

Künstliche Erdsatelliten als Werkzeuge geophysikalischer Forschung.

Von Univ.-Prof. Dr. Friedrich H e c h t, Wien.

Vortrag, gehalten am 22. Jänner 1958.

(Neufassung vom Oktober 1958.)

Ein Jahr ist nunmehr seit dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten „Sputnik I“ oder „1957 α“ vergangen; dieser erste erfolgreiche Aufstieg eines winzigen Kunstmondes von menschlicher Hand war das Ereignis der Nacht vom 4. auf den 5. Oktober 1957. Diesem ersten folgten zwei weitere russische und vier amerikanische Satelliten von denen jetzt (Oktober 1958) noch ein russischer und drei amerikanische die Erde umkreisen. Die Vollendung des ersten Jahres, in dem der Mensch den Saum des Universums außerhalb der Erde berührt hat, gibt Anlaß zu einigen grundsätzlichen Betrachtungen über die Technik und die Ziele solcher künstlichen Trabanten unserer Mutter Erde.

G r u n d l a g e d e r K u n s t m o n d e :
d i e R a k e t e .

Bekanntlich beruht die Rakete auf dem Rückstoßprinzip oder, wissenschaftlich gesprochen, dem

Newtonschen „Prinzip der Aktion und Reaktion“. Dieses besagt: „Zu einer Wirkung besteht immer eine entgegengesetzt gerichtete und gleiche Gegenwirkung“. Auf eine mathematische Formel gebracht lautet die Raketengleichung in ihrer einfachsten Gestalt:

$$v = c \cdot \ln \frac{M_0}{M_e}$$

v ist dabei die Fluggeschwindigkeit der Rakete, c die Ausströmgeschwindigkeit der Gase, die aus der Düse am hinteren Raketende austreten, M_0 die Anfangsmasse (also die Struktur oder Leermasse + die Treibstoffe) und M_e die Endmasse (Anfangsmasse vermindert um die verbrannte Treibstoffmenge). Der Quotient M_0/M_e wird „Massenverhältnis“ genannt. Mit \ln wird der natürliche Logarithmus (bezogen auf die Basis $e = 2,71828\dots$) bezeichnet, während man mit \log bekanntlich den Logarithmus mit der Basis 10 benennt. Auf andere gebräuchliche Darstellungen der Raketengrundgleichung sei hier nicht eingegangen.

Aus obiger Gleichung geht hervor,, daß die Fluggeschwindigkeit einer Rakete entweder durch Vermehrung der Ausströmgeschwindigkeit gesteigert werden kann oder aber durch Vergrößerung des Massenverhältnisses, d. h. letzten Endes durch Vermehrung der Treibstoffe gegenüber der Leermasse. Ist das Massenverhältnis gleich e (siehe oben), so

ist $\ln \frac{M_0}{M_e} = 1$. Wird jedoch dieses Verhältnis quadriert, so wird sein natürlicher Logarithmus verdoppelt. Dies will sagen, daß einer Quadrierung bzw. Kubierung oder schließlich Erhebung zur n-ten Potenz eine Verdoppelung bzw. Verdreifachung bzw. letztlich n-fache Vermehrung der Fluggeschwindigkeit entspricht.

Beiden möglichen Wegen sind heute technische Grenzen der Verwirklichung gezogen. Mit den gegenwärtig verfügbaren chemischen Treibstoffen wird kaum ein Wert für $c = 2500$ m/sec überschritten. Infolgedessen wird bei den künstlichen Erdsatelliten das Prinzip der Stufenrakete benützt, wobei jeweils eine ausgebrannte (und damit für die weitere Fortbewegung wertlos, für die weitere Beschleunigung aber sogar schädlich gewordene) Stufe abgeworfen wird. Wenn beispielsweise bei einer ersten Stufe das Anfangsgewicht (also samt Treibstoffen und Oxydationsmitteln) das Neunfache der beiden übrigen Stufen zusammen (wieder samt deren Treibstofffüllungen) beträgt und das Verhältnis zwischen der zweiten und der dritten Stufe analog ist, so ist mit den drei Stufen das Verhältnis des Anfangsgewichtes des ganzen Aggregates zur letzten ausgebrannten Stufe 10 zur 3. Potenz = 1000. Das bedeutet, daß der Logarithmus des gesamten Massenverhältnisses und damit auch die Fluggeschwindigkeit der letzten Raketenstufe dreimal so groß

