

# Ein Instrument zum Nachweis niederenergetischer Elektronen und Protonen an Bord der Sonden HELIOS (E 8)

E. KEPPLER, B. WILKEN, G. UMLAUFT, K. RICHTER, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Lindau/Harz

Aufgabe des Experimentes 8 an Bord von HELIOS ist die Klärung der Herkunft der niederenergetischen Elektronen und Protonen und ihres Ausbreitungsverhaltens. Das Instrument besteht aus drei separaten Einheiten: dem magnetischen Spektrometer, der Analogelektronik und der Digitalelektronik. Prinzip und Aufbau werden im einzelnen diskutiert sowie erste Flugergebnisse dargestellt.

*The task of Experiment 8 onboard of HELIOS is the exploration of the origin of low-energy electrons and protons and their distribution mechanism. The experiment comprises three separate units: the magneto-spectrometer, the analog electronics unit and the digital electronics unit. The experiment design is described in detail and first flight measurement results are presented.*

## 1. EINLEITUNG

Teilchen im Energiebereich um 100 keV haben im interplanetaren Raum, wo das Magnetfeld von typisch  $5 \gamma$  (Erdbahn) bis ca.  $40 \gamma$  (0,3 AE) variiert, Gyrationenradien von der Größenordnung 50 (Elektronen) bzw. 1000 Kilometer (Protonen) (vgl. TAB. I). Sie folgen damit dem Magnetfeld recht genau und werden insbesondere von Inhomogenitäten des Feldes stark beeinflusst. Teilchen in diesem Energiebereich sind vorwiegend solaren Ursprungs; jedoch weiß man [vgl. z. B. ANDERSON, 1974], daß solche Teilchen auch aus der Magnetosphäre der Erde in Richtung Sonne strömen können oder vom Jupiter ins Sonnensystem hineingelangen können [TRAINOR et al., 1974]. Schließlich können sie im interplanetaren Raum durch Beschleunigung (etwa in der Nähe von Stoßwellen) entstehen [SINGER und MONTGOMERY, 1971].

Die Ausbreitung solcher Teilchen im interplanetaren Raum wird wesentlich vom interplanetaren Magnetfeld bestimmt. Von der Sonne fließt ein ständiger Plasmaström radial nach außen ab, der Sonnenwind, der das interplanetare Magnetfeld als eingefrorenes Feld mitträgt. Dessen Geschwindigkeit variiert sehr stark zwischen etwa 300 und 800 km/sec. Entsprechend sieht ein ruhender Beobachter bei Teilchen in dem hier betrachteten Energiebereich einen Mitnahmeeffekt, der in der Physik als Compton-Getting-Effekt bekannt ist. Eine von einem ruhenden Beobachter festgestellte Richtungsverteilung der Teilchen kann daher bezüglich des mit dem solaren Wind mitbewegten Bezugssystems nur dann bestimmt werden, wenn das Energiespektrum dieser Teilchen in Abhängigkeit von der Richtung mitgemessen wird. Die mögliche Herkunft dieser niederenergetischen Elektronen und Protonen aufzuklären und ihr Ausbreitungsverhalten zu untersuchen und zu verstehen, ist das wesentliche Anliegen, zu dem dieses Instrument an Bord der Sonden HELIOS einen Beitrag liefern soll.

## 2. BESCHREIBUNG DES INSTRUMENTS

Das Instrument besteht aus drei separaten mechanischen Einheiten: dem magnetischen Spektrometer, der Analogelektronik und der Digitalelektronik.

Das Instrument benutzt ein inhomogenes, senkrecht zur Einfallrichtung der Teilchen gerichtetes Magnetfeld von ca. 800 Gauß zur Trennung von Elektronen und Protonen, die dann in separaten Detektoren nachgewiesen werden [KEPPLER und WILKEN, 1970]. Elektronen in dem betrach-

