

1

G. DEHMEL*)

Das Induktionsspulenmagnetometer-Experiment der Sonnensonde Helios

Die Sonnensonde „Helios“ wurde 1966 während eines Besuches der ehemaligen Bundesregierung bei dem damaligen amerikanischen Präsidenten Johnson als kooperatives Programm zwischen der NASA und dem BMWF vereinbart. Im April 1969 wurden Projektziele und Mission definiert, im Juni 1969 wurde das „Memorandum of Understanding“ unterzeichnet und die Vergabe des Hauptauftrages erfolgte im April 1970 an die deutsche Firma MBB. Mit dem „Critical Design Review“ konnte Ende 1972 die Entwicklungsphase abgeschlossen werden. Am 10. Dezember 1975 schließlich hob um 08.11 Uhr (MEZ) vom Kennedy Space Center auf Cape Canaveral eine amerikanische Trägerrakete vom Typ „Titan-Centaur“ ab, um Helios A auf seinen Weg zum Zentralgestirn zu bringen. Insgesamt befinden sich zwölf Meßgeräte für verschiedene Experimente an Bord.

1. Einleitung

Mit dem Start der ersten deutsch-amerikanischen Sonnensonde HELIOS A ist das bisher größte deutsche Weltraumforschungsunternehmen und gleichzeitig das umfangreichste nicht rein amerikanische Projekt der NASA zu einem gewissen Abschluß gekommen. Diese wissenschaftliche Raumsonde soll in einer elliptischen Bahn um die Sonne fliegen und ihr dabei näher kommen als alle bisherigen künstlichen Satelliten. Ein großer technischer und organisatorischer Aufwand ist getrieben worden, um die Sonde mit ihren verschiedenartigen Untersystemen zu entwickeln und zu bauen, um eine für die vorgesehene Bahn und Nutzlast geeignete Raketenkombination bereitzustellen, um einen erfolgreichen Start und sicheren Betrieb der Sonde während der Mission zu ermöglichen und um schließlich den Empfang sowie die Auswertung der wissenschaftlichen Daten vorzubereiten [1].

Zehn aktive Experimente – elektronische Apparaturen für spezielle physikalische Messungen – sollen neben zwei passiven die Eigenschaften und Vorgänge des interplanetaren Plasmas oder „Sonnenwindes“ untersuchen: Interplanetare und interstellare hochenergetische Teilchenstrahlung, elektrische und magnetische Felder und interplanetaren Staub [2, 3].

Bei solchen Raumfahrtexperimenten besteht zunächst die physikalische Aufgabe, eine sinnvolle, dem Stand der Erkenntnisse und der technischen Möglichkeiten entsprechende wissenschaftliche Zielsetzung aufzustellen und später die Auswertung der empfangenen Daten vorzunehmen. Im übrigen ergeben sich beim Experiment-Entwurf und seiner Realisierung überwiegend technologische und elektronische Probleme, weshalb an dieser Stelle über den Aufbau eines Raumfahrtexperimentes berichtet werden soll und zwar über ein Experiment für die Untersuchung des interplanetaren Magnetfeldes.

* Dr.-Ing. G. Dehmel ist Akadem. Direktor am Institut für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig und Experimentleiter.

Zum Erfüllen erweiterter Meßaufgaben werden oft Sensoren gebraucht, die nach neuartigen Prinzipien funktionieren oder neue Materialien und Bauteile enthalten. Auch bei der Experiment-Elektronik für die Verarbeitung der Meßdaten an Bord der Sonde ist man gelegentlich, selbst bei herkömmlicher elektronischer Leistungsfähigkeit, auf einzelne, in der Raumfahrt noch nicht erprobte Bauelemente (bis vor kurzem komplementäre MOS-IC's, MSI/LSI-Schaltkreise, Dick- und Dünnschicht-Schaltungen, Multilayer-Platinen usw.) angewiesen. Denn in der Regel sind von dieser Elektronik einige besondere Bedingungen zu erfüllen.