wird als bei der ersten Stufe (vorausgesetzt natürlich), daß die Ausströmgeschwindigkeit bei allen drei Stufen gleich groß ist). Eine vollgetankte Dreistufenrakete von 10 Tonnen Gewicht kann daher eine Nutzlast von 10 kg in ihre Bahn befördern.

Satellitenbahnen.

Ein waagrecht geworfener Stein fällt in einer sogenannten Wurfparabel zu Boden, und zwar umso weiter von dem Werfer, je größer die angewandte Kraft war. In Wirklichkeit handelt es sich aber nicht um eine echte Parabelkurve, sondern um einen Teil einer Ellipse. Ein schräg aufwärts gefeuertes Geschöß beschrieb, wenn man vom Luftwiderstand absehen könnte, eine elliptische Teilbahn, in deren Brennpunkt sich der Erdmittelpunkt als Schwerkraftanziehungszentrum befände. Allerdings stellt sich bei einem Abwärtsflug die Erdoberfläche in den Weg des Flugkörpers und bremst seine Bahn. Solche Geschosse sind in den Langstreckenraketen (englisch „intercontinental ballistic missiles“ = ICBM) verwirklicht. Würde einem derartigen Flugkörper eine immer größere Antriebsenergie erteilt, so fiel er schließlich überhaupt nicht mehr auf die Erdoberfläche zurück, sondern dauernd „um die Erde herum“. Damit ist aber der künstliche Erdsatellit verwirklicht (Abb. 1 und 2).

Erreicht die Endgeschwindigkeit der letzten Stufe nach „Brennschluß“, d. h. dem Aufhören des Rake-

Abb. 1. Theoretische Bahnen schräg aufwärts
gefeuerter Geschosse.

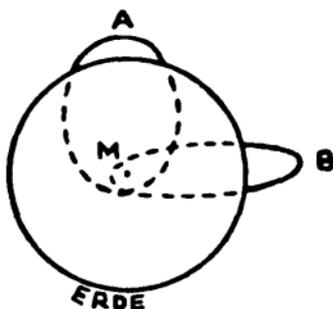
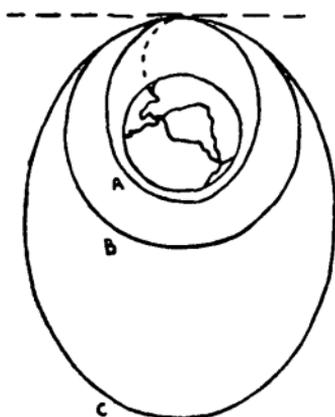
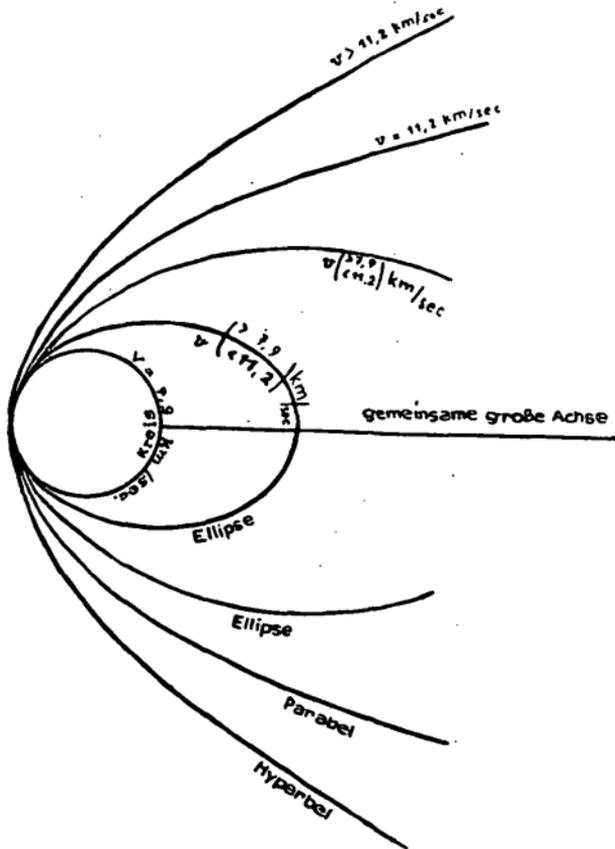


