

Das Plasmaexperiment auf HELIOS* (E 1)

R. SCHWENN, H. ROSENBAUER, H. MIGGENRIEDER,

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für Extraterrestrische Physik, Garching

Unter der Bezeichnung „Plasmaexperiment“ sind vier unabhängige Instrumente zusammengefaßt, deren gemeinsame Aufgabe die Untersuchung des interplanetaren Plasmas, des sogenannten Sonnenwindes ist. Primär werden die Geschwindigkeitsverteilungsfunktionen der verschiedenen Teilchensorten gemessen. Daraus können dann alle wichtigen hydrodynamischen Parameter des Sonnenwindplasmas abgeleitet werden. Drei Instrumente messen die positive Komponente des Sonnenwindes (Protonen und schwerere Ionen mit Energie- zu Ladungs-Werten zwischen 0,155 und 15,32 kV). Zwei davon erlauben auch die Bestimmung der Teilchenrichtung in bezug auf beide Einfallswinkel. Das vierte Instrument analysiert Elektronen im Energiebereich von 0,5 bis 1660 eV mit eindimensionaler Richtungsauflösung. Der bisherige Verlauf der Mission zeigt, daß alle Instrumente, die zum Teil völlig neuartig sind, die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen. Der Einfluß von zwei bisher aufgetretenen Störquellen konnte gering gehalten werden.

The "Plasma Experiment" aboard of the solar probe HELIOS consists of four independent instruments which are designed to investigate the interplanetary plasma, the so-called solar wind. Primarily the velocity distribution functions of the different kinds of particles are measured. All important hydrodynamic parameters of the solar wind plasma can then be derived. Three instruments analyze the positive component of the solar wind (protons and heavier ions with energy-per-charge-values from 0.155 to 15.32 kV). Two of them allow for an angular resolution in both directions of incidence. One instrument measures electrons in the energy range from 0.5 to 1660 eV with a one dimensional angle resolution. Since the launch all the instruments, which are partially novel developments, perform very well. Two sources of interference have caused data losses of minor importance.

1. DAS FORSCHUNGSOBJEKT SONNENWIND UND DIE WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG DES EXPERIMENTS

Seit L. Biermann 1957 aus Kometenbeobachtungen geschlossen hatte, daß von der Sonne dauernd ionisiertes Gas in den interplanetaren Raum abströmen müsse, sind über dieses Phänomen viele Theorien entwickelt worden, und seit den Flügen der ersten interplanetaren Raumsonden ist es auch direkt experimentell nachgewiesen. Es erhielt die Bezeichnung „Sonnenwind“, und das Interesse an seiner Erforschung hat seither nicht nachgelassen. Das hat mehrere Gründe: Zum einen ist uns hier ein astrophysikalisches Plasma, das in ähnlicher Weise wohl von einem Großteil aller Sterne emittiert wird, direkt zugänglich; zum anderen beeinflusst er das physikalische Geschehen in der Magnetosphäre der Erde und in der Umgebung anderer Planeten und liefert uns auch Auskünfte über Vorgänge auf der Sonne. Darüber hinaus können durch das Studium des Sonnenwindes plasmaphysikalische Erkenntnisse gewonnen werden, die im Labor nur schwer oder gar nicht zu erhalten sind.

In Erdbahnnähe sind die Parameter des Sonnenwindes inzwischen recht gut bekannt. Man weiß, daß er sich im Mittel zu etwa 95 % aus Protonen, zu 4 % aus α -Teilchen und aus geringen Anteilen schwererer Ionen sowie aus einer die Ionenladungen gerade kompensierenden Menge von Elektronen zusammensetzt. Die Teilchendichte liegt in der Größenordnung 10 cm^{-3} . Dieses Plasma strömt mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 400 km s^{-1} etwa radial von der Sonne weg nach außen. Die Bewegungsrichtung der einzelnen Protonen streut gegenüber dieser Strömungsrichtung noch geringfügig aufgrund der „Temperatur“ der Protonenkomponente von etwa 10^5 K . Dagegen überwiegt bei den Elektronen die mittlere thermische Ener-

gie (ca. 15 eV) gegenüber der Translationsenergie ($< 1 \text{ eV}$), so daß ihre Geschwindigkeitsverteilung von einer Raumsonde aus nahezu isotrop erscheint. Die hier angegebenen Zahlenwerte unterliegen starken Schwankungen, die wiederum für sich genommen von Interesse sind, weil sie entweder auf Strukturen auf der Sonne oder auf Vorgänge, z. B. Wellenausbreitung, im Plasma zwischen Sonne und Erde hinweisen.

Trotz der scheinbar bereits recht guten Erforschung des Sonnenwindes sind noch wesentliche Fragen für das Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Vorgänge offen. Das liegt zu einem großen Teil daran, daß praktisch alle bisherigen Messungen im Sonnensystem außerhalb der Bahn von Venus gemacht wurden, daß also über die Entwicklung des Phänomens zwischen dem Entstehungsort und ca. 0,7 A.E. nichts bekannt ist. Die verschiedenen Theorien unterscheiden sich aber vor allem im Verlauf der wichtigen Plasmaparameter in diesem Bereich. Hier können also gerade Messungen von HELIOS aus Aufschluß über die Richtigkeit der verschiedenen Modellvorstellungen bringen. Wegen der großen Annäherung von HELIOS an die Sonne sollte es auch möglich sein, Beobachtungen im Sonnenwind viel genauer, als dies bisher möglich war, mit Erscheinungen auf der Sonnenoberfläche zu korrelieren und so wichtige Details zu klären, die in den Theorien über die Expansion des Sonnenwindes bisher nicht erfaßt wurden. Schließlich sind die am Ort der Sonde gemessenen Plasmaparameter auch eine wichtige Basisinformation für andere HELIOS-Experimente, denn die elektrischen und magnetischen Felder (4 Experimente befassen sich mit ihrer Messung) hängen direkt vom Sonnenwind ab, und die höherenergetischen Teilchen (3 Experimente) werden ebenfalls von ihm beeinflusst.

Das Plasmaexperiment ist jedoch nicht so ausgelegt, daß es seinen Wert ausschließlich durch die besondere Bahn von HELIOS erhält; vielmehr wurde versucht, durch die Entwicklung neuartiger Instrumente auch Messungen zu ermöglichen, die bisher selbst in Erdbahnnähe noch nicht gemacht worden sind. Hier sind besonders die Analyse von Plasmalektronen bis zu niedrigsten Energien und die vollständige Trennung der Verteilungsfunktionen der Protonen und der α -Teilchen zu nennen.