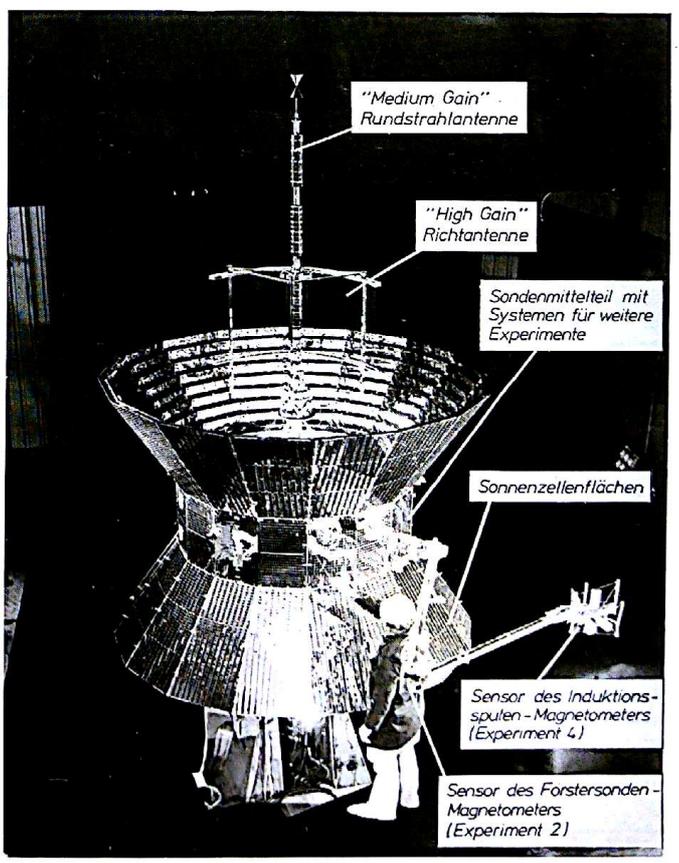


Bild 1. Die Sonnensonde „Helios“ und ihre Systeme

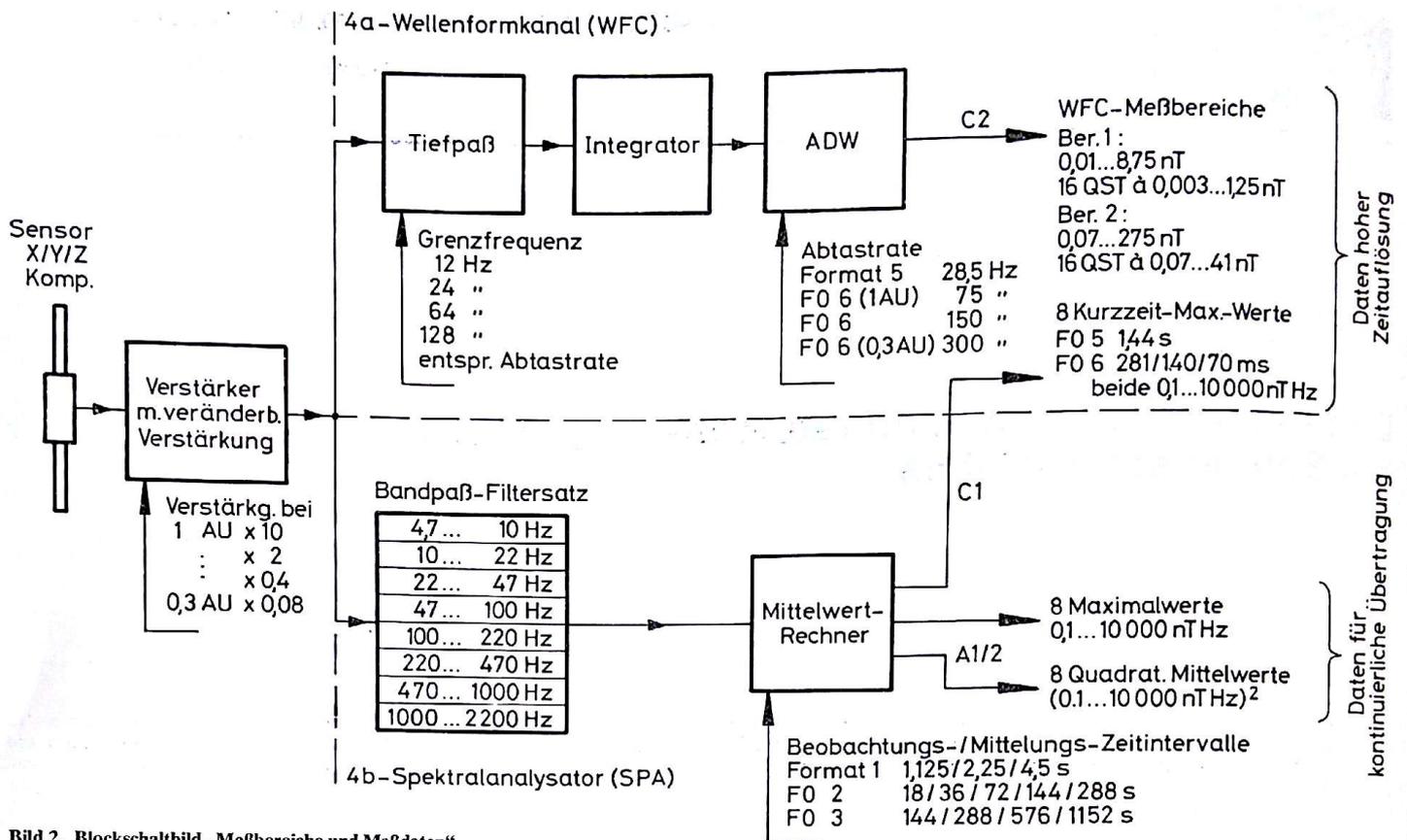


Bild 2. Blockschaltbild „Meßbereiche und Meßdaten“

Die Elektronik soll ein geringes Gewicht und kleinen Stromverbrauch haben, sie soll eine hohe Zuverlässigkeit besitzen und dafür in Schaltungstechnik und Bauteiltechnologie im ganzen konservativ sein, sie sollte mit Testautomaten auf Funktionstüchtigkeit prüfbar sein und gegebenenfalls hierfür Zusatzeinrichtungen besitzen, sie muß die mechanischen Belastungen des Starts überleben und im Vakuum in einem weiten Temperaturbereich arbeiten. Außerdem sind die Meßbereiche gewöhnlich sehr groß (wenn deren Grenzen fast unbekannt sind), wofür die Experimente fast immer automatisch oder durch Telekommando in ihrer Arbeitsweise umschaltbar sind.

Die Elektronik muß schließlich oft so entworfen werden, daß die Meßergebnisse mit einer geringen Menge digitaler Daten übertragbar sind. Das kann erreicht werden durch eine gezielte Vorverarbeitung der Daten im Experiment unter Beschränkung auf das Wesentliche – Interessante und Erwartete – und durch eine den bisherigen Kenntnissen über die Meßgrößen entsprechende optimale Codierung [4]. Diese Reduktion des Nachrichtenflusses hat aber auch Grenzen. Eine zu enge Beschränkung z. B. der Meßbereiche läßt Unerwartetes und Neues unmeßbar werden. Die optimale Codierung ergibt zwar eine geringe mittlere, aber gerade in diesen besonderen Fällen eine größere Meßunsicherheit. Im allgemeinen wird auch die Anfälligkeit gegen