

Experimentelle Probleme physikalischer Weltraumforschung

K. RAWER

Arbeitsgruppe für physikalische Weltraumforschung, Freiburg

(Z. Naturforschg. 21 a, 1792—1797 [1966]; eingegangen am 21. März 1966)

Herrn Professor Dr. W. GENTNER zum 60. Geburtstag gewidmet

Die von der Laborphysik erheblich abweichenden Bedingungen von Weltraumexperimenten werden grundsätzlich diskutiert und am Beispiel der Messung der Plasmadichte erläutert. Die behandelten Problem-Stellungen sind: Meßgeräte, Meßgrößen, störende Einflüsse, Experimentier-Bedingungen.*

Ziel physikalischer Weltraumforschung ist es, die physikalischen Zusammenhänge in der äußeren Atmosphäre und im Weltraum zu verstehen. Dazu ist es erforderlich, alle physikalischen Größen zu bestimmen, die dort eine Rolle spielen. Als solche Größen kommen etwa in Betracht: Feldgrößen (elektrische, magnetische, Gravitations-Felder), Materialgrößen (Plasmakomponenten, ihre Dichte, Temperatur und Energieverteilung), Einflußgrößen (Korpuskeln, elektromagnetische Wellen, Schwerewellen).

Methodisch liegt das Arbeitsgebiet zwischen Laboratoriums-Physik und Geo- wie Astro-Physik. Während im Laboratorium sehr häufig ein idealer Aufbau des Experiments erreicht werden kann, bei dem die gewünschte Meßgröße unter genau vorgesehenen Bedingungen gemessen werden kann, ist das in der Geo- und Astrophysik meist nicht so. Hier gibt es störende Einflüsse und damit natürliche Veränderungen, die nicht ausgeschaltet werden können. Infolgedessen hat eine isolierte Messung häufig nur sehr geringen Aussagewert. Eine große Zahl von Messungen unter verschiedenen Bedingungen ist vielmehr erforderlich, um die verschiedenen Einflüsse zu bestimmen und repräsentative Werte zu erhalten. Das Verhältnis der Anzahl ausgeführter Messungen zur Anzahl der bestimmten Parameter ist häufig sehr ungünstig.

Die folgenden Überlegungen sollen die methodische Situation der Weltraumforschung darlegen und anhand von Beispielen erläutern.

1. Meßgeräte

1.1. Jedes Meßgerät ist ein Kompromiß zwischen einander widersprechenden Forderungen. Das gilt ganz besonders in der Weltraumforschung, wo die

technologischen Forderungen eine besonders wichtige Rolle spielen. Volumen, Gewicht und benötigte Energie sollen so klein wie möglich gehalten werden, auch der Preis. Da andererseits Präzision, Zuverlässigkeit, sichere Auswertung und Übermittlung um so besser erreicht werden können, je weniger Volumen, Gewicht, Energie und Preis beschränkt sind, muß irgendwo ein Kompromiß zwischen diesen widersprüchlichen Forderungen gefunden werden. Der Ort dieses Kompromisses hängt von den im Grunde willkürlichen Forderungen des Benutzers ab. Gelegentlich wird man weniger genaue Meßwerte in Kauf nehmen, weil eine Gewichts- oder Energie-Erhöhung nicht tragbar erscheint — in anderen Fällen wird man festlegen, daß unter einer gewissen Präzisions-Forderung das Experiment nicht mehr genug aussagt. Diese Festlegungen enthalten im allgemeinen eine erhebliche und unvermeidbare „persönliche Komponente“, damit sind sie willkürlich. Derartige Entscheidungs- und Kompromiß-Situationen sind im Umgang unter Menschen üblich. Niemand wird sich darüber wundern, daß es keine allgemein verbindliche Antwort gibt auf die Frage, was eine Theaterkarte „noch kosten darf“. Wie in diesem simplen Beispiel, hängt der Kompromiß häufig vom Reichtum, d.h. von den verfügbaren Mitteln ab. „Arme“ Experimentatoren müssen sich mit „billigeren“ Experimenten zufrieden geben; andererseits werden sie versuchen, durch mehr Gedankenarbeit den Aufwand bei der Realisierung zu vermindern.

