



Ionentriebwerke für Satelliten und Raumsonden

Ein neues Antriebskonzept setzt sich durch

Jahrzehntelang galten Triebwerke, die den Treibstoff nicht verbrennen, sondern ionisieren und elektrisch beschleunigen, als „Zukunftsantriebe“. Nach einer Reihe erfolgreicher Testflüge und auch schon einigen Einsätzen im Weltraum ist die Zukunft inzwischen Wirklichkeit geworden. Die Vorteile des neuen Raketenkonzepts — deutlich bessere Treibstoffökonomie, größere Nutzlasten, kürzere Flugzeiten und Kosteneinsparungen — kommen sowohl wissenschaftlichen und kommerziellen Satelliten, als auch interplanetaren Raumsonden zugute. Auf dem internationalen Markt konkurrieren derzeit ein amerikanisches, ein russisches und ein deutsches Triebwerkskonzept, das am I. Physikalischen Institut der Universität Gießen entwickelt wurde.

Von Horst Löb

Schon zu Beginn unseres Jahrhunderts erkannten die drei großen Raketenpioniere, Konstantin Ziolkowski, Robert Goddard und Hermann Oberth, daß man mit elektrischen Triebwerken viel höhere Strahlgeschwindigkeiten erreichen kann, als dies chemisch möglich ist. Doch die Technologie zur Konkretisierung dieser Idee war zur damaligen Zeit noch nicht reif. So nahm die Raketenentwicklung den Weg über die großen, mehrstufigen chemischen Aggregate, bei denen der Treibstoff rund 90 Prozent der Startmasse ausmacht und für die eigentliche Nutzlast kaum noch ein paar Prozent übrigläßt. Man könnte diese Raketentechnologie mit den alten Dampfschiffen aus dem 19. Jahrhundert vergleichen.

Anfang der sechziger Jahre begannen dann einige Physiker in den USA, in der UdSSR, in Europa und später auch in Japan die ersten Ionentriebwerke zu konzipieren, zu bauen und zu testen. Man untersuchte zunächst Labormodelle, verbesserte und optimierte sie. Dann qualifizierte man die Prototypen und versah sie mit den erforderlichen Peripheriegeräten (Abb. 1).

Die NASA unternahm einige Flugtests; die Sowjetunion flog sogar 60 kleinere, allerdings meist noch nicht qualifizierte Triebwerke — was im Westen aber erst zu Zeiten der Perestroika bekannt wurde. In Europa geschah zunächst nichts; es fehlte an Trägerkapazität. Erst im Sommer 1992 wurde ein „RIT-10“ auf der ESA-Plattform „EURECA“ weltraumgetestet (Abb. 2). Das Triebwerk war seit 1962 am I. Physikalischen Institut in Gießen entwickelt und von 1970 an bei der Firma MBB, Ottobrunn (heute Daimler-Chrysler-Aerospace „Dasa“) industrialisiert worden.

Bereits in den sechziger und siebziger Jahren waren von wissenschaftlicher Seite weltweit zahlreiche Missionsstudien publiziert und von Raumfahrtfirmen konkrete Einsatzvorschläge gemacht worden. Die Weltraumagenturen hatten sie alle auf Eis gelegt, wobei sie argumentierten, daß die „Zukunftsantriebe“ schon dem Namen nach noch nicht

einsatzreif wären. Und um den *circulus vitiosus* zu schließen, förderte man die Triebwerks-Hardware zunächst nur auf Sparflamme, da es ja noch keine Anwendungsfälle gab.

Zu dieser Vertrauensbarriere der Entscheidungsträger gesellten sich noch Budget-Zwänge und geänderte Prioritäten in der Nach-Apollo-Ära. Vor allem aber konnte man die früheren Missionen auch noch ganz gut mit den vorhandenen und bewährten, konventionellen Antriebssystemen durchführen. Die damaligen Satelliten waren vergleichsweise klein und ihr Bedarf für die Bahn- und Lageregelung entsprechend gering. Ebenso konzentrierte sich die Erforschung des Weltraums durch Raumsonden logischerweise erst auf nahe Himmelskörper und flugtechnisch einfache Missionen.