Störungen bei der Übertragung dieser Daten größer. Kurze Unterbrechungen bei der Übertragung wissenschaftlicher Daten von Raumsonden, verursacht durch Störungen oder bedingt durch den Betrieb der Sonde, kommen aber oft vor. Es ist daher nützlich, wenn die Struktur der Daten so gewählt ist, daß selbst bruchstückweise empfangene Daten noch interpretierbar sind.

Vor allem gilt es, eine Elektronik zu entwerfen, die in ihrer Arbeitsweise und ihren Eigenschaften – z. B. Frequenz- und Amplitudenbereich oder Frequenz-, Amplituden-, Zeit- und Raumauflösung – den vorgesehenen Meßaufgaben gut angepaßt ist.

2. Meßaufgaben und Funktion des Experimentes

Das HELIOS-Induktionsspulen-Magnetometer hat die Aufgabe, den sich schnell verändernden Anteil des interplanetaren Magnetfeldes zu untersuchen und Messungen durchzuführen, die bisher nur in Erdnähe gemacht wurden [5]. Wegen seiner großräumigen Struktur erscheint das Feld für eine hindurchfliegende Sonde meistens nur langsam veränderlich. Es treten aber auch gelegentlich, z. B. im Zusammenhang mit Eruptionen auf der Sonne und lokalen Plasmaintabilitäten, starke und höherfrequent periodische (> 1 Hz) Magnetfeldänderungen auf. Von diesen soll der zeitliche Verlauf gemessen werden. Außerdem sind ihre Amplituden, charakteristischen Frequenzen sowie An- und Abklingzeiten für das Verständnis der Vorgänge im Plasma wichtig. Zum Registrieren der Magnetfeldänderungen sind daher im Experiment zwei verschiedenartige Meßeinrichtungen vorgesehen, ein *Wellenformkanal (WFC)* und ein *Spektralanalysator (SPA)*.