1.2. Immerhin sind gewisse technische Entscheidungen nach so vielen Gesichtspunkten vorteilhaft, daß sie meist in gleicher Weise getroffen werden. So ist bei Raketenauftstiegen die Energie-Versorgung mit Batterien allgemein üblich. Welche Sorte benutzt wird, hängt von der gewünschten Konstanz der Spannung, Lebensdauer, Gewicht und Preis ab. In Satelliten werden derzeit als Energiequellen Photoelemente

* Das Vorhaben wurde gefördert durch WRK 50 des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung.



(Solarzellen) am häufigsten angewandt; jedoch kommen leistungsfähigere Anordnungen wie radioaktive Wärmequellen oder chemische Brennstoffzellen mehr und mehr auf. Damit werden künftig Experimente diskutabel werden, die unter den jetzigen Umständen an zu großem Energiebedarf scheitern. Bordelektronik wird fast ausschließlich mit Transistoren an Stelle der früheren Röhren ausgeführt, am besten mit Silicium-Transistoren, die erheblich weniger temperaturempfindlich sind. Die Zuverlässigkeit der Elektronik wird man bei Satelliten-Experimenten mehr im Auge behalten müssen, als bei den meist unempfindlicheren und jedenfalls billigeren Raketen-Experimenten. Für Satelliten liegt derzeit die Begrenzung der Möglichkeiten vor allem bei der Energieversorgung und bei der Telemetrie-Kapazität. Bei beiden sind erhebliche Fortschritte in naher Zukunft zu erwarten. Möglicherweise tritt dann die umgekehrte Schwierigkeit auf, die schon bei einigen der bisherigen Experimente in Satelliten sich zeigte, daß nämlich mehr Meßwerte anfallen als ausgewertet werden können. Man sollte allerdings diesen Gesichtspunkt nicht zu sehr hochspielen. Nicht die unausgeschöpften Möglichkeiten, sondern allein die ausgeschöpften und der dazu notwendige Aufwand sollen bei der Bewertung eines Experiments in Betracht gezogen werden. Im übrigen läuft die Entwicklung auf den Rechner zu, der einen beträchtlichen Teil der Auswertung entweder am Boden oder demnächst gleich an Bord ausführt. Im letzten Fall wird dann die Telemetrie wieder entlastet werden.

1.3. Sehr häufig ist es empfehlenswert, einen ganzen Satz von Meßgeräten zu entwickeln und je nach Bedarf einzusetzen. Wir wollen das am Beispiel der Bestimmung der Plasmadichte (Elektronendichte) erläutern. Dafür gibt es im wesentlichen drei Gruppen von Verfahren: lokale Messungen mit Gleichstrom-Sonden, lokale Messungen mit Hochfrequenz-Sonden und Hochfrequenz-Ausbreitungsmessungen. Ein bestimmtes Gerät erfaßt immer nur einen gewissen Meßbereich. Die bei uns entwickelte Impedanz-Sonde z.B. benutzt das Plasma als Medium mit frequenzabhängiger dielektrischer Suszeptibilität und bestimmt eine Netzwerk-Resonanzfrequenz. Deren Lage hängt im wesentlichen von der Elektronendichte, aber auch vom Erd-Magnetfeld ab. Bei Werten der Elektronendichte, für die die Plasmafrequenz mit der Gyrfrequenz vergleichbar wird, wird die Bestimmung der Elektronendichte immer ungenauer. Deshalb ist für niedere Plasmadichten ein anderes

Verfahren vorzuziehen. Wir benutzen dazu die Aussendung von zwei harmonischen Frequenzen am Boden und die Bestimmung des differentiellen DOPPLER-Effekts an Bord, also ein Ausbreitungsexperiment. Benutzt man relativ niedrige Frequenzen, so ist dies Verfahren auch für kleine Elektronendichten sehr empfindlich.