Der Durchbruch

Als im Lauf der Zeit die interplanetaren Aufgaben immer schwieriger wurden, half man sich zunächst mit einem himmelsmechanischen Trick: Beim nahen Vorbeiflug an einem großen Himmelskörper holten sich die Raumsonden den Schwung für die nächste Flugetappe, ohne Treibstoff zu verbrauchen. Doch solche Manöver bedeuteten fast stets einen Umweg, verlängerten die Flugzeit

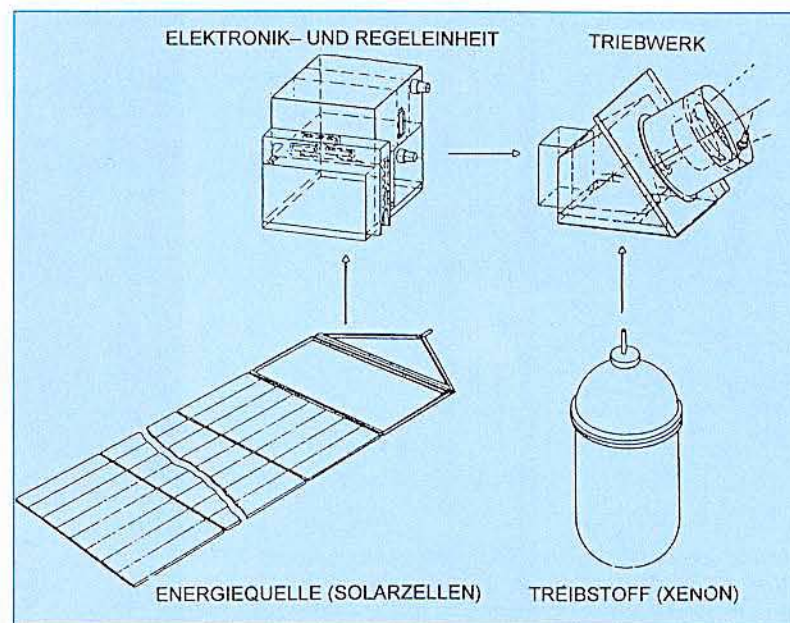


Abbildung 1: Eine Ionenantriebseinheit besteht aus dem eigentlichen Triebwerk, der Treibstoff-Versorgungseinheit (Xenon-Drucktank und Fördersystem mit Ventilen, Flußregler etc.), der Energieversorgung (Solarzellen-Flügel oder Kernreaktor) und der Elektroneinheit (Hoch- und Niederspannungserzeugung, Hochfrequenzgenerator etc.). Um den Schub zu erhöhen, kann man mehrere Triebwerke zusammenschalten.

und machten vor allem das „Startfenster“ immer enger, denn man mußte ja stets die nächste, günstige Planetenkonstellation abpassen.

So erreichte die „Swingby-Technik“ allmählich die Grenze des sinnvoll Machbaren, und man entsann

sich wieder des Ionenantriebs, mit dem man das Ziel direkt und ohne Umweg ansteuern kann (Abb. 3).

Beispielsweise läßt sich der sonnennächste Planet, der Merkur, mit Hilfe des Ionenantriebs in der Hälfte der Zeit erreichen, und man kann

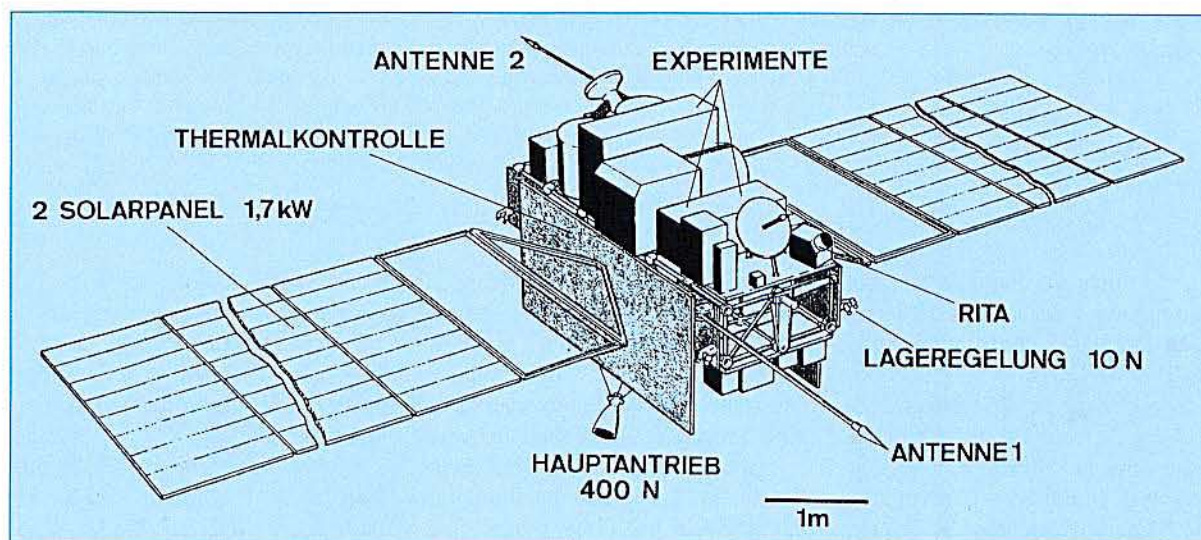


Abbildung 2: Europäischer Testsatellit „EURECA“ mit der RIT-10-Antriebseinheit „RITA“ (rechts vorne auf der Experimentierplattform). Der Flugkörper wurde von einem US-Shuttle in eine 400 km hohe Kreisbahn um die Erde geschafft und ein halbes Jahr später von einem anderen Raumtransporter wieder zurückgeholt.

