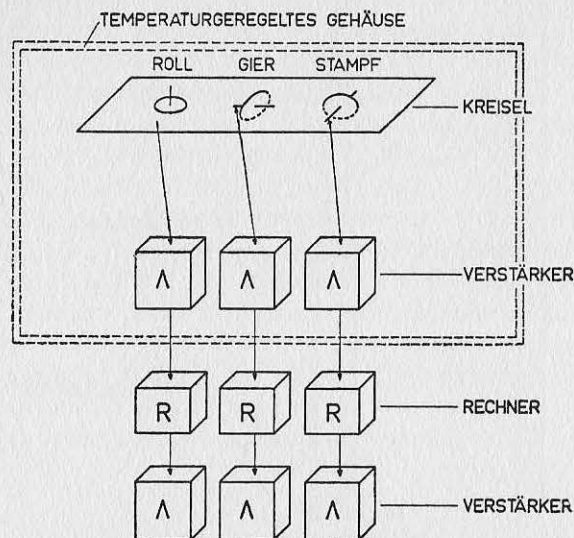
geräte, die aus diesen Messungen die Kommandos für die Steuerorgane errechnen, und schließlich die Stromversorgung für den Betrieb der Steuergeräte. Bis zum Start ist das Steuerungszentrum durch eine mehradrigte Leitung mit den Bodengeräten verbunden, so daß man die Wirkung der Steuergeräte bis zum Augenblick des Abhebens der Rakete beobachten kann. Doch ist dies nicht die einzige Verbindung. Unter der Heckschürze der Vanguard greifen vier Arme vom Boden in



das Gerät ein, die pneumatische, hydraulische und elektrische Verbindungen tragen. Die Zahl vier dürfte in traditionsgemäßer Anlehnung an frühere Raketenentwürfe entstanden sein, die noch vier Flossen besaßen. Während die Verbindung des Steuerzentrums mit dem Boden durch Abwerfen der Kabel kurz vor dem Start gelöst wird, ziehen sich die Verbindungen durch die vier Arme beim Abheben der Rakete selbst heraus.

Das Steuerzentrum, das die Bewegung der Rakete während der ersten und zweiten Stufe beherrscht und auch das Trennen und Zünden der dritten Stufe veranlaßt, enthält eine Reihe von Geräten, die diesen speziellen Aufgaben angepaßt und gewachsen sind. Das Herz der Steuerung ist eine Gruppe von drei Kreiseln, die in einer der Trennwände des Steuerungszentrums fest eingebaut sind. Die Kreisel sind,

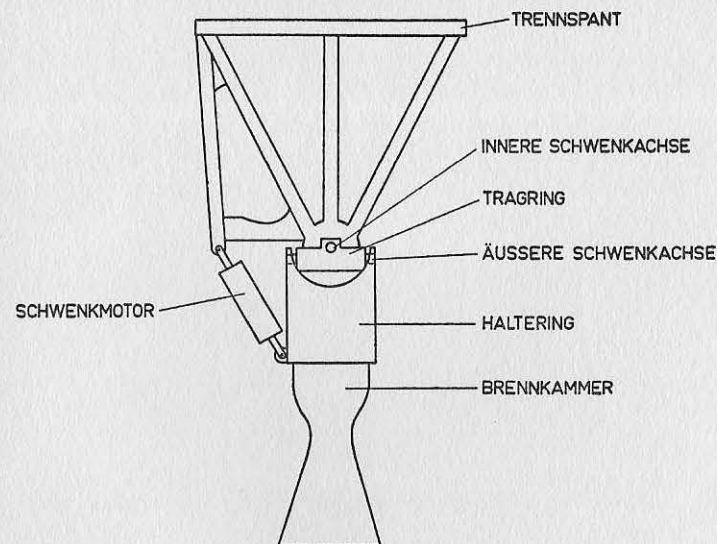
wie wir wissen, kardanisch aufgehängt und behalten daher ihre Lage bei, auch wenn die Rakete sich dreht. Die Achsen der Kreisel liegen in drei verschiedenen Richtungen, so daß die Schwingungen der Rakete in den beiden Ebenen (»Gieren« und »Stampfen«) und die Drehungen der Rakete um ihre Längsachse (»Rollen«) überwacht werden können. Die von den Kreiseln gemessenen Abweichungen in diesen drei Ebenen werden zunächst drei Verstärkern zugeführt. Kreisel und Verstärker sind



in einem besonderen Gehäuse untergebracht, das, um die hohe Genauigkeit zu gewährleisten, temperaturgeregelt ist. Die verstärkten Signale der drei Kreisel, die also den Abweichungen der Rakete aus ihrer Soll-Lage entsprechen, werden je einem Rechner zugeführt, in denen die Signale in Kommandos umgewandelt werden. Die Umwandlung bedeutet, wie wir wissen, das Hinzufügen von Elementen zum Kommando, die eine Dämpfung aller Schwingungen der Rakete hervorrufen. Diese Umwandlung kostet natürlich Energie, und die aus den Rechnern herauskommenden Kommandos müssen noch einmal verstärkt werden, ehe sie den Steuerorganen zugeführt werden können. Die Rechner und die Endverstärker sind ein hübsches Beispiel für die Miniaturisierung elektronischer Geräte. Alle drei Rechner und Verstärker sind zusammen in einer Blechbüchse von 25 Zentimeter Durchmesser und 60 Zentimeter Länge untergebracht.

Die Steuerung wird betrieben aus einer Batterie von sogenannten Silberzellen, die besonders leicht sind. Sie liefert 27,5 Volt Gleichstrom. Da in der Steuerung eine Anzahl von verschiedenen Spannungen benötigt wird, ist weiterhin ein rotierender Umformer vorgesehen, der den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Dieser Wechselstrom hat die bei solchen Flugkörpern allgemein übliche Frequenz von 400 Hertz und Spannung von 115 Volt. Die hohe Frequenz gegenüber den 50 Hertz unseres normalen Licht-Wechselstromes erklärt sich daraus, daß alle Geräte bei dieser höheren Frequenz leichter werden und daher auch leichter an Bord von Raketen oder Flugzeugen unterzubringen sind. Die Spannung von 115 Volt ist die in Amerika übliche Netzspannung, die dort auch im Lichtnetz verwendet wird.

Solange das Triebwerk der ersten Stufe arbeitet und die Raketenstufen noch beieinander sind, werden die Kommandos des Steuerungszentrums den Steuerorganen (Schwenkmotoren) der ersten Stufe zugeführt. Die Brennkammer der ersten Stufe ist schwenkbar angeordnet, und zwar in den beiden Ebenen, die wir vorhin mit dem Namen »Stampfen« und

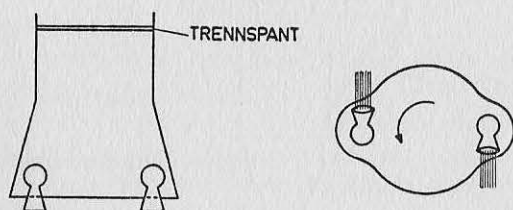


»Gieren« gekennzeichnet haben. Auf dem Trenns pant baut sich nach unten ein vierarmiges Gerüst auf, dessen Stäbe pyramidenähnlich in einer Kugel zusammenlaufen. Die Kugel trägt mit einer kräftigen Achse den Tragrings, der mit einer quer zu dieser inneren Achse liegenden

Die Technik der Raketen

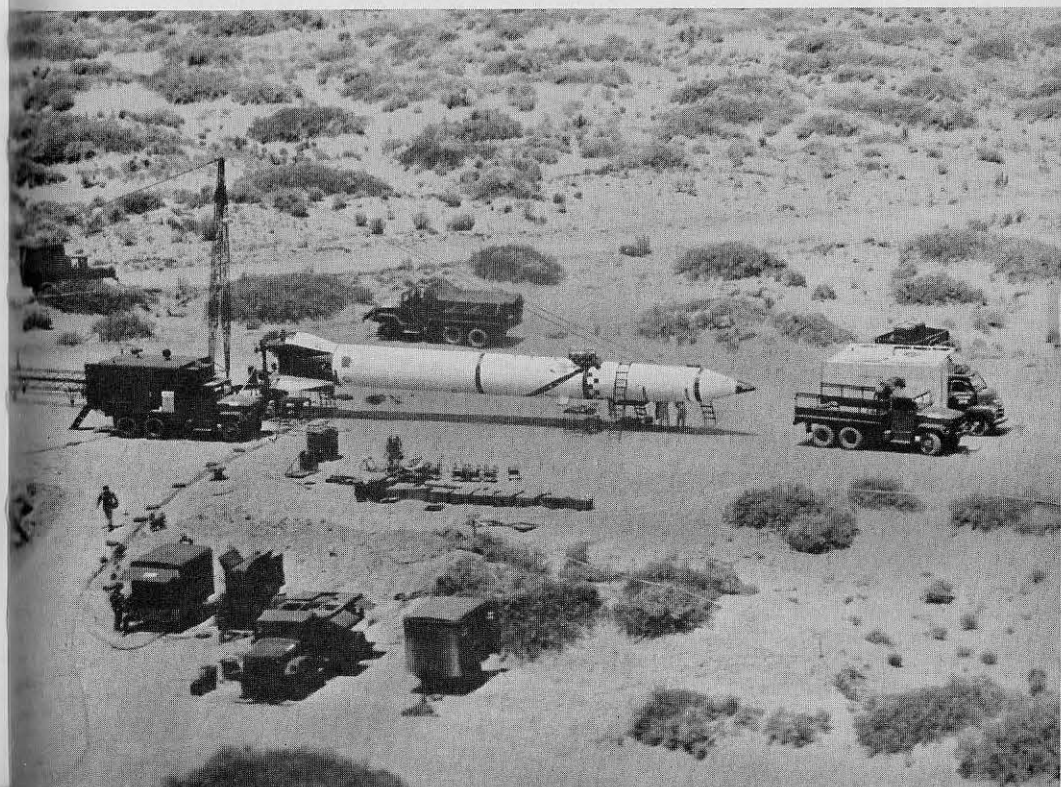
äußeren Achse im Haltering der Brennkammer befestigt ist. Das System der Achsen und Ringe ist der Doppelschneidenanordnung der R 14 ähnlich, die wir oben kennengelernt haben, weist aber auch einige Verwandtschaft mit einer kardanischen Aufhängung auf. Jedenfalls ist die Brennkammer um die beiden Achsen in zwei Richtungen schwenkbar. Die Schwenkung wird durch Kolbenmotoren bewirkt, die sich in ölgefüllten Zylindern bewegen. Derartige Kolben arbeiten genau wie der Kolben eines Automobils oder einer Dampfmaschine, nur wesentlich langsamer. Sie werden dadurch betrieben, daß der Öldruck auf einer der beiden Kolbenseiten erhöht und der Kolben dadurch gezwungen wird, sich im Zylinder zu verschieben. Hierbei treibt die Kolbenstange direkt die schwenkbare Brennkammer an und bringt sie in den gewünschten Winkel. Das für den Betrieb dieser Kolben benötigte Drucköl wird in einer kleinen Pumpe erzeugt, die auf der gleichen Achse sitzt wie die Pumpen für die Treibstoffe, mit denen die Brennkammer beschickt wird. Zwischen dieser Pumpe und den Kolben liegen elektrisch betätigte Ventile, die ihr Kommando von der Steuerzentrale erhalten. So wird also schließlich der Ölstrom durch das Steuerzentrum in die Zylinder kommandiert und somit die Schwenkung des Ofens hervorgerufen. Stellt also beispielsweise der Gier-Kreisel eine Abweichung der Rakete nach links fest, so gibt er ein Kommando, das die Brennkammer nach rechts ausschwenken läßt und dadurch die Rakete wieder ausrichtet.

Es ist leicht einzusehen, daß die Schwenkung der Brennkammer für die Aussteuerung von Rollbewegungen nicht ausgenutzt werden kann.



GEGENSINNIGES AUSSCHWENKEN DER STEUERDÜSEN DREHT DIE RAKETE

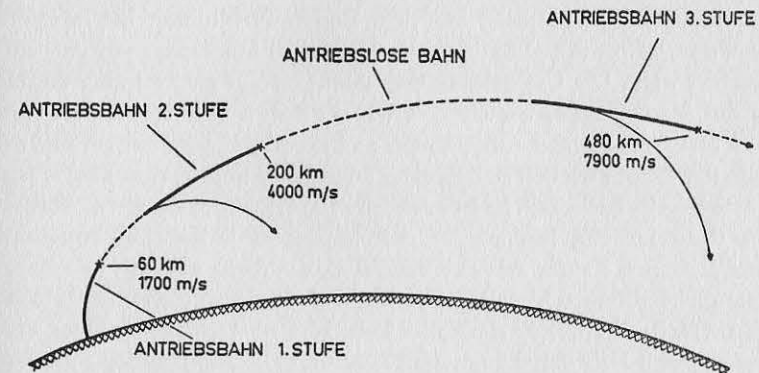
Hierzu sind vielmehr zwei kleine Steuerdüsen vorgesehen, die innen am äußersten Durchmesser der Schürze liegen, gegensinnig geschwenkt werden und damit eine Drehung der Rakete verursachen. Durch diese Düsen strömt das in der Turbo-Pumpe der Rakete verwendete Gas aus. Sie werden nicht mit einem hydraulischen, sondern mit einem pneu-



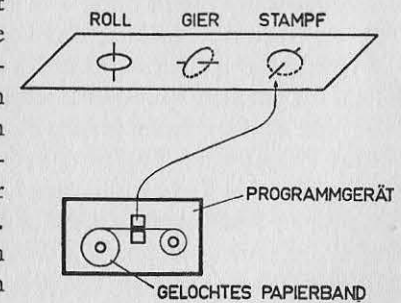


matischen Kolbenmotor geschwenkt, der mit Heliumgas betrieben wird, dem gleichen Gas, das auch benutzt wird, um den Brennstoff- und den Sauerstoffbehälter zu begasen. Der Strom des Heliumgases in die Kolbenmotoren wird ganz ähnlich wie bei der Hauptsteuerung durch kleine elektrisch betätigte Ventile gesteuert, die ihr Kommando vom Roll-Kreisel im Steuerzentrum erhalten.

Mit dieser Anlage wäre die Vanguard in der Lage, während des Brennens der ersten Stufe senkrecht aufzusteigen. Da sie aber einen Satelliten auf die Bahn bringen soll, muß sie bereits während des Bren-



nens der ersten Stufe in die Flugrichtung des Satelliten umgelenkt werden. Das geschieht auf eine bereits bei der deutschen V2 gebräuchlichen Weise. Wie wir wissen, kann man einen Kreisel dadurch zum Auswandern bringen, daß man auf ihn ein Moment, eine seitlich angreifende Kraft, ausübt. Unter dem Einfluß einer solchen Kraft beginnt er seine Achse allmählich zu schwenken. Nach 10 Sekunden senkrechtem Aufstieg, wenn die Rakete also erst 110 Meter hoch gestiegen ist, wird der Stampfkreisel durch ein solches Moment zum Auswandern gebracht. Um diese Auswanderung für verschiedene Raketen je nach Wunsch ablaufen lassen zu können, wird das Moment von einem Programmechismus gesteuert, in dem als Programmträger ein gelochtes Papierband steckt. Dieses gelochte Papierband kann von Fall zu Fall gegen eines mit einem



Atlas-Rakete wird in den Prüfstand eingefahren (zu Seite 206)

anderen Programm ausgewechselt werden. Der auswandernde Kreisel täuscht nun der Rakete vor, sie sei von ihrem Kurs abgewichen. Es entsteht ein Abweichungssignal, und dieses wird zu einem Kommando verarbeitet. Das Kommando dreht über das Steuerzentrum und über die schwenkbare Brennkammer die Rakete so lange, bis sie die vermeintliche Abweichung wieder ausgeglichen, das heißt sich der neuen Lage des Kreisels angepaßt hat. Diese Schwenkbewegung in der Stampfebene nennt man die Umlenkung der Rakete. Durch die Umlenkung wird die Richtung der Rakete festgelegt.

Man erkennt jetzt, wie wichtig es ist, daß eine Rakete mit einer solchen Steuerung, die nicht mehr mit dem Boden Verbindung hat, sondern allein durch Bordmittel dirigiert wird, auf dem Startisch sorgfältig ausgerichtet wird. Die Umlenkung der Rakete erfolgt genau in der Ebene, die der Stampfkreisels vorschreibt. War die Rakete und damit der Kreisel beim Start nicht genau ausgerichtet, so liegt diese Ebene falsch, und die Bahn der Rakete wickelt sich in einer falschen Ebene ab, die Rakete fliegt in eine falsche Richtung. Es ist auch leicht zu erkennen, warum die Rakete eine Rollsteuerung besitzt. An sich könnte es ja bei einer rotations-symmetrischen Rakete wie der Vanguard, die nicht einmal Flossen besitzt, gleichgültig sein, ob sie sich um ihre eigene Achse dreht oder nicht. Die Rollsteuerung muß aber jede, auch die kleinste Drehung, verhindern, weil sich dabei auch die Ebene der Umlenkung dreht und die Rakete eine falsche Richtung einschlagen würde.

Nach dem Umlenken verliert die Rollsteuerung an Bedeutung, weil ein Teil ihrer Aufgabe von der Giersteuerung übernommen wird, die nunmehr die Azimutrichtung der Rakete beeinflußt und überwacht. Flöge die Rakete völlig horizontal, so hätte die Rollsteuerung überhaupt keinen Einfluß mehr auf die Flugrichtung, die dann ausschließlich von der Giersteuerung beeinflußt würde.

Um den Treibstoffvorrat der Rakete möglichst gut auszunutzen, wird der Antrieb der ersten Stufe erst unterbrochen, wenn eine der beiden Treibstoffleitungen meldet, daß kein Treibstoff mehr gefördert wird, die Ventile also geschlossen werden müssen, um eine Explosion zu verhüten. Im gleichen Augenblick wird durch Öffnung der Ventile der Antrieb der zweiten Stufe gezündet. Die Messung des Druckes in den beiden Treibstoffzuleitungen der ersten Stufe und die Auswertung des Druckabfalls als Kommando zum Löschen der ersten und zum Zünden der zweiten Stufe ist ebenfalls eine Aufgabe der Steuerung. Der Brennschluß der ersten Stufe erfolgt etwa 150 Sekunden nach dem Start, die Rakete ist dann etwa 60 Kilometer hoch und 40 Kilometer von der

Startstelle entfernt. Ihre Geschwindigkeit beträgt etwa 1700 Meter in der Sekunde.

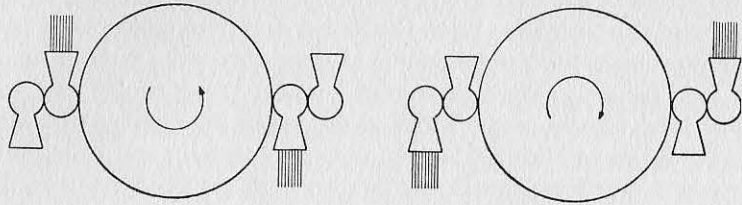
Damit die zweite Stufe einwandfrei brennen kann, werden im Augenblick der Zündung aus der Zelle, in der die Brennkammer der zweiten Stufe versteckt ist, zwei große runde Deckel herausgeworfen, so daß der Strahl sich ausbreiten kann. Die Zellen der ersten und zweiten Stufe sind durch sechs mit Pulver gefüllte »Sprengschrauben« verbunden, die für die Trennung gesprengt werden können. Diese erfolgt aber erst, wenn durch Druckanzeige-Geräte in der ersten Stufe festgestellt wird, daß ihr Schub wirklich auf Null heruntergegangen ist, und wenn durch ähnliche Meßinstrumente in der zweiten Stufe festgestellt wurde, daß deren Schub sich voll ausgebildet hat. Täte man das nicht, so bestünde die Gefahr, daß die erste Stufe, die ja wegen der leeren Behälter sehr leicht ist, die zweite Stufe nach der Trennung noch einmal einholt und eventuell beschädigt.

Nachdem das Steuerzentrum auf Grund von Druckmessungen die Trennung der ersten von der zweiten Stufe verursacht hat und diese allein fliegt, sprengt es (ebenfalls durch Sprengschrauben) die Schutzhülle ab, die den Satelliten bisher verborgen hat. Sie ist jetzt nicht mehr erforderlich, da sich die Rakete bereits in so großen Höhen bewegt, daß die Luftkräfte und die Luftreibung gering sind. Beim Brennschluß der zweiten Stufe ist die Rakete etwa 200 Kilometer hoch und, in horizontaler Richtung gemessen, etwa 280 Kilometer von der Startstelle entfernt. Ihre Geschwindigkeit beträgt etwa 4000 Meter in der Sekunde.

Mit der Abtrennung der ersten Stufe sind auch die Leitungen zu ihren Steuerorganen zerrissen, und die Steuerung wird nun von den Steuerorganen der zweiten Stufe übernommen, die denen der ersten Stufe stark ähneln. Auch während des Fluges der ersten Stufe waren sie bereits mit dem Steuerzentrum verbunden, machten also alle Steuerbewegungen mit. Sie konnten sich nicht auswirken, weil sowohl die Brennkammer als auch die Düsen nicht von Gas durchströmt wurden. Wie in der ersten Stufe werden Stampf- und Gierschwingungen durch Schwenken der Brennkammer ausgeglichen, und diese Schwenkung erfolgt wieder mit hydraulischen Zylindern. Das Öl für sie kommt aus einer kleinen Pumpe, die ein Elektromotor antreibt, denn die zweite Stufe besitzt keine Turbopumpe.