* Dieses Experiment wurde am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für extraterrestrische Physik, 8046 Garching bei München, von den Herren H. Rosenbauer, H. Grünwaldt, B. Meyer, H. Miggenrieder, H. Pellkofer (derzeit bei Fa. Synelec, München) und R. Schwenn entworfen und durchgeführt. J. Wolfe vom Ames Research Center der NASA ist als Coinvestigator beteiligt.

2. ÜBERSICHT

Unter der Bezeichnung „Plasmaexperiment“ sind vier unabhängige Instrumente zusammengefaßt, deren gemeinsame Aufgabe die Untersuchung des Sonnenwindplasmas ist. Drei der Instrumente (I1a, I1b und I3) messen die positive Komponente, eines (I2) die Elektronen des Sonnenwindes.

Primär werden die Geschwindigkeitsverteilungsfunktionen der verschiedenen Teilchensorten gemessen. Die geringe Dichte des interplanetaren Plasmas ermöglicht ein im Prinzip einfaches Verfahren: Die Teilchen werden entsprechend ihren Geschwindigkeiten und Einfallsrichtungen sortiert und einzeln gezählt.

Alle wichtigen hydrodynamischen Parameter des Sonnenwindplasmas können daraus abgeleitet werden: Strömungsgeschwindigkeit, Dichten und Temperaturen der verschiedenen Ionen sowie der Elektronen, Anisotropien der Temperaturen und die Zusammensetzung der positiven Komponente.

Alle E1-Instrumente arbeiten nach demselben Grundprinzip: Die geladenen Teilchen durchlaufen elektrostatische oder -dynamische Ablensysteme; aber nur Teilchen, die aus bestimmten Richtungen einfallen und deren Verhältnis von Energie zu Ladung (E/q) in einem geeigneten begrenzten Bereich liegt, können passieren und werden gezählt.

Als Beispiel sei ein Analysator mit kugelförmigen Ablensplatten (mittlerer Radius R , Abstand d), an denen die Spannung U_p liegt, genannt. Als Bedingung für die Mitte des Durchlaßbereichs gilt:

$$\frac{E}{q} = U_p \cdot \frac{R}{2d}$$

Durch Veränderung der Plattenspannung kann der Durchlässigkeitsbereich verschoben und somit schrittweise ein E/q -Spektrum aufgenommen werden. Solche kugelförmigen Analysatoren werden in I1a, I1b und I2 verwendet. Die Plattenspannung wird hier in 32 Schritten von Umdrehung zu Umdrehung der Sonde hochgeschaltet.

eignete „Azimutkanäle“ aufgeteilt.

Die E1-Instrumente sind in der Nähe des Äquators von HELIOS montiert und blicken mit ihren Eingangstrichtern durch Aussparungen in den Hitzeschilden radial nach außen. Aufgrund der Orientierung der HELIOS-Spinachse liegt die Mitte der Gesichtsfelder stets in der Ebene der Ekliptik. Zur azimutalen Richtungsauflösung (Winkel in der Ebene der Ekliptik, siehe BILD 1) wird die Rotation von HELIOS direkt zu Hilfe genommen; durch spinsynchrone Sektorpulse wird die Meßzeit in jeder Umdrehung in geeignete „Azimutkanäle“ aufgeteilt, die den erwarteten Teilcheneinfallsrichtungen entsprechen.

Bei den Ioneninstrumenten I1a und I3 erfolgt auch eine Auflösung bezüglich des zweiten Einfallswinkels, der Elevation (Winkel senkrecht zur Ekliptik); das ermöglicht eine

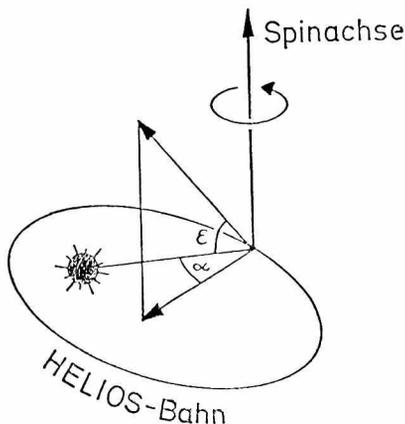


BILD 1: Definition der Winkel Azimut (α) und Elevation (ϵ) der Teilcheneinfallsrichtungen.

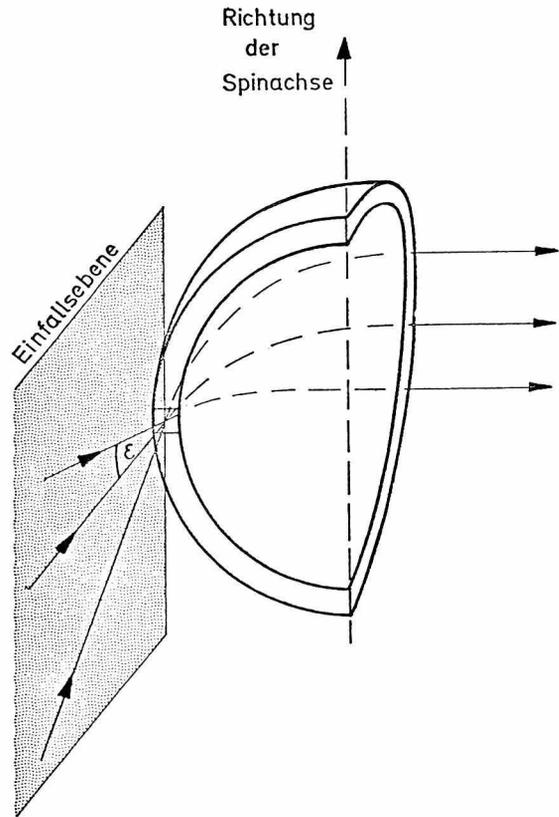


BILD 2: Schema eines elektrostatischen Viertelkugelanalytors. Teilchen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln ϵ treten an verschiedenen Stellen des Analysators aus und werden dann mit einzelnen Detektoren nachgewiesen.

dreidimensionale Messung der Geschwindigkeitsverteilungsfunktion. Wie in BILD 2 schematisch gezeigt, treten die unter verschiedenen Elevationswinkeln ϵ durch die Eintrittsöffnung einfallenden Teilchen nach dem Durchlaufen eines viertelkugelförmigen Analysators an verschiedenen Stellen aus und können durch separate Detektoren registriert werden. Aus diesem Schema läßt sich auch ableiten, daß bei einem halbkugelförmigen Analysator alle Teilchen aus der angedeuteten Einfallsebene auf einen Punkt gegenüber der Eintrittsöffnung fokussiert werden. Ein Detektor an dieser Stelle liefert also ein über alle Elevationswinkel integriertes Meßergebnis. Dieses Prinzip benutzen I1b und das Elektroneninstrument I2.