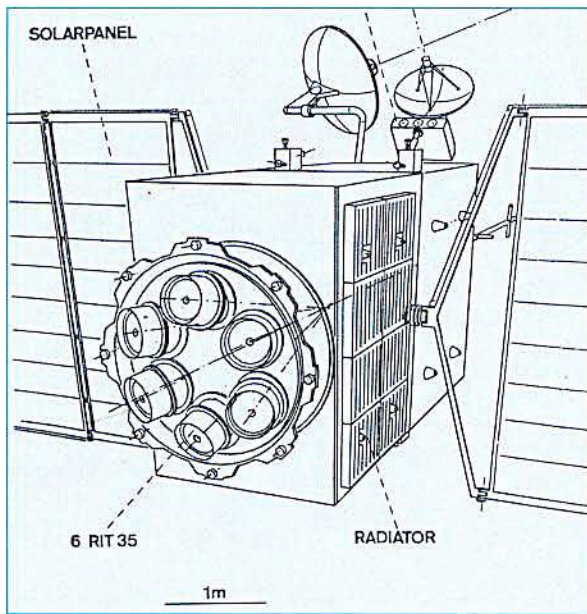


Abbildung 3: Zeichnung einer solar-elektrischen Raumsonde mit einem Bündel von Gießener Ionentriebwerken „RIT 35“ und zwei großen Solarzellenflügeln (im Bild nur zum Teil dargestellt).
Quelle: MBB Ottobrunn

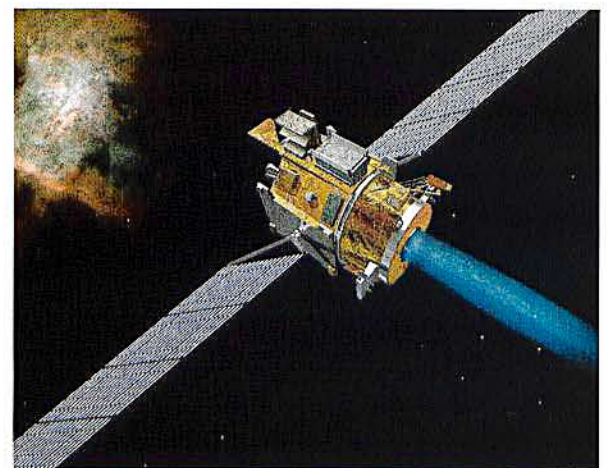
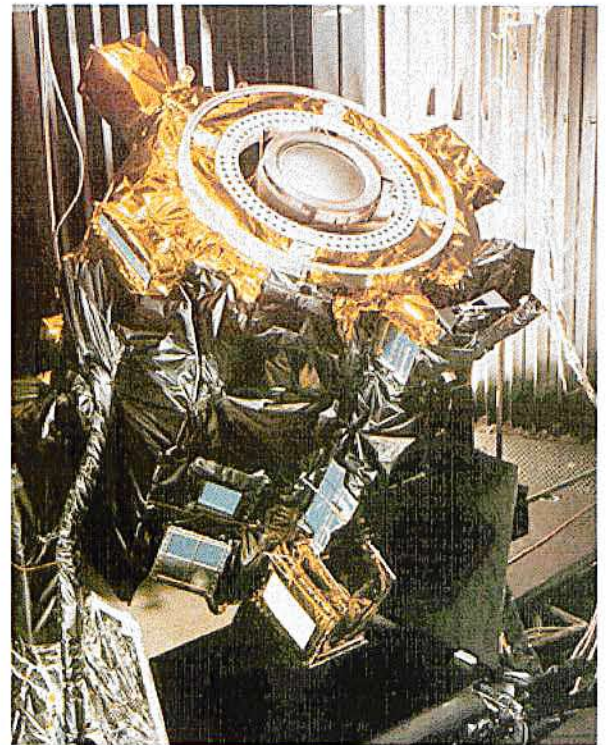


Abbildung 5: Zeichnung der ESA-Mondsonde „SMART-1“ mit zwei Ionentriebwerken und den beiden Solarzellenflügeln.
Quelle: ESA-Technologiezentrum ESTEC, Noordwijk, Holland, 1998.