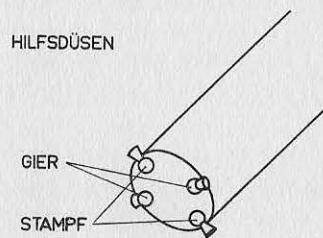
Die Düsen für die Rollsteuerung sind fest an der Außenhaut der Rakete, dicht unterhalb des Steuerungszentrums angebracht. Da sie nicht schwenkbar sind, gibt es im ganzen vier: zwei für Rechtsdrehen,

zwei für Linksdrehen. Solange der Antrieb der zweiten Stufe arbeitet, werden die Düsen mit Propangas betrieben. In den Zuleitungsrohren liegen kleine Ventile, die vom Steuerungszentrum geöffnet und geschlossen werden.



JE EIN PAAR ROLLDÜSEN FÜR RECHTS- UND LINKS-DREHEN

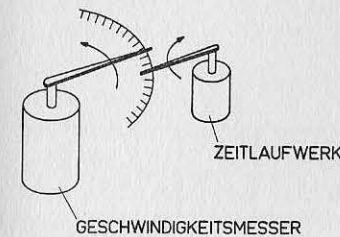
Zwischen dem Brennschluß der zweiten und dem Brennbeginn der dritten Stufe liegt eine lange Zeit, in der die Rakete gesteuert werden muß. Während die Rollsteuerung mit den bisher verwendeten Düsen möglich ist, kann das Triebwerk der zweiten Stufe nicht mehr zur Steuerung herangezogen werden, da es keinen Schub mehr liefert. Also sind auch für die Gier- und Stampfsteuerung der zweiten Stufe besondere



kleine Düsen vorgesehen. Nach Brennschluß der zweiten Stufe werden alle diese Düsen mit Helium aus einem Druckbehälter betrieben. Die vier Hilfsdüsen stoßen aus dem »Heck« der zweiten Stufe radial nach außen. Zur Steuerung wird immer nur eine von ihnen mit Gas beschickt, wodurch sie eine seitliche Kraft auf das untere Ende der Rakete ausübt.

In der nun folgenden Freiflugzeit der Rakete hat die Erdanziehung die Möglichkeit, ihre Bahn zur Erde hin zu krümmen. Aus der bei Brennschluß der zweiten Stufe noch aufwärts gerichteten Bahn wird allmählich eine Horizontale. Damit die Satellitenbahn möglichst kreisähnlich verläuft, muß die Zündung der dritten Stufe gerade dann vorgenommen werden, wenn die Bahn möglichst genau horizontal liegt. Nun hat man bewußt auf eine Beeinflussung der Triebwerke der ersten und zweiten Stufe verzichtet, um aus diesen beiden Stufen das Maximum an Geschwindigkeit herauszuholen. Das bedeutet jedoch, daß die horizontale Bahn zu verschiedenen Zeitpunkten erreicht wird, je nachdem, wie gut oder schlecht die Triebwerke gearbeitet haben. Ihr Wir-

kungsgrad ist ja nicht konstant, sondern ändert sich von Rakete zu Rakete mit den zufälligen Bauungenauigkeiten. Um den Zeitpunkt, in dem die horizontale Bahn erreicht ist, trotzdem genau festzustellen, muß man die Geschwindigkeit der Rakete überwachen. Man verwendet dazu, wie in vielen anderen Fällen, einen Kreisel-Beschleunigungsmesser. Dieser Kreisel befindet sich auch im Steuerzentrum der Rakete und besitzt einen Zeiger, der sich während der ganzen Antriebsbahn allmählich dreht und auf einer Skala die Geschwindigkeit der Rakete anzeigt. Im Moment des Brennschlusses der zweiten Stufe beginnt ein zweiter Zeiger, der von einem einfachen Zeitlaufwerk betrieben wird, sich in das Gebiet dieses Geschwindigkeitszeigers hineinzubewegen, der



nun natürlich stillsteht. Der Zeitpunkt, zu dem sich diese beiden Zeiger berühren, ist der Zündungszeitpunkt für die dritte Stufe. Haben die beiden Triebwerke der ersten und zweiten Stufe überdurchschnittlich gut gearbeitet, so ist die Geschwindigkeit bei Brennschluß der zweiten Stufe besonders hoch, und das horizontale Stück der Bahn wird spät

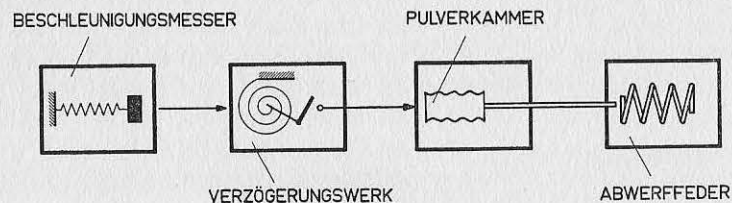
erreicht. Dann ist aber auch der Zeiger des Geschwindigkeitsmeßgerätes weit vorangerückt und wird erst spät von dem Zeitlaufzeiger erreicht, das heißt, die dritte Stufe wird spät gezündet. Haben beide Triebwerke unterdurchschnittlich gearbeitet, so ist die Geschwindigkeit der Rakete bei Brennschluß der zweiten Stufe kleiner als vorgesehen, der Zeiger des Geschwindigkeitsmeßgerätes hat sich nicht so weit gedreht wie vorgesehen, und es kommt früher als normal zur Zündung der dritten Stufe.

Wir haben hier also ein sehr einfaches Rechenggerät, mit dem der Zündzeitpunkt der dritten Stufe von dem Zeitpunkt des Brennschlusses der zweiten Stufe und von der Brennschlußgeschwindigkeit in diesem Moment abhängig gemacht wird.

Berühren sich die beiden Arme des Rechners, werden zugleich eine ganze Reihe von Vorgängen ausgelöst. Da die dritte Stufe keine eigene Steuerung besitzt, muß sie auf andere Weise stabilisiert werden. Das erreicht man, indem man sie um ihre Längsachse in Rotation versetzt, so daß sie wie ein Kreisel bemüht ist, diese beizubehalten. Die dritte Stufe ist daher mit der zweiten Stufe durch Kugellager verbunden und am Rand ihrer Düse mit einem Kranz von Pulverraketen besetzt, die im Augenblick der Trennung gezündet werden und sie auf eine hohe

Umlaufgeschwindigkeit bringen. Etwa gleichzeitig werden Verzögerungs- oder Bremsraketen gezündet, die an der zweiten Stufe angebracht sind und dafür sorgen, daß diese der dritten gegenüber aufgehalten wird, so daß die dritte Stufe aus der zweiten herausrutscht, ohne daß ihr Antrieb schon gezündet wäre. Das Kommando für die Zündung des Antriebes der dritten Stufe wird an sich ebenfalls von der Berührung der beiden Arme gegeben, aber durch eine langsam abbrennende Zündschnur verzögert, die erst an ihrem Ende die Zündung der dritten Stufe verursacht. Die Brennkammer der dritten Stufe gibt der Rakete und dem auf der Spitze angebrachten Satelliten nun die Geschwindigkeit, die sie brauchen, um auf der Kreisbahn um die Erde zu bleiben.

Ist die dritte Stufe ausgebrannt, so kann sie von der Nutzlast, das heißt dem Satelliten, getrennt werden. Hierzu dient ein einfaches, in



einer konservenbüchsen großen Hülle untergebrachtes Steuergerät. Die Büchse enthält als auslösendes Meßgerät einen Beschleunigungsmesser, der überwacht, wann die Beschleunigung der dritten Stufe aufhört, das heißt, das Triebwerk ausgebrannt ist. Er stößt ein kleines Verzögerungswerk an, das nach einer gewissen Zeit eine Batterie aus Quecksilberzellen mit einem Zünddraht verbindet. Der Zünddraht führt in eine Pulverkammer, die völlig abgeschlossen, aber mit einem dehnbaren Mantel umgeben ist. Die Zündung des Pulvers verursacht eine Streckung dieses Mantels, der seinerseits über einen Stift eine Feder auslöst. Die Feder wirft den Satelliten von der dritten Stufe ab, so daß beide Teile nun getrennt voneinander die Bahn durchmessen.

Schon diese kurze Übersicht über die Funktion der Steuerung der Vanguard-Rakete läßt die Vielfalt der Aufgaben und Lösungswege erkennen, die der Entwickler beherrschen muß. Die Raketensteuerung erfordert wie Triebwerk und Zelle die Zusammenarbeit vieler tüchtiger Ingenieure zu ihrer Vollendung.

Die Bodengeräte

Als Ende 1943 in Peenemünde die ersten Raketen vom Typ V2 – die damals noch A-4-Raketen hießen – majestätisch ihre Startstelle verließen und sicher ihre Bahn durchliefen, da ahnte die von dem Jubelgeschrei der Techniker angesteckte politische und militärische Führung noch nicht, daß einmal für den militärischen Einsatz nicht das komplizierte und in völliges Neuland vorstoßende Gerät, die Rakete, sondern die viel einfacher scheinenden Bodengeräte, die zum Start einer Rakete benötigt werden, ein entscheidender Engpaß werden sollten. Die welt- raumbegeisterte Gruppe der Techniker hatte ihr Hauptaugenmerk im wesentlichen auf die Rakete selbst gerichtet. Von den Bodengeräten waren nur einige, und diese außerhalb von Peenemünde, entwickelt worden. Die Propaganda, mit der die ehrgeizigen Raketentechniker ihre Pläne durchzusetzen verstanden, argumentierte ja gerade damit, daß die Raketen – im Gegensatz zu den schweren Geschützen – praktisch »von der flachen Hand« geschossen werden könnten. Daß dem nicht so war, zeigte sich bei genauerem Durchdenken der stationären und motorisierten Abschußstellen für die V2.

Eine Rakete benötigt auf ihrem Lebensweg eine Vielzahl der verschiedenartigsten Bodengeräte, damit sie ihre Funktion erfüllen kann, und zwar um so mehr, je größer und je komplizierter sie ist. Schon die Bodenanlagen, Laboratorien und Forschungsstätten, die für die Entwicklung der Rakete gebraucht werden, sind umfangreicher als bei irgendeinem anderen technischen Gerät. Wir wollen in der folgenden Betrachtung aus der Vielzahl dieser Anlagen, Geräte und Maschinen nur den Brennstand besonders herausheben, weil er das Wahrzeichen einer jeden Raketenentwicklungsstelle ist. Auch auf die zahlreichen für die Fertigung benötigten Spezialgeräte und Prüfeinrichtungen wollen wir hier nicht eingehen. Sie sind für jede Rakete verschieden und daher so vielfältig, daß auch eine knappe Übersicht zu viel Raum einnehmen würde.

Die Bodengeräte, die notwendig sind, um eine aus der Fabrikation kommende fertige Rakete zum Start zu bringen, lassen sich aus dem Lauf einer solchen Rakete ableiten. Zur Überbrückung der Entfernung zwischen der Fabrikationsstätte und der Startstelle werden Transportgeräte benötigt, die die Rakete auf der Straße, auf den Schienen oder durch die Luft zur Startstelle bringen. In der Nähe der Startstelle wird die Rakete zunächst im allgemeinen gelagert. Bevor sie zum Start zugelassen wird, muß sie noch einmal einer Prüfung unterzogen werden. Die hierzu notwendige Prüfeinrichtung ist entweder stationär oder

motorisiert aufgebaut. An der Startstelle selbst müssen die meisten Raketen aufgerichtet werden; danach werden sie aus besonderen Tankwagen betankt. Zwischen diese Vorgänge schieben sich zahlreiche Prüfungen ein, die die Rakete bis zum letzten Augenblick unter Kontrolle halten. Fertig betankt und geprüft ruht sie auf ihrer Gleitbahn oder steht auf ihrem Starttisch, von dem sie ihre Reise in den Raum antritt. Aber selbst nach Verlassen der Startstelle sind noch Bodengeräte tätig. Eine große Zahl von Raketen wird durch Funk ferngesteuert und hierzu die entsprechende Funk-Bodenanlage benötigt. Insbesondere bei Versuchstarts wird die Bahn der Rakete durch optische oder Hochfrequenzgeräte vermessen, und schließlich werden aus der Rakete eine Reihe von Meßwerten über ihre inneren Vorgänge oder über ihre Umgebung auf die Erde zurückgefunkt, die von entsprechenden Bodenanlagen aufgenommen, registriert und verarbeitet werden müssen.

Kleinere Raketen für kürzere Reichweiten, insbesondere Pulverraketen, sind im allgemeinen so stabil aufgebaut, daß ihr Transport keine besonderen Schwierigkeiten macht. Man befördert sie in Holz- oder Blechkisten mit Zeltbahnüberzügen oder auch offen auf normalen Lastwagen oder Eisenbahnfahrzeugen. Daß trotzdem auch Feststoffraketen mit Vorsicht und Umsicht gehandhabt werden müssen, um Beschädigungen zu vermeiden, zeigt unser Bild auf Seite 196, auf dem eine »Honest John« von einem Transportfahrzeug mit einem Kran abgehoben wird, um auf die Startlafette geladen zu werden.

Anders ist es mit den großen, empfindlichen Raketen für große Reichweiten. Nicht nur, weil sie sehr teuer sind und sehr viele kostbare Instrumente enthalten, sind sie besonders zu behandeln, sondern vor allem, weil sie infolge des für ihre Reichweite erforderlichen Massenverhältnisses sehr leicht und daher sehr empfindlich gebaut sind. Sie dürfen nur auf bestimmten Punkten ihrer Zelle gelagert werden, da alle anderen Punkte sich unter der Last der Rakete einbeulen oder deformieren würden. Entsprechend müssen die Fahrzeuge ausgebildet werden; sie müssen Haltebolzen oder Gurte an den Punkten besitzen, die die Rakete hierfür anbietet. Im allgemeinen werden diese großen Raketen für den Transport zerlegt, zumindest wird die schwere Nutzlast, die Spitze, getrennt verladen. Ein extremer Fall ist bei der amerikanischen interkontinentalen Rakete »Atlas« gegeben. Sie ist so empfindlich, daß man sie nur transportieren kann, wenn ihre Behälter, die später zur Aufnahme des Treibstoffes dienen, während des Transportes unter Druck stehen. Die Transportgeräte für die Atlas sind zu diesem Zweck mit Druckgasbehältern ausgerüstet.

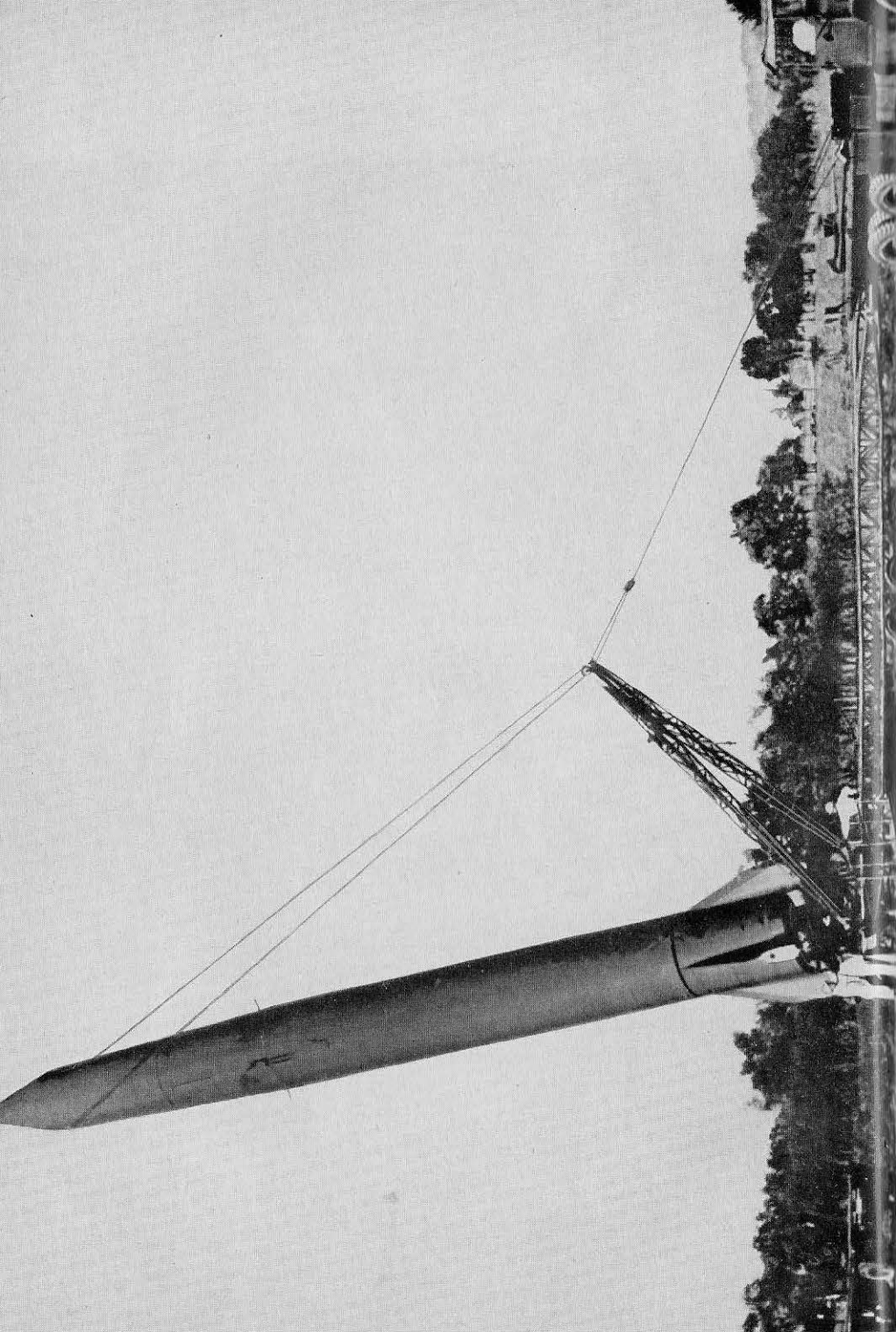


Da der Transport der großen Raketen so umständlich ist und dabei ständig die Gefahr einer unabsichtlichen oder absichtlichen Beschädigung besteht, liegt es nahe, für den militärischen Einsatz auf den Transport überhaupt zu verzichten. Das kann und wird man bei Raketen für sehr große Reichweiten sicherlich auch tun. Diese Raketen dürften aller Voraussicht nach in tief unter der Erde liegenden, bombensicheren Werkstätten gefertigt und in ebensolchen Lagern aufbewahrt werden und können dementsprechend direkt aus diesen unterirdischen Werkstätten verschossen werden. In diesem Fall, der hoffentlich nie eintreten wird, entfielen die wichtigste – nach Ansicht des Verfassers sogar einzige – Möglichkeit, Fernraketen-Angriffe abzuwehren, nämlich, die Raketen vor dem Start am Boden zu zerstören.

Ein so kompliziertes Gerät wie eine große Rakete muß nach jedem Transport überprüft werden, ehe man es zum Start bringen kann. Kurz vor dem Start wird die sogenannte »trockene Prüfung« ohne Treibstoffe, vorgenommen. Sie soll sicherstellen, daß die vielen beweglichen Teile der Rakete während des Startes nicht versagen, da der Ausfall eines dieser Teile den Verlust der ganzen Rakete zur Folge haben könnte.

Meist wird die Rakete liegend auf einem Fahrzeug an die Prüfstellung herangeführt, die entweder in einem festen Gebäude oder in einem Lastwagen untergebracht ist. Die Rakete besitzt eine Reihe von Anschlußstellen für elektrische oder pneumatische Leitungen, also eine Reihe von Steckkontakten und Rohranschlüssen. Über kräftige elektrische Leitungen wird der Rakete Strom zugeführt, damit die an Bord eingebaute Batterie sich in den Prüfungen nicht erschöpft. Über andere Leitungen können dieselben Schaltvorgänge ausgelöst werden, die später beim Start ein Bordgerät nach dem anderen einschalten, und schließlich gibt es eine Reihe von Rückmeldeleitungen, über die die elektrischen oder die mechanischen Geräte über elektrische Kontakte ihre Funktion an die Prüfstellung zurückmelden. An die pneumatischen Steuerleitungen, mit denen die Ventile und Armaturen, die Druckmeßgeräte und die Regelorgane geprüft werden können, schließt man Druckgasbehälter der Prüfanlagen über Handventile und automatische Armaturen an. Die Reihenfolge des Einschaltens aller Teile ist die gleiche wie später beim Start. Unser Bild auf Seite 196 zeigt die Redstone bei der liegenden Prüfung durch eine motorisierte Anlage.

Während eine solche »trockene Prüfung« für ausprobierte und in großer Serie gefertigte Raketen vor dem Start im allgemeinen ausreicht, werden Raketen, die versuchsweise und nur in wenigen Stücken gefertigt worden sind und gestartet werden sollen, meist noch anderen



Prüfungen unterzogen. Das wichtigste Instrument dafür ist der Prüfstand. Für große Raketen ist dies ein Gebäude mit vielen Etagen, meist eine Stahlkonstruktion wie auf unserem Bild Seite 197. Die einzelnen Etagen, die Arbeitsbühnen, lassen sich zur Seite schwenken, so daß man die Rakete als Ganzes in den Prüfstand einfahren und dann die Arbeitsbühnen um sie herum schließen kann. So ist jedes Teil der Rakete, einerlei in welcher Höhe es sich befindet, den Technikern bequem zugänglich.

Im Prüfstand wird die Rakete in der gleichen Lage festgehalten, in der sie sich beim Start befindet, bei großen Fernraketen also in senkrechter Lage. Vor dem eigentlichen großen Versuch wimmelt es auf allen Arbeitsbühnen von Technikern und Ingenieuren, die mit zahlreichen Hilfsinstrumenten die Funktion der einzelnen Komponenten der Rakete nachprüfen und kontrollieren. Schließlich werden alle Verbindungen in der Rakete, die zum Prüfen aufgetrennt waren, wiederhergestellt, die Rakete wird über die dafür vorgesehenen elektrischen und pneumatischen Verbindungen mit den Einrichtungen des Prüfstandes verbunden und zunächst einer »trockenen Prüfung« unterzogen. Im Anschluß daran kann man eine sogenannte »nasse Prüfung« vornehmen. Für die »nasse Prüfung« werden die beiden Treibstoffe in die Rakete getankt und der Startvorgang bis auf das Zünden der Treibstoffe simuliert. Man läßt die Treibstoffe nicht in die Brennkammer hinein, sondern führt sie getrennt heraus, damit sie keinen Schaden anrichten können. Dieser »nasse« oder »Spritzversuch« erlaubt es, alle Funktionen bis auf das Brennen der Rakete zu untersuchen und in ihrer zeitlichen Reihenfolge und Abhängigkeit zu kontrollieren.