1.4. Fast alle Messungen benötigen Telemetrie der Meßergebnisse zum Boden. Dabei entsteht die Frage der Auswertung an Bord. Je weiter diese geht, um so weniger Kanal-Kapazität wird benötigt, um so mehr wird aber auch die Redundanz der Auswertung beschnitten, um so größer wird also die Möglichkeit falscher Auswertung. Der Kompromiß hängt hier weitgehend von der Vorerfahrung ab. Hätten wir die oben erwähnte Impedanzsonde gleich mit einer Extremum-Anzeige an Bord verbunden, so wären bei den ersten Aufstiegen überhaupt keine brauchbaren Resultate erhalten worden. Wir hatten nämlich die Dämpfung der Resonanz unterschätzt, also eine ziemlich geringe Empfindlichkeit (dafür großen Intensitätsmeßbereich) eingestellt. Da wir aber die ganze Frequenzkurve am Boden aufnahmen, war die Auswertung trotzdem noch möglich. Hätten wir den größeren Telemetrie-Aufwand gescheut, wäre das ganze Experiment unbrauchbar, vielleicht sogar irreführend geworden.

2. Meßgrößen

Jede Messung in Raketen und Satelliten geschieht praktisch automatisch. Deshalb muß noch genauer als bei Labor-Experimenten diskutiert werden, welche Meßgröße eigentlich erfaßt wird und wie weit deren Bestimmung verfälscht werden kann. Die Meßanordnung ist im allgemeinen ziemlich kompliziert, das Endergebnis wird am Ende eine Kette von Operationen erhalten, von denen die letzten fast immer elektronisch sind. Ein Fehler in der Kette zerstört meist das Resultat. (Siehe hierzu 3 – Störungen.)

2.1. Als Beispiel diskutieren wir die schon erwähnten Messungen der Plasmadichte. Von den erwähnten Verfahrensgruppen erfassen die beiden ersten die Sonden, das Plasma in einem gewissen Meßraum, der aber in den wenigsten Fällen scharf begrenzt ist. Bei unserer Impedanzsonde z. B. ist der vom Feld zwischen Meß-Antenne (an der Raketen spitze) und Raketenkörper erfüllte Raum der Meßraum. Das sind rund 2 m^3 Plasma in der Nähe und vor der Raketen spitze. Wenn die Sonde ein-

wandfrei funktioniert, bestimmt sie die Plasmadichte in diesem Raum; gibt es dort Abweichungen vom ungestörten Zustand, so muß eine einwandfreie Sonde diesen abweichenden Wert anzeigen. Dagegen ist bei Ausbreitungsverfahren der Meßraum eine lange Säule, die sich von der Bodenstation (Sender) zur Rakete (Empfänger) erstreckt. Nicht notwendig ist deren Achse geradlinig; wenn merkliche Brechung der benutzten Radiowellen in der Ionosphäre auftritt, kann die Achse erheblich „verbogen“ sein.

2.2. Unser Verfahren vergleicht am Empfänger die Phase von zwei Frequenzen miteinander, wobei die beiden Ausbreitungswege sich nicht notwendig decken – und es bei starker Brechung sicher nicht tun. Da die Phase bestimmt wird, ist hier die direkt gemessene Größe nicht die lokale Elektronendichte in der Nähe der Rakete, sondern der Elektronen-Inhalt einer Säule von Einheitsquerschnitt zwischen Sender und Empfänger. Erst durch die Bewegung der Rakete verändert sich die Säulenlänge und der (auf Einheits-Geschwindigkeit reduzierte) Zuwachs des Elektronen-Inhalts ist dann die lokale Elektronendichte nahe der Rakete. Die lokale Elektronendichte wird also erst durch differenzieren, also indirekt erhalten. Tatsächlich bewirken zeitliche Änderungen der Elektronendichte, irgendwo auf dem Ausbreitungsweg, auch Phasenänderungen und ebenso wirkt horizontale Inhomogenität der Elektronendichte in Fällen, wo der Radiostrahl im Laufe der Zeit seine Richtung ändert, (was auf dem absteigenden Ast, auch einer steilen Raketenbahn, meist der Fall ist). Aus den beobachteten Phasenänderungen darf also nur dann auf die lokale Elektronendichte nahe der Rakete geschlossen werden, wenn zeitliche Änderungen und horizontale Gradienten ausgeschlossen werden können.