Abbildung 4: Foto der NASA-Sonde „Deep Space One“ auf dem Prüfstand. Auf der oberen Stirnseite erkennt man in der Mitte das 30 cm-Ionentriebwerk der Firma Hughes, Malibu. Die beiden Solarzellenflügel sind noch zusammengeklappt. Darunter ist eine Zeichnung des Flugkörpers zu sehen.

Foto: Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1998

zudem noch die doppelte Nutzlast mitnehmen. Kürzlich hat die Firma Dasa-Dornier im Auftrag der europäischen Weltraumagentur ESA eine entsprechende Studie fertiggestellt, und der „Merkur Orbiter“ avancierte mit Ionenantrieb zu einem „Cornerstone“ in der ESA-Planung.

1995 publizierte eine 34-köpfige russisch-europäische Expertengruppe unter der kollegialen Leitung von Professor Dr. Gary A. Popov vom Moskauer Aviation Institut und des

Autors eine Studie über „Advanced Interplanetary Missions“. Die genauen Analysen zeigten, daß mit dem Ionenantrieb sogar Flüge möglich sind, die mit den heutigen Mitteln überhaupt nicht zu realisieren sind.

Natürlich kann man eine neue Phase in der Raketentechnologie nicht gleich mit einer großen und teuren Mission beginnen. Deshalb hat die NASA im Herbst 1998 zunächst einen Demonstrationsflug gestartet, „Deep Space One“. Der

recht kleine Flugkörper (Abb. 4) wird nur von einem einzigen Ionenaggregat angetrieben, soll aber bereits zwei Asteroiden bzw. Kometen und den Mars im Vorbeiflug photographieren.

Eine entsprechende Vorläufermission „SMART-1“ plant die ESA für Ende 2001, wobei hier die Mondpole das Ziel sein werden (Abb. 5). Auch die Japaner wollen mit ihrem Projekt „Muses-C“ nachziehen.

Noch vor „Deep Space One“ ha-

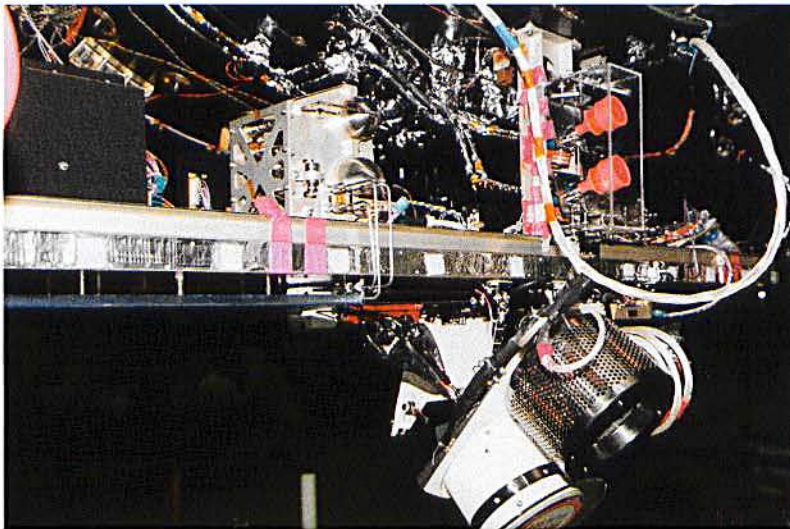


Abbildung 6: Deutsches „RIT-10“-Triebwerk und englisches „UK-10“-Aggregat (rechts unten) an einer Seitenfläche des europäischen Nachrichtensatelliten „ARTEMIS“ (Start voraussichtlich im Mai 2000). In der Mitte links erkennt man die gemeinsame Treibstoffversorgung. Vier Ionentriebwerke sollen 15 Jahre lang die Störkräfte von Sonne und Mond kompensieren.

Foto: Dasa, Ottobrunn, 1998

ben die Ionentriebwerke bereits Eingang in die kommerzielle Satellitentechnik gefunden: Geostationäre Nachrichtensatelliten erfahren nämlich auf ihrer 24-Stunden-Bahn Störkräfte durch Sonne und Mond. Diese würden den Satelliten am Himmel ständig in Nord-Süd-Richtung hin- und herpendeln lassen, falls die Störung nicht durch Bahnkorrekturtriebwerke ausgeglichen wird. Nun ist zwar der tägliche Korrekturbedarf nicht sehr groß, doch er summiert sich im Laufe der Betriebsjahre des Satelliten derart, daß der Treibstoff für diese Orbit-Kontrolle rund ein Drittel der Flugkörpermasse beansprucht.

