



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 Träger Rakete 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.

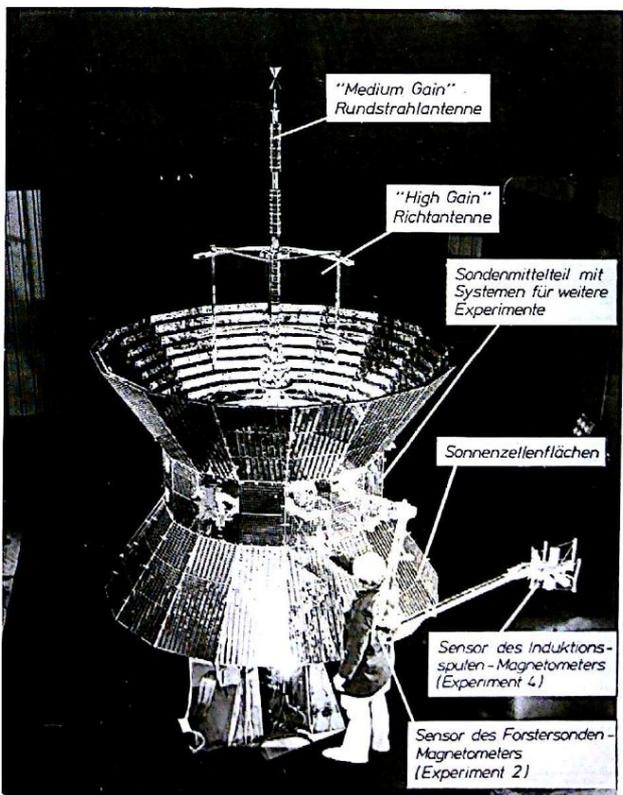


Bild 1. Die Sonnensonde „Helios“ und ihre Systeme

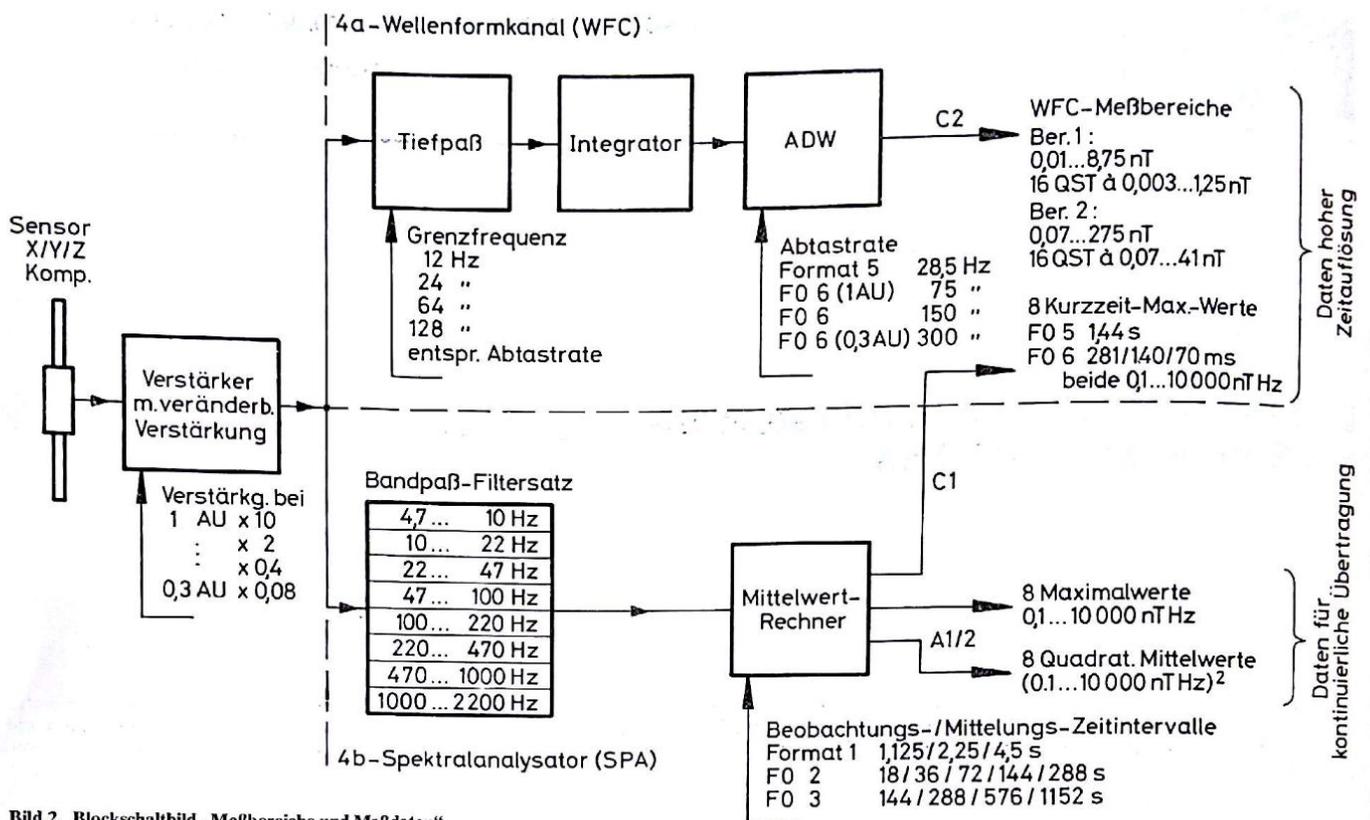


Bild 2. Blockschaftbild „Meßbereiche und Meßdaten“

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.

* 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.

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.

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.

