

Das Induktionsspulen-Magnetometer-Experiment (E 4)

G. DEHMEL*, F. M. NEUBAUER**, D. LUKOSCHUS*, J. WAWRETZKO* und E. LAMMERS**,
Technische Universität Braunschweig

Das Induktionsspulenmagnetometer-Experiment untersucht die magnetische Komponente elektromagnetischer Wellen im interplanetaren Plasma von 0,3 bis 1,0 AE. Sein Wellenformkanal (WFC) mißt die Zeitfunktionen von Kurzzeitschwankungen der magnetischen Felder bis $\pm 8,75/\pm 275$ nT*** in den drei Raumrichtungen von 4 bis maximal 128 Hz. Der Spektralanalysator (SPA) untersucht das Frequenzspektrum in der Ekliptik und senkrecht dazu in 8 Frequenzkanälen zwischen 4,7 und 2200 Hz. Wegen der großen Menge entstehender Meßdaten wird eine anpassungsfähige Datenreduktion angewendet: Die WFC-Daten können zwischengespeichert werden, um nur ausgewählte, interessante Teile zu übertragen.

The Search Coil Magnetometer experiment has been designed to investigate the magnetic component of electromagnetic waves in the solar wind from 0.3 to 1.0 AU. By means of its waveform channel (WFC) the rapid variations of the magnetic field are measured up to ± 8.75 nT resp. ± 275 nT in three orthogonal directions from 4 to 128 Hz. The spectrum analyser (SPA) observes the field components in the ecliptic plane and perpendicular to it, i.e. the power spectral density and peak values for 8 logarithmically spaced channels in the range from 4.7 to 2,200 Hz. Because of the large amount of data produced by this experiment an adaptive data reduction is applied: For interesting time intervals selected by experiment 2 or 5A waveform data can be read into an on-board memory at a rapid rate to be transmitted slowly afterwards.

1. WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG

Ziel des Induktionsspulen-Experiments der TU Braunschweig ist die Beobachtung der magnetischen Komponente elektromagnetischer Wellen im Anschluß an den Frequenzbereich des Förstersonden-Experiments (0-4 Hz) bis heraus zur Elektronengyrofrequenz, deren erwartetes Maximum zu einer oberen Grenzfrequenz von 2,2 kHz bei der Auslegung des Experimentes führte. Wegen der geringen Datenübertragungsrate ist es notwendig, die anfallende Datenmenge im Experiment zu reduzieren. Dies wird erreicht durch einen Spektralanalysator (SPA) für kontinuierliche Messungen im gesamten Frequenzbereich und einen Wellenformkanal (WFC) für Wellenformmessungen in ausgewählten Zeitabschnitten bis maximal 128 Hz. Diese Frequenz wurde gewählt, um Skalenlängen von einem Protonengyradius $V_A/\omega_{pi} = c/\omega_{pi}$ auch in Sonnennähe noch mit mehreren Punkten belegen zu können. Dabei ist V_A die Alfvégeschwindigkeit, ω_{gi} die Protonengyrofrequenz und ω_{pi} die Protonenplasmafrequenz.

Wellen im betrachteten Frequenzbereich können einmal weit vom Beobachtungsort entfernt entstehen und lassen bei ihrer Beobachtung durch HELIOS Schlüsse auf die Ausbreitungseigenschaften einschließlich Dämpfung und Anfachung zu. Zum anderen können natürlich auch Wellen direkt im Entstehungsgebiet gemessen werden. Quellgebiete sind im allgemeinen Gebiete mit instabilen Plasmaverteilungen. Sie können etwa in der Nähe der Sonne liegen. Da elektromagnetische Wellenausbreitung im solaren Wind – etwas vereinfacht dargestellt – nur von 0 Hz bis zur Elektronengyrofrequenz ω_{ge} möglich ist und dann erst wieder nahe der Elektronenplasmafrequenz beginnt, wird bei Annäherung an die Sonne ein immer breiteres Band im unteren Ausbreitungsbereich zugänglich. Weitere interessante Gebiete für die Entstehung von Wellen im betrachteten Frequenzbereich sind solche mit großen Anisotropien und Wärmeflüssen, z.B. in den sogenannten Doppelströmen, bei denen „Plasmajets“ verschiedener Massengeschwindigkeit, Temperatur und Dichte einander durchsetzen. Schließlich sind die Übergangsgebiete von Plasmadiskontinuität-