Abb. 2. Ellipsenbahnen und Kreisbahn um die Erde.



tenantriebes, einen Wert von 7,9 km/sec (wieder bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes), so rundet sich die elliptische Wurfbahn zum Kreis. Man nennt daher diese charakteristische Geschwindigkeit die „Zirkular- oder Kreisbahngeschwindigkeit“. Bei noch weiterer Überschreitung entstehen wieder elliptische Bahnen, die bei einer Erhöhung um 41%,

Abb. 3. Kreis-, Ellipsen-, Parabel- und Hyperbelbahnen.



also auf 11,172 km/sec, die Ellipse zur Parabel werden lassen¹⁾ (Abb. 3). Da die Äste einer Parabel sich erst in der Unendlichkeit wieder schließen, praktisch also überhaupt nicht mehr, so entflieht ein solcher Flugkörper dem Schwerebereich der

¹⁾ Die genannten Geschwindigkeiten gelten für einen Flugkörper im Abstand null von der Erdoberfläche.

Erde (aber nicht der Sonne!) und kehrt erst nach unendlich langer Zeit, praktisch also nie mehr, zur Erde zurück²⁾, weshalb man von der „Fluchtgeschwindigkeit“ spricht. Noch größere Steigerung der Fortbewegungsgeschwindigkeit führt zu sogenannten Hyperbelbahnen, die in die Unendlichkeit führen³⁾.

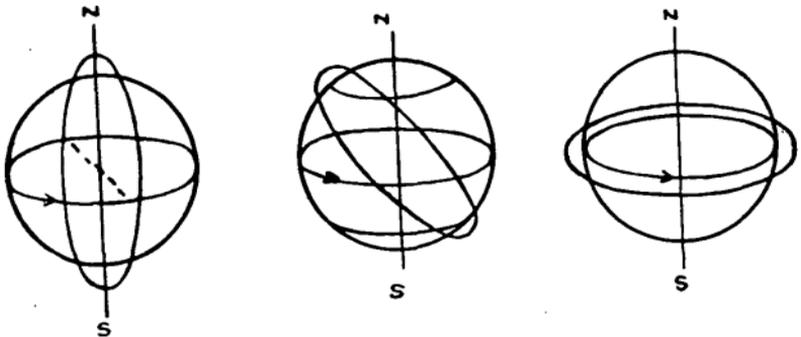
Ein in nächster Nähe der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn umlaufender Satellit würde für eine vollständige Umrundung der Erde 84 Minuten 23,1 Sekunden benötigen. Je größer der Abstand der Kreisbahn von der Erde ist, umso länger wird die Umlaufdauer (Revolutionsperiode), bis sie in der Entfernung des natürlichen Erdmondes von im Mittel 385.000 km nicht weniger als 29 Tage 7 Stunden 43 Minuten 11,5 Sekunden erreicht. Unser Mond gehorcht selbstverständlich ebenso wie die Kunstmonde den im Weltall geltenden Gesetzen der Anziehung, die von dem berühmten deutschen Astronomen Johannes Kepler erstmalig klar erkannt und in mathematische Form gebracht worden sind. Bei den bisher verwirklichten Erdsatelliten wurde niemals eine genaue Kreisbahn erreicht, wengleich die Bahnen der beiden ersten Sputniki sich der Kreis-

²⁾ Er verläßt aber nicht das Sonnensystem.