Zum Teilchennachweis dient in I1b ein hochempfindliches Elektrometer, das direkt den einfallenden Ionenstrom mißt. In den übrigen Instrumenten werden die Teilchen mit Hilfe von offenen „Channeltrons“ (kontinuierliche Elektronenvervielfacher) einzeln gezählt.

Die wichtigsten Daten der einzelnen Instrumente sind in TAB. I zusammengestellt.

3. DIE INSTRUMENTE FÜR POSITIVE IONEN

Die Hauptaufgabe des Plasmaexperimentes ist die Messung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsverteilungsfunktion der Protonen im Sonnenwind. Da es an Bord von HELIOS keine Redundanz für diese Messungen gibt, wurden die Instrumente I1a und I3 in bezug auf die Protonenmessungen als weitgehend gleichwertig entworfen, im Sinn einer „kalten“ Redundanz: Nur eines der beiden Instrumente ist jeweils in Betrieb und füllt mit seinen Meßdaten den gesamten für dreidimensionale Protonenmessungen vorgesehenen Teil des E1-Datenrahmens.

Die Instrumente I1a und I1b sind in einer gemeinsamen Box untergebracht. Ihre kugelförmigen Analysatoren sind

TAB. I: HAUPTDATEN DER E 1-INSTRUMENTE

Instrument 1 a für positive Ionen

				Kanäle
– Energie pro Ladung	0,155	bis	15,32 kV	32×2
– Azimut				
(bezogen auf Sonne)	–54,5°	bis	32,7°	16×2
– Elevation	–20°	bis	+20°	9
Analysator:	Viertelkugel mit R = 60 mm, d = 1,2 mm			
Detektoren:	9 Channeltrons.			

Instrument 1 b für positive Ionen

				Kanäle
– Energie pro Ladung	0,145	bis	14,32 kV	32×2
– Azimut	–56,25°	bis	+118°	1
– Elevation	–40°	bis	+40°	1
Analysator:	Halbkugel mit R = 54 mm, d = 4,5 mm			
Detektor:	Elektrometer mit Quantisierungseinheit 1,6×10 ⁻¹⁶ As.			

Instrument 2 für Elektronen

				Kanäle
– Energie pro Ladung	0,5	bis	15,5 V (A)	16
	10,7	bis	1660 V (B)	16
– Azimut	360°			8×2
– Elevation	–9°	bis	+9°	1
Analysator:	Halbkugel mit R = 40 mm, d = 5 mm			
	Ebene Ablenkplatten mit d = 33,6 mm			
Detektor:	1 Channeltron.			

Instrument 3 für positive Ionen

				Kanäle
– Geschwindigkeit	199	bis	767 km/s	16
– Azimut	–53,2°	bis	30,8°	16×2
– Elevation	–20°	bis	+20°	9
– M/q-Werte				
(bezogen auf H ⁺)	1	bis	5,33	15
Analysator:	Sinusähnliche Platten mit d = 2 mm,			
	l = 135 mm			
	Frequenzen von 1,058 bis 4,088 MHz			
Detektoren:	9 Channeltrons.			

fast konzentrisch angeordnet. Die 32 Energiekanäle haben je 17 % Abstand voneinander und sind für beide Instrumente fast genau gleich. Bei jedem zweiten Meßzyklus werden die Energiekanäle um einen halben Kanalabstand verschoben, ebenso die Azimutkanäle. Bei ruhigem Sonnenwind können dann je zwei Spektren zusammengesetzt werden, was in zwei Dimensionen die Auflösung wesentlich verbessert.

Die relativ große Öffnung und der weite Plattenabstand von I1b zusammen mit dem integrierenden Effekt der Halbkugel ermöglichen es, den Fluß der Ionen des Sonnenwindes direkt als Ionenstrom zu messen. Hier liefern mehrfach geladene Ionen einen entsprechend höheren Beitrag als in I1a, wo jedes Teilchen unabhängig von seiner Ladung einfach gezählt wird. Die Kombination beider Messungen liefert also Aufschluß über den Ladungszustand schwerer Ionen im Sonnenwind. Zugleich hat I1b aufgrund seiner Einfachheit eine gewisse Redundanzfunktion.

Auch das neuartige Instrument I3 soll über die Zusammensetzung der positiven Komponente des Sonnenwindes Aufschluß geben. Es enthält als Kernstück einen „elektrodynamischen Analysator“. Seine Ablenkplatten haben eine annähernd sinusförmige Krümmung, so daß eine angelegte sinusförmige Wechselspannung nur Teilchen mit einer entsprechenden Geschwindigkeit durchkommen läßt. Sie ist bestimmt durch die Frequenz der angelegten Wechselspannung und die Geometrie des Analysators. Zum anderen sorgt auch hier der Betrag der Plattenspannung wie beim elektrostatischen Analysator für die Krümmung der

Teilchenbahnen und damit für die Ausscheidung aller Teilchen mit falschen E/q-Werten. Die beiden unabhängigen Kriterien Geschwindigkeit und Energie pro Ladung führen also zu einer Selektion der Teilchen nach ihrem Masse-pro-Ladungs-Verhältnis (M/q). Insgesamt 15 feste M/q-Werte können für je 16 Geschwindigkeitswerte eingestellt werden. Der höchste Wert von 767 km/sec entspricht bei Protonen einer Energie von 3,08 keV, im Vergleich zu 15,31 keV bei I1a. In seinen Azimut- und Elevationskanälen aber gleicht dieses Instrument genau dem Instrument I1a.

4. DAS ELEKTRONENINSTRUMENT

Den Elektronen des Sonnenwindplasmas kommt bei allen theoretischen Modellen eine zunehmende Bedeutung zu. Aber die Messung solcher Elektronen im Energiebereich von wenigen Elektronenvolt ist prinzipiell schwierig und deshalb bis heute nicht einwandfrei gelungen: Durch die Sonneneinstrahlung entstehen auf der Sondenoberfläche und im Instrument Fotoelektronen, deren Flußdichte bei niedrigen Energien um mehrere Größenordnungen höher liegt als die der Plasmaelektronen.