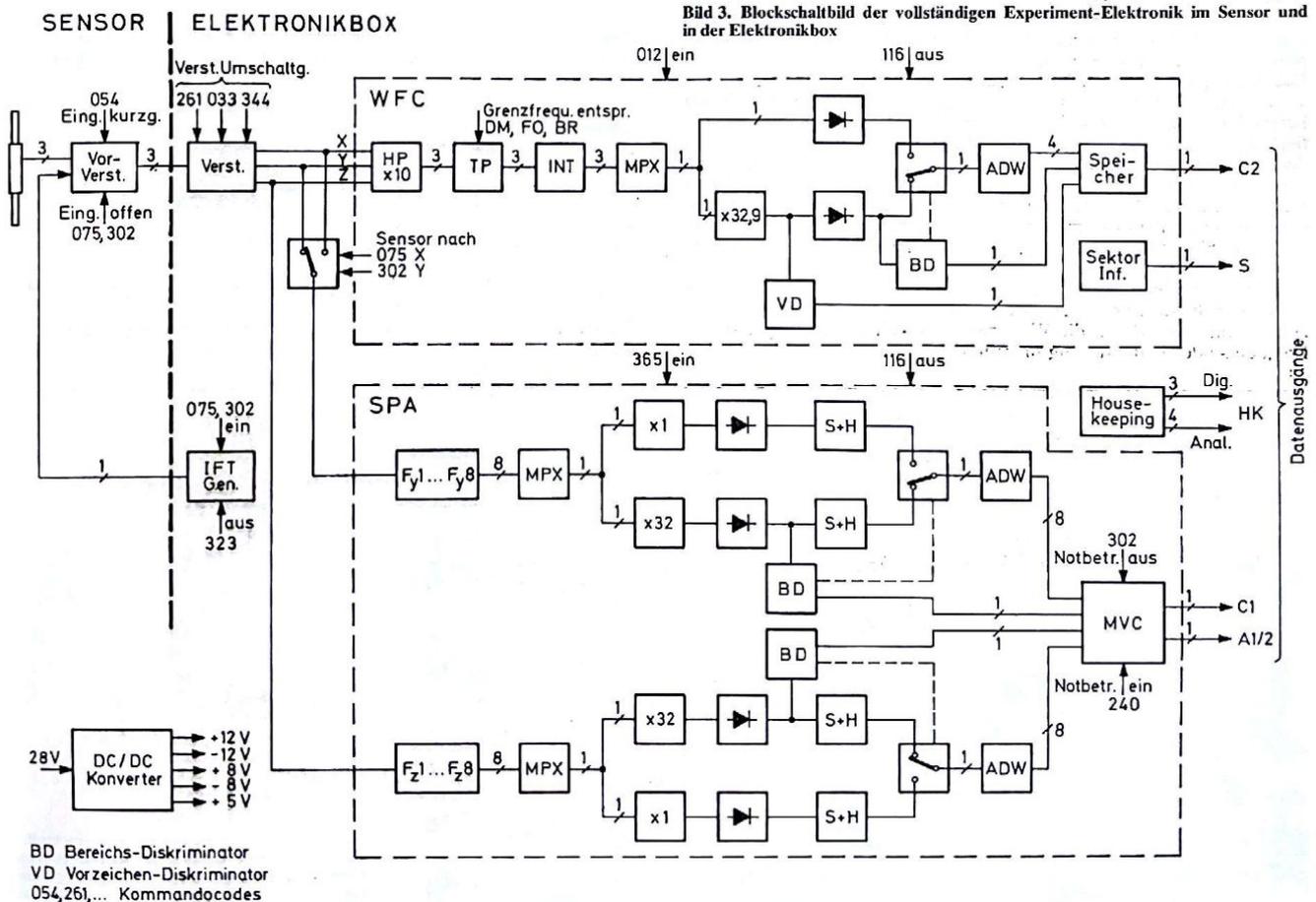
Eine Übersicht über die wichtigsten Funktionseinheiten des Experimentes, die seine Frequenzbereiche, Frequenz- und Zeitaufösungen bestimmen oder zu beeinflussen gestatten, zeigt das Blockschaltbild „Meßbereiche und Meßdaten“, Bild 1. In diesem Bild ist auch der vom Sensor ausgehende Signalfluß und die 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 Sensorspulen 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 Wechselmagnetfelder

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 Digitalwerte 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 der 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 aneinanderreichende 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.

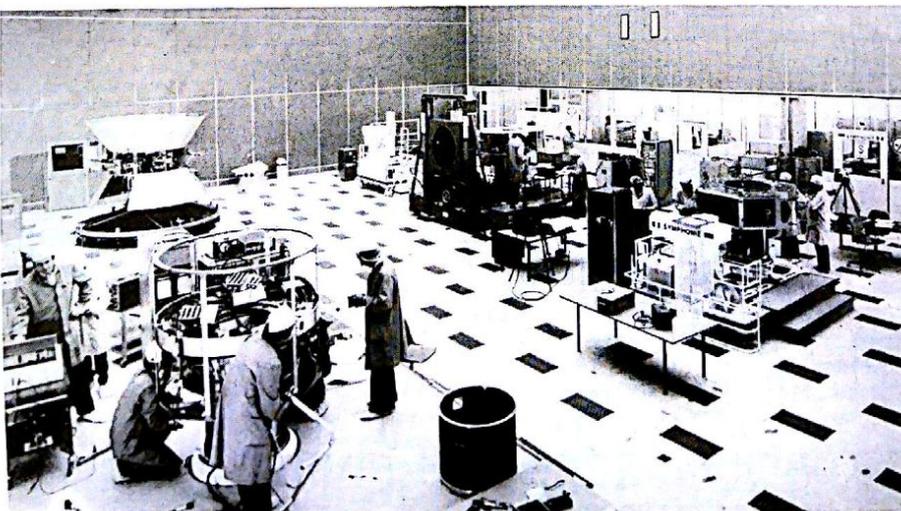
Da für ein Mittellungs- bzw. Beobachtungs-Zeitintervall jeweils nur ein Satz Spektraldaten erzeugt wird, kann durch Verändern der Intervalldauer die Menge dieser zu übertragenden Experimentdaten an die Kapazität des Telemetrie Kanals angepaßt werden. Bei den vorgesehenen sehr unterschiedlichen Sonden-Bitraten 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 nTHz. 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)

G. DEHMEL*)

Die Elektronik des Induktionsspulen-Magnetometers der Sonnensonde HELIOS

In einem vorangegangenen Beitrag sind die Meßaufgaben, die Meßbereiche und die Funktion des Experimentes beschrieben worden. Es untersucht den sich schnell verändernden Anteil des interplanetaren Magnetfeldes. Sein Wellenformkanal (WFC) mißt die Zeitfunktionen der magnetischen Feldstärke und ihrer Richtung im Anschluß an ein anderes Magnetometer-Experiment von 4 Hz bis zu einer Grenzfrequenz von maximal 128 Hz und der Spektralanalysator (SPA) untersucht das Frequenzspektrum des Magnetfeldes im Bereich zwischen 4,7 und 2200 Hz. Die Wellenformmessungen ergeben eine hohe, nicht direkt übertragbare Datenrate, weshalb die Ergebnisse zwischengespeichert werden müssen. Wegen des begrenzten Speicherplatzes muß man sich dabei auf kurze, ausgewählte Zeitabschnitte beschränken. Die Spektraldaten können dagegen direkt übertragen werden, denn hier gleicht ein Mittelwertrechner selbsttätig den erzeugten an den übertragbaren Datenfluß an. Die Elektronik ist im übrigen so ausgelegt, daß die erwarteten Werte der Meßgrößen in den Meßbereichen des Experimentes liegen, was durch Umschalten der Verstärkung und der WFC-Grenzfrequenz erreicht wird.