Endgültigen Aufschluß über die Funktionsbereitschaft einer Rakete gibt aber erst der Brennversuch. Die Rakete, die im Prüfstand so befestigt ist, daß auch der Schub des Triebwerkes sie nicht lösen kann, wird betankt wie auf dem Starttisch, gezündet und das Triebwerk auf diese Weise in Gang gesetzt. Erst mit dieser Prüfung ist es möglich, das Funktionieren des Triebwerkes, insbesondere der Brennkammer, wirklich zu erproben und auch die Vorgänge bei Brennschluß so nachzuahmen, wie sie sich später während des Fluges abspielen werden.

Der mächtige Feuerstrahl der Rakete wird unterhalb des Prüfstandes durch eine »Schurre« zur Seite gelenkt und unschädlich gemacht. Der Strahl selbst und die Ablenkflächen der Schurre müssen gekühlt werden, sonst wären sie in Sekunden zerschmolzen. Für die Vernichtung der im Antriebsstrahl steckenden Wärmeenergie sind ungeheure Wassermengen nötig. Jeder Prüfstand hat daher sein eigenes Pumpwerk, das für die kurze Brennzeit von einer oder einigen Minuten riesige Mengen von

Wasser in die Schurre pumpt. Der große Aufwand für die Strahlvernichtung läßt sich nur bei Prüfständen vermeiden, die wie Schwalbennester an steil abfallende Felswände gebaut werden.

Die Prüfstände für große Fernraketen sind wahre Wunderwerke der Stahlbaukunst. Sie sind meist geeignet, verschiedenartige Raketen aufzunehmen, damit die investierten Kosten sich besser nutzbar machen. Auf allen Arbeitsbühnen befinden sich Hilfsgeräte und Prüfeinrichtungen, mit denen die dieser Bühne zugeordneten Teile der Rakete geprüft werden können. Meist verbindet ein Fahrstuhl die verschiedenen Bühnen. Im Gegensatz zu anderen Gebäuden hat der Prüfstand nicht nur eine Kraft in Richtung auf den Erdmittelpunkt, also in Richtung der Erdbeschleunigung auszuhalten, sondern auch die Schubkraft, die gerade entgegengesetzt wirkt. Der Bau eines Prüfstandes stellt also die Bauingenieure vor besondere Aufgaben.

Elektrische und pneumatische Verbindungen zur Rakete lassen sich durch Stecker oder Rohrkupplungen verhältnismäßig leicht herstellen. Schwieriger ist es schon mit den Hochfrequenzverbindungen, die bei einem solchen Brennversuch natürlich auch mitgeprüft werden sollen. Für diese Prüfung werden an die Antennen der Rakete oder an Stelle von ihnen Hilfsantennen angeschlossen, die außerhalb des Stahlgerüsts des Prüfstandes liegen und daher in ihrer Ausstrahlung nicht behindert sind.

Die geprüfte Rakete rollt im allgemeinen in liegender Stellung auf der Startstelle ein. Zum Start selbst muß sie aufgerichtet und auf ihr Heck gestellt werden. Hierzu kann man, was nach dem Krieg sehr häufig geschehen ist, normale Kräne, allerdings von sehr großer Höhe, verwenden. Diese Kräne haben den Vorteil, daß sie universell einzusetzen sind. Lediglich für die Befestigung der Seile oder Kranhaken an der Rakete müssen Vorrichtungen geschaffen werden.

Wenn eine Rakete in größerer Stückzahl in Verwendung ist, beispielsweise eine militärische ballistische Rakete, so lohnt es sich, dafür ein besonderes Aufrichtefahrzeug zu entwickeln. Das Aufrichtefahrzeug für die V2 ist ein sechsachsiger Anhänger, der von einem Zugfahrzeug geschleppt wird. Er ist mit einer hydraulischen Kippeinrichtung ausgerüstet, mit der ein starker Arm, in dem die Rakete ruht, in die senkrechte Lage geschwenkt werden kann. Die Rakete ist in dieser Kippeinrichtung so befestigt, daß sie auch in der senkrechten Lage nicht abrutscht, sondern vorsichtig auf den Starttisch abgesetzt werden kann. Der Tragarm dient gleichzeitig mit seinen Plattformen für letzte Prüfungen und Handgriffe vor dem Start. Über eine Art Feuerleiter, die vom Boden bis zur Spitze führt, hat die Bedienungsmannschaft Zugang zu den einzelnen

Die Technik der Raketen

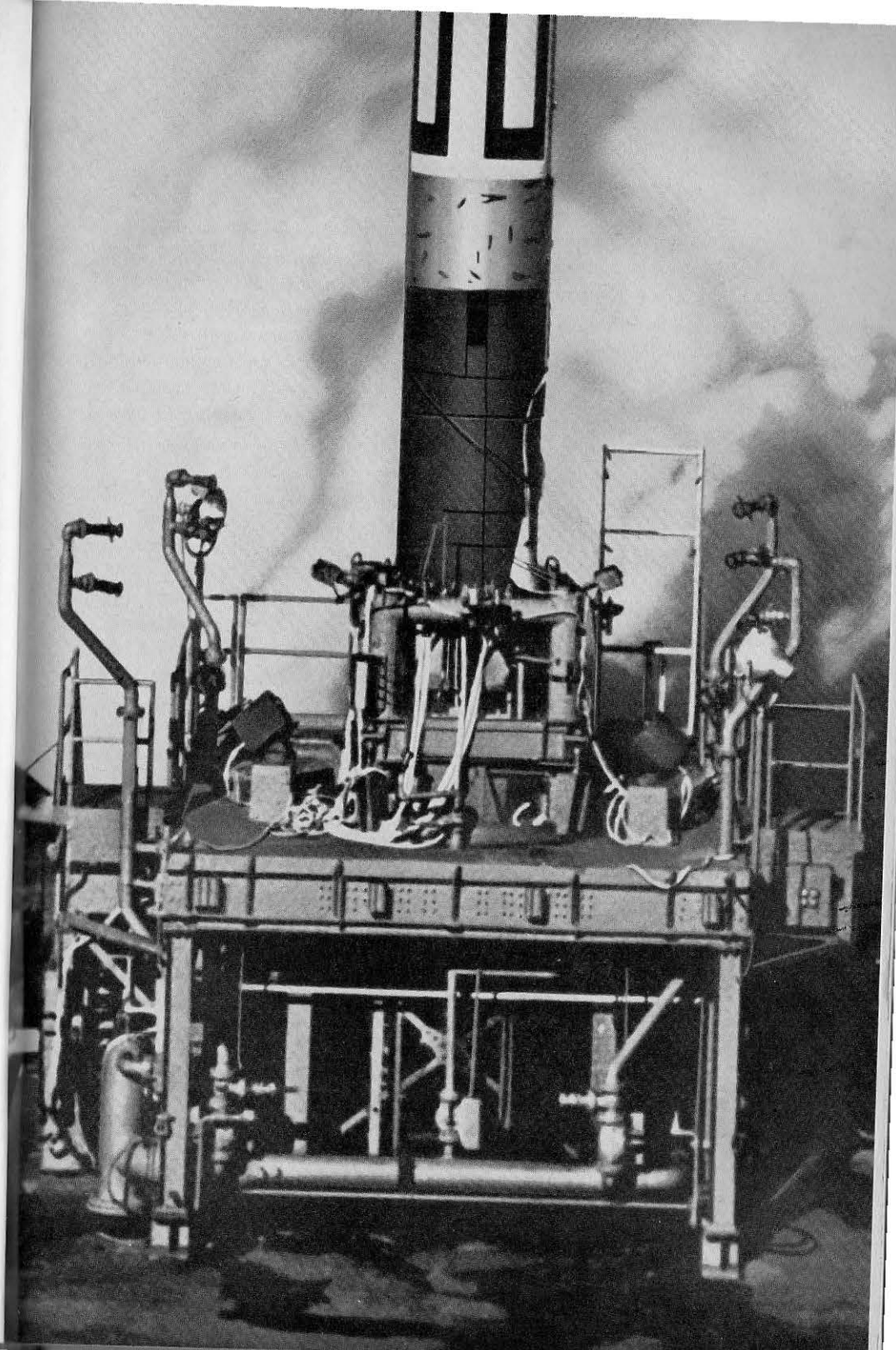
Teilen der Rakete. Unser Bild Seite 204 zeigt einen Transport- und Aufrichtewagen für die amerikanische »Corporal«. Die Einrichtung dieser Fahrzeuge ist gegenüber dem (größeren) Transportwagen der V 2 extrem vereinfacht worden. Selbst der hydraulische Antrieb des Schwenkarmes wurde durch einen einfachen Seilzug ersetzt.

Die Amerikaner haben nach dem Kriege auch für relativ große Raketen wie die »Redstone« den Lufttransport eingeführt und schätzen hierfür das Gewicht schwerer Aufrichtefahrzeuge natürlich nicht. Deshalb ist gerade für die »Redstone« ein Aufrichteverfahren entwickelt worden, das mit ganz wenigen Hilfsmitteln, in der Hauptsache ein paar Drahtseilen, auskommt. Wie man aus unserer Abbildung Seite 206 sieht, wird die Rakete hierbei starken Kräften unterworfen und längst nicht so schonend angefaßt, wie es auf einem Spezialfahrzeug der Fall wäre. Das Verfahren eignet sich also sicherlich nicht für so empfindliche Raketen wie die »Atlas«.

Auch im aufgerichteten und startbereiten Zustand können sich noch Zwischenfälle ergeben, die Arbeiten an der Spitze der Rakete notwendig machen. Hierfür stellte die Technik aus der Erfahrung mit ähnlichen Aufgaben fahrbare Arbeitsbühnen bereit, wie wir sie zum Beispiel vom Oberleitungsbau der Straßenbahnen kennen. Sie wurden für Verwendung in der Startstelle zu außerordentlicher Beweglichkeit entwickelt.

Nach dem Aufrichten kann die Rakete nicht einfach auf dem Erdboden stehen, sondern muß eine Schurre unter sich haben, die den während des Startvorganges entstehenden Antriebsstrahl zur Seite ablenkt, damit er nicht auf die Rakete zurückschlagen kann. Sie wird daher auf einen Starttisch gestellt, der diese Schurre im Innern enthält, aber noch eine Reihe weiterer Funktionen übernimmt. Während des Startvorganges und für die Betankung müssen elektrische und pneumatische Verbindungen mit den Bodengeräten geschaffen werden. Die pneumatischen Verbindungen laufen fast immer über den Starttisch in die Flossen oder in das Heck der Rakete.

Da bei den meisten Raketen, insbesondere den mehrstufigen, das Steuerungszentrum dicht hinter der Spitze angebracht ist, läuft von dort ein Kabel über einen abwerfbaren Stecker in die Bodenanlage. Bei dem Mondboten (Thor-Able), den die Vereinigten Staaten auf die Reise zu unserem natürlichen Trabanten geschickt haben, sind es, wie unser Bild zeigt, sogar zwei getrennte Kabelstränge. Damit dieses Kabel mit seinem vielleicht schweren Stecker nicht beim Start gegen die Rakete schlägt und etwa Beulen oder Löcher hervorruft, wird es von einem besonderen Kabelmast gehalten, der ebenfalls zur Startanlage gehört. Die Stecker





werden an der Rakete meist durch Elektromagneten gehalten, die in seinem bodenseitigen Teil untergebracht sind und sich an Eisenankern in seinem bordseitigen Teil festhalten. Nach dem Zünden des Triebwerkes wird der Strom durch diesen Elektromagneten unterbrochen, der Stecker löst sich und kann von einer Feder abgeworfen werden. Zur Schonung der schweren und doch empfindlichen Stecker sind am Kabelmast Auffangnetze angebracht, die den Aufprall mildern.

Bei der Besprechung der Feststoffraketen haben wir erwähnt, daß der Feststoff für eine große Treffgenauigkeit »konditioniert«, das heißt vor dem Start auf eine feste vorgeschriebene Temperatur gebracht werden muß, damit er genau die Energiemenge an die Rakete abgibt, die zur Erreichung des Zieles notwendig ist. Da nun die Außentemperatur bei dem Einsatz von Raketen sehr stark schwanken kann, muß die Feststofftemperatur künstlich erzeugt werden. Man legt also eine Temperatur fest, die höher ist als die Außentemperatur, und heizt die Rakete mit dem Feststoffinhalt vor dem Start auf. Hierzu wird sie in elektrische Heizkissen eingewickelt und durch genaue Kontrolle dafür gesorgt, daß beim Start die richtige Temperatur erreicht ist.

Raketen, die ungesteuert gestartet werden oder nur mit Luftrudern ausgerüstet sind, müssen für eine gewisse Zeit, nämlich bis sie genügend Geschwindigkeit erreicht haben, damit die Luft stabilisierend wirken kann, auf ihrer Bahn geführt werden. Solche Raketen werden auf Gleitbahnen gestartet, wie wir sie auf den Seiten 212 und 213 für Senkrecht- und Schrägstart zeigen. Die Gleitbahnen führen die Raketen auf dem ersten kurzen Stück ihres Weges, so daß sie nicht in Versuchung kommen, zu taumeln oder gar abzustürzen. Ein originelles Verfahren, angewendet bei der französischen Forschungsrakete »Véronique«, haben wir auf Seite 213 abgebildet. Diese Rakete wird senkrecht gestartet, besitzt aber gar keine Steuerung. Da das Triebwerk nicht stark genug ist, die für die Stabilisierung der Rakete notwendige Geschwindigkeit auf sehr kurzem Wege zu erzielen, andererseits der Bau eines vielleicht 50 Meter langen Startturmes den Entwicklern der Rakete zu umständlich, zu schwierig oder gar unmöglich erschien, hat man einen sehr geschickten Ersatz erfunden. Die Rakete trägt an ihren vier Flossen vier nach außen zeigende Leitarme, an denen jeweils ein Drahtseil befestigt ist. Diese vier Drahtseile laufen am Starttisch über Umlenkrollen auf eine gemeinsame Rolle, so daß sie nur *gleichmäßig* länger werden können. Beim Start ziehen sie sich aus dem Starttisch heraus, die Rakete sorgt dafür, daß sie alle stets straff gespannt sind, und da die vier Seile in jedem Augenblick gleich lang sind, ist die Rakete gezwungen, genau senkrecht

in den Himmel zu steigen. In etwa 50 bis 60 Metern Höhe werden die vier Arme mit ihren Seilen abgesprengt, und die Rakete hat nun so viel Geschwindigkeit, daß sie durch die Luft stabilisiert wird.

Beim Start zerreißt die aufsteigende Rakete die letzten materiellen Bindungen zum Erdboden. Damit sind aber noch nicht alle Verbindungen zur Startstelle gelöst. Ein großer Teil der Raketen, insbesondere jene für die Flugabwehr, erhalten über den Funkweg Vorschriften über ihre Bahn und über das Ziel, auf das sie zufliegen sollen. Hierzu dienen die umfangreichen Boden-Funkanlagen, Peilanlagen, Kommandosender, die wir früher bereits kennengelernt haben.

Aber auch bei Raketen, die in ihrer endgültigen Ausbildung ohne jede Funkverbindung auskommen und ihre Bahn allein finden, werden bei den ersten Versuchsstarts Hochfrequenzverbindungen und selbst optische Verbindungen vom Boden zur Rakete gehalten. Eines der wichtigsten Ergebnisse eines Versuchsstarts ist die geflogene Bahn, die deshalb möglichst genau vermessen werden muß. In den ersten Jahren der Fernraketenentwicklung wurden für diese Vermessung Mittel eingesetzt, die auch sonst in der Vermessungstechnik von bewegten Körpern üblich waren, nämlich optische Geräte, mit denen die Rakete laufend gefilmt oder fotografiert wurde. Zu jedem Bild, das von der Rakete auf der Platte oder dem Film entstand, wurden gleichzeitig die Azimut- und Höhenwerte eingetragen. Wenn man mehrere solcher Bodenstationen, »Theodoliten«, zur Bahnvermessung einsetzt, kann man daraus später die Bahn in allen Einzelheiten berechnen.

Wir haben bereits in dem Doppler-Effekt-Verfahren ein weiteres Vermessungsverfahren kennengelernt, das nicht nur den Vorteil hat, auch bei unsichtigem Wetter, bei dem die optischen Geräte versagen müssen, anwendbar zu sein, sondern darüber hinaus noch genauere Resultate bis zu größeren Reichweiten liefert. Auch die Radartechnik hat ihre Genauigkeit inzwischen so weit verbessert, daß man sie zur Flugbahnvermessung einsetzen kann.

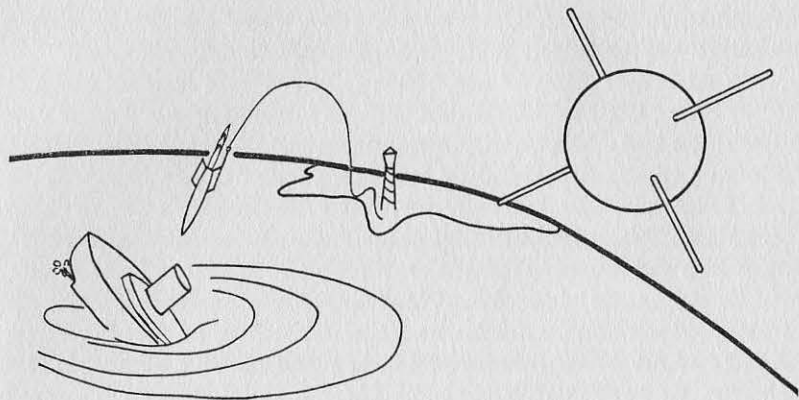
Neben den Koordinaten der Bahn interessieren in der Rakete auftretende Meßwerte, die für den Betrieb des Triebwerkes oder der Steuerung wichtig sind. Man will zum Beispiel den Druck in der Brennkammer, den Druck der Treibstoffe vor dem Eintritt in sie, die Temperatur des Kühlmittels oder die Lage eines Ruders oder einer schwenkbaren Düse während des Fluges laufend verfolgen. Dazu dienen die Meßwertübertragungsverfahren. Einem Sender an Bord werden die interessierenden Meßwerte zugeführt. Er prägt sie der von ihm ausgestrahlten Hochfrequenzwelle in geeigneter Form auf und sendet sie zur

Bodenstation herunter. Dort werden diese Werte auseinandergedrückt, verstärkt und schließlich in einem Registriergerät aufgeschrieben.

Von ähnlichem Interesse und mit denselben Mitteln durchzuführen ist die Übertragung von Meßwerten aus der Umgebung der Rakete zum Boden, also Luftdruck, Temperatur, Sonneneinstrahlung und dergleichen. Am umfangreichsten sind diese Meßprogramme bei den Satelliten, die ja viel länger als eine Rakete in der oberen Atmosphäre verweilen können. Auch für diese Meßwerte stehen am Boden umfangreiche Empfangs-, Auswerte- und Registrieranlagen zur Verfügung. Ja, man ist heute so weit, daß sie nicht mehr in der rohen Form aufgeschrieben werden, in der die Meßgeräte sie herunterfunken und ein Beobachter in der Rakete sie ablesen würde. Bevor man die Meßwerte niederschreibt, werden sie verarbeitet, das heißt zwei Werte miteinander kombiniert, die Differenzen gezogen oder das Produkt gebildet, und erst das fertige Ergebnis wird in Tabellen- oder Kurvenform niedergelegt. Dem Wissenschaftler wird hierdurch ein ermüdender und zeitraubender Teil der Auswertungsarbeit abgenommen.

Das Arbeitsfeld »Bodengeräte« ist viel zu weit und viel zu umfangreich, als daß in einem kurzen Kapitel eine einigermaßen erschöpfende Aufzählung gegeben werden könnte. Wir konnten die Probleme und Aufgabenstellungen wie die Lösungen nur andeuten und durch ganz wenige Beispiele belegen. Die Verschiedenheit der für zivile und militärische Zwecke benutzten Raketen, von denen jede ein ganzes System von Bodengeräten für sich beansprucht, und die Tatsache, daß die meisten Bodengeräte speziell auf ihre Rakete zugeschnitten sein müssen, bringt diese Vielfalt hervor.

Die Bodengeräte stehen zur Raketentechnik etwa im gleichen Verhältnis wie der Straßenbau zum Kraftfahrzeug. Ohne einen ausgebildeten Straßenbau mit seinen großen Erfahrungen und seinen hervorragenden Leistungen gäbe es das moderne Automobil nicht. Ohne eine ausgebildete Bodentechnik wäre die moderne Rakete undenkbar. Die Schaffung funktionstüchtiger und dauerhafter Bodengeräte erfordert sehr viele Kenntnisse und sehr hohes Können von den Technikern. Das Aufgabengebiet »Bodengeräte« ist genauso interessant und genauso umfangreich, wenn auch nicht so sensationell und daher nicht so anziehend wie das Aufgabengebiet »Raketentechnik« selbst.