Man muß also die Elektronen nach ihrer Herkunft unterscheiden. Das ist möglich; denn Fotoelektronen, die senkrecht in den Detektor einfallen, haben – bei einigen vereinfachenden Annahmen – stets eine niedrigere Energie, als es dem elektrischen Potential Φ der gesamten Sonde entspricht, wenn Φ positiv ist; Fotoelektronen mit höherer Energie als $e\Phi$ können ja zur Sonde und damit zum Detektor nicht zurückkehren. Dagegen haben solare Elektronen, die den Detektor erreichen, immer eine höhere Energie als $e\Phi$, weil sie um diesen Betrag nachbeschleunigt worden sind. Da nun die Spektren von Fotoelektronen und Plasmaelektronen im allgemeinen unterschiedlich sein werden, wird man eine Unstetigkeit im gemessenen Energiespektrum der Elektronen an der Stelle des Sondenpotentials erwarten. Dabei muß man aber verhindern, daß Fotoelektronen, die erst innerhalb des Instruments erzeugt werden und deshalb auch höhere Energien als $e\Phi$ haben können, diesen Sprung verwischen.

Dies kann durch eine solche Geometrie erreicht werden, die allen im Sensorinnenraum erzeugten Fotoelektronen grundsätzlich das Erreichen des Detektors unmöglich macht. Außerdem ist vorausgesetzt, daß das Sondenpotential positiv ist und daß nicht im Gesichtsfeld des Sensors Inhomogenitäten des elektrischen Feldes die einfallenden Elektronen ablenken. Leider ist ein kompletter Überzug von HELIOS mit einer leitfähigen Schicht zur Erzielung eines einheitlichen positiven Potentials aus verschiedenen Gründen nicht zu erreichen gewesen. Nur der mittlere Teil von HELIOS ist mit zwei breiten leitfähigen Ringen bedeckt, die elektrisch mit der Sondenstruktur verbunden sind. Sie sorgen für genügend große Fotoelektronenemission und kompensieren dadurch den starken Fluß von Plasmaelektronen, die von oben und unten in die abgeschalteten, ebenfalls leitfähigen und „geerdeten“ Flächen von HELIOS einfallen. Dadurch kann das Potential von HELIOS die meiste Zeit über positiv gehalten werden.

Störeinflüsse infolge elektrostatischer Aufladungen der nicht leitenden Oberflächen durch Plasma- und Fotoelektronen bleiben jedoch bestehen und müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden.

BILD 3 zeigt eine Funktionszeichnung des Elektroneninstrumentes I2 auf HELIOS. Es enthält einen halbkugelförmigen elektrostatischen Analysator mit einem vorgeschalteten ebenen Plattenanalysator. Dieser lenkt die einfallenden Elektronen aus dem Bereich der direkten Sonnenlichteinstrahlung heraus in den Energieanalysator. Die Dimensionen sind so gewählt, daß Fotoelektronen, die z. B. an den Schneiden des Eingangstrichters oder auch an den Rückwänden des Sensors entstehen, nicht bis zum Channeltron vordringen können, weil sie nicht im Gesichtsfeld des eigentlichen Instruments, des Halbkugelanalysators liegen. Das Energiespektrum wird in zwei Teil-

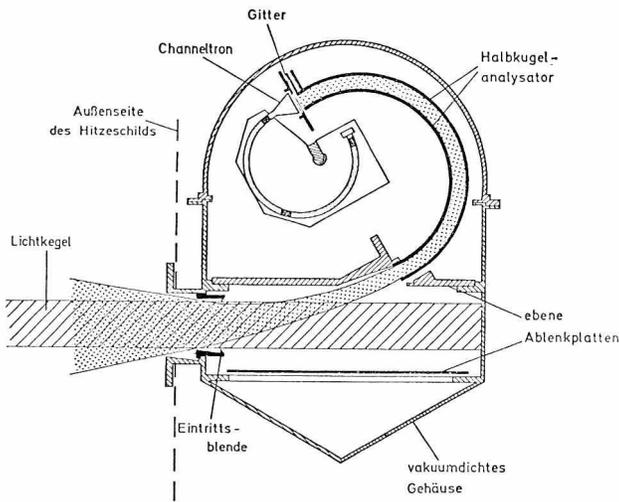


BILD 3: Funktionszeichnung des Elektroneninstrumentes I 2.
Die Elektronen werden durch die ebenen Ablenklplatten aus dem Lichtkegel heraus in den Halbkugelanalysator abgelenkt und nach dem Durchgang durch eine Gitterblende (zur Unterdrückung von Sekundärelektronen) von einem Channeltron registriert.

len von je 16 Schritten durchfahren: Im Teil A für niederenergetische Elektronen von 0,5 bis 15,5 eV und im Teil B von 10,7 bis 1660 eV. Der volle Drehwinkel von 360° ist hier in acht gleiche Bereiche unterteilt, und über die Elevation wird von -9° bis +9° integriert.

5. DATENVERARBEITUNG AN BORD UND MESSPROGRAMME

Das Hauptinstrument I 1a produziert in jeder HELIOS-Umdrehung, also pro Sekunde in 9 Elevations- und 16 Azimutkanälen zusammen 144 Meßwerte in Form von 16-Bit-Zählerständen. Das allein übersteigt schon die größtmögliche Übertragungsrate von HELIOS. Es muß also noch an Bord eine Vorauswertung und Reduzierung der Daten stattfinden. Zunächst werden sämtliche Meßdaten in 8-Bit-Worte umgewandelt, allerdings auf Kosten der Genauigkeit. Bei der „quasilogarithmischen Kompression“ wird die Zahl der im ursprünglichen 16-Bit-Wort vor dem ersten „L“ stehenden Nullen als „Quasiexponent“ (E) mit 4 Bit angegeben. Die „Mantisse“ (M) erhält ebenfalls vier Bit. Die Dekodierung erfolgt nach der Formel

$$\text{Zählrate} = \begin{cases} (M+16) \cdot 2^{11-E} & \text{für } E \leq 11 \\ M & \text{für } E = 12 \\ \text{fehlerhaft} & \text{für } E > 12. \end{cases}$$