ten für die instabile Wellenerzeugung sehr aufschlußreich, da die durchweg gleichzeitig auftretenden starken Änderungen des Magnetfeldes auf starke Stromdichten in der Diskontinuität schließen lassen. Ein weiterer Mechanismus für die Entstehung „hochfrequenter“ Wellen ist die nichtlineare Kopplung von niederfrequenten Wellen. Solche nichtlinearen Welleneffekte bestimmen ja auch die Struktur von stoßfreien Stoßwellen. Aus den beiden letztgenannten Punkten ergibt sich ein Meßprogramm für diese und andere Experimenten an Bord von HELIOS, die sogenannte „shock-mode“, bei dem durch einen bereits in der Arbeit von Musmann et al. (E2) im gleichen Heft beschriebenen Ereignisdetektor interessante Ereignisse, z. B. auch Stoßwellen, erkannt und deren Daten vom WFC für kurze Zeitintervalle in einen Speicher eingelesen und später telemetriert werden.

2. MESSBEREICH UND MESSDATEN

Eine Übersicht über die wichtigsten elektronischen Funktionseinheiten des Experimentes, die seine Meßbereiche und Meßauflösung bestimmen, zeigt BILD 1. In diesem Bild sind Zahlenwerte für Bereiche und Auflösung genannt, ist ihre Veränderbarkeit durch Experiment- oder Sondentelemetrie-Kommandos angedeutet und die Struktur der vom Experiment erzeugten wissenschaftlichen Daten angegeben. Die von veränderlichen Magnetfeldern in den drei Sensor-komponenten induzierten Analogsignale durchlaufen zunächst einen Verstärker mit durch Kommandos umschalt-

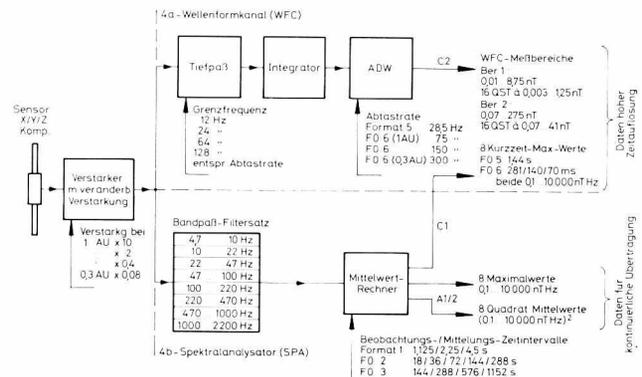


BILD 1: Blockschaubild „Meßbereiche und Meßdaten“

* Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig, 33 Braunschweig, Schleinitzstraße.

** Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 33 Braunschweig, Mendelssohnstr. 1.

*** Die Flußdichte 1 Nanotesla (nT) entspricht bezüglich der Experimenteichung der Feldstärke 10^{-5} G.

barer Verstärkung. Eine der Schwierigkeiten für die Analogelektronik ist das notwendige Verarbeiten der Meßsignale in einem sehr großen Dynamikbereich. Er ergibt sich, weil die Größe der Felder verhältnismäßig unsicher ist, ein starkes Anwachsen von Erd- bis Sonnennähe zu erwarten ist und große Unterschiede bei „ruhiger“ oder „aktiver“ Sonne möglich sind. Mit den einstellbaren Verstärkungsfaktoren 10/2/0,4 und 0,08 ist daher der Meßbereich des Experimentes insgesamt um den Faktor 125 umschaltbar gemacht worden.