³⁾ Bezüglich genauer Einzelheiten der Bewegung und anderer Probleme der künstlichen Erdsatelliten vergleiche man den Beitrag des Verfassers in dem nächstens im Verlag Wilhelm Frick, Wien, erscheinenden Buch „An der Schwelle zum Weltall“.

gestalt erheblich annäherten, was wohl auf sehr exakt wirkende Steuerungssysteme schließen läßt. Andererseits bieten sehr exzentrische (elliptisch stark gestreckte) Satellitenbahnen (Sputnik III, amerikanische Erdsatelliten) den Vorteil stark

Abb. 4. Mögliche Bahnlagen von Erdsatelliten (der Pfeil bedeutet die Rotationsrichtung des Erdäquators).



wechselnder Erdabstände (und damit der Kontrolle verhältnismäßig ausgedehnter Raumbereiche). Je größer der Abschlußwinkel gegen den Erdäquator, umso größer sind die von dem Satelliten überflogenen Breitenzonen der Erde. Darnach sind verschiedene Bahnlagen möglich, die in Abb. 4 dargestellt sind: außer den geneigten Bahnen als Spezialfälle noch die Zirkumpolarbahn über die beiden Erdpole sowie die Äquatorbahn in der Ebene des irdischen Äquators³⁾.

Geophysikalische Forschungsziele.

Wenngleich die Kunstmonde der Erde von den meisten ihrer Schöpfer als Vorstufe einer Entwick-

lung der Weltraumfahrt gedacht sind, so verfolgen sie dennoch sehr reale wissenschaftliche Ziele, die auch von den Gegnern der Weltraumfahrt (diese sind sehr zahlreich!) zwangsläufig anerkannt werden. Anlaß zu ihrer Verwirklichung ergab das Internationale Geophysikalische Jahr (englisch abgekürzt IGY). Manche der Forschungsziele wurden schon vorher mit Höhenraketen untersucht. Raketen haben aber nur eine ausnützbare Lebensdauer von wenigen Minuten, während Satelliten, wie die Praxis bestätigt hat, viele Monate und wahrscheinlich in manchen Fällen einige Jahre die Erde umkreisen können, wengleich ihre Bahn sich infolge Reibung in den — obwohl sehr verdünnten — äußeren Zonen der Erdatmosphäre allmählich verengt und die Umlaufgeschwindigkeit beschleunigt, bis sie schließlich in der dichteren Luft verbrennen.

Die Erforschung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre ist Gegenstand ihrer Untersuchung mit Höhenraketen. Die (von unten nach oben zu verstehenden) Bereiche der Atmosphäre sind die Troposphäre, die Stratosphäre, die Ionosphäre (deren Höhe stark, etwa zwischen 60 bis 350 km, schwankt), schließlich die Exosphäre. Von diesen sind besonders die beiden letztgenannten von außergewöhnlicher theoretischer und praktischer Bedeutung. Spielt doch die Ionosphäre eine ungemein wichtige Rolle für die Fortpflanzung, Brechung und Reflexion der Radiowellen. Umgekehrt kann aus der

genauen Messung dieser Erscheinungen ein Bild der Dichte und elektrischen Ladungsverteilung in der Ionosphäre gewonnen werden. Die Elektronendichte ist auch außerhalb der Ionosphäre von größter Bedeutung für unsere Kenntnisse in Geophysik und kosmischer Physik; dies gilt auch in besonderem Maße für die Kenntnis der Herkunft der verschiedenen elektrisch geladenen Partikel, die von der Sonne dauernd zur Erde strömen und deren Magnetfeld stören, was sich beim Funkverkehr schädigend bemerkbar macht. Wahrscheinlich entstehen um die Erde auch in einigen Erdradien Abstand Ringströme. Bestimmte Erscheinungen auf der Sonnenoberfläche (die sogenannten „Fackeln“, englisch „flares“) verursachen in den ionisierten Bereichen der Erdatmosphäre intensive Störungsströme.