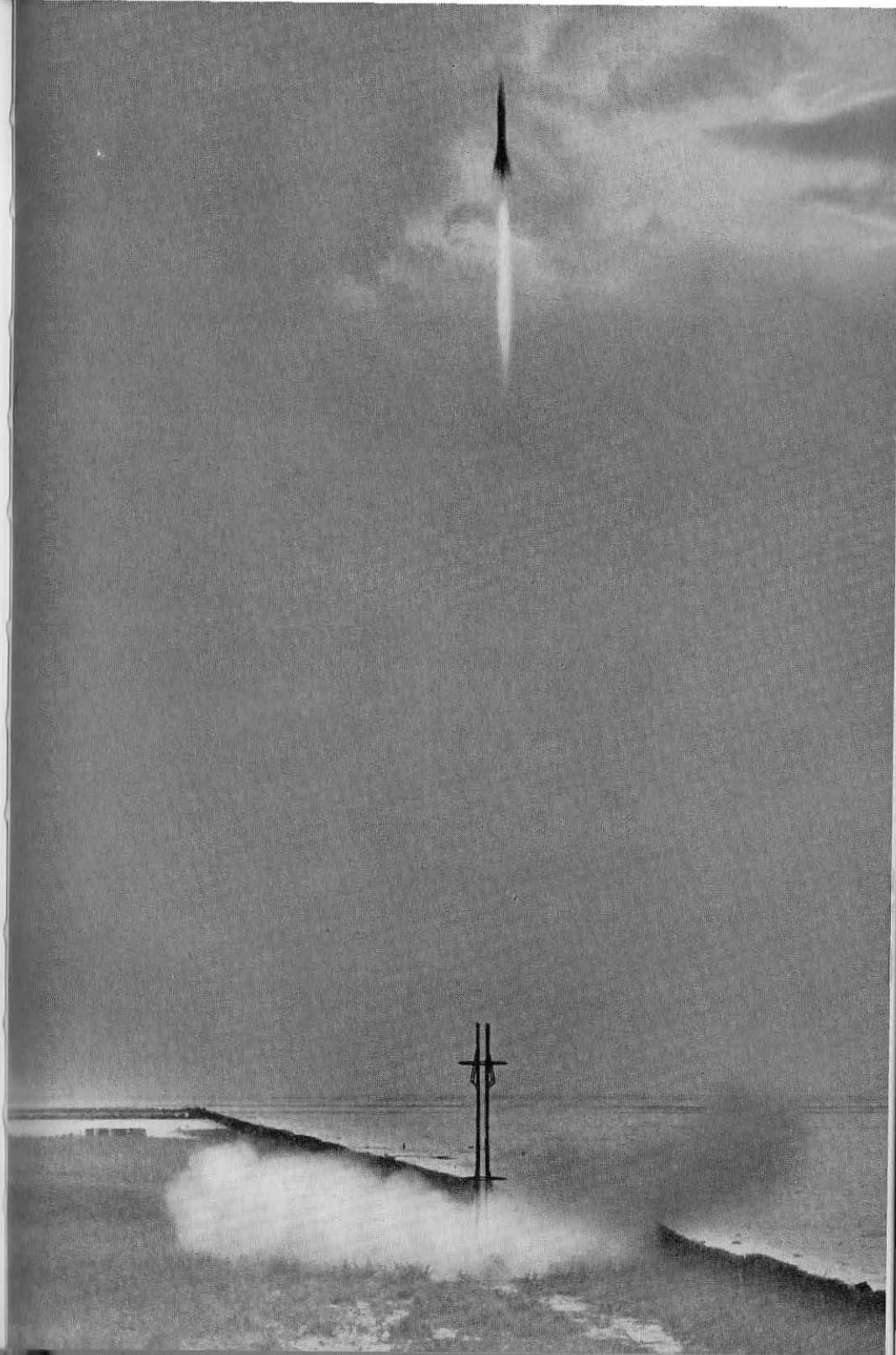


Kapitel 4

DER NUTZEN DER RAKETENTECHNIK

Die Entwicklung der modernen Raketentechnik in den letzten Jahrzehnten hat sich bis auf den heutigen Tag fast ausschließlich an der Verwendung für militärische Zwecke orientiert. Selbst die enormen Anstrengungen im Rahmen des Geophysikalischen Jahres wurden für das psychologische Kampffeld des kalten Krieges ausgewertet. Nun bringen Waffen und deren Verwendung der Menschheit keinen wirklichen Nutzen. Es ist zu hoffen und für das Weiterbestehen der Menschen auf dieser Erde sogar notwendig, daß einmal wie im Verkehr zivilisierter Bürger untereinander auch im Verkehr der zivilisierten Völker das Faustrecht durch eine andere Rechtsform abgelöst wird. In Anbetracht der bisher fast ausschließlich militärischen Verwendung der Raketentechnik kann man mit Recht die Frage stellen, ob sie dem Menschen überhaupt Nutzen bringt oder in Zukunft bringen wird. Man kann weiterhin fragen, ob sich der Aufwand, der für die Entwicklung der Raketentechnik getrieben wird, einmal bezahlt machen wird.

Natürlich darf man diese Frage nicht im Geiste eines Wucherers beantworten, der nur Werte anerkennt, die sich in Mark und Pfennig ausrechnen lassen. Die Entwicklung der Naturwissenschaften (und nicht nur dieser) hat gezeigt, daß Erkenntnisse und Ergebnisse von Untersuchungen und Entwicklungen oft nach langer Zeit, manchmal völlig





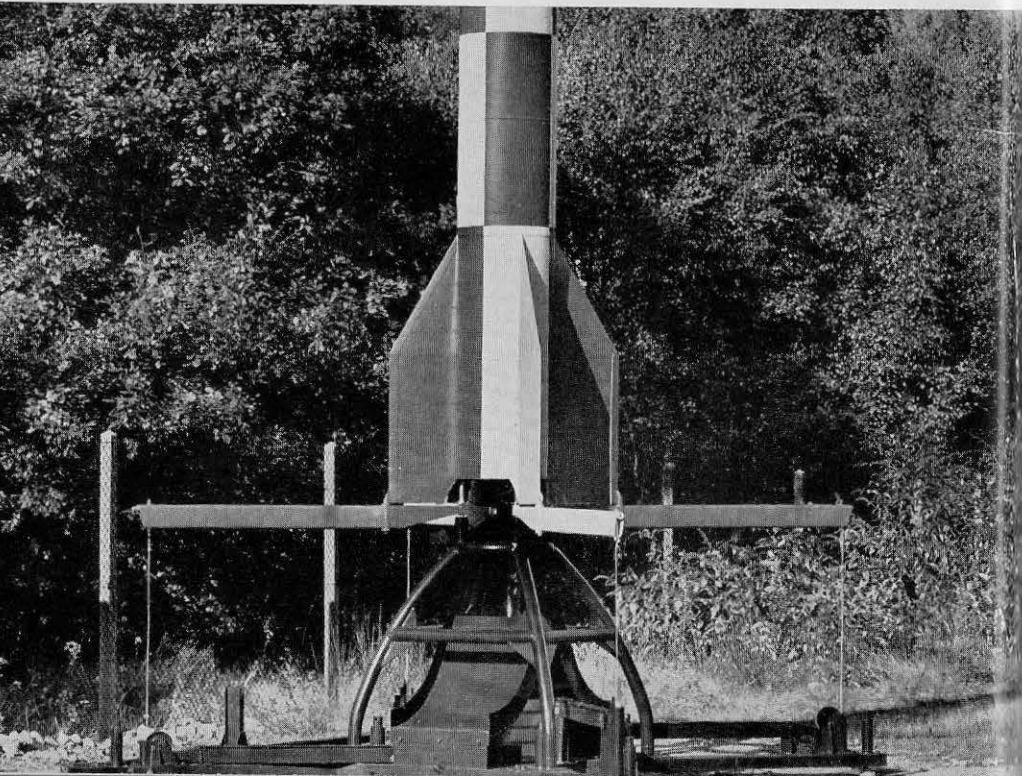
unvermutet, materielle Früchte tragen und sich auf diese Weise bezahlt machen, auch wenn sich die Möglichkeit dazu vorher nicht angedeutet hatte. Aber nicht allein diese späteren Früchte entscheiden über den Wert von wissenschaftlichen Forschungsarbeiten. Jede Erweiterung unseres Weltbildes, jede Vertiefung schon bestehender Erkenntnisse ist eine Stufe der Menschwerdung. Wir sollten uns daran gewöhnen, daß die Befriedigung unserer Neugierde, unseres Wissensdurstes mindestens genauso notwendig ist wie die Befriedigung unseres Magens. Wenn wir aufhören zu forschen und zu fragen, dann hören wir auf, Menschen zu sein.

Die Rakete ist ein hervorragendes Forschungsinstrument erstens, weil man mit ihr in Räume vorstoßen kann, die auf andere Weise unerreichbar sind, und zweitens, weil sie Umweltbedingungen schaffen kann, die ebenfalls auf andere Art und Weise nicht zu schaffen sind.

In dieser Eigenschaft liegt ihre Hauptbedeutung für den Menschen, und alle anderen »praktischen« Anwendungen treten dahinter zurück. Wenn wir trotzdem in der folgenden Übersicht mit den »praktischen« Anwendungen beginnen, so geschieht das nur, um die überragende Rolle, die die Rakete als Instrument zur Erforschung der Natur spielt, am Ende dieses Buches ausdrücklich zu betonen.

Vom militärischen Standpunkt aus ist die Rakete ein Transportfahrzeug, und zwar transportiert sie den Sprengstoff in das Gebiet des Gegners. Was sich auf militärischem Gebiet aus dieser Eigenschaft ergibt, soll noch kurz gestreift werden, ehe wir auf die Verwendung der Rakete für zivile, nichtmilitärische Transporte eingehen.

Die Angst der Menschen vor einem neuen Krieg ist zu einem großen Teil auch Angst vor den neuen militärischen Raketen. Wir glauben aber, daß diese Angst nicht begründet, besser gesagt, nicht richtig begründet ist. Zum Transport von Zerstörungs- und Vernichtungsmitteln, wie sie die modernen Sprengbomben, die Atombomben oder die vielleicht nicht ungefährlicheren chemischen und bakteriologischen Waffen darstellen, stehen neben Fernraketen auch, wie früher, Flugzeuge zur Verfügung. Daß bis heute noch kein Mittel gefunden ist, Fernraketen erfolgreich abzuwehren, weiß man. Dagegen glaubt man, daß es Methoden zu einer erfolgreichen Abwehr von Flugzeugen gäbe. Doch muß hier betont werden, daß eine erfolgreiche Abwehr von militärischen Flugzeugen, ob sie nun massiert oder im lockeren Verband angreifen, bei dem heutigen Stand der Technik nicht möglich erscheint, jedenfalls keine Abwehr, der nicht ein erheblicher Prozentsatz der angreifenden Flugzeuge ent-



kommen könnte. Sicher sind Fernraketen noch schwerer abzuwehren als Flugzeuge, aber der Unterschied in der Gefährlichkeit zwischen Fernraketen und Flugzeugen ist nur gering im Vergleich zu dem Unterschied in der Gefährlichkeit von Atombomben und konventionellen Sprengstoffen. Die Hauptgefahr liegt eben nicht im Transportmittel, sondern in dem, was transportiert wird.

Transport von Gütern und Menschen

Gehen wir von der militärischen Verwendung aus, so mag es scheinen, als stelle die Rakete auch im zivilen Bedarf in der Hauptsache ein Transportmittel für den Güter- oder Personentransport dar. Deshalb wird es vielleicht verwundern, daß gerade in den Jahren, in denen die Raketentechnik ihren mächtigen Aufschwung nahm, es um die Frage des Güter- und Personentransportes mit Raketen so still geworden ist. Wir wollen versuchen, die Möglichkeiten, die der Raketentechnik für diese Aufgabe gegeben sind, das Für und Wider für eine solche Verwendung der Rakete ohne einseitige Stellungnahme zu diskutieren.

Je schwerer und je schneller die Flugzeuge werden, um so längere Startbahnen brauchen sie zum Starten und Landen. Schon im letzten Kriege wurden zur Unterstützung des Startvorganges sogenannte »Starthilfen« entwickelt und für Bombenflugzeuge verwendet, mit denen Lasten transportiert werden sollten, für die sie ursprünglich nicht gebaut waren. Heute werden Starthilfen, wie wir sie auf Seite 220 zeigen, auch in der Zivilluftfahrt verwendet, beispielsweise für die bekannten Düsenflugzeuge Comet. Die Startbahn einer Comet kann bei Verwendung der Starthilfen um fast ein Fünftel kürzer sein als für die Comet ohne Starthilfe.

Starthilfen sind keine Raketen, aber ein Teil davon, nämlich Triebwerke. Derartige Triebwerke, die meist mit ihren Treibstoffbehältern kombiniert sind, bringt man zu zweit oder zu viert unter den Flügeln des Flugzeuges an, dem sie starten helfen sollen. Haben sie es mit ihrem Zusatzschub in die Luft gebracht, und kann es nun mit eigener Kraft weiterfliegen, dann werden sie meist abgeworfen, kommen an Fallschirmen auf den Erdboden nieder und werden zur Wiederverwendung eingesammelt, gereinigt, geprüft und betankt. Unter den Triebwerken, die während des Krieges entwickelt wurden, gab es Flüssigkeitstriebwerke, die sogenannten kalten und heißen Typen. Heute verwendet man häufig Feststofftriebwerke. Die folgende Tabelle zeigt einen kleinen Ausschnitt der in den USA verwendeten Starthilfen:

Einige Feststoffstarthilfen der USA

Type	Schub in kg	Brennzeit in s	Gewicht in kg
Loki	1 430	0,8	
OKS-4 500	2 020	5,0	107
HVAR	2 630	0,8	38
8 KS-7 800	3 540	1,8	54
OCS-10 000	4 540	2,0	103
2 KS-11 000	5 000	2,2	116
5 CS-18 000	8 160	2,5	259
OKS-47 000	21 300	3,0	628

Wenn die Starthilfen nicht unter dem Rumpf, sondern rechts und links unter den Flügeln montiert werden, ist es wichtig, daß sie beide den gleichen Schub erzeugen. Sonst würden die Triebwerke eine einseitige Kraft und damit ein einseitiges Moment um die Hochachse erzeugen, und das Flugzeug würde in eine Kurve gedrängt. Kleinere Unterschiede zwischen den Starthilfen kann das Flugzeug infolge seiner Trägheit und auch mit Hilfe seiner Steuerung ausgleichen. Von besonderer Wichtigkeit ist es, daß die beiden Starthilfen auf den beiden Seiten des Flugzeuges zur gleichen Zeit gezündet werden und zur gleichen Zeit Brennschluß haben, da sonst die gewaltige Kraft, die eine Starthilfe ausübt, das Flugzeug zum Kreiseln auf dem Boden veranlaßt, wobei es meist zu Bruch geht. Daher sind gerade bei Feststoffraketen spezielle Verfahren bei der Fertigung und beim Zünden notwendig, damit die Gleichförmigkeit genügend erhalten bleibt. Demgegenüber haben die Flüssigkeitstriebwerke natürlich den Vorteil, daß man, falls die Funktionen nicht so ablaufen, wie es erforderlich ist, jederzeit künstlich Brennschluß erzeugen kann.

Neben dieser Hilfeleistung als Starthilfe kann die Rakete auch selbständige Transporte vollbringen. Raketen zum Transport von Post sind in Deutschland und Österreich schon mehrfach in kleinem Umfange verwendet worden, insbesondere, wenn es sich darum handelte, Post an unwegsame Orte, etwa im Gebirge, zu bringen. Die beförderten Postmengen waren klein, die Entfernungen so gering, daß keine große Genauigkeit beim Treffen in der Zielgegend erforderlich war. Die Nutzlast, also der Postbehälter, ließ sich beim Eintreffen durch einen kleinen Fallschirm bremsen, wobei es gerade bei Post nicht sehr darauf ankommt, bestimmte Grenzen für die maximale Bremsbeschleunigung einzuhalten. Der Bau solcher Postraketen bietet heute keine Schwierigkeiten. Man wird sie sicher als mit einer primitiven Steuerung versehene Feststoff-

raketen ausbilden und den Postbehälter am Fallschirm zur Erde niederkommen lassen.

Postraketen für große Entfernungen sind wegen ihrer außerordentlich kurzen Flugzeit bestechend. So hatte ein russischer Raketenentwickler 1958 darauf hingewiesen, daß man Zeitungen von Moskau nach Wladiwostok in 40 Minuten befördern könnte, also beim Verkauf keine Zeitdifferenz zwischen Moskau und Wladiwostok mehr auftreten würde. Die technischen Probleme einer solchen »Rohrpost der Luft« sind zu beherrschen. Da bei einer zivilen Anwendung keine Störungsversuche von einem Gegner zu erwarten sind, könnte man die Raketen durch eine Funkfernsteuerung lenken, wodurch sich der Steuerungsaufwand in der Rakete sehr stark erniedrigt und damit das ganze Gerät verbilligt. Die hohe Treffgenauigkeit, die für eine solche Bombenpost erforderlich wäre, ist mit den heute zur Verfügung stehenden Steuerungs- und Fernlenkverfahren zu erreichen. Eine gewisse Schwierigkeit bietet sicher das Landeproblem. Aber auch hier zeigen die von militärischer Seite durchgeführten Versuche, daß es möglich ist, eine Nutzlast nach ihrer Reise durch den Weltraum sicher und unzerstört auf die Erde zurückzubringen.

Bei der zivilen Verwendung bietet jedoch die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens ein entscheidendes Kriterium. Eine ballistische Postrakete ist ein Verlustfahrzeug, das heißt, die Rakete kann nicht zum zweitenmal verwendet werden, da sie bei ihrem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre verglüht – im Gegensatz zur Nutzlast, die besonders geschützt ist und dadurch die Erde erreichen kann. Neben dem relativ hohen Aufwand für die Zelle, das Triebwerk und die Steuerung ist noch der Aufwand für die Treibstoffe zu bedenken, der gerade bei ballistischen Fernraketen große Werte annimmt. Eine genaue Durchrechnung der möglichen Kosten eines solchen Fluges zeigt trotzdem, daß die Kosten für ein Fördergut, das aus Luftpostbriefen besteht, noch nicht unerträglich hoch werden. Von den Kosten pro Brief aus betrachtet, wäre also ein derartiges Projekt durchaus ernsthaft zu diskutieren.

Nun kommt aber eine zweite wirtschaftliche Schwierigkeit hinzu: das Zubringerproblem, das schon bei der mit Flugzeugen transportierten Post für die Transportleistung entscheidend ist. Die Zeit, die ein Brief vom Absender zum Flugzeug und vom Flugzeug bis zum Adressaten braucht, ist meist um ein Vielfaches höher als die eigentliche Flugzeit. Bei einer Postfernrakete wäre dieses Verhältnis noch viel ungünstiger, weil die Fernrakete im Gegensatz zum Flugzeug so lange warten muß, bis ihre Postleistung voll ausgenutzt werden kann, das heißt bis das notwendige Gewicht an Briefen zusammengekommen ist. Während es einem

Flugzeug keinen Unterschied macht, ob es einen gefüllten oder halbvollen Postsack mitnimmt, ist diese Frage für die Wirtschaftlichkeit bei Raketen entscheidend. Die Wartezeit für derartige Postsachen wird also noch größer, und damit schrumpft der Gewinn an Flugzeit so zusammen, daß eine wirtschaftliche Verwendung von Postfernraketen sehr in Frage gestellt ist.

Aussichtsreicher für den gleichen Zweck sind unbemannte Flugzeuge, beispielsweise mit Strahlantrieb. Sie haben den Vorteil, daß sie wiederverwendbar sind. Man kann sie automatisch starten und landen lassen. Das Wiedereintauchproblem entfällt, und schließlich ist der Treibstoffverbrauch ein Bruchteil des Verbrauches der Fernraketen. Natürlich erreichen derartige unbemannte Strahlflugzeuge nicht die hohe Geschwindigkeit von Raketen. Eine Ozeanüberquerung von Paris nach New York wird mit einem solchen Flugzeug, das etwa aus der »Snark« abgeleitet werden könnte, einige Stunden dauern, statt eine halbe Stunde mit einer ballistischen Rakete.

Noch viel ungünstigere Voraussetzungen ergeben sich für die Verwendung der Rakete für den Personenverkehr. Solange es sich um einen Verkehr von einem Punkt der Erde zu einem anderen Punkt der Erde handelt, wird man kaum daran denken, die ungeflügelte ballistische Rakete dafür zu verwenden, sondern ein Raketenflugzeug, das von einem Piloten gesteuert ist. Auch für diese Verkehrsaufgabe tritt das Zubringerproblem in erhöhtem Maße auf. Paradoxerweise sind aber die Aussichten für einen derartigen Schnellpersonenverkehr mit Raketenflugzeugen, die etwa aus der X 15 entwickelt werden könnten, größer als die Aussichten für einen Postverkehr. Das liegt an der Eigentümlichkeit des modernen Menschen, Reisetunden als verlorene Stunden zu zählen und deshalb, sofern er die Mittel dazu hat, immer das schnellste Transportmittel zu wählen, das sich ihm bietet. Zu dieser (vielleicht noch vertretbaren) Begründung kommt hinzu, daß die Flüge mit Raketenflugzeugen in der ersten Zeit eine sensationelle Anziehungskraft besitzen werden. Bei der sehr hohen Geschwindigkeit der Raketenflugzeuge tritt während des Umfliegens der Erde eine Zentrifugalkraft auf, die die Schwerkraft zum Teil aufhebt. Die Passagiere werden also während ihres Fluges teilweise schwerelos sein und können einen Teil der interessanten Effekte der Schwerelosigkeit, die sie bis dahin nur aus Filmen von Versuchspersonen kannten, an sich selbst studieren. Der einstündige Flug von Paris nach New York wird ihnen den Flug zum Mond ersetzen, und sie werden sich wie Pioniere der Weltraumfahrt fühlen.

Der Passagiertransport mit Raketenflugzeugen wäre nicht das erste Beispiel des Erfolges einer eigentlich unwirtschaftlichen Technik.