In den letzten zehn bis fünfzehn Jahren sind die Telekommunikationssatelliten immer leistungsfähiger und schwerer geworden, so daß natürlich auch ihr Korrekturbedarf

ständig zunahm. Da die Satelliten zudem auch immer teurer wurden, ist man heute bestrebt, sie länger als bisher in Betrieb zu halten, was selbstverständlich noch einmal zusätzlichen Treibstoffvorrat bedeutet.

Aus diesem Dilemma helfen die Ionentriebwerke. Sie gehen mit ih-

rem Treibstoff viel sparsamer um als die chemische „Konkurrenz“ und ermöglichen deshalb nicht nur doppelt so lange Betriebszeiten des Satelliten, sondern gestatten auch noch den Einbau zusätzlicher Fernseh- oder Fernsprechanäle.

Alternativ hierzu könnte man bei gleicher Satellitenleistung den Flugkörper verkleinern und ihn mit einer billigeren Rakete starten. Auch dies bedeutet einen kommerziellen Nutzen durch den Ionenantrieb. So wird im Mai 2000 der europäische Nachrichtensatellit „ARTEMIS“ mit einer preiswerten japanischen Trägerrakete gestartet werden. Vier Ionentriebwerke, nämlich zwei deutsche „RIT-10“- und zwei englische „UK-10“-Aggregate (Abb. 6), müssen dann die komplette Nord-Süd-Bahnregelung übernehmen.

Eine Kosten-Nutzen-Analyse bewog jüngst auch ein US-Konsortium, Ionentriebwerke auf einer Flotte von 350 niedrig fliegenden Satelliten einzusetzen. Die Satelliten sollen ein globales Telekommunikationsnetz aufbauen, wobei der Ionenantrieb die Flugkörper auf ihre Sollbahn bringen wird.

Auch wissenschaftliche Satellitenmissionen haben inzwischen den



Abbildung 7: Kaufman-Ionentriebwerk mit 30 cm Durchmesser der Firma Hughes Aircraft, Malibu, das auf der Sonde „Deep Space One“ zum Einsatz kommt.

Foto: NASA

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Prof. Dr. Horst Löb

I. Physikalisches Institut
Heinrich-Buff-Ring 16
35392 Gießen
Tel.: 0641/99-33130
Fax: 0641/99-33139



Horst Löß, Professor für Experimentalphysik i. R., wurde 1932 in Komotau im Sudetenland geboren. Nach der Vertreibung 1945 kam er nach Gießen, wo er Physik studierte. Nach seiner Promotion 1960 über Hochfrequenz-Ionenquellen begann er sich für den Rückstoß von Ionenstrahlen zu interessieren. Als er 1970 zum C3-Professor ernannt wurde, hatte seine Abteilung am I. Physikalischen Institut bereits ein 10 cm-Ionentriebwerk soweit entwickelt, daß es bei MBB (der heutigen Dasa) industrialisiert werden konnte. In der Folgezeit untersuchte er mit seinen Mitarbeitern eine ganze "Familie" von verschiedenen großen Ionentriebwerken, die danach auch für erdgebundene Anwendungen, nämlich zur Materialbearbeitung und zum Zünden von Fusionsplasmen, modifiziert wurden. Bei seinen Projekten arbeitet Horst Löß eng mit der Luft- und Raumfahrtindustrie, mit der ESA und der NASA sowie mit seinen russischen Kollegen zusammen.