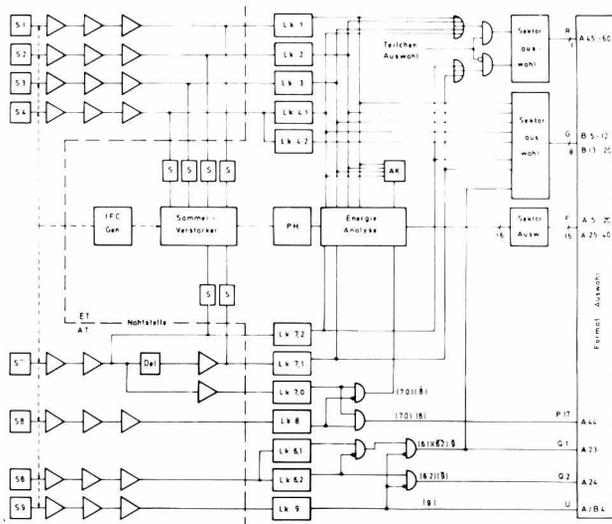
TAB. I: GYRATIONS RADIIEN GELADENER TEILCHEN IN KM

B [ $\gamma$ ]	Elektronen [keV]				Protonen [keV]		
	20	100	500	1000	100	500	1000
5	92,2	187	294,2	321	$9,1 \cdot 10^3$	$2,04 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$
10	46,5	93,5	147	160,5	$4,5 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$
20	23,2	46,8	73,6	80,3	$2,3 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^3$	$7,2 \cdot 10^3$
40	11,6	23,4	36,8	40,1	$1,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$
100	4,6	9,4	14,7	16,0	$4,6 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$

teten Energiebereich von 20-1000 keV werden senkrecht zum Magnetfeld abgelenkt, während die (schwereren) Protonen (80-1000 keV) das Magnetfeld praktisch unbeeinflusst durchfliegen. Zu ihrem Nachweis werden Silizium-Oberflächengrenzschicht-Detektoren benutzt (voll verarmt). Vier dieser Detektoren dienen dem Elektronennachweis; zum Protonennachweis werden zwei hintereinanderliegende Detektoren (Teleskopanordnung) benutzt, von denen die im vorderen (Front-) Detektor registrierten Teilchen analysiert werden. Der hintere (Back-) Detektor verhindert den Nachweis energiereicher Teilchen (Antikoinzidenz).

Elektronen und Protonen werden mittels Pulshöhenanalyse in je 16 Energiekanälen gemessen. BILD 1 (Blockschaltbild) illustriert das analoge Signalverarbeitungsverfahren. Das Magnetfeld im Instrument lenkt natürlich Positionen entsprechend wie Elektronen, jedoch in entgegengesetzter Richtung, ab. Dort wurde daher ein weiterer Detektor platziert, mit dem Positronen nachgewiesen werden können (BILD 2).

Bei der Sensorwicklung war ein signifikantes Temperaturproblem zu lösen. Die Detektoren zeigen ein stark von der Temperatur abhängiges Rauschen. Um möglichst kleine Teilchenflüsse nachweisen zu können, sollten die Detektoren auch im Perihel nicht wärmer als etwa  $0^\circ \text{C}$  werden. Für die Aperturöffnung des Instruments, die etwas über die Außenhaut des Satelliten hinausragt, ließ die Thermalrechnung Temperaturen von bis zu  $180^\circ \text{C}$  (im Perihel) erwarten. Zur Kühlung stand dem Instrument ein Segment des im oberen Konus des Satelliten eingebauten Thermal-Louversystems zur Verfügung, an das es mit einem großen Fuß angeschraubt war. Der komplizierte innere Aufbau (vgl. BILD 2) bringt die Detektoren thermisch gut leitend mit der

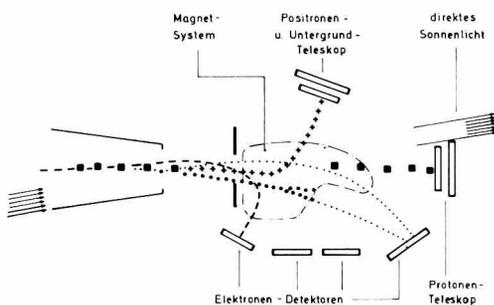


**BILD 1: Blockschaltbild der Signalverarbeitung des Instruments** (S<sub>i</sub>: Detektoren, S: Analogschalter, LK<sub>i</sub>: Schwellendiskriminatoren, PH: Pulshöhenanalysator, AK: Antikoinzidenz).

Die gestrichelte Linie entspricht der mechanischen Aufteilung der Komponenten auf die Analogelektronikbox (AT) und die Digitalelektronikbox (ET).