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

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

Elektronik-Blockschaltbild

Das Blockschaltbild der vollständigen Experiment-Elektronik ist im Bild 1 wiederholt. Diesem Bild folgend soll der Aufbau und die Wirkungsweise der Elektronik erläutert werden.

Sensor und Vorverstärker

Der Sensor besteht aus drei rechtwinklig zueinander stehenden gleichen Komponenten. Jede enthält eine Spule (47000 Windungen 0,05 mm CuL-Draht) auf einem zylindrischen Mumetallkern (320 mm lang, 6 mm Durchmesser) und einen rauscharmen Vorverstärker. In der Spule wird eine vom Verlauf des äußeren Magnetfeldes $H(t)$ abhängende Spannung $u_s = E_1 \cdot \frac{dH}{dt}$ induziert. Für ein sich sinusförmig änderndes Feld der Amplitude H und Frequenz f ist die Spannung $\hat{U}_s = E_2 \cdot H \cdot f$. $E_1 = 0,96 \cdot 10^{-6}$ Vs/nT**) bzw. $E_2 = 6 \cdot 10^{-6}$ V/nT Hz sind die erreichten Empfindlichkeitskonstanten. Durch Aufteilen der Spulenumwicklung in zehn Kammern ist die Eigenkapazität der Spule klein gehalten und durch Anwenden einer Kompensationsschaltung im Vorverstärker dessen parallel liegende Eingangskapazität. So ergibt sich trotz der für die geforderte Empfindlichkeit notwendigen großen Spuleninduktivität $L = 300$ H eine Parallelresonanzfrequenz $f_p = 2,8$ kHz des Sensors. Sie liegt genügend weit oberhalb des Meßfrequenzbereiches,

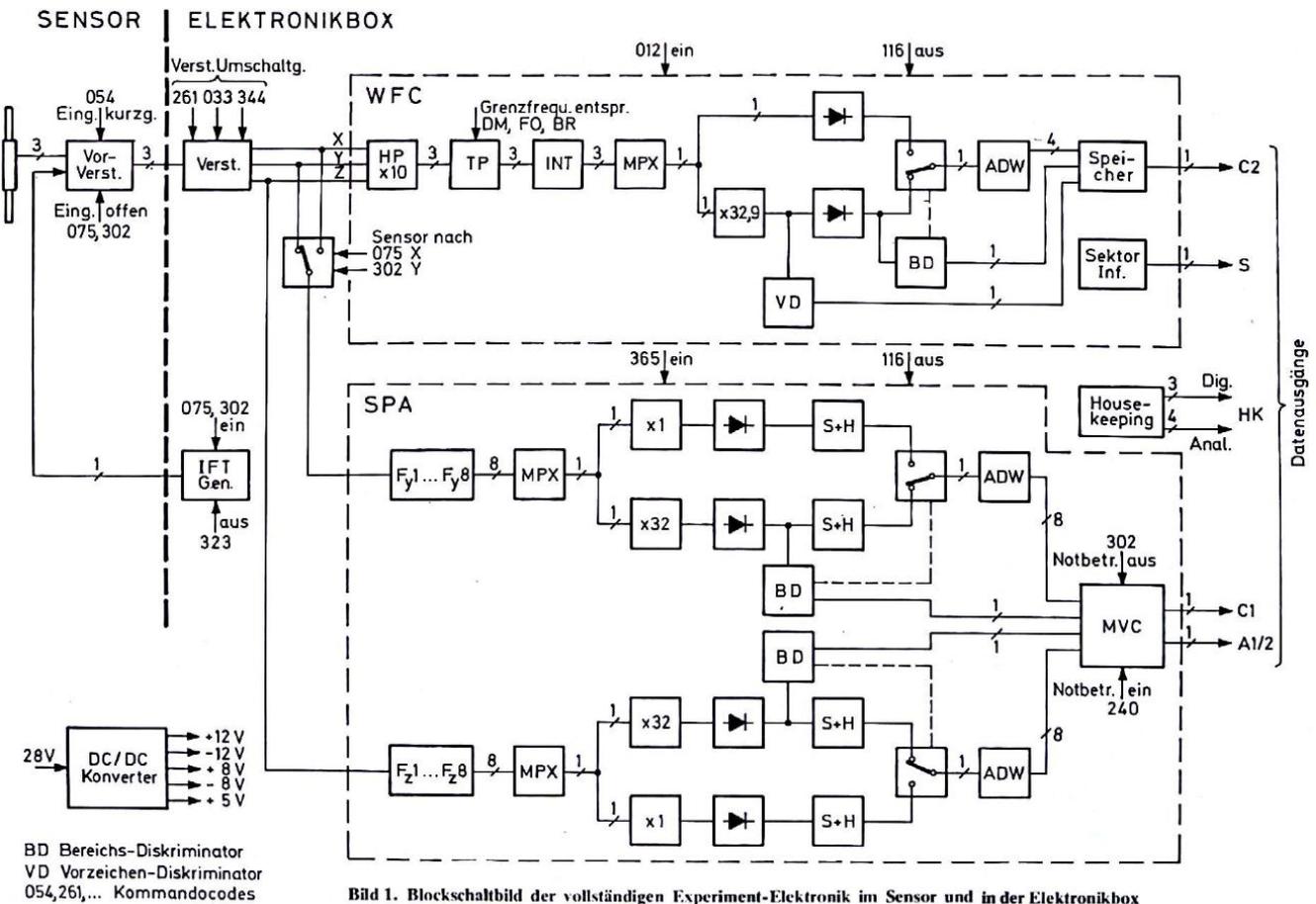


Bild 1. Blockschaltbild der vollständigen Experiment-Elektronik im Sensor und in der Elektronikbox