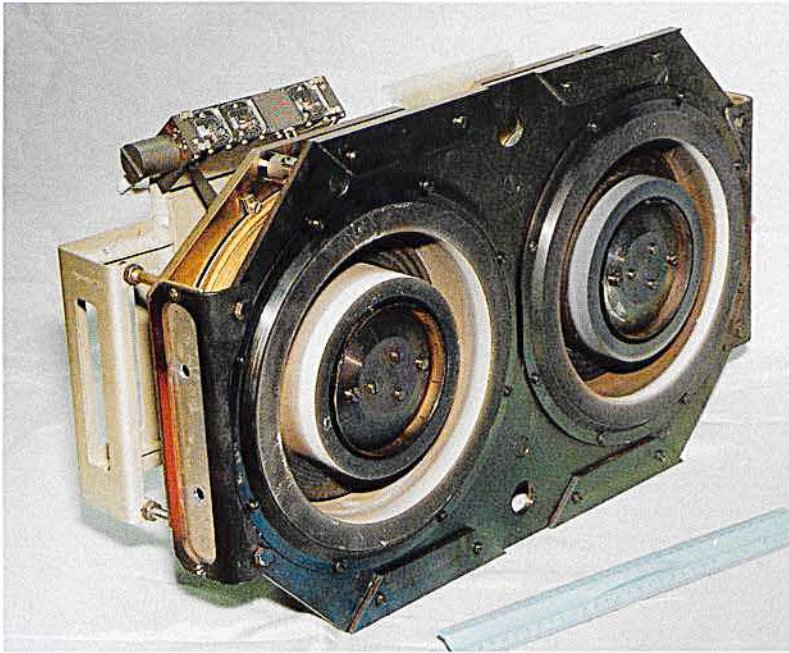


Abbildung 8: Russischer Block mit zwei 14 cm-SPT-Aggregaten.
Foto: Fakel Enterprise, Kaliningrad, und Moskauer Aviation Institut

Ionenantrieb „entdeckt“. Beispielsweise sollen zwei „RIT-10“-Aggregate im Projekt „GOCE“ eingesetzt werden. Sie werden die Aufgabe haben, den Satelliten genauestens zu stabilisieren und die Luftreibung in der Hochatmosphäre zu kompensieren.

Vor- und Nachteile

Das Raketenprinzip beruht bekanntlich auf dem Rückstoß bzw. dem Impulserhaltungssatz. Hierbei hängt der Impuls des schubliefernden Treibstoffstrahls vom Produkt einer Quantitätsgröße, nämlich der Treibstoffmenge, und einer Qualitätsgröße, der Treibstoff- oder Strahlgeschwindigkeit, ab.

Das Antriebsvermögen einer Rakete, d.h. ihre theoretische Endgeschwindigkeit in einem idealen, kräftefreien Raum, ist der Strahlgeschwindigkeit direkt proportional. Um beispielsweise das Schwerfeld der Erde verlassen zu können, muß eine Rakete ein Antriebsvermögen von 11,2 km/s aufbringen — zuzüglich aller Verluste durch Luftreibung usw.

Die Strahlgeschwindigkeiten chemischer Raketen sind nun durch den Heizwert der Treibstoffkombination begrenzt. Selbst mit der besten Kombination — Flüssigwasserstoff und Flüssigsauerstoff — erreicht man

se benötigte der bemannte Mondflug insgesamt sechs Antriebsstufen, und die Rückkehrkapsel mit den drei Astronauten wog nur noch 0,16 Prozent der Startmasse der Saturn V-Rakete.

In elektrischen oder Ionenraketen wird der Treibstoff — in der Regel das schwere Edelgas Xenon — ionisiert und mit Hilfe von Hochspannungsfeldern beschleunigt. Auf diese Weise erreicht man leicht die zehnfache Strahlgeschwindigkeit im Vergleich zu den chemischen Aggregaten.

Jedes Treibstoffatom wird somit zehnmal besser „ausgenutzt“, und man erzielt den gleichen Antriebs- bzw. Korrekturimpuls mit einem Zehntel der Treibstoffmasse. Alternativ hierzu kann man bei gleichem Massenverhältnis ein zehnmal höheres Antriebsvermögen erreichen. Die Ionenrakete wäre in diesem Fall schneller am Ziel oder könnte einen Nachrichtensatelliten entsprechend länger „am Leben erhalten“.

Leider hat jede Münze zwei Seiten, und der Ionenantrieb besitzt auch einen gravierenden Nachteil: Während bei chemischen Raketen der Treibstoff die Energiequelle und das Rückstoßmedium zugleich ist,