Weiterhin wurden zur Datenreduktion zwei unterschiedliche Meßprogramme vorgesehen, die noch eine gewisse Anpassung an die stark variierenden Bitraten der Sonde erlauben. Der interessanteste Teil des Ionenspektrums – Protonen und α -Teilchen – erfüllt meistens nur einen kleinen Ausschnitt des gesamten Meßbereichs, verlagert sich aber durch die bekannten Fluktuationen des Sonnenwindes ständig. Dem angepaßt ist das „Normal-Data-Mode“-Meßprogramm (NDM) für mittlere und niedrige Bitraten. Von einer experimentinternen Logik wird hier zunächst das Maximum der Protonenintensität gesucht, bzw. die Adresse des Meßkanals in Energie (EN), Azimut (AZ) und Elevation (EL), bei dem die höchste Zählrate aufgetreten ist. Im folgenden Meßzyklus wird dann nur noch eine begrenzte Anzahl von Meßkanälen um dieses Maximum herum registriert, nämlich $9 \times 5 \times 5$ (EN \times AZ \times EL), also 225 Werte. Die neun Energiekanäle sind so gelegt, daß auch die Helium-Ionen – etwa beim zweifachen E/q-Wert der Protonen – noch erfaßt wer-

den. Währenddessen wird im gesamten Meßbereich schon ein neues Maximum für den nächsten Zyklus bestimmt. Zusätzlich liefert der „Integrationszähler“ für I 1a und I 3 in jedem Energiekanal eine Zählrate, die durch Summierung aller Azimut- und Elevationskanäle – auch derer, die aufgrund des gewählten Maximums gerade nicht übertragen werden – entsteht. Dadurch wird die Abschätzung der bei der dreidimensionalen Messung gelegentlich abgeschnittenen Randbereiche ermöglicht, sowie auch ein direkter Vergleich mit dem ebenfalls integrierenden, aber die Gesamtladung messenden Instrument I 1b. Auch dessen 32 Meßergebnisse pro Zyklus werden stets übertragen. Wenn I 3 anstelle von I 1a angeschaltet ist, gilt im NDM ein ähnliches Auswahlverfahren, mit einigen Unterschieden: Bei den ersten 16 Umdrehungen eines Zyklus wird der volle Geschwindigkeitsbereich wieder nach einem Maximum der Protonenverteilung (also für $M/q = 1$) durchsucht. Dieses dient dann wie bei I 1a als Zentrum für die 225 Meßwerte aus den ersten 16 Umdrehungen des nächsten Zyklus. Jeweils während der Umdrehungen 17–32 arbeitet nur noch der Integrationszähler. Mit einem fest eingestellten „Geschwindigkeitskanal“, bei dem die Protonen zuvor die höchste Intensität hatten, werden alle M/q-Werte der Reihe nach eingestellt. Dieses Meßprogramm basiert auf der Beobachtung, daß die mittlere Geschwindigkeit der verschiedenen Ionen stets ziemlich genau gleich der der Protonen ist. Die Integration über die Winkel ist sinnvoll aufgrund der äußerst niedrigen Flußdichte der schwereren Ionen.

Von I 2 werden alle 16 Energiekanäle entweder von Teil A oder Teil B in 8 Azimutkanälen übertragen, zusammen also 128 Werte pro Zyklus. Die Auswahl von Teil A oder B erfolgt durch Kommando.

Im Fall von hohen Bitraten kann auf ein Kommando hin auf das Meßprogramm „High-Data-Mode“ (HDM) umgeschaltet werden. Hier entfällt die Bereichsauswahl durch Maximumbestimmung. Von I 1a und I 3 wird für alle Energiekanäle ein festes Raster von 7×7 (AZ \times EL) Kanälen übertragen. Bei I 3 werden im zweiten Teil des Zyklus zwar wieder der Geschwindigkeitskanal festgehalten und die Massenkanäle – diesmal winkelaufgelöst – durchgefahren, aber der Geschwindigkeitskanal wird unabhängig vom Protonenmaximum nach jedem Zyklus weiterschaltet. Nach 16 Zyklen liegen somit für alle 15 M/q-Werte je ein dreidimensionales Spektrum sowie zusätzlich 16 Protonenspektren vor.

Von I 2 werden im HDM stets beide Programmteile vollständig übertragen, ebenso von I 1b und vom I 1a/I 3-Integrationszähler.

Eine Zusammenstellung der auf die verschiedenen Instrumente entfallenden Datenanteile ist in Tabelle 2 gegeben. Hier wurde auch noch die vom Telemetrieformat (FM) abhängige Blocklänge eines „Experiment-Data-Frame“ (EDF) berücksichtigt. Die als „Initial-Data“ bezeichneten ersten 15 Werte jeden EDFs beschreiben den genauen Einschaltzustand von E 1 und enthalten die Maximumadresse sowie einige Codeworte. Die Meßdaten füllen nicht in allen Moden den verfügbaren Datenanteil voll aus. Dann werden die als „Anhang“ bezeichneten Leerstellen mit Nullen besetzt.

TAB. II: AUFSCHLÜSSELUNG DER VON JEDEM INSTRUMENT ÜBERTRAGENEN MESSWERTE IN EINEM E 1-EXPERIMENT-DATA-FRAME

	Normal-Data-Mode		High-Data-Mode	
	FM 1/5	FM 2/3	FM 1/5	FM 2/3
„Initial Data“	15	15	15	15
I 1 b	32	32	8	8
I 1 a Integr.	32	32	8	8
I 2 (EN \times AZ)	16 \times 8	16 \times 8	8 \times 8	8 \times 8
I 1 a/I 3 (EN \times AZ \times EL)	9 \times 5 \times 5	9 \times 5 \times 5	8 \times 7 \times 7	8 \times 7 \times 6
Anhang	72	0	17	1
Blocklänge	504	432	504	432

6. ZUR TECHNIK DES EXPERIMENTS

Jedes Instrument besteht aus einem Sensor- und einem Elektronikteil. Der Sensorteil umfaßt das Eintrittssystem, die Analysatorsysteme, die Teilchendetektoren sowie die Hochspannungskaskaden zur Erzeugung der Platten- und Channeltronspannungen. Zum Schutz der empfindlichen Channeltronoberflächen vor Kontamination durch organische Dämpfe wurde in den Sensorräumen nur Bauteile aus metallischen oder keramischen Werkstoffen verwendet. BILD 4 zeigt einen Blick in den Sensorinnenraum von I2. Die Sensorgehäuse sind UHV-dicht. Bei Bodentests und Eichungen werden die Sensoren durch ihre Eintrittstrichter mit ölfreien UHV-Pumpen evakuiert. Ansonsten sind sie durch fest verschraubte Metalldeckel verschlossen. Jeder dieser Deckel trägt einen kleinen Spiegelwürfel, der zur Justierung (genauer als $0,1^\circ$) der Instrumente in der Sonde dient. Vor dem Start werden die Deckel abgenommen.

Die Elektronikteile der Instrumente enthalten Konverter für die nötigen Versorgungsspannungen, die Regelungen für die Hochspannungen, die Verstärker für die Channeltronpulse und einen Teil der Steuer- und Kontrollelektronik.