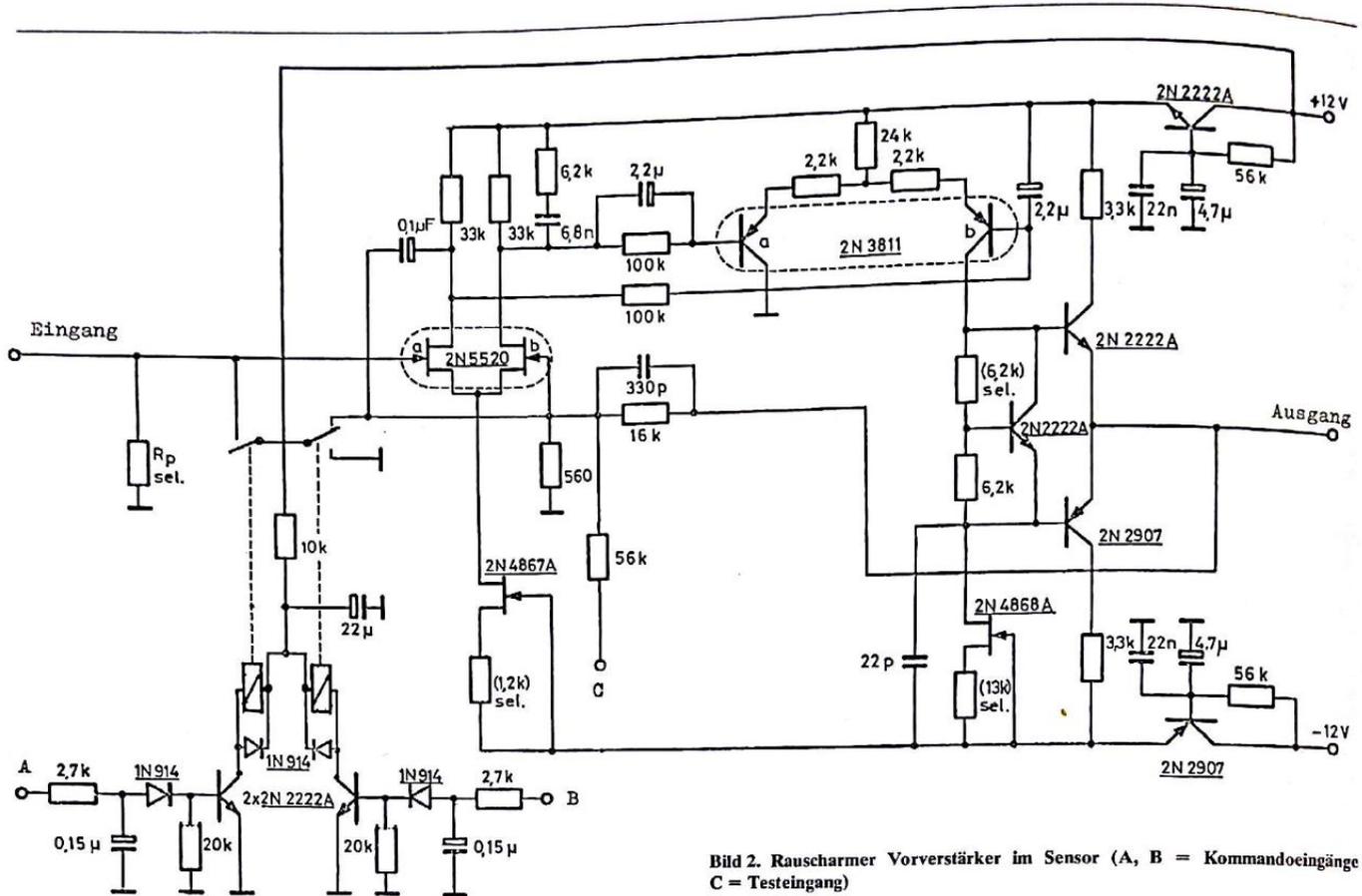


Bild 2. Rauscharmer Vorverstärker im Sensor (A, B = Kommandoeingänge C = Testeingang)

so daß der oben angegebene einfache Frequenzgang des Sensors ausgenutzt werden kann und sein starkes Eigenrauschen in der Nähe der Resonanzfrequenz sowie sein Empfindlichkeitsabfall darüber unwirksam bleiben. Der Mumetallkern ist als kunststoffumgossenes Drahtbündel ausgebildet, um die Wirbelstromverluste klein zu halten.

Mit ausgesuchten Exemplaren der Feldeffekttransistoren 2N5520 und 2N4867A (Konstantstromquelle) erreicht der rauscharme Vorverstärker im Sensor (Bild 2) eine Rauschspannungsdichte $u_r/\sqrt{f} < 25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ zwischen 4 und 200 Hz und $< 10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ oberhalb 200 Hz. Die starken Magnetfelder auf der Erde können in den Sensorpulen für den Verstärker gefährlich hohe Spannungen induzieren. Daher wird sein Eingangstransistor auf Kommando durch ein selbsthaltendes Relais kurzgeschlossen.

Um möglichst wenig von der Sonde gestört zu werden, ist der Sensor am Ende eines etwa 3 m langen Auslegers montiert. Die Ausgangssignale werden über lange Koaxialkabel in die Elektronikbox im temperaturstabilisierten Mittelteil der Sonde geführt. Sie gelangen dort in Verstärker mit je einem integrierten Operationsverstärker LM 108. Diese zeichnen sich durch geringen Leistungsverbrauch aus, können aber trotzdem die nachfolgenden Verstärker im WFC und die SPA-Bandfiltersätze mit je 8 an den Eingängen parallelgeschalteten Filtern ansteuern. Die Widerstände im Gegenkopplungsnetzwerk des LM 108 sind durch zwei selbsthaltende Relais (Teledyne 424 AD im TO 5-Gehäuse) teilweise kurzzuschließen, so daß sich vier Verstärkungsfaktoren (0,08 / 0,4 / 2 / 10) durch Telekommando einstellen lassen. Durch das Umschalten der Gegenkopplungswiderstände wird der Offset-Abgleich und die Kompensation der Temperaturdrift der Ausgangsspannung erschwert. Wegen seines sehr geringen Eingangsstromes bleibt der LM 108 aber auch ohne diese Maßnahmen in seinem Arbeitsbereich.

Wellenformkanal

Im WFC folgen Verstärker mit 10-facher Spannungsverstärkung und RC-Koppelgliedern ($HP \times 10$), die eine untere Grenzfrequenz von 4 Hz (= obere Grenzfrequenz von Experiment 2) ergeben. Diese Verstärker enthalten, wie viele andere Elektronikschaltungen, den mit extrem geringem Leistungsverbrauch betreibbaren integrierten Verstärker LM 4250. Wie üblich, sind hier durch ausgesuchte Widerstände Verstärkungsfaktor, Offset-Null und Temperaturdrift-Kompensation eingestellt.

Da im WFC ein der Magnetfeldstärke entsprechender Spannungs-Zeitverlauf abgetastet wird, sind Tiefpässe (TP) gegen entstehende Abtastfehler (Aliasing-Fehler) zur Bandbegrenzung eingesetzt. Ihre Grenzfrequenz wird entsprechend der Abtastrate durch Sondenkommandos

(abhängig von der Bitrate BR, dem Format FO, dem Datenmode DM ihrer Telemetrie) umgeschaltet. Jeder Tiefpaß enthält einen LM 4250 mit zwei RC-Zeitkonstanten und drei Relais 424 AD, mit denen zu den fest eingebauten Kondensatoren für die höchste Grenzfrequenz 128 Hz weitere parallelgeschaltet werden können, um Grenzfrequenzen von 64, 24 und 12 Hz zu erreichen. Widerstände in Reihe mit den schaltbaren Kondensatoren begrenzen den Relaisstrom auf den zulässigen Wert. Die frequenzbestimmenden RC-Elemente sind, wie bei allen im Experiment vorkommenden Filtern, Metallfilmwiderstände und Glimmer- bzw. spezielle Kunststofffolien-Kondensatoren mit sehr geringem TK aus der Reihe E96.