Im WFC des Experimentes werden durch Abtasten Momentanwerte des Magnetfeldstärke-Verlaufs in den drei Raumrichtungen gewonnen, aus denen die Zeitfunktionen des Betrages der Feldstärke und ihrer Richtung rekonstruiert werden können. Um die unvermeidlichen Abtastfehler (Aliasingfehler) klein zu halten, müssen dem Analog-Digital-Wandler (ADW) bandbegrenzende Tiefpässe vorgeschaltet werden. Zu den einstellbaren Abtastfrequenzen von 28,5, 75, 150 und 300 Hz gehören die umschaltbaren Tiefpaß-Grenzfrequenzen 12, 24, 64 und 128 Hz. Wegen der hierbei entstehenden und zu übertragenden großen Menge von Meßdaten ist eine kontinuierliche Direktübertragung der WFC-Daten nur in einem Telemetrieformat mit hoher Bitrate (Format 5 mit 2048 bit/s) möglich. WFC-Daten mit den besonders für Messungen in Sonnennähe gedachten Grenzfrequenzen 24, 64 und 128 Hz sind in der schon erwähnten „shockmode“ nur für ausgewählte kurze Zeiträume von etwa 100, 50 oder 25 Sekunden Dauer nach Zwischenspeichern in einem sondeneigenen Speicher übertragbar. Der ADW besitzt eine logarithmische Umwandlungskennlinie mit zwei Teilbereichen bis 8,75 und 275 nT, in denen je 16 Quantisierungsstufen mit entsprechend ihrem Mittelwert zunehmender Stufenbreite liegen. So werden die WFC-Daten als Wertetripel von 6-Bit-Wörtern (1 Vorzeichen-Bit, 1 Bereichs-Bit, 4 Meßwert-Bits) über den Datenausgang C2 an die Telemetrie abgegeben.

Der SPA liefert für kontinuierliche Direktübertragung Frequenzspektren des magnetischen Rauschens oder der Wechselfeld-Anteile in zwei Komponenten, in der Ekliptik und der Richtung senkrecht dazu. Sein Frequenzbereich von 4,7 Hz bis 2200 Hz ist auf 8 Bandfilter gleicher relativer Bandbreite verteilt. Die digitalisierten Abtastwerte der Filterausgangsspannungen werden einem Mittelwertrechner (MVC) zugeführt, der aus ihnen quadratische Mittelwerte berechnet und zusätzlich die größten in jedem Filterkanal aufgetretenen Momentanwerte als Maximalwerte speichert.

Die Mittel- und Maximalwerte stammen aus sich aneinanderreihenden Mittelungs- bzw. Beobachtungszeitintervallen, für die jeweils ein Satz Spektraldaten erzeugt wird. Durch Ändern der Intervalldauer zwischen 1,125 und 1152 Sekunden wird der SPA-Datenfluß durch Sondentelemetrie-Kommandos automatisch an die Kapazität des Übertragungskanals angepaßt. Eine bitsparende Codierung im MVC ermöglicht das Darstellen der Spitzenwerte aus dem großen Bereich zwischen 0,1 und 10^4 nT · Hz durch 6-Bit-Wörter und der Mittelwerte zwischen 0,01 und 10^8 (nT · Hz)² durch 9-Bit-Wörter. Über den Experiment-Datenausgang A 1/2 werden die SPA-Daten blockweise (16 x 16 bit) an die Telemetrie abgegeben. Über einen weiteren Datenausgang C1 werden den WFC-Daten noch passende Kurzzeit-Maximalwerte hinzugefügt.

3. ELEKTRONIK

Das Blockschaltbild der vollständigen Elektronik im Sensor und der Elektronikbox des Experiments zeigt BILD 2. Das eigentliche Magnetometer besteht aus drei orthogonal angeordneten gleichen Sensoren (Bild 3), montiert am äußeren Ende eines der Ausleger der Sonde. Jede Sensor-Komponente enthält eine Spule (47 000 Wdgn, 0,05 mm CuL-Draht) auf einem hochpermeablen Mumetallkern (32 cm Länge, 0,6 cm Durchmesser) aus kunststoffvergossenen Drähten und einen rauscharmen Vorverstärker. Für die induzierte Spannung U_s gilt der einfache Zusammenhang $U_s = E_o \cdot H \cdot f$, wenn man ein sich sinusförmig änderndes Magnetfeld der Amplitude H und der Frequenz f annimmt. E_o ist die Empfindlichkeitskonstante in $\mu V/nT \cdot Hz$. Sie ist nach $E_o \sim w \cdot \mu_e A$ abhängig von der Windungszahl w, der effektiven Permeabilität des Kerns μ_e und dessen Querschnitt A. Bei hoher Materialpermeabilität ist μ_e in erster Näherung nur eine Funktion des Kernschlankeitsgrades, Länge l zu Durchmesser d. Mit dem Verhältnis $\mu_e \sim \left(\frac{l}{d}\right)^{1,6}$ erhält man für die Empfindlichkeit $E_o \sim w \cdot l^{1,6} \cdot d^{0,4e}$. Es erweist sich als unzuweckmäßig $\frac{l}{d} > 50 \dots 60$ zu wählen, da dann die thermisch und mechanisch bedingten Änderungen der Materialpermeabilität zu stark in E_o eingehen. Die Wahl einer hohen Empfindlichkeit allein ist nicht ausreichend für die Auflösung schwacher Felder, entscheidend ist das erzielbare Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S/N). Dazu müssen die Rauschquellen des Vorverstärkers in die Be-