Alle E 1-Instrumente werden von einer gemeinsamen Elektronikbox aus versorgt. Sie enthält alle Nahtstellen zwischen den Instrumenten und dem Sondensystem:

- (1) Der Hauptkonverter verteilt die elektrische Leistung und sorgt für galvanische Trennung der Stromkreise vom Sondensystem.
- (2) Das Kommandosystem sorgt für die Ausführung der insgesamt 19 Kommandos, mit denen Meßprogramme,

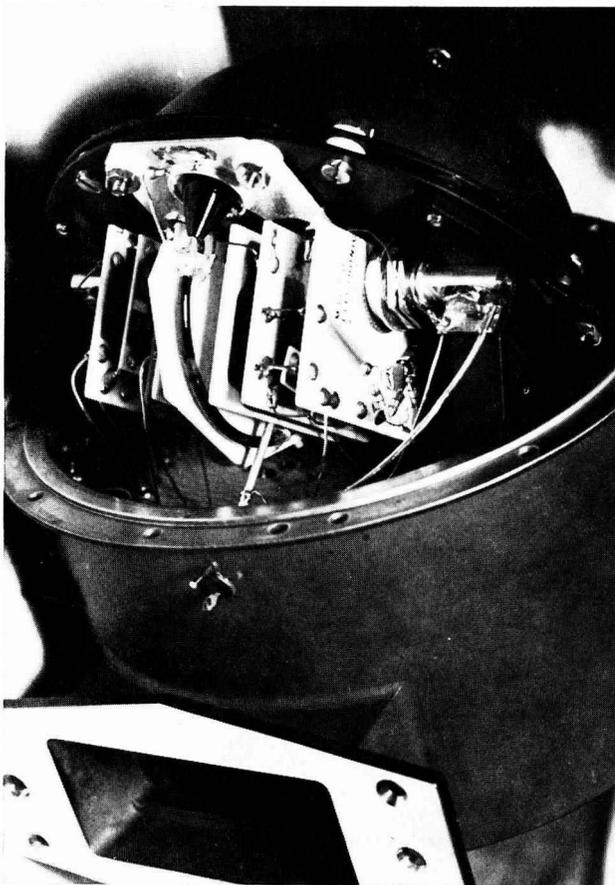


BILD 4: Ein Blick in den geöffneten Sensorteil des Elektroneninstrumentes (vgl. BILD 3). Man erkennt u. a. die Teilcheneintrittsöffnung (links unten) die halbkugelförmigen Analysatorschalen (rechts oben), das auf einer Keramikplatte verlötete Channeltron und die daneben aufgereihten Hochspannungskaskaden. Der Durchmesser des zylinderförmigen Gehäuses beträgt nur 11,2 cm.

Hochspannungen und Instrumente umgeschaltet werden können; es gibt dem Sondensystem auch Rückmeldungen über Empfang und Ausführung der Kommandos.

- (3) Das Programmsystem steuert mit Hilfe der von der Sonde angebotenen Taktpulse die Umschaltungen der Plattenspannungen und die Lage und Länge der Azimutkanäle.
- (4) Das Datensystem bereitet die Meßdaten auf, speichert sie und übergibt sie an die HELIOS-Telemetrie. Dazu gehören
 - die Zähler für die vorverstärkten Detektorpulse aus den Instrumenten,
 - der Kodierer für die Zählraten,
 - die Logik für die Bestimmung des Maximumkanals und die entsprechende Auswahl der Meßkanäle,
 - zwei Magnetkernspeicher mit einer Kapazität von je 4096 Bit.

Die Meßdaten eines EDF werden spinsynchron in einen der Speicher eingelesen, während der andere die zuvor gespeicherten Daten zeitsynchron an die Telemetrie abgibt. Nach Beendigung des langsameren dieser Prozesse erfolgt eine Umschaltung der Speicher, und ein neuer Meßzyklus beginnt. Wenn diese Speicherauslesezeit mehr als doppelt bzw. viermal so kurz ist wie die Einlesezeit, wird ein EDF zweimal bzw. viermal ausgelesen. Das ist nur bei hohen Bitraten und Betrieb von E 1 im NDM möglich. Im umgekehrten Fall, also bei niedrigen Bitraten, wird die Umschaltung so lange verschoben, bis die laufende Auslesung beendet ist. Der Zeitabstand zweier Spektren kann zwischen 40,5 s und 43 min 12 s betragen.

Das Datensystem ist in seinen wichtigsten Teilen redundant ausgelegt. Im Notfall kann per Kommando auf den intakten Teil umgeschaltet werden.

- (5) Das Ingenieurdatensystem sammelt die wichtigsten Daten über den technischen Zustand der Instrumente (Eingangsströme, Hochspannungen, Kommandozustand, Temperaturen). Die Sonde überträgt diese Daten im Rahmen des Ingenieurformates (FM 4). Sie können im Kontrollzentrum am Bildschirm in Echtzeit überwacht werden.
- (6) Mit einem Kommando kann ein automatischer Testzyklus in Gang gesetzt werden, der von der Elektronikbox gesteuert wird. Anstelle der Daten zweier Meßzyklen erscheinen dann Testdaten zur Kontrolle von Plattenspannungen, Channeltronverstärkungen, Nullzählraten, und der Digitalelektronik.

TAB. III gibt einige technische Daten der E 1-Instrumente an.

TAB. III: TECHNISCHE DATEN DER E 1-INSTRUMENTE

	I 1 a/ I 1 b	I 2	I 3	Elektronik	Total
Gewicht (kg)	2.808	1.631	3.948	4.501	12.888
Elektrische Leistung (W)	I 1 a an 2.17 I 3 an 0.78	0.56 0.56	– 5.6	6.60 7.92	9.33 14.86
Temperaturbereich ($^\circ\text{C}$)	–20	–20	–20	–20	
	+40	+45	+40	+50	

7. ZUR ENTWICKLUNG DES EXPERIMENTS

Seit den ersten Sonnenwindmessungen von den LUNA- und MARINER-Sonden aus (ab 1960) waren die Meßverfahren ständig verfeinert worden. Entscheidende Verbesserungen des Auflösungsvermögens brachten die erstmals im 1965 bei den VELA- und IMP-Satelliten sowie den PIONEER-Sonden eingesetzten Halb- und Viertelkugelanalysatoren. Im Experiment S-210 des ESRO-Satelliten HEOS-2, das am

MPE in Garching entwickelt wurde, kamen dann 1972 zum ersten Mal bei Sonnenwindmessungen neun Channeltrons als Detektoren hinter einem Viertelkugelanalysator zum Einsatz, und es gelangen die ersten dreidimensionalen Messungen mit ausreichender Auflösung und Empfindlichkeit. Dieses Instrument glich schon in allen wesentlichen Eigenschaften den HELIOS-E-1-Instrumenten I 1a/I 1b.