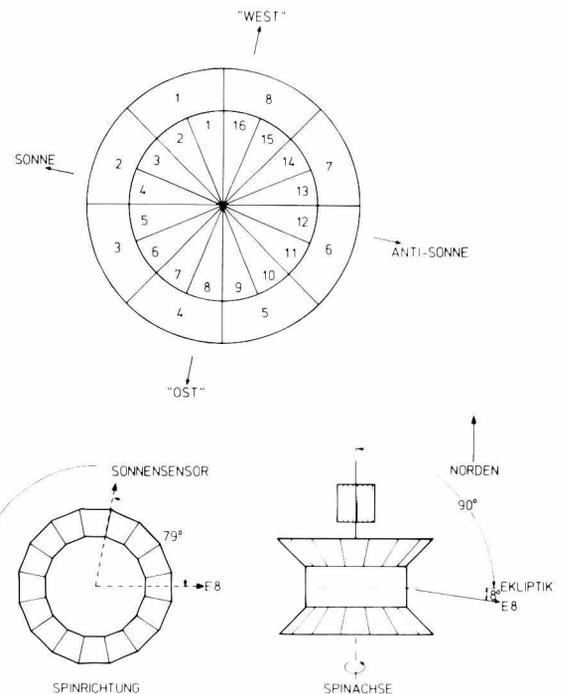
Rückseite und damit mit der Fußplatte in Verbindung. Das Magnetsystem und die restliche Mechanik, einschließlich der Aperturhalterung, ist von den „kalten“ Teilen durch Titanbolzen und Nylonisolierungsringe thermisch entkoppelt. Die Erwartungen, die sich aus diesem Aufbau an das Temperaturverhalten im Flug knüpften, wurden voll erfüllt. Bei 10,4 Solarkonstanten erreichten die Detektortemperaturen (im Innern des Sensors)  $+1,3^{\circ}\text{C}$ . Entsprechend zeigten die empfindlichsten Detektoren (S1 und S7 für Elektronen und Protonen) während der Mission bis zum Perihel eine Linienbreite von ca. 8 keV FWHM.

Die Eintrittsapertur des Spektrometers ist etwa senkrecht zur Spinachse des Satelliten orientiert (BILD 3). Da die Spinachse senkrecht zur Ekliptik steht, kann die Richtungsverteilung der geladenen Teilchen durch Unterteilung der Spinumdrehung des Satelliten in 16 gleiche Intervalle gemessen werden (Sektorisierung).



**BILD 2: Zum Nachweisprinzip des Sensorsystems:** Geladene Teilchen werden im Magnetfeld nach ihrem Impuls aufgetrennt, wobei Protonen oberhalb von 80 keV das Magnetfeld praktisch unbeeinflusst durchfliegen, während Elektronen und Positronen nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt werden. Die Teilchenbahnen sind schematisch eingezeichnet. Das Magnetfeld steht senkrecht zur Zeichenebene. Die Umriss der Polschuhe sind durch die strichpunktierten Linien angegeben.

Die während mehrerer ( $m$ ) Spinumdrehungen in einem bestimmten Sektor registrierten Teilchenpulse werden in einem diesem Sektor zugeordneten Speicher abgelegt. Auf diese Weise wird die Richtungsverteilung des Teilchenflusses etwa in der Ebene der Ekliptik ständig abgetastet. Und zwar wird der energieintegrale Fluß von Elektronen ( $E > 20\text{ keV}$ ) aus diesen 16 Sektoren simultan, jedoch alternierend mit dem energieintegralen Protonenfluß ( $E > 80\text{ keV}$ ) aus 16 Sektoren gewonnen, während nach der Energie aufgelöste Informationen (16 Energiekanäle) ebenfalls aus 16 Sektoren, jedoch in aufeinanderfolgenden Meßzeiten gewonnen werden. Jede Meßzeit dauert  $m$  vollendete Spinumdrehung ( $m$ : Meßzeitparameter, vgl. unten). Auf diese Weise werden 544 Datenworte ( $16 + 16 + 16 \times 16 \times 2$ ) gebildet. Darüber hinaus werden – allerdings gemittelt über die  $m$  Spinumdrehungen – noch die Protonen-Koinzidenzrate ( $E_p > 6\text{ MeV}$ ) und die Untergrundzählrate (von der kosmischen Strahlung herrührend) bestimmt und in zwei Datenworten übertragen. Schließlich stehen noch zwei Datenworte für die Zählrate des Positronendetektors zur Verfügung.