Die folgenden Integrierten (INT) erzeugen aus der Eingangsspannung $u_{\text{ein}} \sim \frac{dH}{dt}$ eine Ausgangsspannung $u_{\text{aus}} \sim H(t)$. Sie enthalten LM 4250, die mit einem Widerstands-T-Glied und einem Kondensator zum invertierenden Eingang überbrückt sind. So kann mit einem verhältnismäßig kleinen Kondensator eine Integrationszeitkonstante von > 3 Sekunden und damit ein Fehler $< 3\%$ der analogen Integration für einen gegebenen Zeitraum (zwischen zwei Meßwerten von Experiment 2) erreicht werden.

Für die drei WFC-Meßkomponenten müssen alle bisher aufgezählten Elektronikeinheiten dreifach vorhanden sein. Die Ausgangsspannungen der Integrierten können nun von einem Multiplexer (MPX) in ein Zeitmultiplexsignal zusammengefaßt werden, da der folgende Analog-Digital-Wandler (ADW) zeitdiskrete Abtastwerte der drei Wellenformspannungen umwandelt. Der MPX ist ein integrierter MOS-Schalter Siliconix DG 118 für dekodierte Takt- und Adressensteuerung auf 4 Leitungen mit TTL-Signalpegel. In drei Eingänge werden die Wellenformspannungen niederohmig eingespeist, so daß sich eine hohe Kanaltrennung ergibt. Der vierte mit Z-Dioden geschützte Eingang des MPX ist als Testeingang verwendet, um z. B. die Wandlungskennlinie des ADW messen zu können. Dem MPX-Ausgang ist noch ein Impedanzwandler mit LM 4250 nachgeschaltet. Von ihm ist ein kurzschlußfester Testausgang herausgeführt, über den die Frequenzabhängigkeit der Gesamtverstärkung der WFC-Analogelektronik einschließlich MPX aufgenommen werden kann.

Um einen Meßbereich zu bekommen, der um den Faktor 32,9 größer ist als der Umwandlungsbereich des ADW, ist der Signalweg zwischen MPX und ADW in zwei Zweige aufgeteilt. Kleine Spannungen gelangen über den Verstärker mit 32,9-facher Verstärkung zum ADW. Große Signale übersteuern den Verstärker und kommen ohne Verstärkung zum ADW, da sie eine Schwelle im Bereichsdiskriminator (BD) überschreiten und damit das Umschalten des Bereichsschalters vom Zweig $\times 32,9$ auf den Zweig $\times 1$ auslösen. Für das Zeitmultiplex-Signal muß der Verstärker

× 32,9 schnell einschwingen. Hier ist ein Operationsverstärker NH 0003 mittleren Leistungsverbrauchs mit großer Bandbreite und „slew-rate“ verwendet, ebenso wie in den Komparatoren des BD und Vorzeichendiskriminators (VD). Der ADW digitalisiert nur positive Spannungen. Deshalb sind ihm betragbildende Verstärker vorgeschaltet, die negative Halbwellen formgetreu umpolen. Bild 3 zeigt die Schaltung dieser Verstärker nach dem bekannten Prinzip eines Präzisions-Zweiweg-Gleichrichters mit Operationsverstärker und Dioden. Anstelle der Dioden sind zwei integrierte Doppeltransistoren verwendet, von denen die links gezeichneten Systeme als Dioden mit nur wenigen 10 mV Knickspannung (der Kollektor-Emitter-Strecke bei vorgespannter Basis) arbeiten und die anderen Systeme eine temperaturdriftkompensierte Basisspannung erzeugen. Mit dem NH0003 bekommt man so einen Gleichrichter, der für positive oder negative Eingangsspannungen bis zu Frequenzen von 20 kHz sehr genau gleichartige und formgetreue positive Ausgangsspannungen abgibt. Die gleiche Schaltung wird an entsprechender Stelle im SPA verwendet und von da kommen die Anforderungen hinsichtlich Bandbreite bzw. Einschwingzeit.

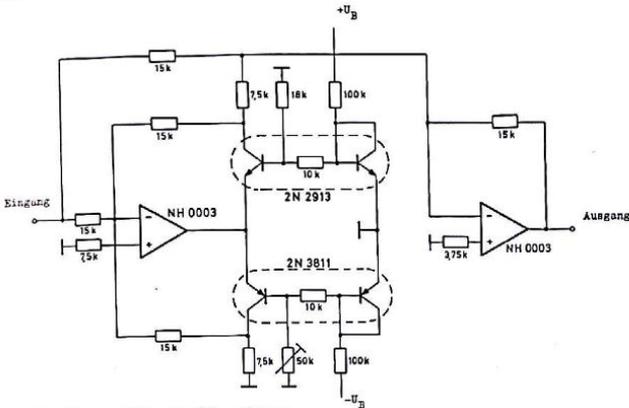


Bild 3. Betragbildender Verstärker

Nach dem Einschwingen der Ausgangsspannung des Bereichsschalters, die dann einem Stück des Zeitverlaufes der Magnetfeldstärke in einer der drei Raumrichtungen entspricht, tastet der ADW die Spannung ab. Innerhalb der Abtastzeit wird ein Speicherkondensator auf die Summenspannung von Meß- und einer Referenz-Spannung aufgeladen. Danach entlädt sich der Kondensator über einen Widerstand nach einer e-Funktion mit genau bekannter Zeitkonstante. Für die Dauer vom Beginn der Entladung bis zum Überschreiten der Referenzspannungsschwelle werden Impulse eines 1-MHz-Taktes gezählt. So erhält man einen logarithmischen Zusammenhang zwischen dem Momentanwert der Meßspannung und der Zahl der Taktimpulse, die schließlich mit 4 bit codiert wird. Die WFC-Meßwerte werden also mit insgesamt 6 bit (einschließlich Bereichs- und Vorzeichen-Bit) dargestellt und in Dreiergruppen für die x-, y- und z-Komponenten über einen Zwischenspeicher und den Datenausgang C2 an die Telemetrie der Sonde abgegeben. Ein zentraler WFC-Takt steuert das Umschalten des MPX und Bereichsschalters, den ADW und das Einlesen der Daten in den Zwischenspeicher.