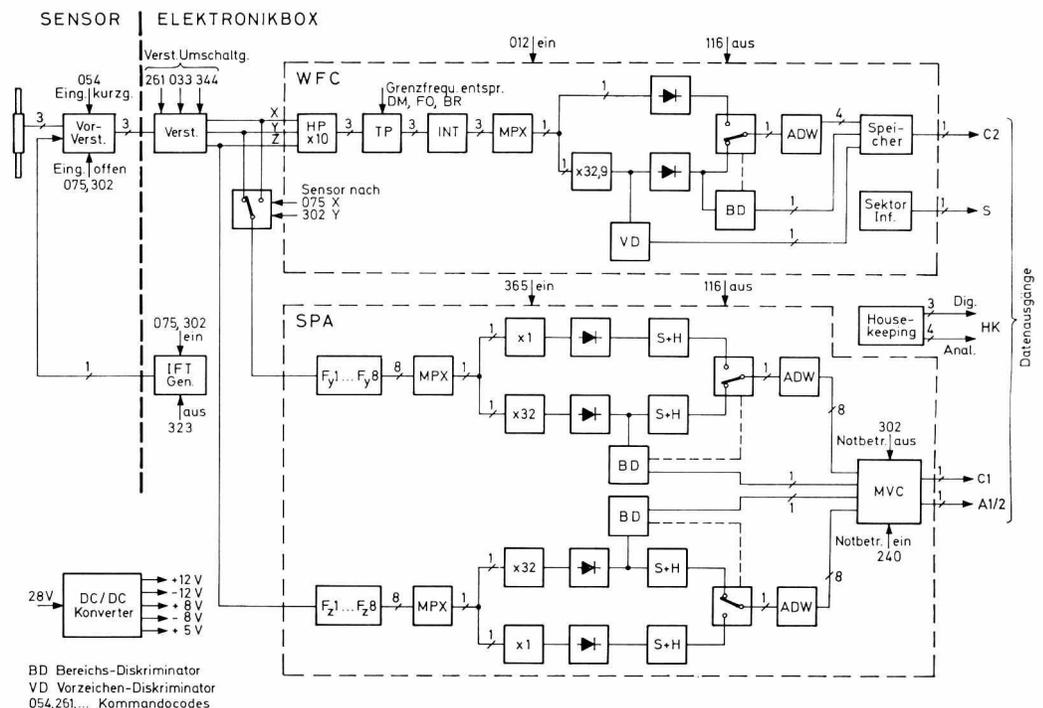


BILD 2:
Blockschaltbild der
Experimentelektronik
im Sensor und in der
Elektronikbox