**BILD 3: Zum Einbau der Sonde in den Satelliten:** Im oberen Teil der Abbildung ist die Sektorzuordnung zu den räumlichen Richtungen dargestellt, im unteren Teil die Einbaurichtungen im Satelliten in Azimuth (relativ zum Sonnensensor) und Elevation.

Die in den einzelnen Detektoren gebildeten Pulse werden im Instrument in 19-bit-Zählern akkumuliert. Die Inhalte dieser Zähler werden quasilogarithmisch auf 8 bit komprimiert und als Datenworte von der Telemetrie übertragen. Insgesamt liefert das Instrument  $2 \times 256 + 2 \times 16 + 4 = 548$  verschiedene Datenworte.

Das Instrument ist während  $m$  vollendeten Spinumdrehungen meßbereit. Danach werden während einer maximal 250 msec langen Meßpause die Daten aus den Arbeitsspeichern ausgelesen, quasilogarithmisch komprimiert und in Pufferspeichern abgelegt, von wo aus sie vom Telemetriesystem während der nächsten Meßperiode abgerufen werden. Der Meßzeitparameter  $m$  wird jeweils so bestimmt [KEPLER und UMLAUFT, 1973], daß kein Datenwort verloren gehen kann und keine Leerworte übertragen zu werden brauchen. Auf diese Weise wird die Synchronisation

zwischen spinbezogener Meßzeitsteuerung und telemetrie-taktbezogener Datenauslese erreicht. Die Anpassung an die 10 verschiedenen möglichen Bitraten (8-4096 bps) des Satelliten wird durch entsprechende Wahl von  $m$ , der Zahl der Spinumläufe während einer Meßperiode, erreicht.  $m$  wird zu diesem Zweck nach jeder Änderung der Bitrate neu bestimmt. Dies geschieht im Rahmen eines Eichzyklus, in dem außerdem die Lage der Energieschwellen und die Verstärkung in den einzelnen Kanälen mit einer modulierten Impulsfolge geprüft wird. Da auch der prozentuale Anteil der Experiment-Datenrate am Bitstrom des Satelliten bei den verschiedenen Datenformaten des Satelliten verschieden ist, wird auch nach Formatänderungen ein Eichzyklus ausgelöst. Dies wird durch einen Modenänderungsimpuls, der vom Satelliten zum Experiment gesandt wird, automatisch veranlaßt. Um auch bei niederen Bitraten eine einigermaßen vernünftige zeitliche Auflösung erreichen zu können, kann das Instrument in einer zweiten Mode betrieben werden, in der nur 64 verschiedene Datenworte (in jeweils 8 Sektoren bestimmt) übertragen werden.

### 3. ERSTE FLUGERGEBNISSE

BILD 4 zeigt als Beispiel für die wissenschaftliche Datenausbeute ein Protonenspektrum, das während eines Flare-Ereignisses auf der Sonne gemessen wurde. Die am gleichen Flare gemessene Richtungsverteilung von Elektronen und Protonen ist in BILD 5 dargestellt.

Ab 4,5 Solarkonstanten wurde der Positronendetektor S6, ab 6 Solarkonstanten der Elektronendetektor S2 in dem der Sonne zugewandten Sektor durch Licht gestört. Dieser Effekt führte jedoch zu keiner Beeinträchtigung der Funktion des Instruments. 11 der 548 Datenworte, zu denen diese