Spektralanalysator

Im SPA werden quadratische Mittelwerte der Filterausgangsspannungen für Zeitabschnitte gebildet, die größer sind als eine Umdrehungsdauer der in der z-Richtung spinstabilisierten Sonde. Deshalb werden hierfür die Ausgangssignale von nur zwei Sensorkomponenten herangezogen, wahlweise die der x- oder y-Komponente und der z-Komponente. Aus dem umschaltbaren Verstärker gelangen die Signale zunächst in je einen Satz am Eingang parallelgeschalteter Bandfilter. Jedes dieser RC-aktiven Filter besteht aus einem Tiefpaß-, Hochpaß- und Bandpaß-Abschnitt mit je 2 Zeitkonstanten. Diese Reihenfolge wurde für großen Aussteuerbereich und kleine Steuerleistung am Eingang gewählt. Ein Bandfilter enthält drei LM 4250, die auch bei geringer Leistungsaufnahme wenig Verzerrungen verursachen, wodurch eine große Sperrdämpfung ermöglicht wird. Die Schaltungen sind so ausgewählt und dimensioniert, daß sich Werte der benötigten Widerstände und Kondensatoren > 10 kΩ bzw. > 1 nF, aber < 2 MΩ bzw. < 0,2 µF ergeben. Sonst sind die Belastung der integrierten Schaltkreise und deren parasitäre Kapazitäten nicht zu vernachlässigen oder die Bauelemente werden zu groß und schwer. Die im Bild 4 dargestellten gemessenen Durchlaufkurven stimmen gut mit den von einem Digitalrechner ermittelten überein, der auch die optimalen Größen der Widerstände und Kondensatoren aus der Reihe E96 auswählte. Eine weitere Forderung bei der Auswahl der Filterschaltungen war, daß Kurzschluß eines Kondensators und Unterbrechung eines Widerstandes nicht zur Selbsterregung eines Filters führen soll, die erhebliche Störungen verursachen würde.

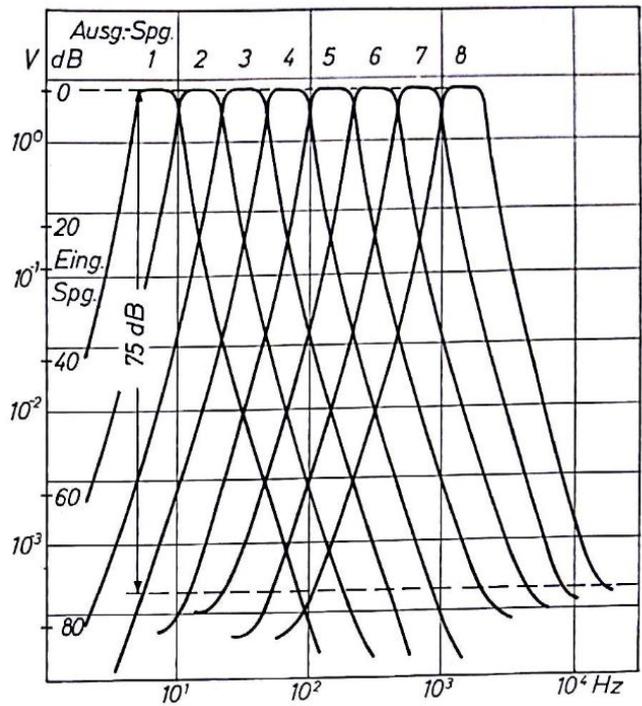


Bild 4.

Die acht Ausgänge je Filtersatz werden von dem MPX aus zwei in Reihe geschalteten MOS-Schaltkreisen DG 118 zeitlich nacheinander zum ADW durchgeschaltet. Ebenso wie im WFC verzweigt sich der Signalweg zwischen MPX und ADW zum Aufteilen des notwendigen großen Meßbereichs. Auf die Verstärker × 1 mit LM 4250 bzw. × 32 mit LM 108 folgen die schon beschriebenen Betragverstärker (Bild 3), „Sample-and-Hold“-Schaltungen mit einem Schalt-FET 2 N 4416 und der Bereichsschalter mit zwei 2 N 4416, gesteuert vom Bereichsdiskriminator mit dem integrierten Komparator LM 111.

Das Ansteigen der Signalpegel im Analogteil des SPA vom Sensorspulen-Ausgang bis zum Eingang des ADW und die Zuordnung der 13-bit-Wörter zur ADW-Eingangsspannung ist im Bild 5 dargestellt. Links sind die Bereiche des auf den Sensorspulenausgang bezogenen und über die Bandfilter bewerteten Eigenrauschens der Elektronik und der erwarteten Magnetfeld-Spannung in Erdnähe (1 AE) und Sonnennähe (0,3 AE) eingetragen. Rechts ist der Eingangsspannungsbereich des ADW angegeben. Im Feld dazwischen liegt, von gleichartig schraffierten Linien begrenzt, der Aussteuerbereich des SPA. Gegeben waren die Sensoreigenschaften sowie der Eingangsspannungsbereich des ADW, und als notwendig ergibt sich eine Erweiterung dieses Bereiches um den Faktor 32. Da der rauscharme Vorverstärker die Meßspannungen genügend über das Eigenrauschen der folgenden Elektronik anheben muß und die Bandfilter nur mit einer etwa 20-fachen Spannungsverstärkung gut realisierbar sind, bleiben für den umschaltbaren Verstärker nahezu nur die verwendeten Werte der Verstärkungsfaktoren, deren kleinster und größter eingetragen sind.

Die letzte elektronische Einheit des SPA ist der MVC. Seine wichtigsten Baugruppen sind im Bild 6 (nach [2]) angegeben. Die Dateneingabe-Einheit empfängt unter Kontrolle eines eigenen Steuerwerks die 9-bit-Wörter (8 bit Meßgröße, 1 Bereichsbit) von den SPA-ADW, bildet daraus Gleitkomma-Summanden für die Mittelwert-Berechnung und teilt sie außerdem in 47 Klassen zum Ermitteln der Spitzenwerte ein. Zentraler Teil des MVC ist der Prozessor mit Programmsteuerwerk, Rechenwerk, Adreßrechenwerk und 4096-bit-Kernspeicher. Er enthält sieben festverdrahtete Mikroprogramme: Akkumulation der Summen, Reduktion der Summen zu übertragbaren Gleitkommazahlen, Zählen der Summanden (für die Dauer der Mittelungszeitintervalle zum Bilden der Mittelwerte), Spitzenwertsuche, Interrupt zum Abspeichern der gefundenen Spitzenwerte und weitere zwei Interrupt-Programme zum Nachladen der Datenausgangs-Zwischenspeicher. Ständig läuft eines der Programme, und die dringenden Interrupts können sie, aber auch sich gegenseitig je nach wechselnder Priorität unterbrechen. Um dabei Zeitverlust durch Umorganisieren zu vermeiden, steht dem unterbrechenden Programm ein eigener Registersatz zur Verfügung. Die Zeit-

steuereinheit liefert die synchronen Takt- und Adressen-Signale für die MPX, S+H, BD und ADW im SPA und die Filterkanal-Information für die Dateneingabe-Einheit zum Einordnen der herankommenden Daten. Von der Sonde gelieferte Telemetrieakte (BSP 1/6, WTC 1/6 und BTC 1/6) lösen den Wechsel der Mikroprogramme aus und steuern den Datentransfer. Der MVC besteht aus sechs Multilayer-Platinen mit je 42 Digitalschaltkreisen SN 54 L im „flat-pack“-Gehäuse und vier Platinen, die Steuer- und Auswahlelektronik sowie die Ferritkernmatrix tragen. Sein Gesamtgewicht beträgt 550 gr. und der Leistungsverbrauch knapp 2 W.