Transport von Nachrichten

Zum Austausch zwischen den Menschen zählt nicht nur der Transport von Menschen und Gütern, sondern auch der Transport von Nachrichten. Bevor man es verstand, die Elektrizität in den Dienst des Nachrichtenverkehrs zu stellen, bedeutete ein Nachrichtentransport immer auch den Austausch materieller Dinge, sei es die Haut eines Sklaven, auf die mit Milch geschrieben wurde, sei es ein Brief auf Pergamentpapier oder ein Wachstäfelchen. Nach der Erfindung des Telegrafen und des Telefons nahm der Nachrichtenverkehr einen Aufschwung, den niemand vorausgesehen hatte. Bald reichten die Nachrichtenkanäle über Draht nicht mehr aus, die Hochfrequenztelegrafie und die Telefonie über Funk wurde hinzugenommen. Sowohl auf den Drähten als auch auf den Trägerwellen der Funkverbindungen wurden durch die Mehrfachausnutzung mit Hilfe der Überlagerungstelegrafie auf jedem Träger eine Anzahl von Bändern geschaffen, so daß heute viele Nachrichten über den gleichen Draht oder die gleiche Funkwelle zur gleichen Zeit transportiert werden können. Ja, die Mehrfachausnutzung von solchen Nachrichtenkanälen ist so weit gediehen, daß auf einem Kanal gleichzeitig mehrere tausend Telegramme übertragen werden können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen oder zu stören.

Besonders geeignet für die gleichzeitige Übertragung so vieler Nachrichten sind die unter dem Namen Dezimeterwellen bekannten ultrakurzen Wellen. Wegen ihrer außerordentlich hohen Frequenz lassen sie sich viele Nachrichtenkanäle aufprägen und sind daher wirtschaftlicher als Kabelverbindungen. Die Dezimeterwellen haben aber eine unangenehme Eigenschaft: Sie folgen nicht der Erdkrümmung, sondern breiten sich gradlinig aus. Das bedeutet, daß Sender und Empfänger einen Abstand haben müssen, der eine optische Sicht erlaubt; man muß also vom Standpunkt des Senders aus den Empfänger sehen können. Für längere Nachrichtenstrecken heißt das, daß unterwegs Relaisstationen eingesetzt werden müssen, damit die Erdkrümmung schrittweise überlistet wird. Die Wirtschaftlichkeit solcher Verbindungen über Dezimeterwellenstrecken ist trotzdem immer noch größer als die über entsprechende Kabel- oder Drahtleitungen.

In ernsthafte Schwierigkeiten kommen die »Dezistrecken« aber, wenn große Wasserflächen zu überbrücken sind, auf denen man keine Relaisstationen aufbauen kann. Erst im letzten Jahrzehnt hat man hier einen Ausweg gefunden, der eine teilweise Lösung des Problems verspricht. Man schickt einen Dezimeterstrahl schräg in den Himmel hinauf und

richtet die Empfangsantenne der weit entfernt liegenden Empfangsstation auf etwa dieselbe Stelle in der oberen Atmosphäre. Man legt also die Mittellinien der Sende- und der Empfangsantenne so, daß sie sich im Himmelsgewölbe schneiden, und zwar in einer Höhe, die man durch Experimente als besonders günstig herausgefunden hat. Der Schnittpunkt dieser beiden Mittellinien liegt stets an einer Stelle, wo die Atmosphäre sich den elektrischen Wellen gegenüber nicht normal verhält, also in den uns bereits bekannten Ionosphärenschichten. An diesen Schichten, die elektrisch geladene Teilchen in großer Zahl enthalten, werden die elektrischen Wellen zur Erde zurückgeworfen. Das geschieht nicht schön gleichmäßig, wie bei einem optischen Spiegel, sondern unregelmäßig und schwankend, weil die Konzentration der Ionen in der Atmosphäre von Ort zu Ort verschieden ist und sich ständig ändert. Ein Teil der auf diese Weise zur Erde zurückgeworfenen Hochfrequenzwellen gelangt auch in den Empfänger. Wenn man diesen Teil genügend verstärkt, so kann man aus ihm die Nachricht wieder herauslesen.

Dieses unter dem englischen Namen Scattering bekannte Verfahren ist nicht nur auf die Ungleichmäßigkeiten der Ionenverteilung in der Atmosphäre beschränkt. Auch die ständig auf die Erde einströmenden Mikrometeore und Meteore, von denen die größeren als Sternschnuppen sichtbar werden, bilden Reflektoren für die elektrischen Wellen, die ausreichend sind, ein solches Scattering zu erzeugen. Im ganzen ist die Scattering-Methode ein wenig unsicher, sehr wenig effektiv und von Umständen abhängig, die man nicht in der Hand hat.

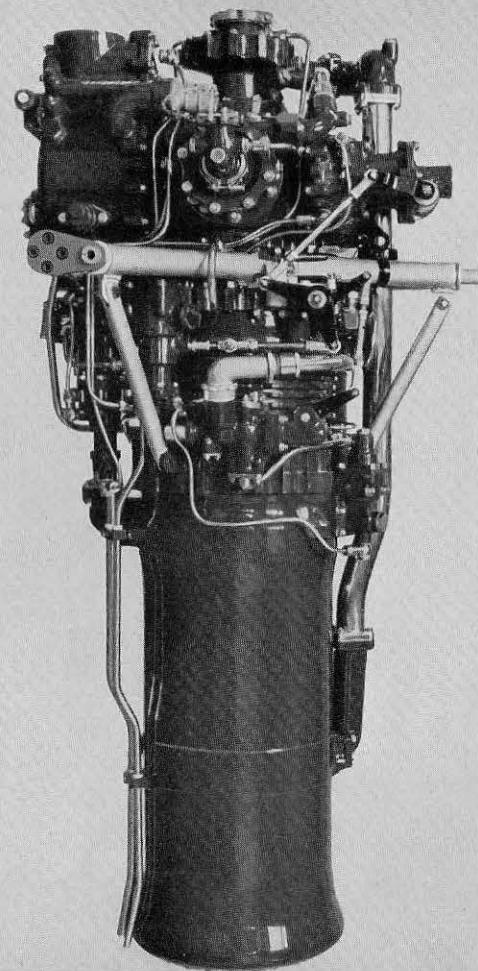
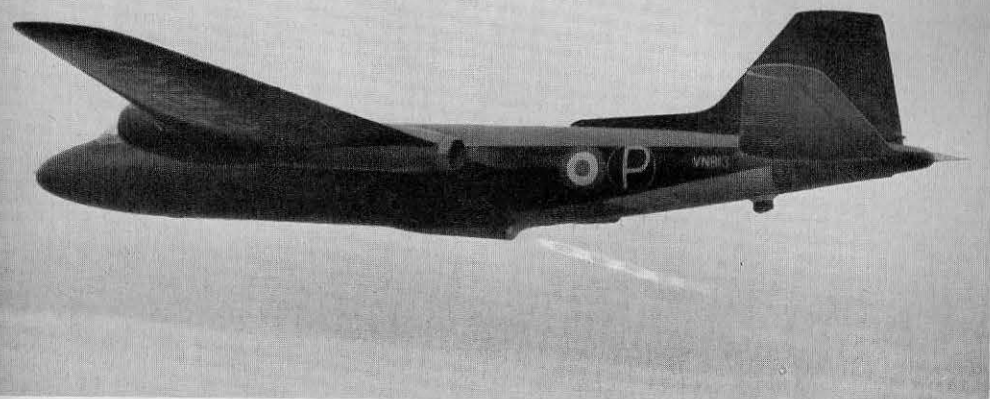
Schon bevor man die ersten Satelliten auf ihre Kreisbahn am Himmel setzen konnte, kam daher der Gedanke auf, sie an Stelle der zufälligen Unregelmäßigkeiten in der Atmosphäre zur Reflexion der elektrischen Wellen zu verwenden. Ein Satellit bietet darüber hinaus noch den Vorteil, daß man sich nicht auf die passive Reflektion an seiner Hülle zu beschränken braucht. Man kann ihn mit einem Relaisempfänger und -sender ausrüsten, der ähnlich wie eine Relaisstation auf der Erde wirkt, also die vom Bodensender ausgestrahlte Energie mit dem Empfänger aufnimmt, verstärkt und wieder aussendet. Auf diese Weise läßt sich eine sehr sichere Übertragung erzielen. Es scheint sicher, daß dieses Projekt in nicht allzu ferner Zukunft Wirklichkeit wird. Eine der Schwierigkeiten, die bis dahin noch überwunden werden müssen, ist die Energieversorgung für Sender und Empfänger im Satelliten. Hierzu sollen die Sonnenbatterien Verwendung finden, mit deren Hilfe man aus der Sonneneinstrahlung elektrische Energie erzeugen kann.

Natürlich wird man sich ungern auf die kurzen Durchflugzeiten eines

Satelliten für die Nachrichtenübertragung beschränken, vielmehr wird man eine 24-Stunden-Nachrichtenübertragung anstreben. Das kann auf zwei Weisen geschehen. Entweder man verwendet eine ganze Kette von Satelliten, die so dicht aufeinander folgen, daß der eine am Horizont auftaucht, wenn der andere gerade verschwindet. Sender und Empfänger am Boden müssen dieser Satellitenbewegung natürlich ständig nachgeführt werden. Die Zahl der Satelliten, die man für diesen Zweck braucht, ist abhängig von dem Radius ihrer Bahn, das heißt der Höhe, in der sie über der Erde kreisen; sie beträgt etwa zehn. Eine ganz andere Möglichkeit bietet sich, verwendet man den schon erwähnten Satelliten, der scheinbar über der Erde feststeht, weil er sich nämlich in 24 Stunden genau einmal um die Erde dreht. Mit einer solchen Relaisstation kann man eine feste Verbindung, die zum Beispiel zwischen den Erdteilen Europa und Südamerika aufgespannt ist, ständig unterhalten. Allerdings ist die Praxis hier auch wieder viel schwieriger als die Theorie. Einem Satelliten nämlich genau die Geschwindigkeit mitzugeben, die er zu seinem 24-Stunden-Flug braucht und ihn außerdem noch genau in der Äquatorebene zu halten, was für diesen Zweck ja notwendig ist, dürfte nicht ganz einfach sein. Außerdem werden sich gewisse Einflüsse der Erddrehung und der Drehung der Satellitenbahn um ihre eigene Achse nicht ganz ausschalten lassen.

Zum Nachrichtenverkehr im weiteren Sinne gehört das Fernsehen. Die große Zahl der Bildpunkte, die beim Fernsehen in einer Sekunde übertragen werden müssen, macht es notwendig, für eine Fernsehübertragung ein breites Nachrichtenband zu verwenden, das für Tausende von Gesprächen dienen könnte. In der Fachsprache sagt man, der Informationsinhalt einer Fernsehsendung ist viel, viel größer als der Informationsinhalt eines Gespräches. Wegen des beanspruchten breiten Nachrichtenbandes ist eine Übertragung nur über Ultrakurzwellen möglich, es bestehen also dieselben Schwierigkeiten wie bei der Nachrichtenübertragung, und es kommen die gleichen Verwendungsmöglichkeiten der Satelliten in Betracht.

Im Gegensatz zu diesen Reflexionsmethoden, die am besten funktionieren, wenn der Satellit scheinbar über der Erde stillsteht, steht der Vorschlag, der eine Aufspeicherung der Nachrichten im Satelliten ausnutzen will. Im modernen Telegrafendienst gibt es eine Reihe von Telegrafenamtern, die als Relaisstationen dienen. Die ankommenden Telegramme, die für die verschiedensten Richtungen bestimmt sind, werden zunächst einmal gespeichert. Man verwendet dazu gelochte Papierstreifen. Diese werden nach den Bestimmungsorten der



Telegramme sortiert und dann über die jeweiligen Leitungen dorthin wieder herausgesendet. Derartige Stationen sind heute schon so weit automatisiert, daß sie kaum noch einer Bedienung bedürfen. Die Übertragung dieses Gedankens auf eine bewegliche Relaisstation führt zum Telegrafensatelliten.

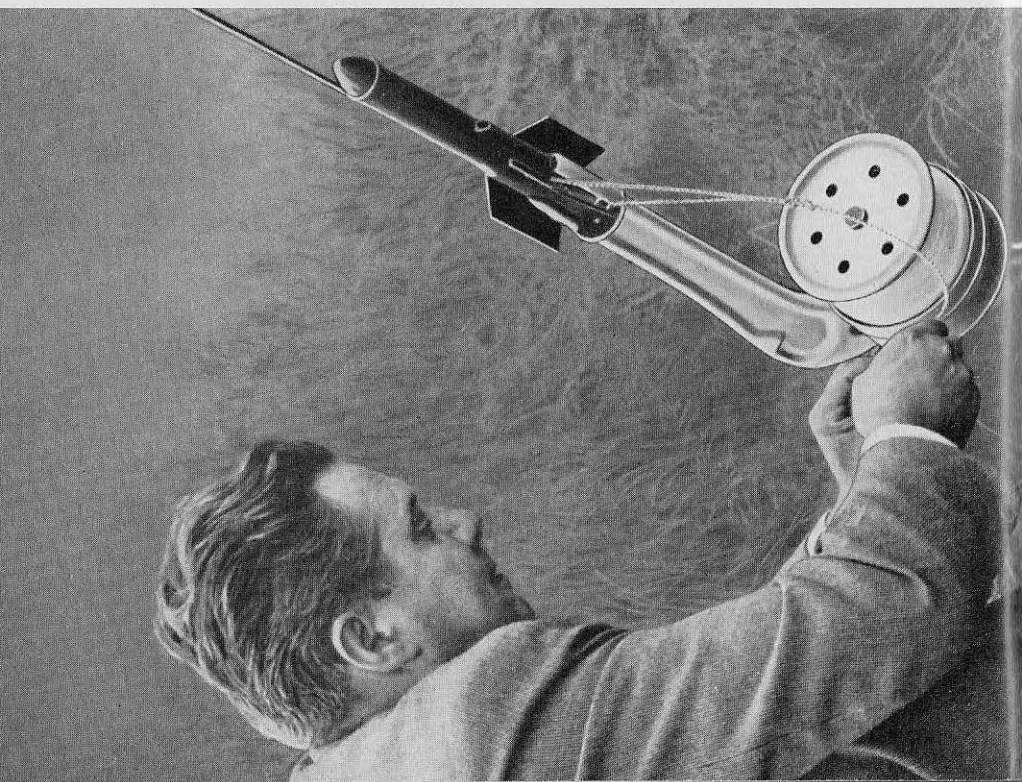
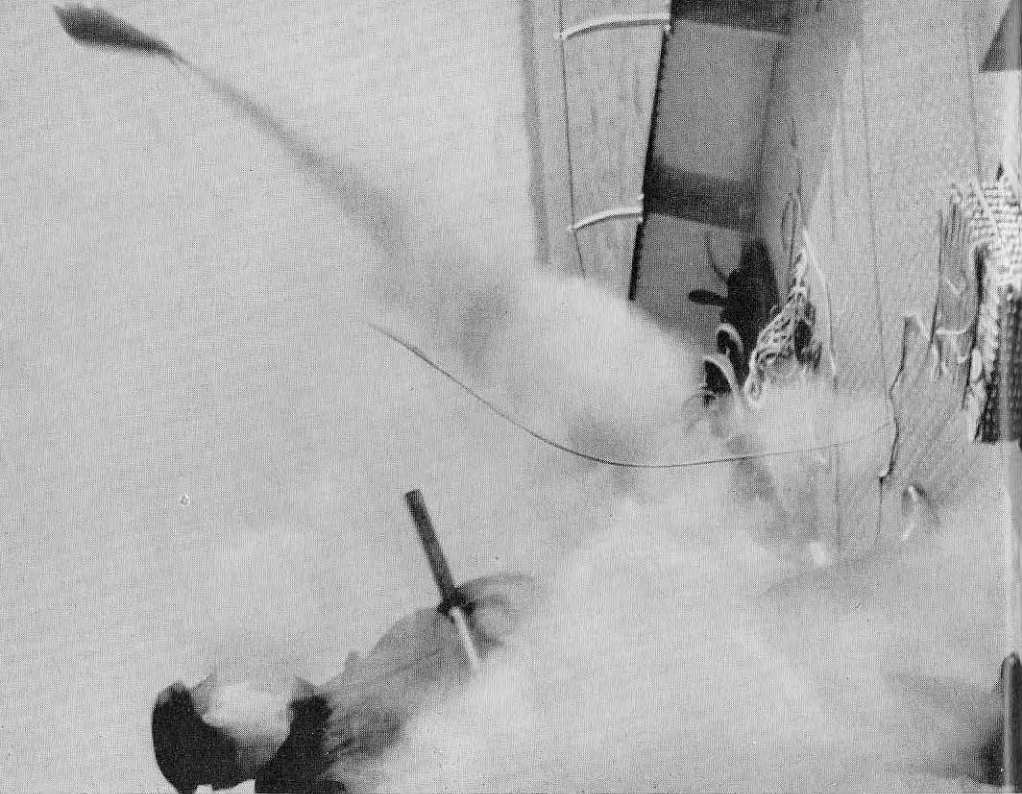
Wir haben heute in den Magnetbändern und Magnettrommeln der elektronischen Rechentechnik Nachrichtenspeicher, in denen man Nachrichten im Telegrammcode in großer Menge auf sehr kleinem Raum aufspeichern kann. Bringt man nun einen solchen Nachrichtenspeicher in einem Satelliten unter, und gibt man dem Satelliten einen Sender und einen Empfänger mit, so kann dieser, während der Satellit zum Beispiel über Bonn fliegt, die Telegramme, die Bonn aussenden will, empfangen und in sehr kurzer Zeit auf dem Nachrichtenspeicher sammeln. Während der Satellit weiterfliegt, werden die Nachrichten nach den Städten, für die sie bestimmt sind, sortiert. Steht er wenig später etwa über London, so strahlt er die für dort bestimmten Telegramme an eine Bodenstation herunter. Die technische Realisierung dieses Vorschlages ist denkbar, ob allerdings die Methode wirtschaftlich ist und ob sie eine genügende Sicherheit für die Nachrichtenübertragung bietet, muß noch geklärt werden.

Außer Transportaufgaben lassen sich mit Raketen noch viele andere praktische Aufgaben auf sehr verschiedenen Gebieten lösen. Interessanterweise gilt dies für zwei Gruppen von Raketen beziehungsweise Raketenabkömmlingen, die sich diametral gegenüber stehen, Kurzstreckenfeststoffraketen einerseits und andererseits die Satelliten, die von den modernsten weitreichenden Raketen auf ihre Bahn gebracht werden.

Nützliche Feststoffraketen

Die bekannteste Feststoffrakete ist die Feuerwerksrakete, deren einzige Aufgabe es ist, die Menschen zu Anlässen wie Silvester oder sonstigen großen Festen zu erfreuen. Der Antrieb der Feuerwerksraketen besteht meistens aus Schwarzpulver. Brennstoffbehälter und Brennkammer sind aus einer Papprohre geformt. Für die Stabilisierung sorgt der an die Rakete gebundene Stock. Auf die Nutzlast, die in diesem Fall aus Leucht-kugeln, leuchtenden Katarakten, Knattereinlagen oder sonstigen Überraschungen besteht, wird der meiste Erfindungsgeist verwendet.

Eine Abart dieser Raketen sind die Signalaraketen, die im militärischen wie im zivilen Gebrauch vor der Einführung von Funkgeräten eine sehr



große Rolle spielten und auch heute noch, vor allen Dingen in den Bergen und auf der See, zur Signalisierung besonderer Notzustände verwendet werden.

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts tauchte der Gedanke auf, Schiffe, die in der Brandung gekentert waren, mittels hinübergeschossenen Leinen Hilfe zu bringen. Seine Realisierung war im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts möglich. Seit dieser Zeit gibt es die Seenotraketen, mit denen man vom Ufer aus dünne Leinen auf das Schiff hinüberschießen kann, mit deren Hilfe vom Schiff aus ein dickeres, tragfähiges Tau herangezogen wird. An diesem Tau wird die Besatzung Mann für Mann an Land gehievt, meist mittels der sogenannten Hosenboje, in der die Besatzungsmitglieder den Weg an dem schwankenden Tau zum Land sicher bestehen können. Von allen Anwendungen der Raketentechnik erscheint uns dieses Verfahren, das nun fast zweihundert Jahre alt ist, dasjenige zu sein, das dem Menschen *bisher* am meisten Nutzen gebracht hat.

Wenn ein Schiff in der Brandung einer unbewohnten Küste strandet, ist natürlich die Hilfe vom Land nicht vorhanden. Auch in diesem Fall ist es möglich, mit Raketen erfolgreich zu arbeiten. Man verwendet hierzu die sogenannten Anker-Raketen, mit deren Hilfe vom Schiff aus ein nicht allzu schwerer Anker auf das Land geschossen wird, sich dort eingräbt und auf diese Weise eine Brücke herstellt. Unser Bild auf Seite 221 zeigt den Abschluß einer Ankerrakete und läßt besonders deutlich die kunstvoll zusammgelegte Schlepplleine erkennen.

In den letzten Jahrzehnten haben die Leinenschlepp-Raketen, die sich aus den Schiffsrettungsraketen entwickelt haben, zahlreiche ganz verschiedene Anwendungsgebiete erobert. Für die Verlegung von Hochspannungsleitungen in unzugänglichem Gelände sind sie ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Soll die Leitung einen tiefen Taleinschnitt, einen Steinbruch oder ein Gewässer überbrücken, so wird durch eine Leinenschlepp-Rakete zunächst die Verbindung durch ein leichtes aber festes Perlonseil hergestellt. An diesem wird dann ein kräftigeres Seil und schließlich das Kabel selbst herübergezogen. Da man auf diese Weise oft große Bodenarbeiten wie das Schlagen von Waldschneisen vermeiden kann, betragen die Ersparnisse manchmal das Hundertfache der Kosten der Raketen.