Das Plasmaexperiment für HELIOS wurde seit 1968 im Institut konzipiert. Im Laufe der Entwicklung wurde die Funktionsweise verschiedener elektrostatischer und -dynamischer Analysatorsysteme untersucht sowie auch das Langzeitverhalten von Channeltrons und andere technologische Fragen.

Besonderer Wert wurde der genauen Eichung der Instrumente beigemessen. Alle elektrostatischen oder -dynamischen Analysatoren haben eine Instrumentencharakteristik, bei der die Durchlässigkeit in relativ komplizierter Weise von der Energie und dem Einfallswinkel der Teilchen gleichzeitig abhängt. Dabei spielen auch Ungenauigkeiten der Analysatorschalenfertigung eine große Rolle. Deshalb wurde eine eigene Eichanlage errichtet. Hier werden die Instrumente mit ihren Eingangstrichtern schwenkbar an ein Vakuumssystem angeflanscht und mit Teilchen aus einer speziell entwickelten Ionen- bzw. Elektronenquelle beschossen. Die in Abhängigkeit von Teilchenenergie und Einfallswinkel gemessenen Zählraten liefern die für die Bestimmung der Sonnenwindparameter nötigen Referenzdaten. Ein Beispiel für eine solche Eichmessung ist in BILD 5 gezeigt.

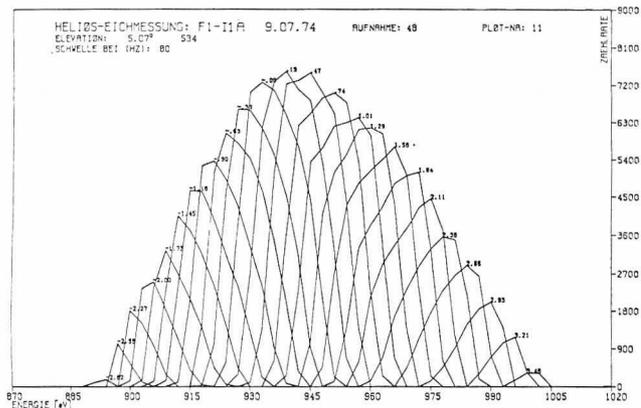


BILD 5: Beispiel für eine Eichmessung des Instruments I 1a. Aufgetragen ist die von einem Ionenstrahl erzeugte Zählrate in Abhängigkeit von der Teilchenenergie mit dem azimutalen Einfallswinkel als Parameter.

Mit dem Bau der flugtauglichen Geräte wurde eine Industriefirma beauftragt. Aus der Vielzahl von technischen Problemen, die dabei zu lösen waren, seien nur einige erwähnt:

- Fertigung sphärischer Analysatorschalen aus Aluminium mit Toleranzen unter 0,02 mm.
- Flußmittelfreie Verlotung von Channeltrons auf Keramikplatten. Schutz vor der Vibrationsbelastung ohne Anwendung organischer Werkstoffe.
- Fertigung vakuumdichter Sensorgehäuse in Leichtbauweise.
- Erzeugung von geregelter Wechselspannung bei 16 verschiedenen Frequenzen bis 4 MHz mit hohem Wirkungsgrad und kleinem Klirrfaktor.
- Lichtabschwächung im UV-Bereich um den Faktor 10^{10} .
- Kontrolle des Wärmehaushalts von 12, wegen der besonders großen Eintrittsöffnung.

8. DAS FLUGVERHALTEN DES EXPERIMENTS

Zwei Tage nach dem Start wurden die Instrumente durch Kommandos eingeschaltet und vollständig ausgetestet.

Alle Instrumente arbeiteten völlig störungsfrei und lieferten in allen Meßprogrammen einwandfreie Daten. BILD 6 zeigt als Beispiel die Daten des Integrationszählers von I 1a in Form von Zählraten als Funktion des E/q -Wertes. Man erkennt gut die Protonenverteilung und – in diesem Fall deutlich davon abgesetzt – die Verteilung der α -Teilchen, deren Maximum etwa beim zweifachen E/q -Wert liegt.

Gleichzeitig mit der Einschaltung des Motors für die entdrallte Antenne traten in den Daten von I 1b starke Schwankungen des Nullpunktes auf. Offenbar wurde das hochempfindliche Elektrometer von I 1b durch den von den Antennenlagern ausgehenden Körperschall gestört. Bei den Bodentests war dieser Effekt nicht aufgetreten; vermutlich waren dort die Lager aufgrund der Schwerkraft anders belastet. Die Störung, die sich praktisch als Verringerung der Empfindlichkeit auswirkt, ging nach einigen Tagen stark, aber nicht völlig zurück.

Als dann die Hochgewinnantenne angeschaltet wurde – zunächst mit mittlerer, dann mit hoher Sendeleistung – traten in den meisten Meßkanälen des Elektroneninstrumentes ungewöhnlich hohe Zählraten auf, wodurch diese Messungen unbrauchbar wurden. Gleichzeitig beobachteten auch die Wellenexperimente (E 5) Erhöhungen ihrer Störpegel um einige Größenordnungen.

Die Ursache für diese Störung war zunächst völlig unklar. Schließlich wurden spezielle Versuche mit der Antenne des Prototyps unternommen. Sie zeigten, daß in den schmalen Schlitzen des Hochgewinnantennenmastes ein resonanter Sekundärelektroneneffekt entstehen kann („Multipacting“), der Elektronen sowie elektromagnetische Störungen erzeugt. Nur die kollegiale Haltung der anderen Experimentatoren, des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (Efelsberg-Spiegel), des Deep Space Network der NASA und auch der Techniker im Kontrollzentrum Oberpfaffenhofen machte es möglich, daß durch Umschaltung auf die Mittelgewinnantenne von HELIOS wenigstens zeitweise noch brauchbare Elektronenmessungen möglich waren.

Der Periheldurchgang brachte für E 1 keine Probleme. Schon die provisorische Auswertung der Echtzeitdaten läßt erkennen, daß die in dieser wichtigsten Phase der HELIOS-Mission gewonnenen Daten zu interessanten Ergebnissen führen werden.