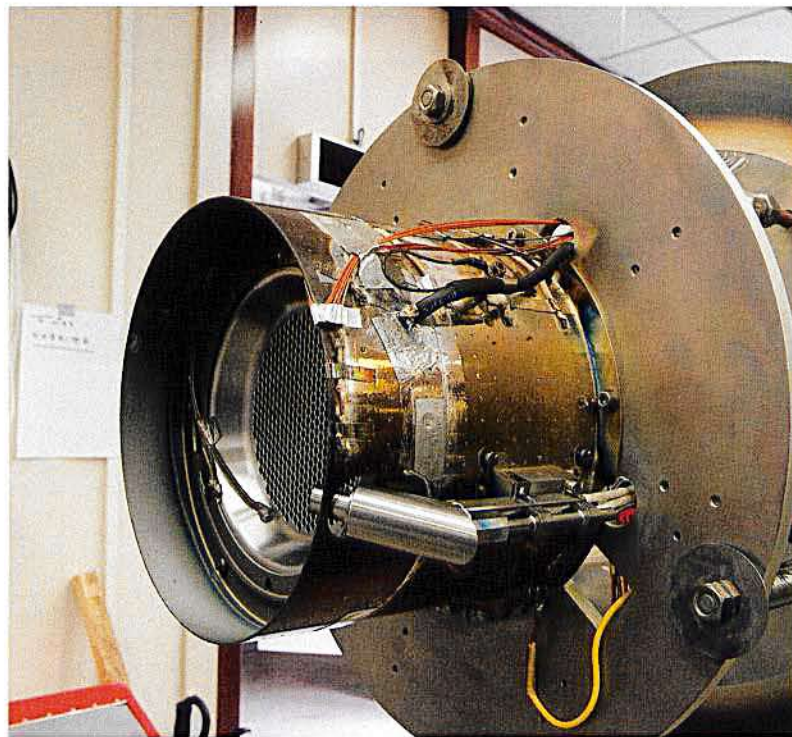


Abbildung 9: Radiofrequenz-Ionenantriebwerk „RIT-10“ mit 10 cm Ionisatordurchmesser im ESA-Lebensdauerprüfstand bei der ESTEC, Noordwijk.

Foto: Daimler-Chrysler Aerospace Dasa, Ottobrunn

benötigen die elektrischen Raketen eine „Steckdose“ im Weltraum — in der Regel Solarzellen, wenn man nicht ein kleines Kernkraftwerk mitfliegen lassen will.

Und während man in chemischen Triebwerken tonnenweise den Treibstoff verbrennen kann, um damit entsprechend hohe Schübe aufzubauen, begrenzt die Umweltenergie Sonnenstrahlung die verfügbare Antriebsleistung eines Ionenaggregats. Um beispielsweise 25 kW Leistung bereitzustellen, braucht man mehr als 100 Quadratmeter Solarzellenfläche und erzielt damit dennoch nur etwa 1 Newton Schub — was dem Gewicht von 100 Gramm auf der Erdoberfläche entspricht.

Demzufolge sind Ionenraketen nicht einmal in der Lage, sich selbst vom Erdboden in den Weltraum zu befördern. Sie können nur als Oberstufe einer konventionellen Trägerrakete bzw. auf Satelliten oder Raumsonden im schwebefreien All eingesetzt werden.

Ionenaggregate besitzen noch einen weiteren Nachteil: Sie laufen

nur im Vakuum. Für den Einsatz im luftleeren Weltraum ist dies natürlich kein wirkliches Handicap. Allerdings erfordern Bodentests große Hochvakuum-Pumpstände. So besitzt beispielsweise die Versuchsanlage des I. Physikalischen Instituts der Justus-Liebig-Universität ein Kammervolumen von 30 m³ und eine Pumpleistung von 100.000 Liter in der Sekunde.

Im Vergleich zu den chemischen Hochschub-Triebwerken stellen die Ionenaggregate ausgesprochene „Niederschubsysteme“ dar, allerdings mit hohen Strahlgeschwindigkeiten und Antriebsvermögen. Sie brennen sozusagen auf „Sparflamme“ und brauchen lange Betriebszeiten, um den ganzen Treibstoffvorrat auszustoßen — typischerweise ein Jahr.

Für die Stabilisierung von Satelliten über Zeitspannen von beispielsweise zehn Jahren ist dies natürlich kein wirklicher Nachteil, ebenso wenig wie für Raumsonden, die mindestens ein Jahr unterwegs sind. Im Gegenteil: Wegen ihres Dauerschubs

können Ionenraketen eventuelle Bahnkorrekturen ohne zusätzlichen Treibstoff ausführen.

Um einen Vergleich mit der Leichtathletik anzustellen: Chemische Raumsonden sind „Sprinter“, die in relativ kurzer Zeit ihren Treibstoff verbrennen und rasch hohe Geschwindigkeiten erreichen. Die solar-elektrischen Flugkörper dagegen bleiben zunächst zurück und kommen erst langsam in Fahrt. Dann aber überholen die „Marathonläufer“ die „Sprinter“ und ihr Vorsprung vergrößert sich immer mehr.

Wägt man die Vor- und Nachteile des Ionenantriebs ab, so sieht man, daß er die konventionelle Raketen-technologie zwar nicht ablösen, wohl aber vorteilhaft ergänzen wird.

Die Konkurrenz

In den ersten beiden Jahrzehnten der elektrischen Triebwerksentwicklung wurden mehr als ein Dutzend verschiedenartiger Konzepte vorgeschlagen und untersucht. Den Konkurrenzkampf überlebten drei Triebwerkstypen, nämlich der Kaufman-

Antrieb der NASA (Abb. 7), der auch von den Engländern und Japanern übernommen wurde, das „stationäre Plasmatriebwerk SPT“ der Russen (Abb. 8), das von den Franzosen und einer US-Firma nachgebaut wurde, und das deutsche Radiofrequenzkonzept der Typenreihe „RIT“ (Abb. 9), welches auch Eingang in die ESA-Planung gefunden hat.