2.3. Interessant ist noch die Frage nach dem wirksamen Querschnitt der als Meßraum bezeichneten Säule. Er reicht soweit, als Veränderungen an seitlich abliegenden Orten die Phase am Empfangsort noch merklich beeinflussen. Deshalb ist der wirksame Querschnitt längs des Radiostrahls nicht etwa konstant, sondern in einer mittleren Höhe am größten, entsprechend der Größe der FRESNEL-Zonen. Dort sind Durchmesser von einigen km durchaus möglich.

2.4. Wir sprachen oben von Plasmadichte, dann präziser von Elektronendichte. Tatsächlich messen die Hochfrequenzverfahren immer die Elektronendichte, da wegen der großen Trägheit der Ionen

deren Einfluß bei hohen Frequenzen vernachlässigt werden kann. Ganz anders kann das bei Gleichstrom-Sonden sein, wenn nämlich nur nach dem Vorzeichen der Ladungen und nicht nach e/m unterschieden wird. Hier würde also ein Unterschied entstehen, wenn negative Ionen in größerer Anzahl vorhanden wären.

3. Störende Einflüsse

Störungen betreffen entweder das Meßgerät und seine Funktion oder aber die Meßgröße. Die Nebenbedingungen, die bei einem Raumflug-Experiment in Kauf genommen werden müssen, sind ganz anders als bei üblichen Laborexperimenten, wo Störungen weitgehend vermeidbar sind. Nach ihrer Ursache unterscheiden wir vier Gruppen von störenden Einflüssen.

3.1. Beim Abschuß, also während der Antriebsperiode, tritt eine starke Beschleunigung in der Längsrichtung der Rakete auf. Sie ist für die meisten Meßgeräte harmlos im Vergleich zur Wirkung der gleichzeitig auftretenden Schallwellen, die das ganze Fahrzeug durchlaufen. Da der Abbrand ein breites Spektrum von Schallwellen erzeugt, besteht in einem breiten Tonfrequenzbereich die Gefahr der Resonanz einzelner Bauteile. Bei den Feststoff-Raketen sind die lineare Beschleunigung wie die Schwingungen im allgemeinen kräftiger als bei Flüssigkeits-Raketen. Erhebliche Unterschiede bestehen zwischen Triebwerken verschiedener Typen; bei langsameren entstehen merkliche Schwingungen bis 2 kHz, bei schnelleren bis ca. 4 kHz. Erhebliche Resonanz-Überhöhungen pflegen aufzutreten, deshalb ist bisher eine brauchbare Vorausberechnung der wirklich auftretenden Beschleunigungen nicht möglich. Zweckmäßig baut man die Meßgröße so, daß sie größere Schwingungsbeschleunigungen aushalten, als den Daten des Fahrzeugs selbst entspricht. Dadurch sorgt man vor für Resonanzen in der Struktur. Allerdings gibt es bei der Schwingungserprobung Fälle so großer Resonanz-Überhöhung, daß Änderungen an der Struktur notwendig werden. Meist sind das Versteifungen, oder aber dämpfende Einlagen. Durch Versteifung verschiebt man die Eigenschwingungen nach höheren Frequenzen, durch dämpfende Einlagen (Gummi, Schaumgummi, Hartpapier, Holz) verringert man die Amplitude. In elektrischen Geräten ist die Gefahr der Schwingung von Bauteilen an ihren Anschlußdrähten die größte Gefahr. Als Gegenmaßnahme kann man das Bauteil ankleben

(z. B. mit Araldit), oder die ganze Schaltung mit einem Kleber oder einem Schaumstoff vergießen. So ideal die letzte Maßnahme im Hinblick auf Schwingungen ist, so ungeschickt erweist sie sich, sobald nachträglich ein Fehler gesucht oder repariert werden muß.

Gegen Ende der Antriebsperiode tritt meist auch eine merkliche Temperatur-Erhöhung der Außenhaut auf. Sie ist umso größer, je größer die maximale Geschwindigkeit ist und in je niedrigerer Höhe sie erreicht wird. An der Spitze schneller Raketen können Temperaturen auftreten, die für niedrig schmelzende Metalle gefährlich werden, ebenso an herausragenden Teilen, (die ohnehin am besten vermieden werden). In der ungestörten Strömung längs des Profils sinkt die erreichte Übertemperatur dann auf wenige 100° ab. In Nähe des Triebwerks treten durch Strahlung der Flamme erhebliche Wärmebelastungen auf. Meßgeräte in diesem Bereich müssen Übertemperaturen von einigen 100°C aushalten, während die Wärmebelastung durch die Strömungs-Erwärmung praktisch nur die Oberfläche betrifft; für im Innern liegende Geräte ist sie meist nicht kritisch.