Zum Schleppen von Leinen werden Feststoffraketen, meist mit Schwarzpulverfüllung verwendet. Die Brennzeiten betragen drei bis zehn Sekunden, die erreichten Geschwindigkeiten etwa 100 m/sek. Mit leichten Perlondrähten können Entfernungen von 500 m und darüber

überbrückt werden. Die Leine liegt entweder sorgfältig aufgeschichtet in einem Vorratsbehälter oder sie spult sich, wie unser Bild Seite 221 zeigt, von einer Spule ab.

Als Kuriosum sei noch eine besonders ungewöhnliche Anwendung von solchen Raketen erwähnt. Ein Gebirgsbauer, dem der Weg zu seiner hochgelegenen Alm zu umständlich und zu lang war, schoß mit einer Leinenschlepp-Rakete einen Perlonschlauch von seinem Hof auf die Alm. Durch diesen Schlauch fließt allmorgendlich die auf der Alm produzierte Milch in die auf dem Hof aufgestellten Kannen.

Bereits in der Antike wußte man, daß Brandung und aufgeregtes Meer sich dadurch beruhigen lassen, daß man Öl aufs Wasser gießt. Auch dieses Verfahren kann man durch die Raketentechnik modernisieren. Das beweist eine Entwicklung, die in den letzten 10 Jahren in Deutschland stattgefunden hat. Da es darauf ankommt, das Öl sparsam, also in möglichst feiner Verteilung auf eine große Fläche des Meeres auszubreiten, was sich durch einfaches Ausgießen nicht leicht erreichen läßt, hat man eine kleine Ölspürrakete entwickelt, die etwa ein Kilogramm Öl mit sich führt und während ihres Fluges in feiner Verteilung auf das Meer hinausschleudert. Um das Öl wirksamer zu verteilen und vor allem die Richtung der Rakete einigermaßen zu stabilisieren, wird ihr ein Drall erteilt, während auf eine aktive Steuerung, wie bei allen diesen kleinen Raketen, natürlich verzichtet wird. Unser Bild Seite 224 zeigt eine Ölspürrakete der Deutschen Raketen-Gesellschaft, Bremen.

Die Verwendung von Raketen, die Flüssigkeit oder Pulver aussprühen, hat auch auf anderen Gebieten, zum Beispiel dem der Schädlingsbekämpfung, Erfolg gehabt. Schon seit Jahrzehnten ist es üblich, insbesondere in den Vereinigten Staaten und Kanada, große Bodenflächen – im allgemeinen von Flugzeugen aus – mit Insektenvernichtungsmitteln zu überrieseln. In den letzten Jahren nun hat man in Österreich Versuche zur Verteilung des Vernichtungspulvers mit Raketen gemacht und dabei festgestellt, daß eine ähnlich gleichmäßige, alles überstreichende Verteilung wie mit Flugzeugen möglich ist, diese Methode aber zugleich den Vorteil größerer Wirtschaftlichkeit hat.

Nicht nur zur Bekämpfung der Seenot, auch zur Bekämpfung der Bergnot werden Raketen erfolgreich eingesetzt. Man kann die Lawinengefahr in Berggegenden im Hochgebirge wesentlich herabmindern, wenn man die überhängenden Schneemassen zum Abbrechen und zum Absturz bringt, ehe sie sich zu Lawinen auswachsen können. Früher wurden für diesen Zweck Geräte der Artillerie, insbesondere Mörser und Minenwerfer, verwendet, die sich jedoch infolge ihres Gewichtes immer nur

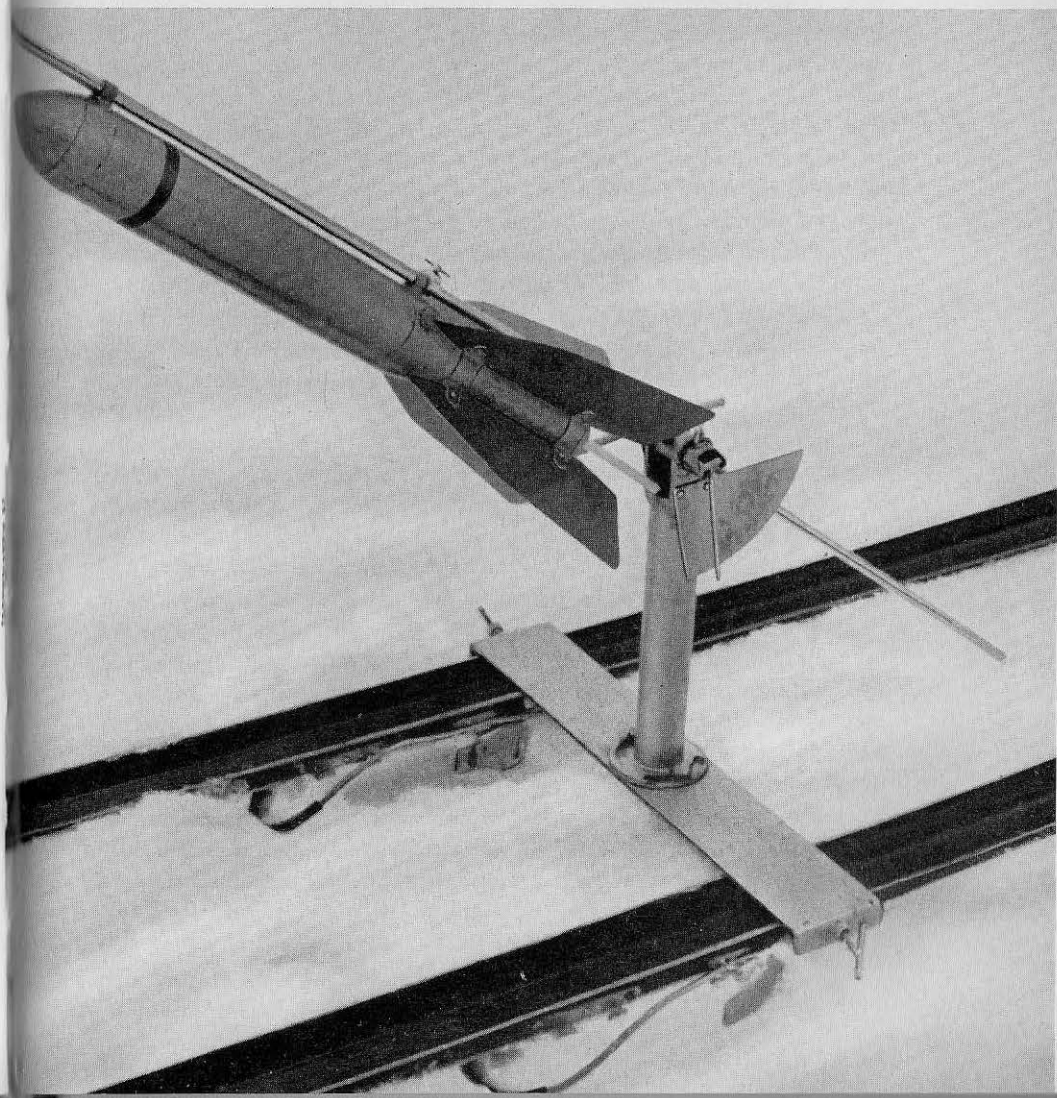
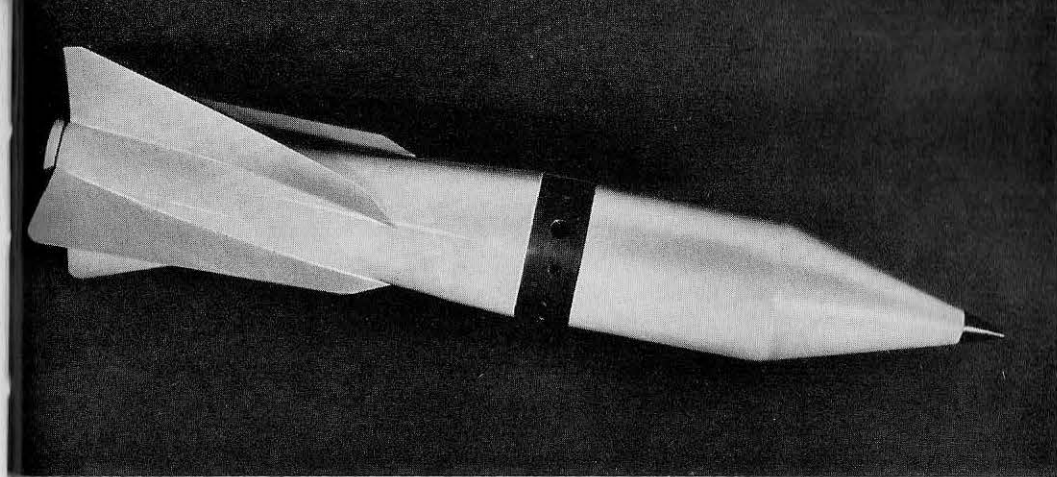
Der Nutzen der Raketentechnik

schwer richtig in Stellung bringen ließen. Es lag daher nahe, Raketen einzusetzen, für die keine schweren Bodengeräte erforderlich sind. Wie unser Bild zeigt, wird die kleine Feststoffrakete von einem Führungsstab verschossen, der schwenkbar auf einer Lafette befestigt ist. Als Unterlage für die Lafette genügen ein Paar Schier. Die Rakete hat bis zu einem Kilometer Reichweite und trägt eine Pulverladung, die beim Aufschlag zündet und durch ihre Druckwelle die Schneemassen zum Absturz bringt.

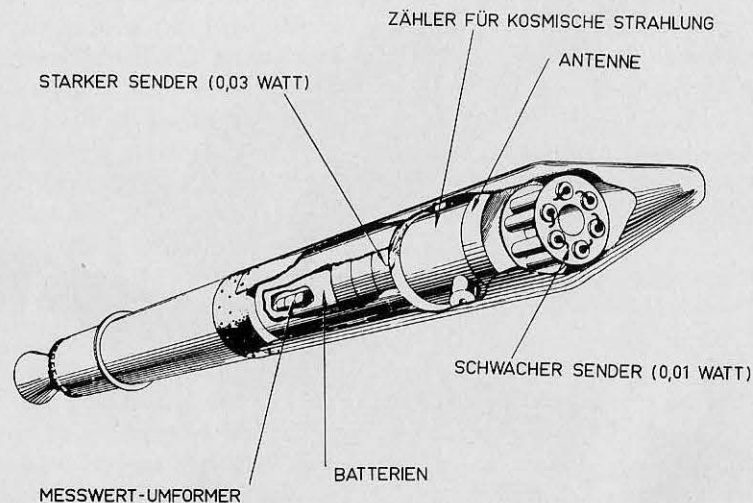
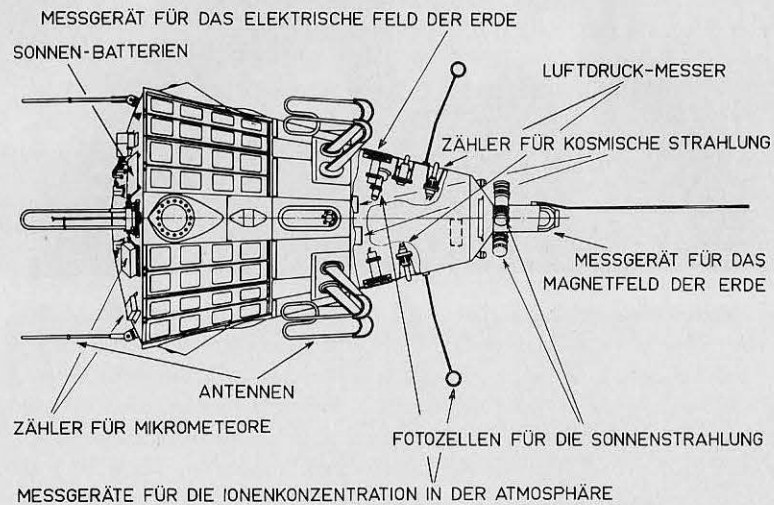
Zur Abwehr einer anderen Witterungsgefahr werden in gebirgigen Ländern bereits seit etwa fünfzig Jahren ganz ähnliche Raketen, nämlich die Hagelzerstreuungsraketen, verwendet. Der Hagel ist eine der großen Wetterunbilden, die der Mensch über sich ergehen lassen muß. Die Zerstörungen, die er hervorruft, stehen denen, die durch Taifune oder Dürren verursacht werden, nicht nach. Wenn auch direkte Schäden an Mensch und Tier relativ selten sind, so werden doch auf großen Flächen und verhältnismäßig häufig erntebereite Felder zerstört. Schon im vorigen Jahrhundert versuchte man, Hagel bringende Wolken, die von der Bevölkerung auf Grund von Bauernregeln deutlich erkannt wurden, durch Böllerschüsse zu »erschrecken«, und hatte teilweise damit Erfolg. Am Anfang dieses Jahrhunderts wurden zum erstenmal Raketen eingesetzt, die in Höhen von 1000 bis 2000 Metern aufsteigen und dort eine Pulverladung zur Explosion bringen oder besondere Chemikalien in feinverteilter Form zerstäuben. Die von der Explosion hervorgerufene Knallwelle und die feinverteilten Kerne verhindern die Bildung von Hagel, indem sie die Feuchtigkeit an diesen vielen Kernen kondensieren lassen und so an Stelle der Hagelkörner Schneeflocken entstehen. Seit die Versuche der Hagelzerstreuung erfolgreich verliefen, gehört das Abfeuern von Hagelraketen in einigen Gebieten Mitteleuropas zum festen Bestand der Wetterbeeinflussung.

Nützliche Satelliten

Die Nützlichkeit insbesondere der kleinen Feststoffraketen auf all diesen Teilgebieten des menschlichen Lebens ist unbestritten und seit langem bekannt. Da es sich außerdem um verhältnismäßig kleine und billige Objekte handelt, steht der Weiterentwicklung und Intensivierung dieser Methoden nichts im Wege. Anders verhält es sich dagegen mit den Versuchen, von denen wir wissen, daß sie unendlich große Summen verschlingen, wie die im Rahmen des Geophysikalischen Jahres durch-



MESSEINRICHTUNGEN DES SPUTNIK III



MESSEINRICHTUNGEN DES EXPLORER IV

geführten Raketen- und Satellitenaufstiege. Hier ist der Nachweis der praktischen Nützlichkeit im Verhältnis zu den aufgewendeten Mitteln, der allerdings nicht allein ausschlaggebend sein sollte, schon etwas schwieriger zu erbringen.

Lange vor der Erfindung des Kompasses richteten sich die Schiffe, die das offene Meer befuhren, nach den Sternen. Sie trieben, wie man heute sagen würde, Astronavigation. In den letzten 10 oder 20 Jahren wurde die Astronavigation für Flugzeuge so weit vervollkommen, daß es heute möglich ist, sie über große Strecken nur nach den Sternen fliegen zu lassen und sogar führerlose Flugzeuge durch automatische, astronavigatorische Steuerungen zu leiten. Nun sind aber die Sterne sehr weit von uns entfernt und geben im allgemeinen sehr wenig Licht ab. Von Schiffen oder tiefer fliegenden Flugzeugen aus kann man sie nicht immer sehen, da sie durch Wolken verdeckt sind. Am Tage ist neben der hellen Sonnenstrahlung kaum ein anderer Stern zu erkennen und für die Zwecke der Astronavigation zu verwenden. Da der Mensch jedoch in der Lage ist, mit mehrstufigen Raketen künstliche Sterne an den Himmel zu setzen, ist er auch in der Lage, diese Sterne für die Navigation auszunutzen. Die Satelliten müssen nur in eine solche Höhe gebracht werden, daß ihr Umlauf um die Erde praktisch nicht mehr durch Reste der Luft-hülle gebremst wird und ihre Bahn sich nicht verändert. Dann kann man diese Bahn, genau wie die von Sternen, in Tabellen und Büchern festhalten und genau wie die Sternörter zur Navigation verwenden. Ein großer Vorteil dabei ist, daß man die künstlichen Sterne mit Hochfrequenzwellen anpeilen oder ihnen sogar Hochfrequenzsender mitgeben kann, so daß sie von sich aus auf diesen Wellenlängen strahlen, die Nebel und Wolken durchdringen. Ähnlich wie den Leuchttürmen der Leuchttürme oder den sogenannten Funkleuchttürmen auf dem Lande zur Führung von Flugzeugen, kann man den Sendungen des Satelliten bestimmte Kennzeichen mitgeben, so daß der Flugzeugführer, der Kapitän eines Schiffes oder die automatische Steuerung leicht erkennen können, welcher Satellit gerade zur Peilung verwendet wird.

Die mehr passive Rolle der Satelliten für die Navigation, bei der sie beobachtet werden, kann gegen eine aktive, selbstbeobachtende Rolle vertauscht werden. Von ausschlaggebender Bedeutung für die heutige Wettervorhersage ist das Aussehen der Wolkendecke über der Erde. Mit den zur Zeit vorhandenen Wetterstationen können wir nur etwa 10 Prozent der Atmosphäre überblicken und nur von diesen 10 Prozent die Wolkendichte und das Aussehen der Wolkendecke feststellen. Mit zwei bis drei Satelliten, die die Erde ständig umkreisen und entsprechende

Beobachtungsgeräte an Bord haben, könnte die gesamte Wolkendecke der Erde alle 2 bis 3 Stunden neu erkundet werden. Die Meteorologen sind der festen Überzeugung, daß eine solche zwei- bis dreistündige Inventur der Wolkendecke es erlauben würde, Stürme schon im Entstehen festzustellen und ganz allgemein die Wettervorhersage wesentlich sicherer zu machen, als sie jetzt ist. Welchen Nutzen eine solche Wettervorhersage bringen könnte, läßt sich sehr schwer abschätzen. Sicher aber wäre der Nutzen für die Landwirtschaft der gesamten Erde so groß, daß er den Aufwand für einige Satelliten bei weitem überstiege.

An Bord eines solchen Beobachtungssatelliten müßte ein optisches Beobachtungssystem vorhanden sein, dessen Ergebnisse in einer für die Übertragung geeigneten Form, zum Beispiel auf einer Magnettrommel, gespeichert werden. Jeweils beim Überfliegen bestimmter Empfangsstationen würden die Ergebnisse der Beobachtung gesammelt zum Boden heruntertelegraphiert und so als Grundlage für die Aufzeichnung der Wetterkarten dienen.

Eine ähnliche Aufgabe aus dem politisch-militärischen Raum wäre die strategische Luftüberwachung. Sie ist wesentlich schwieriger als die Überwachung der Wolkendecke, weil die zu beobachtenden Objekte erheblich kleiner sind. Man müßte optische Geräte mit besonders hohem Auflösungsvermögen, also Fernrohre, verwenden, und das Ergebnis dieser Fernrohrbeobachtung in einer recht komplizierten Form so speichern, daß es später zur Erde heruntergesendet werden kann. Die naive Vorstellung, man könnte mit einer Fernsehkamera ausgerüstete Satelliten zur Luftinspektion verwenden, hält einer näheren Betrachtung nicht stand. Das Auflösungsvermögen von Fernsehkameras ist viel zu gering, um die Dinge erkennen zu lassen, die bei einer militärischen Inspektion überwacht werden sollen. Trotzdem sind heute sowohl für die Beobachtung als auch für die Übertragung technische Lösungen denkbar, die eine Zuverlässigkeit garantieren können. Der Beobachtungssatellit hat vor Beobachtungsflugzeugen voraus, daß er keinen Treibstoff verbraucht, kein Personal benötigt, und daß die Gefahr einer Notlandung auf fremden Gebieten nicht besteht. Für die überflogenen Länder, die der Beobachtung unterzogen werden, bietet er den Vorteil, daß er praktisch keine Angriffswaffen mit sich führen kann, von ihm also eine Gefahr nicht droht, was man von Flugzeugen, die angeblich nur mit Fotogeräten ausgerüstet sind, nicht immer sicher weiß.

Vielleicht kann die Raketentechnik auf dem Wege über die Beobachtungssatelliten einen direkten Beitrag zur Befriedung der Situation zwischen den großen Machtblöcken liefern. Es dürfte jedenfalls wesent-

lich einfacher sein, zu einer Vereinbarung über Satellitenflüge zu kommen als das Überfliegen des eigenen Landes durch einen fremden Satelliten zu verhindern.

Satelliten als Forscher

Mit den zuletzt beschriebenen Anwendungen der Satelliten befinden wir uns zwar noch im Bereich der praktischen Nutzbarmachung, doch bilden sie bereits die Brücke zu ihrer Hauptanwendung als Mittel zur Erweiterung unseres Wissens.

Schon die Bahn eines Satelliten kann uns eine Reihe von Dingen berichten, die wir auf andere Weise nur ungenau oder schwer erfahren können. Wie wir wissen, ist die Bahn eines solchen Satelliten, sofern sie nicht durch die Luftreibung gehemmt wird, eine unveränderliche Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Erde liegt. Bei einer wirklich kugelförmigen Erdkugel würde diese Bahn fest im Raum verharren, während sich die Erde um ihre eigene Achse dreht und dadurch dem Satelliten immer wieder andere Erdteile zeigt. Nun ist die Erde aber keine richtige Kugel, sondern infolge der Zentrifugalkraft an den Polen etwas abgeplattet und am Äquator wulstförmig aufgebaucht. Hierdurch ist auch das Schwerfeld der Erde etwas verzerrt, und wenn man es genau berechnet, stellt man fest, daß die Bahn des Satelliten, auch wenn keine Luftstörungen auftreten, unter diesen Bedingungen nicht mehr unverändert im Raume bleiben kann. Erstens muß sich ihre Ebene allmählich um die Erdachse drehen, und zweitens wandert ihr höchster Punkt allmählich und mit ihm ihr niedrigster Punkt natürlich auch. Die Wanderung dieser Extrempunkte, die also durch die Erdabplattung hervorgerufen werden, sind abhängig von dem Winkel, den die Bahn mit dem Äquator bildet. Es gibt einen ausgezeichneten Winkel, bei dem der Einfluß Null ist, bei dem also die Wanderung der höchsten und tiefsten Punkte der Bahn unterbleibt. Die russischen Satelliten, die Sputniks, sind etwa unter diesem Winkel auf die Reise geschickt worden.