Plötzliche starke Änderungen des Magnetfeldes, d. h. mehr oder weniger abrupte Sprünge des Feldstärkebetrages und/oder Drehungen der Feldstärkerichtung treten z. B. auf bei Tangential- und Rotationsdiskontinuitäten, an der Stirnfront der zeitweise sehr seltenen, aber interessanten Plasma-Stoßwellen, an den Grenzen zwischen den räumlich sektorförmigen Teilen des Sonnenmagnetfeldes entgegengesetzter Feldrichtung. Die räumliche Ausdehnung der Änderungszonen, ihre Relativgeschwindigkeit zur Sonde und die charakteristischen plasmaphysikalischen Zeiten bestimmen die Anstiegszeiten der Magnetfeldänderungen und damit die notwendigen Grenzfrequenzen des WFC. Die Magnetfeldeigenschaften ändern sich bei Annäherung an die Sonne und es wird erwartet, daß sich die Anstiegszeiten von der Größenordnung 0,1 s bis zu einigen ms und die Amplituden der Feldstärkeänderungen ähnlich wie der Mittelwert – 6 nT* in Erdnähe und 40–100 nT in Sonnennähe – verschieben. Deshalb sind mehrere WFC-Grenzfrequenzen wählbar und der WFC-Gesamtmeßbereich ist in zwei Teilbereiche aufgeteilt.

* Die magnet. Feldstärke kann nach Multiplikation mit der absoluten Permeabilität μ_0 als „Leerinduktion“ in der Einheit nT (Nanotesla) ausgedrückt werden, wobei 1 nT dem Wert 10^{-5} G entspricht.

Aus dem Untergrund des ständig vorhandenen „magnetischen Rauschens“ im turbulenten interplanetaren Plasma bilden sich im Zusammenhang mit bestimmten Strukturen starke, oft nahezu monochromatische tonfrequente magnetische Wechselfelder heraus. Ihre Frequenzen hängen mit den Zyklotronschwingungsdauern der geladenen Teilchen zusammen, liegen zwischen einigen zehn Hz und wenigen kHz und sind Kennzeichen verschiedener möglicher Wellentypen. Frequenzbereich und Frequenzauflösung des SPA sind so gewählt, daß mit Hilfe seiner Meßergebnisse die Wellen identifiziert werden können und korrespondieren mit einem Experiment für elektrische Wechselfelder auf der Sonde. Der weite Amplitudenbereich schließt alle bisher gemessenen und in Sonnennähe erwarteten Feldstärken ein.