3.2. Durch das Fahrzeug selbst entstehen oft sehr beträchtliche Störungen, auch nach der Antriebsperiode.

3.2.1. Die meisten Raketen haben einen Drall, der Zentrifugal-Beschleunigungen bewirkt, die mit dem Radius ansteigen; weit von der Rotations-Achse liegende Geräte unterliegen Beschleunigungen, die in schnellen Raketen nicht selten die Größenordnung 10 g erreichen.

3.2.2. Aus dem Triebwerk dampfen auch nach Brennschluß noch beträchtliche Mengen, im Vergleich zur Luftdichte in größerer Höhe, von Brennstoffen ab. Dieses Ausgasen ist (nach PFISTER und ULWICK) bei Flüssigkeits-Triebwerken größer als bei Feststoff-Triebwerken, am geringsten aber, wenn bei Flüssigkeits-Triebwerken die Zuleitungen zur Brennkammer bei Brennschluß verschlossen werden. Durch Ausgasen werden die aeronomischen Bedingungen in der Umgebung der Rakete oft erheblich verändert. So entstehen z. B. durch Anlagerung an Brennstoff-Moleküle negative Ionen und die Elektronendichte wird erheblich verringert. Eine ausgasende Rakete „bohrt“ sozusagen „ein Loch“ in die Ionosphäre. Unsere Impedanzproben an der Spitze von Véronique-Raketen geben beim Aufstieg zuverlässige Werte der Elektronendichte, bis zu dem Niveau, wo die Geschwindigkeit unter die Schallgeschwindigkeit absinkt. Solange die Rakete mit Überschall-Geschwindigkeit fliegt, können die Gase von der hinten liegenden Brennkammer nicht zur Spitze diffundieren. Beim Abstieg dagegen liegt die Brennkammer vorn, so daß dann die Gase den Meßraum leicht errei-

chen. Wir beobachten dann wechselnde Werte der Elektronendichte, die allgemein unter den beim Aufstieg gemessenen liegen.

3.2.3. Eine andere Störung trat bei einem Skylark-Aufstieg der ESRO auf. Hier wurde die Spitze abgesprengt, die Meßantenne lag danach vor einer stumpfen Vorderseite, an der bei Überschall-Bewegung ein Verdichtungs-Stoß auftreten muß. Auch die Plasmadichte sollte im Stoß vergrößert sein; das ergibt sich unmittelbar für die Ionen, die Elektronen werden von diesen aber durch elektrostatische Kräfte mitgezogen. Tatsächlich wurden bei diesem Aufstieg größere Werte gefunden als mit Ionosonden-Messungen (vom Boden aus). Die Überhöhung der angezeigten Plasmadichte nahm mit abnehmender Fluggeschwindigkeit (also nach oben) ab.

3.2.4. Besonders schwerwiegende Umgebungsstörungen verursacht die Aufladung, die jede Rakete und jeder Satellit im Plasma erleidet. Ein metallischer Körper in einem Plasma lädt sich wegen der größeren Beweglichkeit der Elektronen allgemein negativ auf. Der Effekt wird bei üblichen Raketen- und Satelliten-Geschwindigkeiten dadurch erhöht, daß diese über der Schallgeschwindigkeit der Ionen, aber unter der der Elektronen liegt. Deshalb treffen Elektronen allseitig auf, Ionen aber nur auf der Vorderseite. Auf der Rückseite bildet sich also ein Schweif verringelter Ionen-dichte, dessen Länge ungefähr aus Durchmesser und MACHschem Winkel folgt. Andrerseits erzeugt die negative Aufladung (Größenordnung 1V) eine Raumladungs-Schicht um den Körper herum, die im allgemeinen einige cm dick ist und verringerte Elektronendichte hat. Der positive Strom, der durch Photo-Effekt entsteht, reicht im allgemeinen nicht aus, um die negative Aufladung zu kompensieren. Die „Ionen-Schicht“ ist eine erhebliche Schwierigkeit für Experimente mit elektrischen Feldern, mit langsamen Korpuskeilen und auch für Elektronen-Dichte Messungen mit kleinem, hautnahem Meßraum. Bei dem erwähnten Aufstieg der ESRO flog eine hautnahe LANGMUIR-Sonde mit; die davon angezeigte Elektronen-Dichte war um einen Faktor 10 zu niedrig.