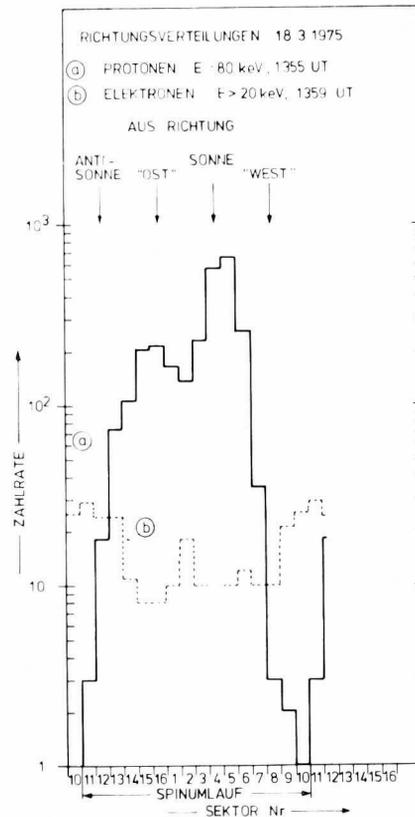


BILD 5: Richtungsverteilung solarer Protonen und Elektronen während des Flare vom 18. 3. 1975 (Zählrate gegen Sektornummer, 16 Sektoren entsprechen einem Spinumlauf). Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde die Verteilung links und rechts wiederholt.

Detektoren in dem der Sonne zugewandten Sektor Beiträge leisteten, waren davon beeinflusst.

### Schlußbemerkung

Das magnetische Spektrometer und die Analogelektronik des Instruments wurden im Max-Planck-Institut für Aeronomie entwickelt und gebaut. Die Digitalelektronik wurde im Rahmen eines Entwicklungsvertrages von der Firma SEL, Stuttgart, hergestellt. Das Gesamtgewicht des Instruments ist 3,5 kg, der Leistungsverbrauch beträgt 4,41 W.

Die Entwicklung und der Bau des Instruments wurden aus Mitteln der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, e.V., und aus Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie im Rahmen der Bewilligung A5-RS12 getragen.

### LITERATUR:

- [1] ANDERSON, K. A.: "Intensity and energy spectrum of electrons accelerated in the Earth's bow shock", J. Geophys. **40**, 701, 1974
- [2] KEPLER, E., B. WILKEN: „Ein Teilchenspektrometer für die Sonnensonde HELIOS“, Mitt. a. d. MPI für Aeronomie, Nr. 40, 21, 1970, Springer-Verlag
- [3] KEPLER, E., G. UMLAUFT: "A digital optimization device for directional charged particle measurements in space research", IEEE-Transact., **NS-20**, Nr. 4, 38, 1973
- [4] SINGER, S., M. D. MONTGOMERY: "Detailed directional and temporal properties of solar energetic particles associated with propagating interplanetary shock waves", J. Geophys. Res. **76**, 6628, 1971
- [5] TRAINOR, J. H., B. I. TEEGARDEN, D. E. STILLWELL, F. B. McDONALD, E. ROELOFF, "Energetic particle population in the jovian magnetosphere", Science **183**, No. 4122, 311, 1974

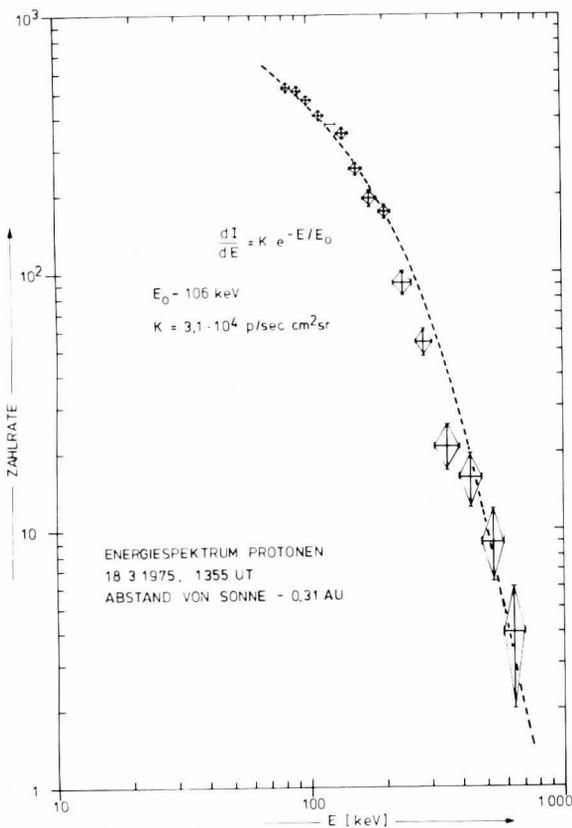


BILD 4: Energiespektrum solarer Protonen während eines Flare am 18. 3. 1975. Die gestrichelte Linie entspricht einem auf die Meßpunkte angepaßten Exponentialenergiespektrum.