In dem auf Harold Kaufman zurückgehenden Elektronenstoß-Ionenmotor wird das Treibstoffgas Xenon mit Hilfe einer Gleichstromentladung ionisiert, die zwischen einer zentral angeordneten Hohlkathode und dem Anodenzylinder brennt. Ein Magnetfeld spiralt die Entladungselektronen auf, erhöht damit die Stoßwahrscheinlichkeit und verbessert so die Triebwerkswirkungsgrade. Zwei oder drei gelochte Molybdän-Elektroden, die sogenannten „Grids“, werden auf Hochspannungen von beispielsweise 1000 Volt gelegt; sie saugen die positiven Ionen aus der Entladungskammer ab, beschleunigen sie auf etwa 40 km/s Geschwindigkeit und bündeln sie zum Antriebsstrahl. Eine Elektronenquelle am Triebwerksausgang sorgt dafür, daß der Ionenstrahl elektrisch neutralisiert wird.

Das auf A.I. Morosow zurückgehende SPT-Aggregat arbeitet gleichfalls mit einer Gleichstromentladung, um das Xenon zu ionisieren. Allerdings ist die Ionenquelle nun ringförmig ausgeführt, und ihre Wände bestehen aus Bornitrid, einem Isoliermaterial. Ein starkes, radial gerichtetes Magnetfeld zwingt die Entladungselektronen auf Kreisbahnen innerhalb der Ionisationskammer. Es entstehen sogenannte Hall-Ströme. Die durch Elektronenstoß erzeugten Ionen werden durch die Entladungsspannung — etwa 300 Volt — aus der Ionisationskammer hinaus beschleunigt. Der Strahlneutralisator dient zugleich als Entladungskathode.

Im Vergleich zum Kaufman-Antrieb ist die russische Version einfacher, kompakter und robuster. Sie benötigt weder teure Beschleunigungsgitter, noch eine Hochspannungsquelle. Zudem gestatten die Hall-Ströme relativ hohe Entladungs- und Schubdichten.

Andererseits aber ist die Treib-

stoffgeschwindigkeit systembedingt niedriger; sie beträgt kaum 20 km/s. Die Wirkungsgrade sind schlechter, und die Lebensdauer erreicht den Kaufman-Standard nicht. Der Strahl kommt zudem unter einem großen Öffnungswinkel aus dem Triebwerk, ist oft instabil und in der Regel stark verunreinigt.

Das in Gießen konzipierte Radiofrequenztriebwerk ähnelt in seinen Leistungsdaten und Wirkungsgraden der Kaufman-Version und besitzt gleichfalls Hochspannungsgitter. Allerdings wird bei den RIT-Motoren das Xenon nicht in einer Gleichstrom-, sondern in einer Hochfrequenzentladung ionisiert. Hierzu wird um das zylindrische, aus Aluminiumoxid-Keramik gefertigte Entladungsgefäß die Spule eines 1 MHz-Generators geschoben. Durch Induktion wird ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt, welches die Elektronen beschleunigt und zu Ionisierungsstößen befähigt. Die Entladung brennt nach der Zündung selbständig weiter. Der große Vorteil des Konzepts fußt darauf, daß keinerlei Elektroden der Entladung ausgesetzt sind und erodiert werden können. Daraus folgen nicht nur besonders stabile Betriebszustände, sondern auch sehr lange Lebensdauern. Zudem ist der Strahl sauberer, und der Elektronik- bzw. Regelaufwand ist geringer als beim Kaufman-Motor.

Im Verlauf einer langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit am I. Physikalischen Institut der Justus-Liebig-Universität wurden fünf verschieden große RIT-Modelle gebaut, untersucht, optimiert und getestet — von 4 cm Ionenquellendurchmesser an bis hin zu 35 cm. Das standardisierte 10 cm-Aggregat „RIT-10“ (Abb. 9) wurde bereits auf „EURECA“ (Abb. 2) weltraumqualifiziert und wird auf „ARTEMIS“ (Abb. 6) eingesetzt werden. Ein mit Mitteln des DLR-Zentrums entwickeltes schubstärkeres Aggregat „RIT-15“ wird gegenwärtig in Gießen getestet. Die zweite Entwicklungsstufe eines ESA-Projektes bezüglich eines 26 cm großen HF-Aggregats „ESA XX“ konnte kürzlich erfolgreich abgeschlossen werden, während das firmeneigene Triebwerk „RIT-22“ der Dasa in Gießen seine ersten Testläufe absolvierte. •