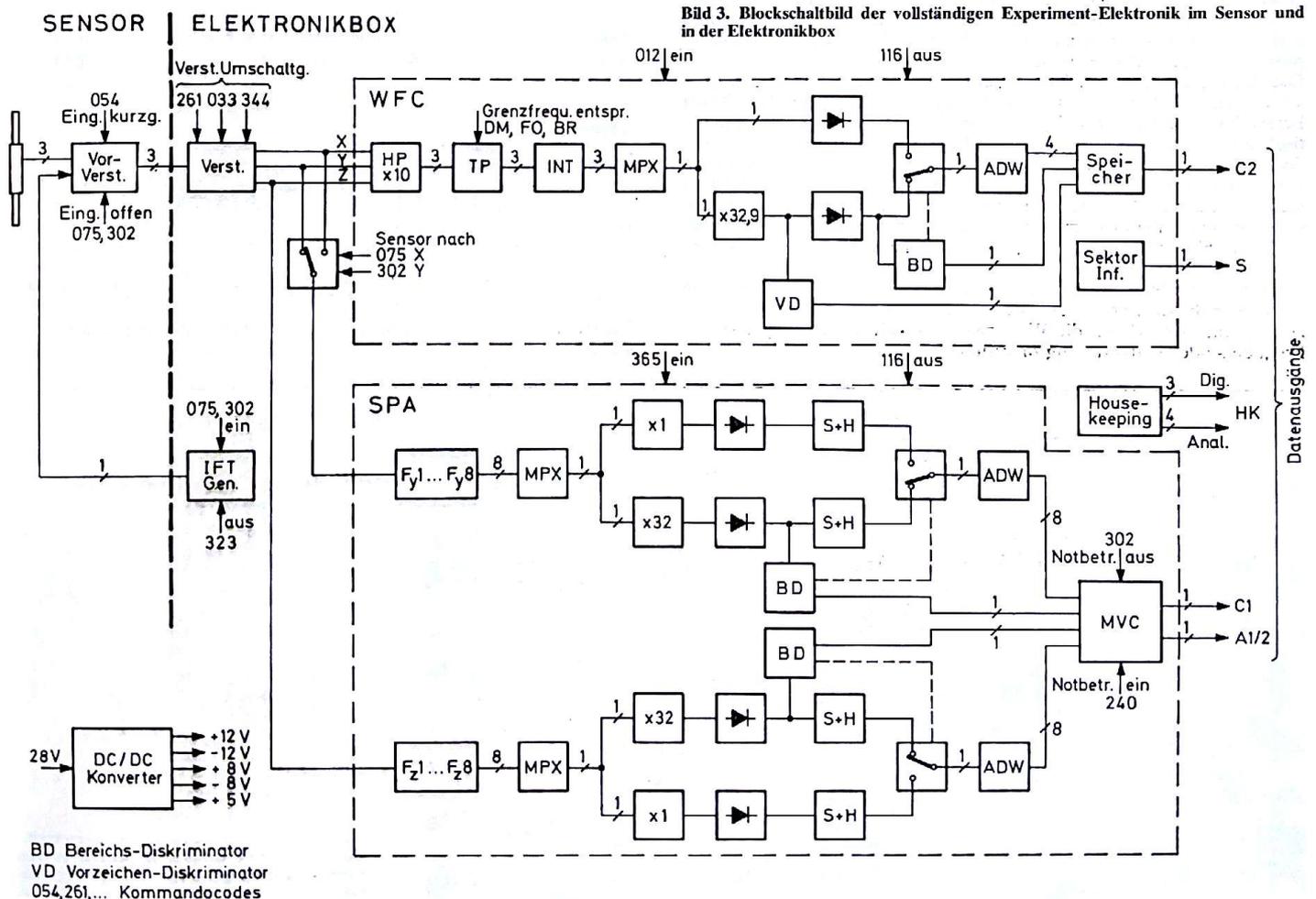
Eine Übersicht über die wichtigsten Funktionseinheiten des Experimentes, die seine Frequenzbereiche, Frequenz- und Zeitauflösungen bestimmen oder zu beeinflussen gestatten, zeigt das Blockschaltbild „Meßbereiche und Meßdaten“, Bild 1. In diesem Bild ist auch der vom Sensor ausgehende Signallauf und die Einwirkungsmöglichkeit auf verschiedene Funktionseinheiten durch Experiment- bzw. Sonden-Kommandos angedeutet. Schließlich sind dort die entstehenden Magnetfeld-Meßdaten zusammengestellt. Daran soll zunächst die allgemeine Wirkungsweise des Experimentes erläutert werden.

Veränderliche Magnetfelder induzieren in den Spulen der drei senkrecht aufeinander stehenden Sensorkomponenten x, y und z Spannungen, die der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes oder dem Produkt Magnetfeldstärke mal Frequenz proportional sind. Die Eigenresonanzfrequenz der Senserspulen beträgt etwa 2,8 kHz und begrenzt den Meßfrequenzbereich nach oben. Nach Vorverstärkung im Sensor selbst gelangen die Signale noch in einen Verstärker mit durch Experiment-Kommandos umschaltbarer Verstärkung. Dem erwarteten Anstieg der Magnetfeldschwankungen in Sonnennähe entsprechend ist vorgesehen, vom Verstärkungsfaktor $v = 10$ in Erdnähe (= 1 Astronomische Einheit - AE - Entfernung zwischen Erde und Sonne) stufenweise über $v = 2$ und $0,4$ auf $v = 0,08$ in Sonnennähe (0,3 AE) umzuschalten. Dadurch ergibt sich eine Vergrößerung des Amplituden-Meßbereichsumfanges des WFC und auch des SPA um den Faktor $5^3 = 125$. Da die Größe der von der Sonde als elektromagnetische Störungen selbst erzeugten Wechselfelder und auch die Größe der interplanetaren Wechselfelder

sehr unsicher ist, ist das Experiment mit der umständlicheren Bereichsumschaltung durch Kommandos an dieser Stelle anpassungsfähiger als mit einer automatischen Verstärkungsumschaltung.