Wenn man die Bahn genau verfolgt und insbesondere die Wanderungen der Bahnebene und der höchsten und tiefsten Punkte der Bahn sorgfältig mißt, so kann man daraus rückwärts auf die wirklich vorhandene Abplattung der Erde oder auf den Äquatorwulst schließen. Hierdurch können die bisher vorhandenen geographischen Messungen oder Messungen des Schwerfeldes, die das gleiche Ziel hatten, verbessert werden.

Nicht nur für die allgemeine Form der Erde, sondern auch für spezielle Messungen auf ihr kann der Satellit eingesetzt werden. Durch die gleichzeitige Beobachtung eines hoch genug über der Erdoberfläche schwebenden Satelliten von zwei Kontinenten, etwa von Europa und Amerika aus, kann der Abstand dieser Kontinente mit größerer Genauigkeit bestimmt werden als bisher. Die Vermessung der ganzen Erde läßt sich verbessern und hierdurch die Grundlage für die Beobachtung etwaiger Wanderungen der Kontinente schaffen.

Jeder von uns weiß, daß die Luftdichte nach außen allmählich abnimmt, daß also die Satellitenbahn in sehr dünner Luft verläuft. Und doch kann man sich kaum eine richtige Vorstellung davon machen, wie stark die Luft dort verdünnt ist. Die kleine Tabelle zeigt uns noch einmal ein paar charakteristische Werte:

Höhe über dem Meeresspiegel	Luftdichte im Vergleich zur Höhe Null	freie Weglänge der Moleküle
0 km	1	0,000 01 cm
100 km	0,000 000 5	10 cm
500 km	0,000 000 000 01	30 000 000 cm

Man erkennt aus ihr, daß die Luftdichte in 100 Kilometer Höhe bereits auf die Hälfte eines Millionstel der Luftdichte am Erdboden gesunken ist. In 500 Kilometer Höhe ist sie sogar 100 milliardenmal kleiner als am Boden. Daß so starke Veränderungen eine völlige Umkehrung aller Eigenschaften bedeuten, ist klar. Während ein Molekül eines der Gase, die die Luft zusammensetzen, also ein Sauerstoffmolekül oder ein Stickstoffmolekül, sich am Boden nur um den zehntausendsten Teil eines Millimeters frei bewegen kann, da es dann an ein Nachbarmolekül anstößt, ist diese »freie Weglänge« in 100 Kilometer Höhe bereits auf 10 Zentimeter, also auf das Millionenfache, angewachsen. In 500 Kilometer Höhe muß ein solches Molekül oder Atom sogar 300 Kilometer weit fliegen, ehe es auf ein Nachbarmolekül prallt.

Lange bevor man Raketenaufstiege machen konnte, hat man sich auf Grund der Ballonmessungen bis 40 Kilometer Höhe und auf Grund physikalischer Vorstellungen Modelle der Luftdichteverteilung gemacht. Infolge der Verschiedenheit der Annahmen wiesen sie allerdings in den uns jetzt interessierenden Höhen über 100 Kilometer große Unterschiede bezüglich der Luftdichte auf. Die Gelehrten waren sich in diesem Falle so wenig einig, daß die Dichteangaben eines Modelles hundertmal größer waren als die eines anderen. Unter diesen Umständen ist es nicht

verwunderlich, wenn die Wissenschaftler die Vermessung der Satellitenbahnen gerade für die Untersuchung dieser Frage ausnutzen. Auch die geringen Luftreste in den höheren Atmosphärenschichten bremsen die Satelliten allmählich ab, und aus der Größe der Abbremsung kann man die Luftdichte errechnen – wenn man das Widerstandsgesetz kennt. Glücklicherweise vereinfachen sich die Widerstandsgesetze, die bei größerer Luftdichte recht kompliziert sind, in den Höhen, wo die einzelnen Luftteilchen unabhängig voneinander sind und nur selten aufeinander treffen. Hier gilt ein Gesetz, das bereits vor 250 Jahren von Isaak Newton formuliert wurde. Ihm liegt die Vorstellung zugrunde, daß die einzelnen Luftmoleküle oder Atome, welche die Satelliten unterwegs treffen, zunächst auf der Oberfläche des Satelliten haftenbleiben und dann in einer beliebigen Richtung mit beliebiger Geschwindigkeit wieder abgestoßen werden. Der Satellit muß also die Luftmoleküle, die er unterwegs trifft, auf seine eigene Geschwindigkeit beschleunigen, bevor er sie wieder abstößt. Er teilt ihnen diese mit und verliert hierdurch selbst an Geschwindigkeit.

Man sollte meinen, daß die Berechnung der Luftdichte eine einfache Sache wäre, da ein einfaches Widerstandsgesetz gilt und die Bahn eines Satelliten relativ genau zu vermessen ist. Leider trifft das nicht zu. Zunächst einmal bietet ein Satellit der Luft, die er durchströmt, nicht immer denselben Querschnitt dar, es sei denn, er wäre kugelförmig ausgebildet wie die Vanguard-Satelliten. Natürlich ergeben die verschiedenen Querschnitte eines Satelliten verschiedene Reibungszahlen, und da man seine Bewegung im einzelnen nicht so genau kontrollieren kann, ist auch die mittlere Reibungszahl sehr schwer festzustellen. Außerdem werden die Satelliten nicht nur durch die Luftreibung, sondern auch durch magnetische und elektrische Einflüsse gebremst, die nicht etwa von untergeordneter Bedeutung sind, sondern in diesen Höhen die gleiche Größenordnung haben wie die Bremsung durch die Luftreibung selbst.

Noch schwieriger als die Luftdichte ist die Temperatur der Luft in den verschiedenen Höhen zu bestimmen. Auf dem Erdboden glaubt jeder zu wissen, was Temperatur ist, man empfindet sie und kann sie mit einem Thermometer leicht messen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, daß die Temperatur eines Gases eigentlich die Geschwindigkeit der Gasmoleküle darstellt. Durch ihren Aufprall auf das Thermometer teilen sie diesem ihre Temperatur mit. Was aber ist in den Höhen, in denen die Gasmoleküle so selten sind? Dort haben die Gasmoleküle kaum noch Einfluß auf die Anzeige eines Thermometers. Die von einem Thermo-

meter angezeigte, allgemein, die von einem festen Körper angenommene Temperatur ist fast nur noch abhängig von der Einstrahlung der Sonne und der eigenen Ausstrahlung in den Weltraum. In einem Satelliten entstehen je nach der Farbe seiner Außenwände und seiner augenblicklichen Lage (im Erdschatten oder der Sonnenstrahlung ausgesetzt) in einem weiten Bereich schwankende Temperaturen. Im Sputnik III hat man sich diese Tatsache zunutze gemacht, um seine Temperatur so zu regeln, daß die Meßinstrumente möglichst günstig arbeiten können. Man mißt die Temperatur im Inneren des Sputnik und steuert damit wärmeausstrahlende Flächen. Wird die Temperatur zu hoch, so sorgt man dafür, daß die Flächen mehr Wärme ausstrahlen; wird sie zu niedrig, so zieht man die Flächen ein.

Wären die obersten Schichten der Atmosphäre ein verdünntes Abbild der unteren Schichten, so könnte man sie mit ein paar physikalischen Daten beschreiben, und es lohnte sich kaum, eigens zu ihrer Erforschung Satelliten auszusenden. Diese Nahtstelle weist aber eine solche Mannigfaltigkeit von merkwürdigen Eigenschaften auf, sie bildet so sehr eine Brücke zwischen der Erde und dem Weltraum, daß ihre Erforschung unsere Kenntnisse von der Erde und vom Weltraum wesentlich erweitern und darüber hinaus alle Gebiete der Physik befruchten wird.

Wie wir schon wissen, können die Strahlungen, die aus dem Weltraum, vornehmlich von der Sonne zur Erde ausgesendet werden, nur zu einem kleinen Bruchteil die Erdoberfläche wirklich erreichen. Der Rest wird in der Atmosphäre absorbiert. Die großen Energien, die auf diese Weise unterwegs verloren gehen, verschwinden natürlich nicht spurlos, sondern mit ihnen verwandeln sich die Moleküle und Atome in den oberen Luftschichten in Ionen, das heißt, die großen Energien der einfallenden Strahlen zerschlagen die Moleküle in elektrisch geladene Teilstücke. In dichteren Luftschichten würden sich diese Teilstücke sofort wieder zusammenfinden. In den dünneren Luftschichten, mit der geringeren Treffwahrscheinlichkeit der Ionen können sie sich über lange Lebenszeiten hin erhalten und bilden daher die die ganze Erde umgebenden Ionenschichten.

Eines der Hauptanliegen der den Satelliten mitgegebenen wissenschaftlichen Instrumente und Meßgeräte ist daher, die Strahlen zu untersuchen, die für die Ionosphäre verantwortlich sind. Aus dem Strahlenrest, der auf die Erde herunterkommt, aus den bei Zusammenstößen erzeugten »Zweitstrahlen« und aus den zahlreichen Messungen, die seit Jahrzehnten über die ionisierten Schichten vorgenommen werden, hat man bereits eine ganze Anzahl von Vermutungen und An-

nahmen über Art und Menge der »Primärstrahlen«, das heißt der Strahlen, die ursprünglich von außen in die Atmosphäre eindringen, aufgestellt. Diese Anschauungen konnten durch die Messungen mit Satelliten und durch Raketenanstiege zum Teil ergänzt und verbessert, also im wesentlichen bestätigt werden, zum Teil haben sich aber auch ganz überraschende Ergebnisse gezeigt.

Die aus dem Weltraum und von der Sonne kommenden Strahlen sind durchaus nicht einheitlich. Wir finden unter ihnen die leichtesten Teilchen, die wir kennen, nämlich Elektronen, schwerere Teilchen, nämlich die Atomkerne von Wasserstoff und von Helium, und sogar wirklich schwere Atomkerne, wie etwa Eisenkerne. Ein wichtiger Teil der Strahlung ist die Energiestrahlung in Form von elektromagnetischen Wellen, wie die Lichtstrahlung, die Gammastrahlung oder die Röntgenstrahlen. Der geringste Teil dieser Strahlen erreicht die Erde, der größte Teil wird in verschiedenen Höhenschichten absorbiert. Es ist, als hätten sich die einzelnen Schichten der Atmosphäre auf das Einfangen bestimmter Strahlenarten spezialisiert.

Eine der unerwarteten Neuentdeckungen betrifft eine bis dahin unbekannte Schicht elektrisch geladener Teilchen. Man stellte fest, daß sich um die Erde herum, in einer Höhe von etwa 1000 Kilometern über der Erdoberfläche, ein Gürtel von Elektronen zieht. Dieser Gürtel besteht nicht aus ionisierten, also zerschlagenen Luftteilchen wie die bisher bekannten Ionosphärenschichten. Es sind vielmehr die aus dem Weltraum, von der Sonne einstrahlenden Elektronen selbst, die auf ihrem Weg zur Erde vom erdmagnetischen Feld eingefangen und auf Spiralbahnen um die Erde gezwungen werden. Die Elektronen werden von den Linien des magnetischen Erdfeldes aufgewickelt und laufen auf Spiralbahnen mit einem Durchmesser von 100 bis 1000 Metern um sie herum. Da die magnetischen Kraftlinien von Pol zu Pol gespannt sind, wandern die Elektronen sozusagen im Walzerschritt auf einen der Pole zu. Je näher sie dem Pol kommen, um so stärker wird das Magnetfeld und um so enger sind die Spiralen gewickelt. Kurz vor dem Pol kehrt das Elektron um und wandert rückwärts. Auf diese Weise können Elektronen, wenn sie keinen Zusammenstoß erleiden, jahrelang zwischen den beiden Magnetpolen der Erde hin- und herpendeln. Daher ist der Elektronengürtel in der Äquatorgegend, also zwischen den beiden Erdpolen, besonders reich, während die Elektronendichte nach den Polen hin stark abnimmt.

Die Auswertung der Meßergebnisse über die verschiedenen Ionenschichten in der Atmosphäre ist noch in vollem Gang. Die bisherigen Vorstellungen von diesen Schichten stammen aus Funkmessungen, die

einem Abtasten von Wolkendecken durch Scheinwerfer vergleichbar sind. Selbstverständlich kann man dabei nur die Unterseite der Ionenschichten studieren, nicht aber ihre Ausdehnung nach oben und ihre obere Grenze. Die vielen Zehntausende von Messungen, die auf diese Weise in den vergangenen 30 oder 40 Jahren gemacht wurden, haben aber gezeigt, daß die Schichten kein unveränderliches Aussehen besitzen, sondern sich in ständiger Bewegung befinden. Die Hauptursache für diese Bewegung ist die Sonneneinstrahlung, die sich durch die Erddrehung in 24stündigem Rhythmus ändert und einen wesentlichen Anteil an der Entstehung der ionisierten Schichten hat. Auf Grund der bisherigen Messungen unterscheidet man eine Schicht in etwa 100 Kilometer Höhe, die sogenannte E-Schicht, und eine in etwa 400 Kilometer Höhe, die sogenannte F-Schicht.

Es ist schwer, sich vorzustellen, daß diese überaus verdünnten Gase, selbst wenn sie elektrisch geladen sind, irgendwelche Einflüsse auf die Erde, insbesondere auf unseren Lebensraum haben können. Und doch ist es so. Das liegt daran, daß diese Gasmengen einen unvorstellbar großen Raum füllen. Der ständige Strom der viele Tausende Kilometer ausgedehnten Ionenwolken bedeutet einen Strom von Elektrizität und hat daher ähnliche Wirkungen wie ein elektrischer Strom, der durch einen Leiter fließt. Insbesondere erzeugen diese Ströme magnetische Felder, die sich dem erdmagnetischen Feld überlagern und zum Beispiel die auf der Erdoberfläche meßbaren »magnetischen Stürme« hervorrufen.

Obwohl wir heute noch nicht sehr viel darüber wissen, können wir mit Sicherheit annehmen, daß unsere Großwetterlage von der Stärke und den Strömungen dieser ionisierten Schichten abhängt. Seit fast 100 Jahren ist bekannt, daß zwischen den Sonnenflecken und der Wetterlage auf der Erde eine enge Beziehung besteht. Da nun das Auftauchen der Sonnenflecken stets eine starke Änderung der Menge der von der Sonne ausgesandten elektrisch geladenen Teilchen bedeutet, ist fast sicher, daß die auf die Erde einströmenden elektrisch geladenen Teilchen und die von ihnen erzeugten ionisierten Schichten in der oberen Atmosphäre für die Großwetterlage verantwortlich sind.

Hier verläßt die Forschung bereits wieder ihre eigentliche Aufgabe, nämlich die Befriedigung der menschlichen Neugierde, und erzielt praktisch verwertbare Resultate. Je genauer wir über die auf die Erde einströmenden Strahlungen und über die von ihnen erzeugten ionisierten Schichten Bescheid wissen, um so genauer können wir Wettervorhersagen über lange Zeit durchführen.

Noch ein zweites praktisches Ergebnis ist zu erwähnen. Die ionisierten Schichten haben einen sehr starken Einfluß auf die Ausbreitung der Radiowellen. Wir wissen, daß Mittel- und Kurzwellen am Abend besser zu hören sind als am Tage. Auch das ist eine Wirkung der von der Sonne hervorgerufenen ionisierten Schichten. Kennt man einmal die Bewegungen und die Änderungen dieser Schichten genauer, so ist man in der Lage, das Funkwetter vorauszusagen und für den Nachrichtenverkehr oder auch für das Radio Wellenlängen zu wählen, die der jeweiligen Funkwetterlage angepaßt sind.

Ausgehend von Erscheinungen, die vor und während des zweiten Weltkrieges zufällig an Hochfrequenzempfängern für kurze Wellen entdeckt wurden, hat sich eine Konkurrenz zur Astronomie – die Radioastronomie herausgebildet. Sie nutzt das uns bereits bekannte »Radio-Fenster« der Atmosphäre im Bereich der kurzen Funkwellen aus. Die Radioastronomie hat in den wenigen Jahren ihres Bestehens bereits eine aufschlußreiche Karte des Himmels gezeichnet, wie er sich ihren »langwelligen Augen« darbietet.

Auf dem Gebiet der an das sichtbare Licht anschließenden *kurzwelligen* Ultraviolettstrahlung ist mit erdgebundenen Beobachtungsgeräten kein Erfolg zu erwarten, da diese Wellen in der Atmosphäre fast völlig verschluckt werden. Hier springt wieder die Rakete in die Lücke, und zwar durch die Schaffung der »Raketenastronomie«. Beobachtungsgeräte für diese kurzen Wellen, den unten erwähnten Geiger-Müller-Zählern ähnlich, werden auf stabilisierten Plattformen montiert und mit Raketen an den Rand der Atmosphäre geschickt. Während des Fluges tasten sie wie ein Astronom mit dem Fernrohr den Himmel ab. Aus den Messungen dieser Roboter-Astronomen stellt der Forscher eine weitere Himmelskarte zusammen. Erst die Überlagerung dieser in verschiedenen Strahlungsgebieten gewonnenen Himmelskarten, sozusagen der Mehrfarbendruck aus den Einzelbildern mit weit außerhalb des sichtbaren Spektrums liegenden »Farben«, kann uns eine bündige Auskunft über die Geschehnisse im Weltraum geben.

Der Vielfalt der Erscheinungen entspricht die Vielfalt der notwendigen Meßgeräte. Für die Untersuchung des sichtbaren Lichtes und seiner Randgebiete, nämlich des Ultravioletten und Infraroten verwendet man optische Instrumente, sogenannte Spektrometer, mit denen die Intensität der Strahlung in den verschiedenen Wellenlängengebieten gemessen werden kann. Wenn es im wesentlichen darauf ankommt, die Sonnenstrahlung zu erforschen, werden diese Spektrometer in den Raketen oder Satelliten so gesteuert, daß sie stets auf die Sonne gerichtet bleiben.

Die in der Primärstrahlung enthaltenen Materieteilchen, Elektronen und Atomkerne kann man mit den auch am Erdboden oft verwendeten Geiger-Müller-Zählern zählen. Ihre Geschwindigkeit mißt man dadurch, daß man die Zähler durch dicke Bleischichten oder Metallschichten abschirmt, damit nur noch die schnellsten Materieteilchen durch sie hindurch den Zähler erreichen. Ähnliche Geräte dienen dazu, die Ionen, die sich in den Schichten der Atmosphäre gebildet haben, zu messen und zu zählen. Hierbei ist natürlich zu berücksichtigen, daß die Ionen längst nicht die Geschwindigkeit haben, die die Teilchen aus dem Weltraum oder von der Sonne besitzen.

Für die Messung des magnetischen Feldes der Erde gibt es eine Reihe ausgeklügelter Apparate, die sich bereits auf der Erde bewährt, aber den Nachteil haben, daß sie ein relativ hohes Gewicht besitzen. Für den Einbau in Satelliten mußten daher besonders leichte Apparate entwickelt werden, und auch diese haben nur in größeren Satelliten Platz.

Außer von der Strahlung atomarer Teilchen wird die Erde noch ständig von einem Materiestrom getroffen, den man schlecht als Strahlung bezeichnen kann, nämlich von Meteoren aller Größen. Ununterbrochen prasselt ein Regen von Steinen und rieseln Wolken von Staub auf die Erde nieder. Es handelt sich um Splitter kosmischer Körper, zumeist von Kometen, die auf ihren eigenen Bahnen durch den Weltraum zogen, zufällig in das Schwerfeld der Erde gelangten und zum Absturz auf die Erdoberfläche gezwungen wurden. Nur die größten Meteore – und die kleinsten, der kosmische Staub – erreichen die Oberfläche, ohne als Sternschnuppen zu verglühen. Da die größeren Brocken relativ selten sind, beschränkt sich die Messung mit Raketen und Satelliten auf die Zählung der kleinen Staubpartikelchen. Eine der einfachsten Methoden besteht darin, das Geräusch, das sie auf einer Metalloberfläche machen, mit dem Mikrofon aufzunehmen, zu registrieren oder es auf die Erde herunter zu senden. In Übereinstimmung mit früheren Schätzungen haben die Messungen ergeben, daß täglich etwa 10000 Tonnen Materie auf die Erde fallen.

Eines der schwierigsten Kapitel der modernen Physik, nämlich die Relativitätstheorie, kann in den künstlichen Satelliten eine experimentelle Stütze finden. Zwei äußerst genaue, völlig gleich gehende Uhren müssen verschiedene Zeiten anzeigen, wenn eine von ihnen mit einem Satelliten reist, während die andere auf der Erde bleibt – sagt die Relativitätstheorie. Da gerade in dieser Zeit der Satelliten eine Uhr erfunden wurde, die viel genauer geht als die genauesten Uhren bisher, ließe sich ein solches Experiment mit einem Satelliten anstellen. Die

Relativitätstheorie könnte durch solche Experimente gestützt und vielleicht verbessert werden.

Die Aufzählung der Aufgaben, die die Forschung stellt, ist noch längst nicht vollständig. Bis zur Beantwortung der heute noch offenen Fragen sind sicher noch Zehntausende von Raketenaufstiegen und Hunderte von Satelliten notwendig.