3.3. Service-Anlagen an Bord stören oft ganz erheblich. Ausricht- oder Korrektur-Antriebe verwenden oft Gasstrahlen, die die aeronomischen Bedingungen stark verändern können. Magnetische Stabilisierung verändert das natürliche Magnetfeld im Bereich des Fahrzeugs. Hochspannungs-Generatoren stören durch elektronische Zerhacker oft in einem breiten Frequenzbereich, (deshalb sind Generatoren mit definierter Frequenz vorzuziehen). Die Telemetrie schließlich enthält meist eine Reihe von Oszillatoren, die auf Hochfrequenz-Empfänger an Bord einwirken. Nichtlineare Störungen wie Kreuz-Modulation werden dabei häufig festgestellt. Die Telemetrie-Sendung erzeugt ein ziemlich starkes Hochfrequenz-Feld, vor allem auch an Meßantennen

und Meßfühlern. Wenn nicht besondere Filter unmittelbar an der Antennen-Einführung vorgesehen werden, genügt die aufgenommene Hochfrequenz-Spannung meist, um Kreuzmodulation im ersten Halbleiter-Bauteil zu erzeugen. Telemetrie-Verfahren, die Impulse benutzen, sind hier besonders gefährlich.

3.4. Die enge Packung der Bordgeräte erzeugt in vielen Fällen gegenseitige Beeinflussung. Magnetische oder elektronische Felder, hochfrequente Koppelung, Abstrahlung hochfrequenter Schwingungen durch Oszillator-Stufen, breitbandige Störungen durch steile Impulse sind hier zu nennen. Bei Experimenten mit harter Strahlung entsteht oft Sekundärstrahlung in den umgebenden Gegenständen, die ganz erheblich werden kann.

3.5. In Anbetracht der vielen Störungs-Möglichkeiten müssen diese zu jedem Experiment sorgfältig diskutiert werden. Aber grundsätzliche Überlegungen allein genügen nicht. Eine Kohabitations-Erprobung muß zu einem genügend frühen Zeitpunkt im Vorbereitungs-Programm vorgesehen werden. Häufig stellen sich dabei Schwierigkeiten ein, an die vorher nicht gedacht wurde.

4. Experimentier-Bedingungen

4.1. Während im Labor-Versuch der interessierende Vorgang so rein als möglich herausgeschält wird, muß der Geophysiker meist „nehmen was kommt“. Gelegentlich möchte man in der Weltraum-Forschung aber auf ein bestimmtes „besonderes Ereignis“ abzielen.

4.1.1. Wenn irdische Beobachtungen, dessen Einsatz festzustellen erlauben, können z. B. Raketen-Schüsse passend kommandiert werden. Das ist natürlich um so leichter, je häufiger das betreffende Ereignis eintritt und je länger es dauert. Bei ionosphärischen Messungen ist die „sporadische“ E-Schicht, „Es“ genannt, nicht allzu schwer zu „treffen“; selbst mit Flüssigkeitsraketen, die nur für etwa zwei Tage startklar bleiben, gelingt das während der günstigen Jahreszeit (Sommer). Seltener Ereignisse können nur mit Feststoff-Raketen erfaßt werden, die sehr lange startklar bleiben. Bei kurzer Dauer der Ereignisse ist trotzdem die Chance nicht sehr groß. So wurden kräftige solare Emptionen bisher nur selten mit Raketen erfaßt. Polarlichter treten in der Polarlichtzone zu den Äquinoktien so häufig auf, daß sie gut erfaßbar sind. Die Boden-Beobachtungen geschehen dabei am einfachsten mit dem „Riometer“, also durch Messungen der Dämpfung kosmischer Radiowellen. Für sehr seltene Ereignisse, wie die solaren Protonen-Ausbrüche, muß man sehr lange Wartezeiten ansetzen und deshalb ein ganz anderes Organisations-Schema anwenden als sonst gewohnt.