Die an diesen Verstärker anschließende WFC-Elektronik mißt in allen drei Raumrichtungen Momentanwerte der magnetischen Feldstärke, aus denen die Zeitfunktion des Betrages und der Richtung rekonstruiert werden können. Es sind also alle Einrichtungen des WFC dreifach vorhanden. Lediglich das Umwandeln der Analogsignale in Digitalworte geschieht nacheinander, wozu dem Analog-Digital-Wandler ein Analogmultiplexer vor und ein Digitalmultiplexer nachgeschaltet ist. Durch Hochpaß-Koppelglieder erhält der WFC eine untere Grenzfrequenz von 4 Hz, die gleich der oberen Grenzfrequenz eines anderen Magnetometers (Förstersonden-Magnetometer, Experiment 2) ist. Die Übertragungscharakteristiken beider Experimente sind im Überlappungsbereich so aufeinander abgestimmt, daß die Meßergebnisse lückenlos zusammengesetzt werden können.

Um den Aliasing-Fehler beim Abtasten des dem Magnetfeld entsprechenden Spannungs-Zeit-Verlaufes genügend klein zu halten, wird er vor dem Abtasten durch einen Tiefpaß bandbegrenzt. Zu den wählbaren Abtastfrequenzen 28,5, 75, 150 und 300 Abtastungen je Sekunde gehören die umschaltbaren Tiefpaß-Grenzfrequenzen 12, 24, 64 und 128 Hz. Bei Berücksichtigung eines natürlichen Abfalls der spektralen Leistungsdichte im aufgenommenen Signal proportional $1/f^2$ und der Übertragungsfunktion des zweistufigen RC-Tiefpasses ergibt sich bei den genannten Paarungen von Grenz- und Abtastfrequenz ein Mittelwert des Aliasing-Fehlers um 10%. Dieser Wert entspricht auch etwa dem durchschnittlichen Quantisierungsfehler für Gleichverteilung der Meßamplituden innerhalb der Meßbereichsgrenzen. Wegen der bei diesen Abtastfrequenzen entstehenden und zu übertragenden großen Menge von Meßdaten ist eine kontinuierliche Direktübertragung der Wellenformdaten nur bei der kleinsten Grenzfrequenz und in einem Telemetrieformat mit hoher Bitrate (Format 5 mit 2048 Bits je Sekunde für die Sonde) möglich. Wellenformdaten mit den insbesondere für Messungen in Sonnennähe gedachten Grenzfrequenzen 24, 64 und 128 Hz sind lediglich für ausgewählte Zeitabschnitte unter Verwendung eines Zwischenspeichers übertragbar. In diesen sondeneigenen Speicher



werden die WFC-Daten den Abtast- bzw. Grenzfrequenzen entsprechend schnell eingelesen und später für die Übertragung wieder langsam ausgelesen. Der von diesem Experiment belegbare Anteil an der Gesamtkapazität des auch von anderen Experimenten benutzten Speichers begrenzt die Dauer der Zeitabschnitte zusammenhängender Wellenformdaten je nach den oben genannten Grenzfrequenzen auf etwa nur 100, 50 oder 25 Sekunden. Wenn das „Einfrieren“ der sonst durch den Zwischenspeicher nur hindurchlaufenden Daten mit der automatisch arbeitenden „Wellenform-Erkennungs-Elektronik“ (im Experiment 2) richtig gesteuert wird, ist aber die Information über die interessantesten Teile der Magnetfeld-Wellenformen in den Daten dieser kurzen Zeitabschnitte enthalten.

Die Ausgangsspannungen der Tiefpaßfilter sind übrigens zunächst nur den Änderungsgeschwindigkeiten der Magnetfeldstärke proportional. Bei der vorhandenen unteren Grenzfrequenz des WFC können daraus mit analogen Integratoren Signale gewonnen werden, die innerhalb eines begrenzten Zeitbereiches mit genügender Genauigkeit direkt der Magnetfeldstärke entsprechen. Diese werden dem Analog-Digital-Wandler zugeführt, dessen Umwandlungsbereich den Meßbereich von 0,01 bis 275 nT festlegt. Die untere Grenze ist bestimmt durch das Eigenrauschen des WFC-Elektronik und an der oberen Grenze liegen die erwarteten größten Feldstärkeänderungen. Der Gesamtbereich ist zum Erhöhen der relativen Meßgenauigkeit in zwei ähnliche Teilbereiche mit je 16 Quantisierungsstufen aufgeteilt, deren Stufenbreite zur oberen Bereichsgrenze hin zunimmt.