Eine andere Erscheinung in der Atmosphäre sind die Polarlichter (Aurorae), deren Höhen mittels Triangulierungsverfahren zwischen 60 und 1100 km bestimmt wurden. Am häufigsten sind allerdings Höhen von 90 bis 150 km und als obere Grenze rund 450 km. Sie werden nach der geltenden Theorie durch von der Sonne stammende Protonen (elektrisch positiv geladene Atomkerne des Wasserstoffs) verursacht, die ungefähr einen Tag nach ihrem Abflug von der Sonne in die Erdatmosphäre eintreten. Mit dem Spektroskop konnten in den Polarlichtern in allen Höhen Stickstoff und Sauerstoff nachge-

wiesen und die dort herrschenden Temperaturen zu rund 2000° Kelvin (vom absoluten Nullpunkt —273° an gezählte Temperaturskala) in 120 km Höhe bestimmt werden. Dies bedeutet jedoch nicht, daß ein dort befindlicher Körper verbrennen würde, weil die genannte Temperatur nur aus der Geschwindigkeit der Molekularbewegung berechnet ist, aber die Zahl der als Wärmeüberträger wirksamen Gaspartikel minimal ist. Neuere Studien deuten allerdings auf niedrigere Temperaturwerte von nur 750 bis 950° Kelvin in der Höhe von 320 km, doch fußen diese Temperaturberechnungen auf mancherlei hypothetischen Annahmen, die von künftigen Erdsatelliten auf eine bessere Grundlage gestellt werden können. Solche Annahmen betreffen das mittlere Molekulargewicht der betreffenden atmosphärischen Region, ferner den Dissoziationsgrad (Prozentsatz der Aufspaltung der Gasmoleküle in Gasatome). Für solche Messungen wird ein Massenspektograph benötigt, wie solche bereits mit Höhenraketen aufgestiegen sind, aber auch einer im Sputnik III eingebaut ist. Eine andere Ansicht über die Entstehung der Polarlichter nimmt als ihre Ursache nicht die solare Korpuskelstrahlung, sondern besonders starke Ausbrüche solarer elektromagnetischer Aktivität an.

Wie die bisherigen Messungen mit Satelliten erwiesen haben, nimmt die Dichte der Atmosphäre weniger rasch ab, als man es bisher vermutet hatte. Die Gasmoleküle können in den höchsten, luftver-

dünnten Zonen sehr lange Wegstrecken zurücklegen, bevor sie mit anderen Molekülen zusammenstoßen („mittlere freie Weglänge“). Viele Teilchen fallen infolge der Schwerkraft wieder in die dichteren Schichten hinunter, sodaß in dieser äußersten atmosphärischen Region nur sehr wenige Kollisionen von Gasteilchen untereinander stattfinden. Sie wird die Exosphäre genannt. Andererseits umkreisen vermutlich manche Teilchen einmal oder mehrmals als winzigste „Satelliten“ die Erde, weil sie Geschwindigkeiten erreichen dürften, die der Kreisbahngeschwindigkeit nahe kommen oder sie erreichen. Da sich die Kunstmonde in der Exosphäre bewegen, darf man von ihnen wertvollste Aufschlüsse über die Verhältnisse in dieser Region erwarten, die vorher eine Domäne der Spekulation war. Das Gewicht der Exosphäre wurde bisher auf nur ein Zehnmilliardstel des Gesamtgewichtes der Atmosphäre geschätzt. Die Grenze der Exosphäre kann so definiert werden, daß sie dort erreicht wird, wo die Zahl der von außen einfallenden Partikel gleich der Zahl der entkommenden Partikel ist.

Die neuen Erdsatelliten werden auch mit Instrumenten zur Messung der Variationen des erdmagnetischen Feldes ausgestattet. Der Erdkörper stellt einen unregelmäßigen, riesigen Magneten mit einem magnetischen Äquator und magnetischen Polen dar, die keineswegs mit dem geographischen Äquator und den geographischen Polen zusammenfallen.