4.1.2. Bei Satelliten ist die Fragestellung anders. Weil der Satellit lange Zeit im Raum bleibt, ist er zur Überwachung besonders geeignet, natürlich nur in Höhenbereichen über 200 km. Andererseits kann eine Satelliten-Bahn kurzfristig nicht wesentlich verändert werden. Deshalb ist die Chance einer Beobachtung kurzdauernder Ereignisse von vornherein begrenzt. Solare Ereignisse können zwar in nahezu schattenfreien Bahnen mit ziemlicher Sicherheit erfaßt werden, nicht aber ihre Wirkungen in der Erd-Atmosphäre. Für Ereignisse, die die Polarlichtzonen betreffen, liegt auch bei polnäher Bahn die mittlere Zeitabweichung bei 30 Minuten. Für geographische Ereignisse sind die lokalisierten Bahn-Bedingungen besonders ungünstig. Die Möglichkeit, bei jedem Umlauf einen bestimmten geographischen Bereich mit einem erdnahen Satelliten zu überqueren, besteht nur in äquatorialen oder polaren Breiten. In mittleren Breiten ist die Wartezeit rund 12 Stunden. Deshalb sind Satelliten praktisch nicht in der Lage, irdische Messungen lokaler Größen einfach zu ersetzen.

4.2. Die verschiedenen geophysikalischen Einflüsse lassen sich im allgemeinen nur dann experimentell sauber sortieren, wenn umfangreiches Beobachtungs-Material vorliegt.

4.2.1. Dieses wird bei Raketen-Aufstiegen in den seltensten Fällen erreichbar sein. Weil die meisten Beobachtungsdaten, zumindest die aeronomischen, außer den weltweiten und lokalen Störungen noch tägliche, jahreszeitliche und 11-jährige Variationen zeigen, kann man die Aufstiege allein genommen nur als Stichproben ansehen. Es ist daher besonders wichtig, sie in ein Gerüst anderer Beobachtungen und Erkenntnisse einzubauen. Eingebaut ist der Informations-Gehalt einer Stichprobe bei weitem größer. Deshalb ist nicht nur die Koordinierung und der Vergleich verschiedener Aufstiege wichtig, sondern noch mehr die Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf regelmäßig gewonnene geophysikalische und solare Daten, die vom Boden oder auch von Satelliten aus gemessen werden können.

4.2.2. Bei Satelliten-Messungen dagegen kann man durch Wahl der Bahn bestimmte Parameter voll „durchspielen“, andere mehr oder minder lange konstant halten. Aber auch hier sind die Möglichkeiten begrenzt, vor allem wegen der Relationen, die zwischen den verschiedenen Bahn-Parametern bestehen. Jede Satelliten-Bahn ist ein Kompromiß. Bei der Auswertung sind zeitlich und örtlich unregelmäßige Einflüsse, insbesondere geophysikalische bzw. kosmische Störungen oft irreduzierbar. Redundanz ist auch hier erwünscht. Sortieren aus einem umfangreichen Meß-Material ist sicherer als zu eng gezielte Beobachtungen. Deshalb müssen viele Daten zusammengebracht werden, um ein tragbares Bild zu erreichen. Beim derzeitigen Stand der Technik sind durch diese Forderung die Möglichkeiten einer vollen statistischen Auswertung an Bord noch sehr beschränkt.

4.3. Als Zusammenfassung möchten wir folgenden schematischen Vergleich bringen: Laboratoriums-

Experimente entsprechen einer logischen Kette. Die einzelnen Glieder (Schlüsse) sind hintereinander geschaltet, jedes einzelne kann als voll gesichert angesehen werden. Das aus den einzelnen Experimenten abgeleitete Vorstellungsbild ist auch bei einmaliger Ausführung dann gesichert, wenn jedes Experiment sorgfältig ausgeführt wurde und ein eindeutiges Ergebnis hatte. In der Astro- und Geo-

physik, und dazu gehört der größte Teil der Welt-
raum-Forschung, wird dagegen das Vorstellungsbild
nicht von einer logischen Kette, sondern von einem
logischen Gewebe gehalten. Jeder einzelne Faden
allein würde nicht tragen, es müssen viele Experi-
mente und Beobachtungen zusammengenommen und
miteinander verwoben werden, um ein tragfähiges
Band aufzubauen.