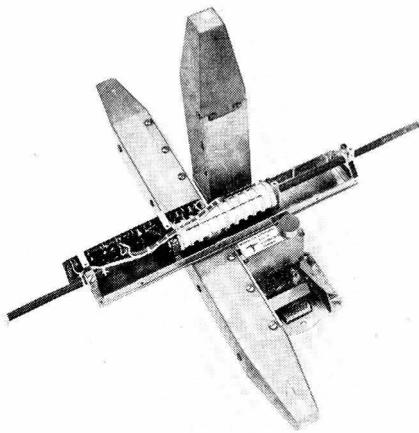


BILD 3: Sensortripel mit einer geöffneten Komponente

trachtung einbezogen werden. Diese sind durch den zur Verfügung stehenden Eingangstransistor vorgegeben. Aufgrund der Längenbeschränkung und des optimalen Schlankheitsgrades liegen die Abmessungen des Kerns ebenfalls fest. Freiheitsgrade hat man damit nur noch in der Dimensionierung der Spule, die in ihren Rauschgrößen an die vorhandenen Quellen angepaßt werden muß. Bei begrenztem Gewicht bedingt eine Erhöhung der Windungszahl eine Verminderung des Drahtdurchmessers. Die so erreichte Steigerung der Empfindlichkeit hat einen Anstieg des Gesamttausens zur Folge. Außerdem führt die Induktivität mit der unvermeidlichen Wicklungskapazität und der Eingangskapazität des Verstärkers zu einer Resonanzfrequenz, die den Meßbereich nach oben begrenzt. Bei vorgegebener Meßgrenze bestimmt sich daraus die Windungszahl, so daß nur noch der Drahtdurchmesser variiert werden kann. Eine exakte Optimierung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses läßt sich nur für eine bekannte Signalstatistik durchführen. Der Vorverstärker verwendet einen ausgesuchten rauscharmen Dual-FET 2N5520 als Differenzverstärker zusammen mit einer Konstantstromquelle 2N4867A.

Diese Anordnung hat zwar ein um den Faktor $1/3$ höheres Eingangsruschen als ein Einzeltransistor, erlaubt jedoch, die Eingangskapazität zu kompensieren. Dadurch erzielt man eine höhere Resonanzfrequenz bzw. kann eine größere Empfindlichkeit zulassen, so daß sich insgesamt ein günstigeres S/N-Verhältnis ergibt. Um den in BILD 4 gezeigten geradlinigen Frequenzgang zu erhalten, wird die Resonanzüberhöhung mit einem Dämpfungswiderstand abgeschwächt. Die erreichte Empfindlichkeit beträgt $300 \mu\text{V/nT} \cdot \text{Hz}$ am Ausgang des Verstärkers mit der Spannungsverstärkung 50. Das gleiche Bild zeigt die spektrale Rauschspannungsdichte der Sensor-Vorverstärker-Einheit bezogen auf den Eingang. Der lineare Anstieg ist bedingt durch den Spannungsabfall, den die Stromrauschquellen an der Spuleninduktivität hervorgerufen.

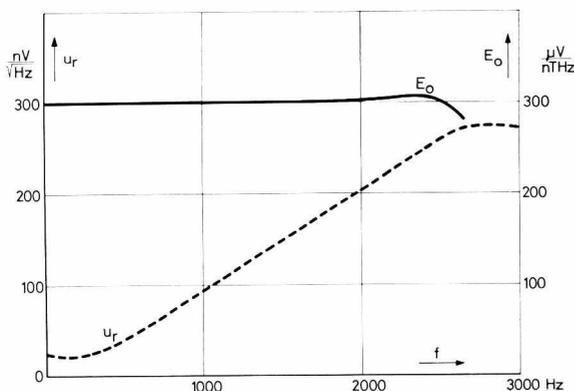


BILD 4: Empfindlichkeit E_0 und Eigenrauschen u_r der Sensor-Vorverstärker-Einheit

Zur Entwicklung und Eichung des Sensortripels wurde eine kleine Magnetfeldsimulationsanlage gebaut, in der Felder mit einer reproduzierbaren Unsicherheit von ca. $0,1\%$ bestimmt werden können. Für die Rauschmessungen stand eine doppelwandige Mumetallabschirmkammer zur Verfügung.

Die drei Sensorsignale kommen über im Ausleger geführte, abgeschirmte Kabel zu den umschaltbaren Verstärkern in der Elektronikbox. Danach spaltet sich der Signalweg auf in WFC und SPA.

Im WFC werden die Spannungen zunächst um den Faktor 10 verstärkt und dann von den umschaltbaren Tiefpässen bandbegrenzt. Es sind zweipolige Butterworth-Filter, deren Kapazitäten durch Zu- und Abschalten von Kondensatoren in Abhängigkeit von den aktuellen Data-Handling-Signalen verändert werden. Sie steuern auch die ADW-Abtastrate für die inzwischen vom Multiplexer (MPX) parallel-seriell gewandelten Signale. Wie aus den erwähnten Paarungen von Abtastrate und Grenzfrequenz hervorgeht, liegt dabei die Abtastrate stets höher als die doppelte Grenzfrequenz. Rechnungen, die den erwarteten Abfall der Feldstärkedichte mit $1/f$ und die Übertragungsfunktion der Tiefpässe berücksichtigen, ergeben, daß der Aliasingfehler durch die gewählte Überabtastung $< 10\%$ wird.