Die Wellenformdaten werden für die drei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen x, y und z der Sensorkomponenten getrennt gemessen und übertragen. Da der Sensor sich mit der Sonde um die z-Richtung dreht, muß für das Reduzieren der Daten auf ein raumfestes Koordinatensystem der zu jedem x- oder y-Meßzeitpunkt zugehörige Drehwinkel der Sonde z. B. in Bezug auf die Richtung Sonde – Sonne bekannt sein. Dafür erzeugt die-Sonde mit einem an einer bestimmten Stelle eingebauten Sensor je Umdrehung einen „see-sun“-Impuls, ferner einen Takt mit 512 Impulsen je Sekunde und beim Beginn jedes Telemetrie-rahmens einen Rahmenanfangsimpuls. Vom Experiment werden die Taktimpulse gezählt, die zwischen dem „see-sun“-Impuls und dem Rahmenanfangsimpuls liegen und deren Zahl, entsprechend der Zeit zwischen beiden Impulsen, als Sektorinformation übertragen. Da auch die Zeitdifferenz zwischen der Aufnahme des Meßwertes und seiner Einordnung in den Telemetrierahmen sowie die Sondendrehgeschwindigkeit bekannt ist, kann auf den Drehwinkel der Sonde zum Meßzeitpunkt zurückgerechnet werden.

Die Meßsignale aus den Verstärkern mit umschaltbarer Verstärkung werden zusätzlich auch dem SPA des Experimentes zugeführt. Dieser liefert für kontinuierliche Übertragung Frequenzspektren des magnetischen Rauschens oder der Wechselfelder in zwei Komponenten, in der Bahnebene der Sonde und senkrecht dazu. Der SPA-Frequenzbereich von 4,7 bis 2200 Hz wird mit acht Bandfiltern (drei je Frequenzdekade) gleicher relativer Bandbreite unterteilt. Hierbei ist in mehrfacher Hinsicht ein annehmbarer Kompromiß geschlossen worden. Denn mit wachsender Zahl der Bandfilter steigen der elektronische Aufwand, Stromverbrauch und Gewicht, wird aber die Interpretation der Ausgangsdaten des SPA leichter und genauer möglich. Weiter ist, wie bei jedem Spektralanalysator, bei einer festen erlaubten Menge entstehender und zu übertragender Daten die Wahl zwischen mehr oder weniger großer Frequenz- oder Zeitauflösung zu treffen.

Die digitalisierten Abtastwerte der Filterausgangsspannungen werden einem digitalen Mittelwertrechner zugeführt, der daraus quadratische Mittelwerte berechnet. Dies ist bisher bei einem solchen Experiment noch nicht gemacht worden und hat den Vorzug, daß die Meßergebnisse sich auch in quantitativen rechnerischen Interpretationen verwenden lassen. Außerdem ermöglicht diese Digitalelektronik leicht, zusätzlich die größten in jedem Filterkanal aufgetretenen Momentanwerte als Maximalwerte zu speichern. Die Mittel- und Maximalwerte gelten für sich aneinanderreihende Mittellungs- bzw. Beobachtungszeitintervalle, die zwischen 1,125 und 1152 Sekunden einstellbar sind. Aus dem Mittelwertrechner werden außerdem noch Maximalwerte für sehr kurze Zeitintervalle bis herunter zu 70 ms, passend zu den Wellenformdaten mit einer Grenzfrequenz bis 128 Hz, entnommen.

Wegen der großen relativen Bandbreite $\frac{\Delta f}{f_m} \approx 0,8$ der Bandfilter und der

trotz geringem Stromverbrauch erzielten hohen Arbeitsgeschwindigkeit des Rechners werden unmittelbar die Abtastwerte der Filterausgangsspannungen zur Mittelwert-Berechnung verwendet. Für genügend kleine Abtastfehler sorgt das angewendete Verhältnis Abtastfrequenz/obere Filtergrenzfrequenz = $3,8 \cdot 6,5$, das durch Anpassen der Abtastrate an die Frequenzlage der Filter ermöglicht wird. So wird das erste Filter ($4,7 \cdot 10$ Hz) mit $f_A = 65,1$ Hz, das zweite Filter ($10 \cdot 22$ Hz) mit $2f_A = 130,2$ Hz, das achte Filter ($1000 \cdot 2200$ Hz) schließlich mit $2^7 f_A = 8332,8$ Hz abgetastet.