Radio-Meteorbeobachtungen mit einfachsten Mitteln

W. DIEMINGER und H. KOCHAN

Max-Planck-Institut für Aeronomie, Lindau/Harz

(Z. Naturforsch. 21 a, 1797—1800 [1966]; eingegangen am 21. März 1966)

Professor Dr. W. GENTNER zum 60. Geburtstag gewidmet

Feldstärkeregistrierungen zweier 130 km entfernter Sender auf 10 und 2 m zeigen kurzzeitige Spitzen, die von Reflexionen der Radiowellen an den ionisierten Schweifen von Meteoren herrühren. Aus ihrer Anzahl kann auf die Häufigkeit der Meteoriten geschlossen werden. Besonders stark war der Leonidenschauer am 16. 10. 1965, der optisch offenbar kaum beobachtet wurde.

Die nächtliche visuelle Beobachtung der Lichtspuren, die von Meteoren beim Eindringen in die hohe Atmosphäre hinterlassen werden, ist eine mühsame Aufgabe. In unseren Breiten wird sie besonders dadurch erschwert, daß der Himmel häufig bedeckt ist. Eine brauchbare Statistik der Meteorhäufigkeit ist auf diese Weise nicht zu gewinnen. Daran ändern auch fotografische Beobachtungen nichts. Sie bedeuten allerdings insofern einen Fortschritt, als die Kamera im Gegensatz zum menschlichen Beobachter nicht ermüdet und weit unempfindlicher gegen klimatische Einflüsse ist.

Demgegenüber haben Radio-Meteorbeobachtungen den Vorteil, daß sie völlig unabhängig von der Bedeckung des Himmels und von der Tageszeit durchgeführt werden können. Sie beruhen auf der Tatsache, daß Meteoriten bei ihrem Durchgang durch die Atmosphäre im Höhenbereich von etwa 80—140 km eine ionisierte Spur hinterlassen, die ähnlich wie die Bahn in einer Nebelkammer solange fest im Raum steht, bis sie durch Diffusion, Rekombination und Windverwehung aufgelöst wird. Diese Spur kann mit Methoden der Radartechnik geortet und in ihren wichtigsten Parametern bestimmt wer-

den^{1—4}. Hierzu sind mehr oder weniger aufwendige Geräte erforderlich, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Hier soll vielmehr über Beobachtungen berichtet werden, die sich sozusagen als Nebenprodukt einer anderen Versuchsreihe ergeben und die sich durch einen sehr bescheidenen Geräteaufwand auszeichnen. Im Prinzip sind nur eine Antenne mit geringer Richtwirkung, ein Empfänger und ein Registriergerät mit ausreichendem Vorschub und kurzer Einstellzeit erforderlich.

Geräte

Seit mehreren Jahren betreibt das Max-Planck-Institut für Aeronomie eine Anlage zur automatischen Registrierung von Radiowellen im m-Wellenbereich, die an Inhomogenitäten in der Ionosphäre zurückgestreut werden. Sie besteht aus Sende- und Empfangsanlagen, die mehr als 100 km voneinander entfernt aufgestellt sind. Der Aufstellungsort der Sender ist bei der Sendestelle Teutoburger Wald des WDR auf dem Bielstein, 130 km west-nord-westlich von der Empfangsstation. Die Sender strahlen unmoduliert auf den Frequenzen 29,0 und

* Max-Planck-Institut für Aeronomie, Lindau/Harz.

¹ A. C. B. LOVELL, Meteor Astronomy, Clarendon Press, Oxford 1954.

² T. R. KAISER, Meteors, Pergamon Press, London 1955.

³ L. A. MANNING and V. R. ESHLEMAN, Meteors in the Ionosphere. Proc. Inst. Radio Engrs. 47, 186 [1959].

⁴ W. DIEMINGER, Radioastronomie III. Die Radioortung von Meteoriten. Arch. Elektr. Übertr. 7, 555 [1953].