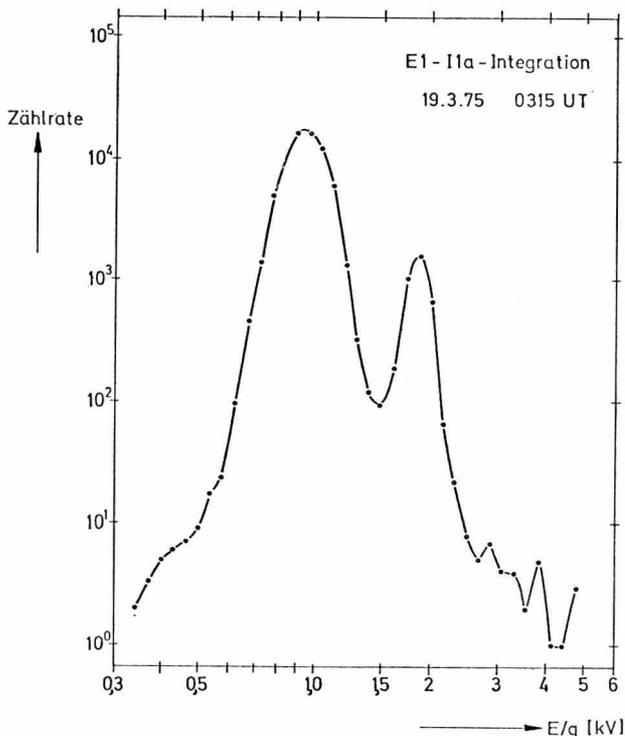


BILD 6: Ein vom Instrument I 1a gemessenes Spektrum positiver Ionen (über alle Einfallswinkel integriert).

Schlußbemerkungen

Das Plasmaexperiment wurde im Rahmen des Projektes HELIOS im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie durch die Gesellschaft für Weltraumforschung in der DFVLR gefördert. Hauptkontraktor für Entwicklung und Fertigung des Experiments war die Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH. Entscheidende Beiträge leisteten auch die Unterauftragnehmer Firma Micro-

electronic A. Lewicki (Channeltronmontagen, Dickschichttechnik), die Firma Carl Zeiss AG (Analytorschalen) und die Firma Dornier System GmbH (Fertigung der Kernspeicher).

Allen Institutionen, Firmen und besonders den Mitarbeitern an den verschiedenen Stellen, die durch großen, manchmal sehr persönlichen Einsatz dem Plasmaexperiment zum Erfolg verhalfen, sei auch an dieser Stelle herzlich gedankt.

Das Förstersonden-Magnetfeldexperiment (E2)

Günter MUSMANN, Fritz M. NEUBAUER, Arnold MAIER, Ernst LAMMERS,

Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig

The Förstersonden-Experiment E2 is a three component-vector-magnetometer. Its purpose is to continuously observe the interplanetary magnetic field in a frequency range up to 4 Hz. Thereby certain phenomena are to be analysed as a function of the distance from the sun e. g. the spiral structure and discontinuities. The measurement ranges are ± 100 nT and ± 400 nT. The resolution is ± 0.2 nT and ± 0.8 nT respectively.

For accurate measurements of the zero offset of each sensor the component parallel to the spinaxis can be flipped by 90° . Depending on telemetry format and bitrate the digital data are fed into a time average computer or directly connected to telemetry. A shock identification-computer triggers the S/C core memory in case of discontinuities with variations of the ambient magnetic field magnitude.

Das Förstersondenexperiment E2 ist ein dreiaxsiges Vektormagnetometer. Es dient zur kontinuierlichen Beobachtung des interplanetaren Magnetfeldes in einem Frequenzbereich von 0 bis 4 Hz. Dabei sollen Erscheinungen wie die Spiralstruktur und Diskontinuitäten als Funktion des Abstandes von der Sonne untersucht werden. Die Meßbereiche sind ± 100 nT und ± 400 nT mit einer Auflösung von $\pm 0,2$ nT bzw. $\pm 0,8$ nT. Um genaue Nullpunktsbestimmungen jedes Sensors durchzuführen wird die Komponente, die parallel zur Spinachse liegt, um 90° gedreht. In Abhängigkeit von Format und Bitrate durchlaufen die digitalen Daten einen Mittelwertrechner oder direkt zur Telemetrie. Ein Stoßwellenidentifikationscomputer triggert den S/C-Kernspeicher beim Auftreten von Diskontinuitäten mit Magnetfeldvariationen.

1. WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG

Die Bewegung der geladenen Teilchen im interplanetaren Medium wird abgesehen vom meist kleinen Einfluß der Stöße durch magnetische und elektrische Felder bestimmt. Dies gilt sowohl für die relativ energiearmen Teilchen des solaren Windes (Protonenenergie ~ 1 keV, Elektronenenergie bis zu einigen 10 eV) als auch für die energiereichen Teilchen solaren oder galaktischen Ursprungs. Für letztere ist dabei das Magnetfeld dominierend, obwohl die elektrischen Felder durchaus nicht vernachlässigbar sind. Andererseits wirken Plasmaströme im solaren Wind wieder auf das Magnetfeld zurück. Zeitliche Änderungen des Magnetfeldes sowie Ladungstrennung bestimmen das elektrische Feld. Für nicht zu schnelle Variationen in Raum und Zeit sind elektrische Felder \mathbf{E} und Magnetfelder \mathbf{B} durch das Prinzip der eingefrorenen Felder verbunden durch

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

wobei \mathbf{v} die Massengeschwindigkeit des Plasmas ist.

Daraus ergibt sich, daß zum genauen Verständnis der Plasmamessungen des solaren Windes sowie der Messung ener-

giereicher Teilchen die Kenntnis des Magnetfeldvektors unbedingt notwendig ist. Andererseits gibt das Magnetfeld wichtige Informationen über das Plasma selbst. Solche Magnetfeldmessungen werden vom Förstersondenmagnetometerexperiment E2 der TU Braunschweig geliefert und zwar für Frequenzen bis 4 Hz, d. h. über den Gültigkeitsbereich des Konzepts des eingefrorenen Feldes hinweg. In Erdnähe reicht der Frequenzbereich etwa bis zur unteren Hybridfrequenz, da die Protonenzyklotronfrequenz hier im Mittel bei etwa 0.1 Hz. liegt.

Der von der Sonne ausströmende solare Wind ist immer von einem mit der Sonne rotierenden System von Plasmaströmen hoher Geschwindigkeit verbunden, das von Sonnenrotation zu Sonnenrotation je nach dem Grad der Aktivität mehr oder weniger starken Variationen unterworfen ist. Diese Ströme haben auch über das eingefrorene-Felder-Theorem eine ausgeprägte Struktur im interplanetaren Magnetfeld. Dieses Magnetfeld ist normalerweise für einen solchen Strom mit Anstiegs- und Abfallbereich durch eine bestimmte Polarität des interplanetaren Magnetfeldes ausgezeichnet. Ein oder mehrere Strombereiche bilden nach Beobachtungen nahe der Erde einen magnetischen Sektor, der durch eine von der Sonne weggerichtete oder zur Sonne gerichtete