Solche Messungen können sogar eine praktische Bedeutung haben: Beispielsweise wurden gewaltige Eisenerzlager bei Kursk in der UdSSR durch Messung der Vertikalintensität des Erdmagnetismus entdeckt. Diese Messungen wurden allerdings nicht mit Erdsatelliten ausgeführt, doch mag die Zukunft ähnliche Entdeckungen bringen⁴⁾. Überhaupt können Messungen der Variationen des erdmagnetischen Feldes mittels Satelliten voraussichtlich die Tiefenlage der Ursachen kontinentaler und regionaler magnetischer Anomalien ermitteln.

Die Erde ist nach bisherigen Messungen ein abgeplattetes Rotationsellipsoid mit einem äquatorialen Durchmesser von 6378,4 km und einem polaren Durchmesser von 6357,9 km, was einem Abplattungsverhältnis von 1/297 entspricht. In Wahrheit weicht ihre Gestalt ein wenig von der eines geometrischen Rotationsellipsoides oder Sphäroids ab. Man bezeichnet die Gestalt der Erde als Geoid und meint damit einen Körper, dessen Oberfläche durch die mittlere Seehöhe null über den Ozeanen gebildet würde. Sie ist aber keine genaue Äquipotentialfläche der Schwerkraft, die in jedem Punkt senkrecht zur Richtung der Schwerebeschleunigung läge. Unregelmäßigkeiten der Schwere gehen auch auf Dichtevariation in der Erdkruste zurück. Die

⁴⁾ Auch hinsichtlich der erdmagnetischen Messungen mit Hilfe von Satelliten sei auf den oben erwähnten Artikel des Verfassers verwiesen.

Abweichungen des Geoids vom Sphäroid überschreiten aber gewöhnlich nicht 100 m. Die Größe und Gestalt des Geoids werden durch geodätische Daten bestimmt, die durch fortgesetzte Triangulation erhalten werden. Darnach weist der Erdäquator einen Unterschied von 165 m zwischen seinem größten und kleinsten Durchmesser auf. Die Himmelsmechanik erlaubt, aus den Bewegungen des Mondes und der exakten Messung seiner Bahnänderungen die Gestalt der Erde zu berechnen. Dies könnte aber vielleicht noch besser mit Hilfe von Erdsatelliten erfolgen, wozu allerdings die bisher verwirklichten nicht ausreichen. Es wird aber in der Zukunft voraussichtlich möglich sein, die Abplattung und sonstige Gestalt der Erde und den Wert der Schwerebeschleunigung, der sogenannten Größe „g“ (in unseren Breiten rund 981 cm/sec^2), aus Satellitenbeobachtungen genauer als bisher zu bestimmen.

Satelliten mit genau bekannten Bahnen, die in astronautischen Almanachen verzeichnet sein müßten, wären für Navigationszwecke in der Nautik und Fliegerei benützlich. Die Beobachtung der Satelliten könnte rein optisch oder mit Radioortung erfolgen, falls in den Satelliten Sender eingebaut wären. Auch für die Beobachtung der Großwetterlage können aller Voraussicht nach Erdsatelliten herangezogen werden, was die Wettervorhersage auf eine gesicherte Grundlage stellen könnte. In

Satelliten montierte Fernsehkameras könnten die Verteilung von Wolken, Eis- und Schneefeldern feststellen. Auch Zyklonfamilien wären erkennbar.

Ein außerordentlich wichtiges Forschungsziel ist die Messung des kurzwelligen Spektrums der Sonnenstrahlung im Ultraviolett und Röntgengebiet. Solche Strahlung wird in besonderem Maß bei intensiven Ausbrüchen auf der Sonne ausgesandt und übt eine Wirkung auf die Ausbildung der Regionen der Ionosphäre aus. Die Ultraviolettstrahlung der Sonne verursacht auch photochemische Reaktionen in der Atmosphäre, z. B. die Entstehung der Ozonschicht. Diese bewahrt die Lebewesen vor schädlicher Ultraviolettstrahlung und hält die von der Sonne zur Erde gestrahlte Wärme in der Erdatmosphäre zurück. Ein Satellit könnte die Höhenverteilung und Konzentration des Ozons ermitteln.