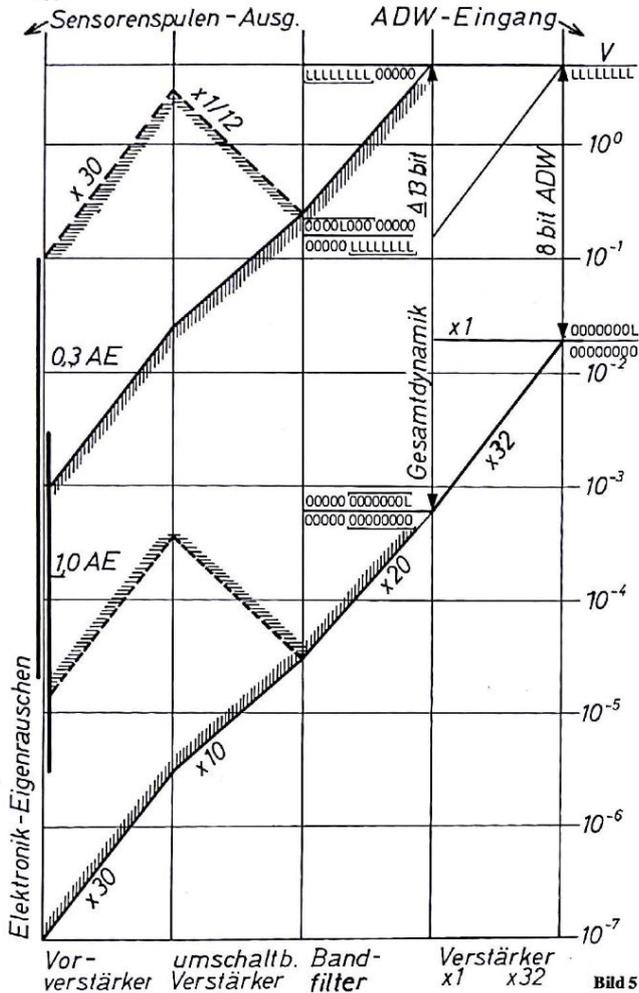


Bild 5

Hilfselektronik

Für verschiedene Zwecke sind im Experiment weitere Elektronikschaltungen erforderlich. Ein „Inflight-Test-Generator“ (IFT-Gen.) erzeugt ein Prüfsignal aus Pseudo-Random-Pulsfolge (PRBS) und 8-Hz-Rechteckspannung. Nach einem durch Kommando einschaltbaren Testzyklus können die bekannten Werte des Elektronik-Eigenrauschens (als Zeit- und Frequenzfunktion) und des Frequenzspektrums der PRBS aus dem SPA sowie die von der Grenzfrequenz abhängige Form der mit dem WFC aufgezeichneten 8-Hz-Rechteckwelle nachgeprüft werden. Dieser Test ist für die Mission gedacht, war aber auch bei den häufig notwendigen Funktionsprüfungen des Experimentes während der Integration und der Tests der Sonde und bei den Startvorbereitungen sehr nützlich. Für ausführliche Funktionstests des Experimentes wurde außerdem ein großes, rechnergesteuertes Testgerät entwickelt [3]. An mehreren Stellen können Telekommandos, deren Bedeutung und Codes in Bild 1 eingetragen sind, auf das Experiment einwirken und seine Eigenschaften oder Betriebsweise umschalten. Mit Ausnahme des Einschaltens eines „Notbetriebes“ bei Störungen im MVC, wirken die Kommandos über selbsthaltende Relais. Die Ansteuerlektronik für jedes Relais enthält zwei Schalttransistoren, die aus einem Speicherkondensator einen Stromstoß zum Umschalten auf das Relais leiten. Das Ausführen der Kommandos wird in der Regel durch einen zusätzlichen Relaiskontakt geprüft und das Ergebnis über drei digitale „housekeeping“-Datenkanäle übertragen. Ein 8-bit-Wort meldet das Ausführen der Experiment-Kommandos, mit einem zweiten 8-bit-Wort

wird der durch Sondenkommandos veränderbare Experimentzustand und in dem dritten der Arbeitsprogramme im MVC angezeigt. Über analoge „housekeeping“-Kanäle werden die Ströme zu vier im Experiment vorhandenen Betriebsspannungen von der Sonde gemessen.

Allgemeines

Das Experiment enthält insgesamt etwa 250 diskrete Halbleiter, 120 analoge und 400 digitale Schaltkreise sowie 2000 passive Bauelemente, die auf 27 Tochterplatinen 9 cm x 11 cm der Box, drei kleinen Verstärker- und einer Verteilerplatine im Sensor untergebracht sind. Sechs Tochterplatinen des MVC sind Sechsfach-Multilayer, die Analogteil-Mutterplatine ist ein Achtfach- und die Digital-Mutterplatine ein Vierfach-Multilayer. 17 Tochterplatinen, vorwiegend mit Analogschaltungen, sind über 79-polige Milstripstecker mit den Mutterplatinen verbunden. Dabei ist die (durch Parallelschalten von Steckerstiften nur geringe) Zuverlässigkeitsminderung bewußt in Kauf genommen, um das Wechseln und Testen der Platinen zu erleichtern. Der MVC ist als Block aus 10 Platinen in das Experiment eingesetzt.

Bei derartig komplexen Elektronik-Aufbauten kommt dem Massenkonzent eine besondere Bedeutung zu. In der Elektronikbox sind für Analog- und Digitalschaltungen getrennte Masseleitungen zu einem vom Boxgehäuse isolierten Sternpunkt in der Stromversorgung geführt. Im Sensor ist nur die Analog-Masseleitung verwendet und dort mit dem Gehäuse verbunden, da es von der Sondenstruktur elektrisch isoliert montiert ist. Die Gehäuseteile bestehen aus vergoldetem Aluminium, beim Sensor z. T. auch aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Alle Metallteile sind entweder unmagnetisch oder haben eine sehr geringe Restmagnetisierung, z. B. die Stecker- und Halbleitergehäuse, der Sensor-Mumetallstab. Die mit Permanentmagneten ausgerüsteten selbsthaltenden Relais wurden vor dem Verwenden auf genügend geringes Streufeld untersucht.