Nach den Tiefpässen durchlaufen die Signale Integratoren, d. h. einpolige Tiefpässe mit einer Grenzfrequenz von $0,05 \text{ Hz}$, die jeweils von zwei einpoligen, passiven Hochpässen mit einer Grenzfrequenz von 4 Hz eingerahmt sind. Durch die Integration wird die nach dem Induktionsgesetz erfolgte Differentiation des Signals wieder rückgängig gemacht, und mit den Hochpässen erreicht man den Anschluß an den Meßbereich des Experiments 2.

Danach werden die bisher parallel laufenden Signale im MPX mit einer Umschaltrate von etwa 8 kHz zeitseriell angeordnet. Sie ist erforderlich, damit man auch für die Abtastrate von 300 Hz beim Berechnen des Vektors von quasi-gleichzeitig gemessenen Werten der drei Komponenten ausgehen kann.

Vom MPX ab teilt sich der Weg bis zum ADW erneut, um die erwähnten zwei Teilbereiche zu erhalten. BILD 5 gibt für diese Verzweigungsstelle den Amplitudengang des WFC-Analogteils über der Frequenz wieder, wobei die Emp-



BILD 5: Empfindlichkeit des Wellenformkanals

findlichkeit E_0 des Sensors und seine Differentiation einbezogen sind. Insgesamt führt dies zur Dimension mV/nT der Empfindlichkeit. Die umschaltbare Verstärkung ist dabei zu 10 angenommen. Deutlich ist der Einfluß der vier Tiefpässe und zumindest am Verlauf der gestrichelten Asymptoten der Bereich zu sehen, in dem Integration und Differentiation sich aufheben und eine frequenzunabhängige Empfindlichkeit existiert.

Nach den Schaltungen zur Bereichserweiterung, bestehend aus Verstärker, Gleichrichtern, Vorzeichen- und Bereichsdriskriminator, folgt der ADW. Er gibt während der Zeit, in der ein auf die Meßspannung aufgeladener Kondensator

sich nach einer Exponentialfunktion gegen eine Referenzspannung entlädt, einen Torimpuls ab. Die Anzahl von 1 MHz-Impulsen, die während der Torzeit gezählt werden, entspricht dem Logarithmus der Meßspannung bzw. Feldstärke.

Der SPA erhält Signale aus zwei Komponenten des Sensors, wobei die Ekliptikkomponente (x oder y) durch Kommandos gewählt werden kann. Die beiden Signale werden bis nach der Analog-Digital-Wandlung getrennt, aber gleichartig verarbeitet.

Jeder ADW erhält im Abstand von 60 μ s aus einem der beiden Zweige mit unterschiedlicher Verstärkung, die wieder der Meßbereichserweiterung dienen, ein gleichgerichtetes Signal, das nach einem festgesetzten Schema vom MPX jeweils einem der acht Filter entnommen wird. Um den Aliasingfehler klein zu halten, wird dabei das Filter für die höchsten Frequenzen alle 120 μ s, das nächste alle 240 μ s, das übernächste alle 480 μ s usw. abgetastet. Unter denselben Voraussetzungen wie beim WFC liegt der Aliasingfehler für das Quadrat der Filterausgangsspannungen je nach Filter zwischen 0,1 und 10 %.

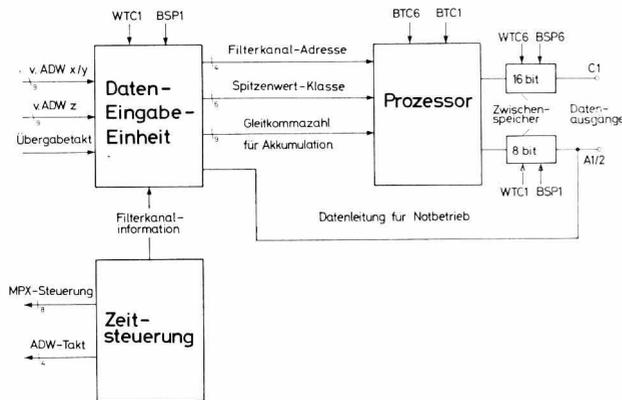


BILD 6: Blockschaltbild des Mittelwertrechners

Angesteuert wird der MPX durch den Mittelwertrechner (MVC), dessen Blockschaltbild BILD 6 zeigt. Weiterhin erhält er die 8-Bit-Wörter beider ADW und die Bereichsbits. Die Daten-Eingabe-Einheit paßt die übernommenen Daten mit Hilfe eines eigenen Mikroprogrammsteuerwerks für die Rechnungen im Prozessor an. Aus den 9 Bits wird ein aus 6 Bits bestehender Spitzenwert gebildet und ein 9-bit-Gleitkommazahl errechnet. Sein vierstelliger Exponent ist für die stellenrichtige Addition verantwortlich und die fünfstellige Mantisse stellt die Zahlenfolge des quadrierten Abtastwerts dar, die mit einer festverdrahteten Quadrierlogik berechnet wird. Zudem wird die zugehörige Filterkanaladresse an den Prozessor weitergegeben. Dort erledigen festverdrahtete Mikroprogramme für jeden der 16 Filterkanäle