Schon die bisherigen Satelliten waren in der Lage, wichtige Beiträge zur Erforschung der sogenannten kosmischen Strahlung (auch als Höhenstrahlung bezeichnet) zu erbringen. Die primäre kosmische Strahlung besteht aus etwa 86% Protonen, ferner aus rund 12% Heliumkernen (Alphateilchen), 0,4% Atomkernen der leichten Elemente Lithium, Beryllium, Bor und ungefähr 1,4% Kernen schwererer Elemente mit Ordnungszahlen über 6 im Periodensystem. Ihre Eintreffgeschwindigkeit an den obersten Grenzen der Atmosphäre ist fast Lichtgeschwindigkeit. Sie haben teilweise die größten auf

der Erde überhaupt bekannten Energien. Ihr Energiespektrum ist über 9 Zehnerpotenzen ausgedehnt. Ihre Zahl ist aber verhältnismäßig so gering, daß sie der Erde nicht mehr Energie zuführen als das gesamte Sternenlicht des Himmels. Die Primärstrahlung erreicht jedoch nicht die Erdoberfläche.

Es hat sich erwiesen, daß ein sehr wesentlicher Teil der kosmischen Strahlung von der Sonne herührt, der Rest aus der Welt der Fixsterne. Die Intensität der kosmischen Strahlung zeigt Variationen mit der geographischen Breite des Beobachtungsortes. Es ist leicht verständlich, daß Satelliten auf verschiedenen Bahnen genaue Messungen der Intensität und Energieverteilung der kosmischen Strahlung ermöglichen können. Die letzten amerikanischen und sowjetischen Satelliten haben bereits wertvolle Ergebnisse erzielt. So wurde in einer begrenzten Zone oberhalb der Erde, die in rund 1000 km Höhe beginnt, eine außerordentlich intensive Strahlung gemessen, die wahrscheinlich aus Elektronen besteht, aber in der Satellitenhülle eine kurzwellige Röntgenstrahlung hervorruft, die für ein Lebewesen, das sich längere Zeit in deren Bereich aufhielte, tödlich wirken würde. Künftige Raumfahrer werden also diese Zonen schnellstens und womöglich unter — nicht leicht verwirklichtbaren — Schutzmaßnahmen durchfliegen müssen.

Schließlich soll noch die Messung der Dichte und Partikelgröße des interplanetarischen Staubes und

der Mikrometeoriten, die den Raum bevölkern, als bereits in Angriff genommenes Forschungsziel der Erdsatelliten erwähnt werden. Es wird auch schon daran gedacht, in bestimmten Höhen über der Erdoberfläche auf Satelliten astronomische Teleskope zu montieren. Diese hätten den Vorteil, von der Lichtwellenabsorption befreit zu sein, die jenseits beider Grenzen des Wellenlängenbereiches von 4000 bis 7000 Ångström (dem für das menschliche Auge wahrnehmbaren Gebiet des Spektrums) die Lichtwellen verschluckt. Die lästige Behinderung durch Wolkenbildung wäre gleichfalls vermieden. Ebenso könnte die photographische Aufnahme der Atmosphären fremder Planeten im fernen Ultraviolett neue wichtige Erkenntnisse über deren Zusammensetzung und Reichweite bringen. Auch andere Himmelskörper könnten im ultravioletten Licht beobachtet werden, was durch die Erdatmosphäre verhindert wird.

Auf die bisher verwirklichten Kunstmonde soll hier wegen des beschränkten Raumes und wegen der mannigfachen zur Verfügung stehenden Presseberichte nicht näher eingegangen werden. Wir dürfen aber gewiß sein, daß innerhalb des zweiten Jahres der Epoche der Satellitentechnik die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sich gegenüber den bisher gewonnenen vervielfachen werden und daß wir am Anfang nicht voraussehbarer neuer Erkenntnisse stehen.