Raum-Laboratorien

Wenn die Physiker mit frei fliegenden Atomen, Ionen oder Elektronen experimentieren, wenn sie ultraviolette Strahlen untersuchen, müssen sie, wie in manchen anderen Fällen auch, die Versuchsapparate in einen luftleeren Raum, in ein Vakuum bringen. Die Erzeugung und Aufrechterhaltung eines solchen Vakuums in großen Gefäßen ist sehr schwierig, weil jeder Werkstoff etwas Gas abgibt und das Vakuum dadurch dauernd verschlechtert wird. Das wäre in einem Satelliten anders. Dort könnte man das vollkommene Vakuum, in dem der Satellit sich bewegt, für die Untersuchungen direkt ausnutzen, ohne daß ein Auspumpen notwendig wäre. Ein solcher Satellit für physikalische Versuche im Vakuum braucht nicht unbedingt bemannt zu sein. Wir sind mit der Automatisierung von Maschinen und Geräten heute so weit, daß wir jeden nur erdenklichen Versuch an Bord eines solchen Satelliten durch Fernsteuerung erzeugen und uns auch die Ergebnisse eines Versuches durch Fernübertragung auf die Erde zurückgemeldet werden können. Heute schon laufen viele atomphysikalische Experimente hinter dicken Mauern ab, durchgeführt und beobachtet über automatische Einrichtungen. Überträgt man diese Technik auf die sicher schwierigeren Verhältnisse des Satelliten, so kann man »Raumlaboratorien« für physikalische Untersuchungen schaffen, in denen Verhältnisse herrschen, von denen die Physiker bisher nur träumen konnten.

Noch eine zweite Eigenschaft des Satelliten könnte die Physiker für ihre Versuche sehr interessieren: die Schwerelosigkeit. Bekanntlich herrscht in und bei einem Satelliten Schwerelosigkeit, weil die Zentrifugalkraft, die ihn auf seiner Bahn hält, gerade die Schwerkraft aufhebt. Eine große Zahl von Versuchen auf der Erde, so etwa Untersuchungen an elektrischen Lichtbogen, sind durch die Schwerkraft verfälscht. Bisher hat man sich in den Physiklaboratorien damit geholfen, daß man wenigstens für kurze Zeit eine Schwerelosigkeit hervorrief, indem man diese Untersuchungen in einem fallenden Fahrstuhl machte. Natürlich sind

die Zeiten, während der ein Fahrstuhl frei fällt, so kurz, daß die Untersuchungen darunter sehr stark litten. In einem physikalischen Satelliten wären sie unabhängig vom Zeitbedarf durchzuführen und würden wahrscheinlich sehr interessante Ergebnisse liefern.

Nicht nur die Physiker, auch die Mediziner und Biologen sind am Zustand der Schwerelosigkeit interessiert. Da wir die Wirkung der Schwerkraft auf einen menschlichen oder tierischen Körper bisher nie völlig ausschalten konnten, vermögen wir auch nicht genau zu sagen, welche physiologischen Vorgänge von der Schwerkraft abhängig sind, von ihr beeinflußt werden und welche nicht.

Anders steht es mit Beschleunigungen, die *größer* sind als die Erdbeschleunigung. Wir können sie auf Zentrifugen erzeugen; aus diesem Grunde sind in den medizinischen Untersuchungsanstalten große Zentrifugen zum Schleudern von Menschen und Tieren aufgebaut worden.

Mit Düsenflugzeugen hat man den Zustand der Schwerelosigkeit für Zeitabschnitte von etwas unter einer Minute, in letzter Zeit mit einem Raketenflugzeug für über 10 Minuten erzeugen können. In den Satelliten dagegen haben wir die Möglichkeit, die Wirkung der Schwerelosigkeit auf den Organismus über lange Zeiten zu untersuchen. Der erste Versuch hat bereits stattgefunden, und zwar mit der Hündin Laika im Sputnik II. Anscheinend hat die Schwerelosigkeit dabei weder die Herztätigkeit noch die Atmung beeinflußt. Während des Aufstieges der Rakete wurde die Atmung durch die Beschleunigung beschleunigt, und der Herzmuskel arbeitete dreimal so schnell wie im Normalzustand. Dann aber normalisierten sich die Funktionen wieder, und nach allem, was aus den spärlichen Berichten bisher bekannt ist, hat sich die Schwerelosigkeit selbst auf die Funktion des tierischen Körpers nicht ausgewirkt.

Von den zahlreichen wissenschaftlichen Forschungsaufgaben, die den Raketen und Satelliten übertragen werden und noch übertragen werden können, konnten nur einige aufgezählt und in ihrer Bedeutung kurz gestreift werden. Die Ergebnisse, die von diesen beiden Instrumenten der Forschung geliefert werden, rechtfertigen nachträglich die großen Aufwendungen, die für die Raketenentwicklung getrieben worden sind. Vergleicht man die Arbeitsstunden, die bisher verbraucht wurden, um unseren geistigen Hunger zu stillen, mit den Arbeitsstunden, die jedes Jahr verbraucht werden, um unseren körperlichen Hunger auf der ganzen Welt zu stillen, so erkennt man, daß der Mensch keine Angst vor einer geistigen Überfütterung zu haben braucht. Zu bedauern ist nur,

daß dieser Bruchteil der menschlichen Arbeitskraft häufig der Wissenschaft nur auf dem Umweg über militärische Aufgaben zur Verfügung gestellt wird.

Die mit Raketen und Satelliten bereits in Angriff genommenen und auch die zukünftigen wissenschaftlichen Aufgaben lassen sich lösen, ohne daß die Rakete oder der Satellit eine menschliche Besatzung haben. Es ist sogar sicher, daß der Mensch an Bord einer Rakete oder eines Satelliten keine Verbesserung der Meßmöglichkeiten und der Registrierung der Meßergebnisse erreichen kann, da wir schon seit Jahren in der Lage sind, messende und registrierende Apparate zu bauen, die den Menschen übertreffen. Auf der anderen Seite würde die Mitnahme eines Menschen in einer Rakete oder einem Satelliten die Transportaufgabe so erheblich erschweren, daß die dafür notwendigen Aufwendungen ein Vielfaches der Aufwendungen für die Meßgeräte darstellten. Daher sind wir überzeugt, daß die unbemannte Rakete und der unbemannte Satellit auch in Zukunft für wissenschaftliche Forschungsaufgaben vorzuziehen sind und daß es vom wirtschaftlichen Standpunkt aus immer besser sein wird, mehr Arbeitskraft und Intelligenz in die zu entwickelnden automatischen Geräte zu stecken als in Geräte und Methoden, die einem Menschen den Aufstieg in den Raum und den Wiederabstieg auf die Erde ermöglichen.

Raumfahrt

Etwas ganz Ähnliches gilt unserer Meinung nach auch von der Weltraumfahrt. Die bemannte Weltraumfahrt, also die Fahrt von Menschen zum Mond, zu den Planeten oder unter Umständen sogar zu benachbarten Planetensystemen, scheint uns keine vordringliche Aufgabe der Raketentechnik zu sein. Alle Beobachtungen, die im Weltraum und auf anderen Planeten gemacht werden können, lassen sich ebenso gut oder besser von Automaten durchführen. Wissenschaftliche Geräte, die man auf einen anderen Planeten oder auf eine Bahn um einen anderen Planeten schickt, kann man dort belassen, bis sie durch Zufall zerstört werden. Einem Menschen, der mit einer solchen Rakete in den Weltraum vordringt, muß man mindestens die latente Möglichkeit zur Rückkehr offenhalten. Hierdurch erhöhen sich aber die dafür notwendigen Aufwendungen auf ein Vielfaches derjenigen Aufwendungen, die man für automatische Geräte und für die Verbindung von der Erde zu diesen Geräten treiben müßte.

Forschungsraketen und Satelliten, die die Erde verlassen und in den Weltraum vorstoßen, haben vielfältige Aufgaben. Der Weltraum selbst, der ja, wie wir inzwischen wissen, nicht so leer ist, wie man sich ihn vorstellt, sondern erfüllt von elektromagnetischen Strahlungen, Korpuskeln und Staub, ist das erste Untersuchungsobjekt solcher Raketen. Von den großen Himmelskörpern liegt uns der Mond am nächsten, dessen Untersuchung uns zwar voraussichtlich keine großen Überraschungen bringt (auch nicht die seiner Rückseite!), von dem wir aber noch eine Reihe von Einzelheiten wissen möchten, um unser Bild nicht nur über den Mond, sondern auch über die Erde abzurunden.

Weitere interessante Objekte sind die beiden benachbarten Planeten, Mars und Venus, die heute schon mit unbemannten, steuerfähigen Raketen erreicht werden können. Zu diesen Planeten ausgesendete Forschungsraketen könnten uns über die seit hundert Jahren diskutierten, sogenannten Marsrätsel Aufschluß geben. Von der Venus, die unseren auf der Erde lebenden Astronomen durch eine wolkige Atmosphäre völlig verdeckt ist, würde ein auf ihr landendes Gerät sogar die ersten Beobachtungen liefern. Beide Planeten erscheinen für den Menschen so unwirtlich, daß an eine Bewohnbarkeit nicht gedacht werden kann, obwohl auf dem Mars vielleicht niederes Leben, in der Form von Flechten oder Algen vorhanden ist.

Besuche auf den ferneren Planeten versprechen keine Ergebnisse, die über das hinausgehen, was wir auf dem Mars und der Venus erfahren können. Auch diese Besuche lassen sich, unter der Voraussetzung, daß unsere Steuertechnik wesentlich verbessert wird, mit unbemannten Fahrzeugen durchführen.

Während die Reisezeiten zu den Planeten unseres Sonnensystems mit den Geschwindigkeiten, die unsere Raketen heute erreichen können, noch einigermaßen überschaubar sind, sind die Reisezeiten, die zu anderen Planetensystemen unseres Milchstraßensystems benötigt werden, bereits so groß, daß sie weit über das Menschenalter hinausreichen. Es bleibt zu erwarten, ob es den heute noch sehr utopisch anmutenden, neuen Triebwerksvorschlägen gelingt, Reisegeschwindigkeiten für Raketen zu erzielen, die in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommen und die Entfernungen zu diesen Planetensystemen auf einige Jahre zusammenschrumpfen lassen.

Derartige Fahrten sind auch für unbemannte Raketen als Abenteuer zu betrachten. Die Voraussetzungen dafür sind nach dem heutigen Stand der Technik noch bei weitem nicht gegeben. So erscheint es unmöglich, mit den gegenwärtigen Methoden eine einwandfreie Verbindung zwischen

der durch den Weltraum fliegenden Rakete und der Erde zu schaffen, was aber für die Steuerung der Rakete und die Übermittlung der Meßergebnisse notwendig wäre. Auf der anderen Seite versichern uns die Astronomen immer wieder, aus ihren bisherigen Untersuchungen ergäbe sich, daß das Weltall außerordentlich eintönig sei. Es ist also kaum zu erwarten, daß wir in fernen Sonnensystemen oder gar in fernen Milchstraßensystemen andere Verhältnisse finden, als wir sie in unserem eigenen Milchstraßensystem oder Sonnensystem haben.

Die Wahrscheinlichkeit, einen Planeten zu treffen, der etwa die gleichen Lebensbedingungen hat, wie sie bei uns auf der Erde herrschen, ist außerordentlich gering, wenn es auch durchaus wahrscheinlich ist, daß solche Planeten existieren. Die Weltkörper sind außerordentlich dünn im Raum verteilt, die Entfernungen zwischen ihnen unvorstellbar groß, und die Durchmusterung beispielsweise unserer Milchstraße auf bewohnbare Planeten ist eine Aufgabe, die sich kaum in Jahrtausenden lösen lassen wird.

Diese Betrachtung, die uns auf die Bescheidenheit unserer Anstrengungen nachdrücklich hinweist, sollte uns nicht kleinmütig machen. Im Gegenteil, wir sollten stolz darauf sein, daß wir mit Raketen in den Weltraum vorstoßen können, auch wenn es sich in absehbarer Zeit nur um den winzigen Raum um das winzige Stäubchen Erde handelt.

Noch stolzer allerdings sollten wir darauf sein, daß wir mit dem menschlichen Geist in Räume vorstoßen können, die unserem schwerfälligen, weil aus Materie gemachten Körper wohl für immer versperrt bleiben werden.

STICHWORTVERZEICHNIS

Abgriff 167
 Abwurfkabel 193, 208, 211
 Achsen der Rakete 108
 Aerodynamik 71
 Aggregatzustände 80
 Air-to-air-missiles 16
 Air-to-ground-missiles 16
 Ankerrakete 221, 222
 Anstellwinkel 53, 73
 Antriebsbahn 39
 Antriebsstrahl 35
 Atlas 11, 26, 205
 Atmosphäre 71, 76, 117
 Atom 79
 Atomtriebwerk 96
 Aufrichtgerät 207, 208
 Auftrieb 53, 72, 185
 Austrittsgeschwindigkeit 43, 87
 Azimut 111

 Bahnvermessung 183, 210
 Ballistik 39
 Behälterbegasung 147, 155
 Beobachtungssatelliten 226
 Beschleunigung 37, 56
 Beschleunigungsintegration 57, 172
 Beschleunigungsmesser 172
 Biegung 101, 103
 Boden-Boden-Waffen 15
 Bodengeräte 125, 203
 Boden-Luft-Waffen 15
 Booster 16
 Brennkammer 88, 134
 Brennkammerdruck 138
 Brennkammerkühlung 139
 Brennschluß 41, 54, 159, 174
 Brennschlußgeschwindigkeit 53, 54
 Brennversuch 206

 Chemie 79
 Chemische Umsetzung 82
 Cobra 11, 20
 Corporal 207

 Dampfanlage 145
 Dämpfung 108
 Dezimeterwellen 218
 Dissoziation 87, 90
 Doppler-Verfahren 116, 118, 181
 Drall 110
 DRG 212, 223, 224
 Druckfestigkeit 100
 Druckförderung 132
 Durchsatz 137
 Düse 135, 136, 138

 Effektive Austrittsgeschwindigkeit 43, 90
 Eingießtechnik 161
 Einspritzdüsen 136
 Eintauchproblem 76
 Engster Querschnitt 138
 Elektronengürtel 231
 Ellipse 61
 Erdanziehung 41, 52
 Erddrehung 62
 Explorer 64, 223

 Fenster in der Atmosphäre 117
 Fernlenkverfahren 174
 Fernsehrelaisstation 220
 Festigkeitslehre 98
 Feststofftriebwerk 132, 160
 Feuerwerktrakete 221
 Flüssigkeitstriebwerk 132
 Fördersysteme 141
 Form der Erde 227
 Formfestigkeit 101
 Forschung 33, 213
 Forschungsraketen 224, 225
 Forschungssatelliten 223, 227
 Freie Radikale 91
 Freiflugbahn 41
 Funkgeräte 173
 Funkpeilverfahren 116, 174
 Funkröhre 178
 Funkwetter 233

Gasentnahme 146
 Gefügefestigkeit 98
 Geiger-Müller-Zähler 234
 Geschwindigkeitsmessung 55, 201
 Gewicht 47
 Gieren 109, 194
 Gleitbahn 209, 212, 213
 Ground-to-air-missiles 16
 Ground-to-ground-missiles 16
 Grundgesetz 33
 Gütertransport 214

 Hagelabwehrrakete 224
 Hauptventile 158
 Heck 131
 Heißwassertriebwerk 78
 Heizwert 85
 Hochachse 109, 186
 Höhenwinkel 111
 Honest John 22, 204, 213
 Horizont 168

 ICBM 14
 Impulssatz 36
 Indifferentes Gleichgewicht 106
 Infrarot 180, 223
 Instabilität 72, 106
 Integrationskreisel 114, 171, 201
 Ionosphärenschichten 230
 Ionentriebwerk 93
 IRBM 13

 Kabelmast 208, 211
 Kalorie, Kilokalorie 85
 Kardanring 166, 191
 Knickung 101
 Kommandoübertragung 116, 173
 Konditionierung 162
 Koordinatensystem 112
 Kran 204, 206
 Kreisel 112
 Kreiselgeräte 166
 Kreiselpumpe 134, 144
 Kühlung 138
 Kurskreisel 167

 Lastannahmen 102, 104
 Längsachse 109

 Lawinenrakete 222
 Leichtbau 125
 Leinenschlepprakete 220
 Leitstrahlverfahren 115
 Lenkverfahren 165
 Liegende Prüfung 204
 Loki 160
 Luft-Boden-Waffen 14
 Luftdichte 71, 228
 Luftdruck 71, 228
 Lufthülle 71, 76, 117, 228
 Luft-Luft-Waffen 14
 Luftkräfte 103
 Luftkraftangriffspunkt 106
 Luftreibung 76
 Lufttruder 185
 Luftwiderstand 72

 M8-Pulverrakete 74
 Mach-Kegel 76
 Mach-Zahl 74
 Magnetfeld 234
 Magnetische Stürme 232
 Magneto-Aerodynamik 78
 Masse 46
 Massenkraft 103
 Massenstrahl 78
 Meßwertübertragung 117, 210
 Meteore 234
 Mittelteil 127
 Mischdüse 137
 Modulation 174
 Molekül 80
 Mondschuß 67
 Mosquito 20
 Müller-Story 33
 Mutterrakete 63

 NAA X-15 27, 217
 Nachrichtentransport 218
 Naßkühlung 140
 Navigationssatelliten 225
 Neigungswinkel 50
 Nickschwingungen 110
 Niederdruckgas 148
 Nike 11, 17, 23
 Nordlichter 71
 Nutzlast 123, 126

Stichwortverzeichnis

Ölsprührakete 222, 223
OKSH 47000 160
Optisches Fenster 117
Ortungsgesät 115
Oxydation 82

Parabel 50
Pendel 105
Peilung 116, 174
Personentransport 217
Photonentriebwerk 97
Postrakete 216
Preßluftkreisel 168
Programmechanismus 198
Prüfstand 205
Pulverkreisel 168
Pulvertriebwerk 132, 160

Querachse 109, 186
Querbeschleunigungsmesser 172

R14-Rakete 11, 17, 25, 131, 149
Radargerät 115, 175
Radialkühlung 140
Radikale 91
Radiofenster 117
Raketenastronomie 233
Raumfahrt 69, 237
Raumlaboratorien 235
Raumstation 30
Raumschiff 31
Reaktion 82
Rechner 184, 194
Redstone 24, 204, 206, 208
Reichweite 53
Reißlänge 100
Relaisstationen 219
Relativitätstheorie 234
Rollen 109, 194
Ruder 185
Rückstoß 33, 78

Satellitenbahn 59, 61
Scattering 219

Schalentheorie 102
Schiefer Wurf 50
Schub 36
Schubdurchleitung 103, 141

Schubgerüst 141, 196
Schurre 206
Schuß vom Berg 51
Schwenkbares Triebwerk 158, 191, 195
Schwerefeld der Erde 58, 67
Schwerelosigkeit 235
Schwereschwelle 68
Schwerkraft 58

Seenotraketen 222
Servomechanismen 164
Sicherheit 104
Signalrakete 221
Snark 17, 217
Spektrometer 233
Spritzversuch 206
Sputnik 29, 223

Stabilisierte Plattform 169
Stabilität 72, 105, 163
Stampfen 109, 194
Starthilfe 16, 214
Starttisch 193, 208, 210
Steighöhe 66
Steilbahn 41
Steuerdüse 189, 196, 200
Steuerkräfte 103, 119
Steuerorgane 119, 185
Steuerung 19, 125, 163
Steuerungstheorie 105
Steuerungszentrum 165, 193
Strahlaustrittsgeschwindigkeit 43
Strahlruder 187
Stufenprinzip 63
Stufenraketen 63
Stumpfe Spitze 77

TCBM 14
Temperatur der Atmosphäre 71, 229
Theoretische Austrittsgeschwindigkeit 87
Thermisches Atomtriebwerk 96
Thermodynamik 63
Thor Able 225
Tochterraquete 63
Trägheitnavigation 115
Transportgeräte 204
Treibstoffanteil 46, 48, 160
Treibstofffluß R 14 150

Stichwortverzeichnis

Triebwerk 18, 123, 131
Triebwerksregelung R 14 156
Trockenkühlung 140
Turbindampffluß R 14 152
Turbopumpenförderung 134, 143

Überdruckstabilisierung 129
Ultraviolett 233

V2-Rakete 10, 17, 128, 136, 145, 168
Vakuum 235
Vanguard 28, 64, 192, 210
Verbrennung 82
Verluste im Triebwerk 89
Vermessung 183, 210
Véronique 21, 209, 213
Vertikant 168

Verweilzeit 137
Vorkammer 136

Wärmeaustauscher 143
Wärmeenergie 81
Wasserstoffperoxyd 83
Wetterbeobachtung 225
Windkraft 104
Wurfparabel 51

X-15 27, 217

Zelle 16, 123, 125
Zentrifugalkraft 53, 60
Zielsuchgerät 179
Zubringerproblem 216
Zugfestigkeit 98

QUELLENVERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Associated Press, Frankfurt/Main, S. 196 (oben). Contraves AG., Zürich, S. 20.
© 1952 Crowell-Collier Pub. Co., New York, nach einer Zeichnung von Chesley
Bonestell, S. 30. De Havilland Engine Company, Watford, S. 220 (2). Deutsche Gesell-
schaft für Raketentechnik und Raumfahrt, Stuttgart, S. 27, S. 225 (unten). Deutsche
Presse-Agentur, Frankfurt/Main, S. 205, S. 213 (oben). Foto-Gerke, Bremen, S. 224
(oben). A. und H. Gottwald, Wiesbaden, S. 221 (2). Keystone, München, S. 204.
W. Pilz, Stuttgart, S. 21, S. 213 (unten). Presseabteilung der Botschaft der UdSSR,
Rolandswerth/Rh., S. 29, S. 225 (oben). C. Schwenke, Bremen, S. 212. Ullstein-Bilder-
dienst, Berlin, S. 224 (unten). United Press, Frankfurt/Main, S. 209. USIS/Press Unit, Bad
Godesberg, S. 22, 23, 24, 26, 28, 196 (unten), 197, 208. H. Wimmer, Karlsruhe, S. 25, 31.

Sämtliche Zeichnungen wurden nach Entwürfen des Verfassers von Hans Beerweiler,
Pforzheim, angefertigt.