Einige charakteristische Zahlen seien noch genannt: Die Elektronikbox ist 30 cm x 20 cm x 15 cm groß und wiegt 4 kg, der Sensor mißt 35 cm x 35 cm x 35 cm und ist 1 kg schwer. Die Leistungsaufnahme des gesamten Experimentes beträgt 5 W, sein Arbeitstemperaturbereich liegt zwischen -20 und +60 °C. Der dauernd vom SPA übertragene Datenfluß beträgt je nach Kapazität des Telemetrie Kanals zwischen 228 und 0,22 bit/s, während für gewisse Zeitabschnitte WFC-Daten übertragen werden, die mit 6890 bis 513 bit/s vom Experiment an die Sonde geliefert werden.

Das Experiment wurde gemeinsam mit dem Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig konzipiert. Der Sensor und Teile der Elektronik sind im Institut für Nachrichtentechnik, der MVC ist im Institut für Datenverarbeitungsanlagen entwickelt worden. In der PTB in Braunschweig wurden die magnetischen Eigenschaften des Mumetallstabes, in der DFVLR das Ausgasen von Bau- und Gehäuseteilen aus Kunststoff untersucht. Das Vervollständigen des Entwicklungsmusters und das Herstellen aller Experiment-Modelle übernahm schließlich die Firma Dornier in Friedrichshafen. Der Verfasser dankt den zahlreichen Mitarbeitern am Experiment in den Instituten und Firmen für die langjährige gute Zusammenarbeit, der Gesellschaft für Weltraumforschung für die Betreuung und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für die Finanzierung des Projektes.

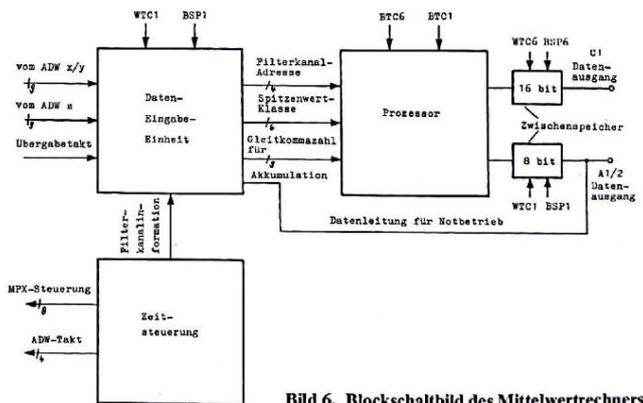


Bild 6. Blockschaubild des Mittelwertrechners

Schrifttum

- [1] NN: Baugruppen für zwei Helios-Experimente in Präzisions-Dickfilmtchnik, Techn. Mitt. AEG-Telefunken 62 (1972), S. 46.
- [2] Türke, C.: Dokumentation für den Mittelwertrechner des HELIOS-Experimentes 4. Institut für Datenverarbeitungsanlagen der TU Braunschweig, 1972.
- [3] Schirenbeck, G.: The HELIOS Search Coil Magnetometer and its Test Equipment using CAMAC. CAMAC-Bulletin (1972) 5.

Eine Ergänzung

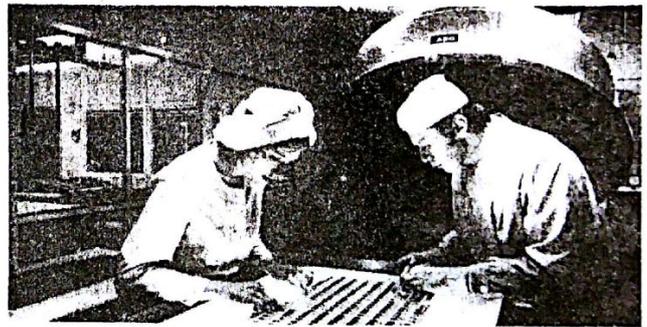
Durch ein Versehen wurden bei dem Beitrag „Die Elektronik des IM der Sonnensonde Helios“ von Dr.-Ing. G. Dehmel in der Nr. 4 der INTELRI zwei Absätze weggelassen. Bitte ergänzen Sie als 3. Absatz unter der Überschrift „Spektralanalysator“:

Der Analog-Digital-Wandler ADW 881 von AEG-Telefunken, eine Spezialentwicklung für Raumfahrtanwendungen //, enthält eine großintegrierte Dickfilmschaltung und Schaltungen mit einzelnen integrierten Kreisen und diskreten Bauelementen in Mikrobaugweise. Der Wandler nimmt 300 mW auf bei Vollaussteuerung mit 5,1 Volt und der höchsten Taktfrequenz von 200 kHz. Dabei codiert er jeden Momentanwert der verstärkten und gleichgerichteten Filterausgangsspannung innerhalb von 45 μ s mit einem 8-bit-Wort, das parallel im TTL-Pegel dem Mittelwertrechner (MVC) angeboten wird, bis eine neue Wandlung erfolgt. Der MVC erhält außerdem das Bereichsbit, das den Stellenwert des 8-bit-Wortes um 5 Binärstellen erhöht, wenn der Verstärker $\times 32$ übersteuert war und die Spannung über den anderen Signalzweig zum ADW gelangt. So entsteht eine Digitalinformation der Filterausgangsspannung aus einem Meßbereich $\cong 13$ bit mit einer Auflösung $\cong 8$ bit.

und als zweiten Absatz unter der Überschrift „Hilfselektronik“:

Ein von der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blöhm GmbH entwickelter synchronisierbarer Gleichspannungswandler (DC/DC-Konverter) versorgt schließlich das Experiment aus dem 28-V-Bordnetz der Sonde mit den internen Betriebsspannungen ± 8 V, ± 12 V (beide $\pm 1\%$) und

± 5 V ($\pm 5\%$). Er enthält einen mit 20 kHz schwingenden Gegentakterhacker, strombegrenzende Regelschaltungen zum Stabilisieren der Ausgangsspannungen und arbeitet mit einem Gesamtwirkungsgrad von 72%. Der Wandler trennt die Experiment-Masse von der 28-V-Nullleitung, schützt die Sonde vor Kurzschlüssen im Experiment und schirmt das Experiment gegen Schwankungen der Versorgungsspannung oder ihrer überlagerter Störungen ab.



Einer der Schwerpunkte der AEG-Telefunken-Aktivitäten im Helios-Programm war die Entwicklung und Fertigung der Stromversorgungsanlagen. Das Bild zeigt die Solargeneratorfertigung, wobei nach dem Bekleben die Solarzellen nach einem AEG-Verfahren miteinander verbunden werden. (AEG-Telefunken)