- das ständige Aufsummieren der Gleitkommazahlen in ein 50-bit-Register,
- die Maximumsuche für die laufende Beobachtungszeit,

- die Reduktion der Endsummen nach Ablauf der Mittelungszeit in Exponent und Mantisse, wobei der Exponent den Abstand der gefundenen führenden „1“ von der sich aus Mittelungszeit und Filterordnungszahl ergebenden höchstmöglichen führenden „1“ angibt und die Mantisse die darauffolgenden Bits darstellt, und
- das Laden der Zwischenspeicher mit Spitzenwerten und den reduzierten Quadratsummen für den Abruf zur Telemetrie.

Ein weiteres Mikroprogramm zählt, wie häufig der Filterkanal 1z aufgetreten ist. Dieser Wert ist auch Bestandteil des A 1/2-Datenblocks und dient zur Berechnung der Mittelwerte. Die von der Sonde gelieferten Telemetrieakte (BSP 1/6, WTC 1/6 und BTC 1/6), deren zeitliche Zuordnung sich in Abhängigkeit von Telemetrieformat und Übertragungsrate ändert, bestimmen weitgehend den rechtzeitigen Einsatz der einzelnen Mikroprogramme und den Datentransfer zur Sonde. Die ständigen Arbeitstakte für den MVC betragen 1 MHz und 333 kHz. Im Fall einer Fehlfunktion des MVC kann im „Notbetrieb“ die Daten-Eingabe-Einheit und der Prozessor umgangen werden. Dann werden wenige digitalisierte Abtastwerte in zufälliger Reihenfolge mit zugehöriger Filterkanaladresse direkt zum A 1/2-Datenblock zusammengefaßt.

Außerdem sind noch vier weitere Schaltungseinheiten in BILD 2 eingetragen: der Inflight-Test-Generator, der auf Kommando ein Testsignal zur Kontrolle der Signalverarbeitung in WFC und SPA abgibt; die Schaltung „Sektor-Information“, die die zeitliche Zuordnung zwischen den WFC-Abtastwerten und der Sondenlage mißt; die „House-keeping“-Elektronik, mit der Relaisstatus, MVC-Status und Stromverbrauch überwacht werden; der DC/DC-Konverter, der aus der 28 V-Bordspannung die experimentinternen Betriebsspannungen erzeugt.

4. DATENAUSWERTUNG

Bei der Datenauswertung am Boden werden mit Hilfe der Kalibrierungskurven die gemessenen SPA-Mittelwerte für jeden Kanal in die Einheit nT/\sqrt{Hz} für die Wurzel aus der spektralen Leistungsdichte (power spectral density) umgerechnet. Entsprechendes geschieht mit den Maximalwerten. Die sich ergebenden Werte werden als 8-Sekunden-Mittelwerte (Wurzeln aus den Mittelwerten der Quadrate) über jeweils eine Stunde hinweg dargestellt, und zwar getrennt für die x/y- und z-Komponenten. Diese Darstellungen dienen zur ersten Auswahl physikalisch interessanter Datenintervalle, für die zur Weiterverarbeitung detaillierte Ausdrücke angefertigt werden können.

Die WFC-Daten werden mit Hilfe einer Kalibrierungstabelle in Magnetfeldwerte in nT umgewandelt, wobei ein für das Plateau der WFC-Empfindlichkeitskurve (BILD 5) charakteristischer Eichfaktor benutzt wird. Die Komponenten werden dann in solar-ekliptische kartesische Koordinaten umgerechnet und für 1-Minuten-Intervalle grafisch dargestellt. Wegen der großen Datenmengen werden die „Plots“ routinemäßig mit Hilfe eines Mikrofilmplotters hergestellt.