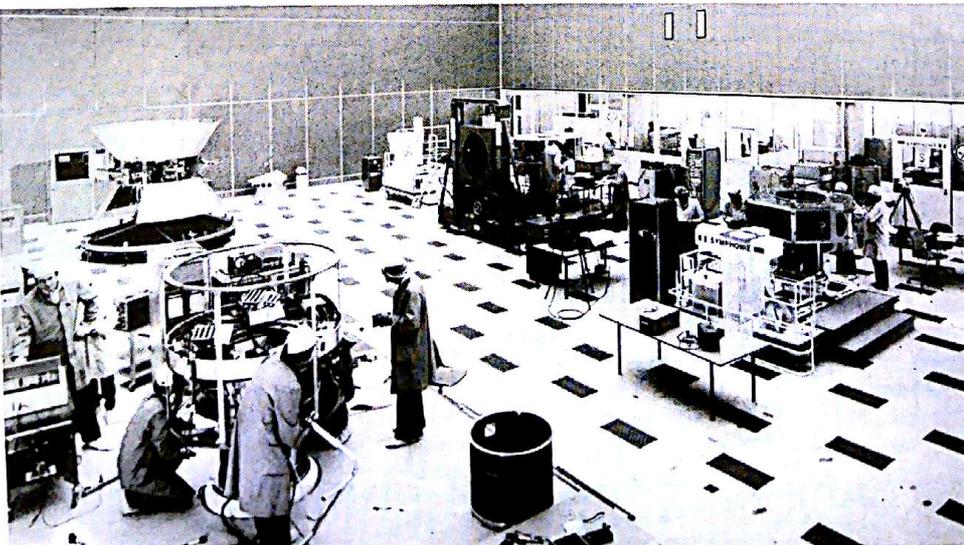
Da für ein Mittellungs- bzw. Beobachtungs-Zeitintervall jeweils nur ein Satz Spektralraten erzeugt wird, kann durch Verändern der Intervalldauer die Menge dieser zu übertragenden Experimentdaten an die Kapazität des Telemetrie Kanals angepaßt werden. Bei den vorgesehenen sehr unterschiedlichen Sonden-Bitraten zwischen 2048 und 8 bit/S, abhängig von der Entfernung Sonde – Erde und der Empfangsqualität auf der Erde, ist diese Anpassung besonders wichtig. Die Intervalldauern werden automatisch vom Telemetriesubsystem der Sonde gesteuert. Das Zwischenschalten des Rechners hat schließlich noch den Vorteil, daß zwischen Abtasttakt und Daten-Übernahmetakt zur Telemetrie (= Sendetakt) kein fester Zusammenhang zu bestehen braucht.

Der Meßbereich des SPA liegt insgesamt etwa zwischen den Werten des Produkts aus Magnetfeldstärke und Frequenz 0,1 und 10.000 nT/Hz. An der unteren Grenze des Bereiches liegt das Eigenrauschen des Sensors und Vorverstärkers bewertet durch das Filter größter Bandbreite und an der oberen Grenze die stärksten erwarteten Signale in Sonnennähe.

Schrifttum

- [1] Project Plan for HELIOS A and B. Gesellschaft für Weltraumforschung m.b.H., 1971.
- [2] H. Porsche: Projekt einer deutsch-amerikanischen Sonnensonde. Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Nr. 25 (1968), S. 55–63.
- [3] H. G. Hasler: Projekt HELIOS. Bild der Wissenschaft (1973), S. 592–599.
- [4] R. Lippmann und D. Preuß: Nachrichtenreduktion für Raumfahrtexperimente. NTZ 25 (1972), S. 179–186.
- [5] F. M. Neubauer: Magnetfeldmessungen an Bord der Sonnensonde „HELIOS“. Sterne + Weltraum (1970), S. 223–228.

Ein Beitrag über die Elektronik dieses Experimentes folgt in der nächsten Nummer.



Satelliten-Integrationsraum bei Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) in Ottobrunn, in dem COS-B, Helios-EM, ein Helios-Prototyp und Symphonie versammelt sind. (Aufnahme MBB/Archiv Kral)