

Bundesministerium für Forschung und Technologie

Forschungsbericht W 77-25

**Luft- und Raumfahrt
- Weltraumforschung/Weltraumtechnologie -**

**Aufbau und Betrieb
des Induktionsspulen-Magnetometer-Experimentes
der Sonnensonde HELIOS**

von

G. Dehmel

Institut für

Nachrichtentechnik

und

F. M. Neubauer

Institut für Geophysik

und Meteorologie

Technische Universität Braunschweig

Dezember 1977



Bundesministerium für Forschung und Technologie

Forschungsbericht W 77-25

Luft- und Raumfahrt
- Weltraumforschung/Weltraumtechnologie -

Aufbau und Betrieb
des Induktionsspulen-Magnetometer-Experimentes
der Sonnensonde HELIOS

von

Dr.-Ing. Günther Dehmel
Institut für
Nachrichtentechnik

Prof.Dr. Fritz Manfred Neubauer
Institut für Geophysik
und Meteorologie

der Technischen Universität Braunschweig

Institutsleiter:

Prof.Dr.-Ing. Helmut Schönfelder

Prof.Dr. Walter Kertz

April 1977

1. Berichtsnummer BMFT-FB W 77 - 25		2. Berichtsart Abschlußbericht		3. Weltraumforschung/ Weltraumtechnologie	
4. Titel des Berichts Aufbau und Betrieb des Induktionsspulen-Magnetometer- Experimentes der Sonnensonde HELIOS					
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) Dehmel, Günther Neubauer, Fritz Manfred				6. Abschlußdatum April 1977	
8. Durchführende Institution (Name, Adresse) Institut für Nachrichtentechnik und Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig Mühlenpfordtstrasse 23 3300 Braunschweig				7. Veröffentlichungsdatum Dezember 1977	
				9. Ber.Hr./Auftraggeber	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Postfach 120370 5300 Bonn 12				10. Förderungskennzeichen BMFT-WRS 0107/ GFW-01 H 3004	
				11. Seitenzahl 75	
				13. Literaturangaben 34	
				14. Tabellen 7	
				15. Abbildungen 20	
16. Zusätzliche Angaben					
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)					
18. Kurzfassung (Gliederung s. Hinweise) Der Bericht beschreibt wissenschaftliche Zielsetzung, Wirkungsweise, elektronischen und mechanischen Aufbau und Betrieb des für die Sonnensonde HELIOS entwickelten Induktionsspulen-Magnetometer-Experimentes. Die beiden Flugeinheiten F1 und F2 in HELIOS 1 und 2 liefern seit dem Start im Dez. 1974 bzw. Jan. 1976 Meßdaten. Das Experiment untersucht die magnetische Komponente elektromagnetischer Wellen, die sich im interplanetaren Plasma ausbreiten. Von seinem Wellenformkanal (WFC) werden die Zeitfunktionen von Kurzzeitschwankungen der magnetischen Felder in den drei Raumrichtungen von 4 Hz bis max. 128 Hz, vom Spektralanalysator (SPA) Frequenzspektren der Feldkomponenten in der Ekliptik und senkrecht dazu in 8 Frequenzbändern zwischen 4,7 und 2200 Hz gemessen. In den Sensorkomponenten werden der Änderungsgeschwindigkeit der Felder proportionale elektrische Spannungen induziert. Nach Verstärken werden sie im WFC durch Tiefpässe bandbegrenzt. Integriertoren in F1 liefern Ausgangssignale $\sim H(t)$ zum Digitalisieren und Übertragen, in F2 wurden die Integriertoren weggelassen und deshalb Signale $\sim H(t)$ übertragen. Der SPA enthält 2x8 Bandfilter, von deren Ausgangsspannungen in einem Digitalrechner quadratische Mittelwerte und Spitzenwerte für aneinander anschließende Zeitintervalle wählbarer Dauer berechnet werden. Die hohe Rate und große Menge der anfallenden Daten macht eine anpassungsfähige und wirkungsvolle Datenreduktion notwendig: Die WFC-Daten werden zwischengespeichert und nur die interessanten Teile mit einem Bruchteil der Speichereinleserate übertragen. Der SPA-Datenfluß ist der Länge der Mittelungszeitintervalle umgekehrt proportional und wird für kontinuierliche Übertragung an die stark schwankende Kapazität der Telemetrie automatisch angepaßt.					
19. Schlagwörter Induktionsspulenmagnetometer-Experiment Raumfahrt-Experiment Sonnensonde HELIOS 1/2					
20.		21.		22. Preis DM 15.75 *	

* Vertrieb und Verkauf nur durch ZLDI, Postfach 860880, 8000 München 86

1. Report No. BMFT-FB W 77-25	2. Type of Report Final Report	3. Space Research/ Space Technology
4. Report Title Design and operation of the search-coil magnetometer experiment of the solar probe HELIOS		
5. Author(s) (Family Name, First Name(s)) Dehmel, Günther Neubauer, Fritz Manfred		6. Report Date April 1977
8. Performing Organization (Name, Address) Institut für Nachrichtentechnik und Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig Mühlenpfordtstrasse 23 3300 Braunschweig		7. Publication Date December 1977
12. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Postfach 120370 5300 Bonn 12		9. Originator's Report No.
16. Supplementary Notes		10. BMFT-Reference No. BMFT-WRS 0107/ GFW-01 H 3004
17. Presented at (Title, Place, Date)		11. No. of Pages 75
18. Abstract		13. No. of References 34
The report describes scientific objectives, functioning, electrical and mechanical design and operation of the HELIOS Search-Coil Magnetometer Experiment. Both flight units F1 and F2 on HELIOS 1 and 2 have been delivering measuring data since the launches in December 1974 and January 1976, respectively.		14. No. of Tables 7
The experiment investigates the magnetic component of electromagnetic waves in the solar wind from 0.3 to 1.0 AU. By means of its Waveformchannel (WFC) the rapid variations of the magnetic field are measured in 3 orthogonal directions from 4 to 128 Hz. The Spectrum Analyzer (SPA) observes power spectral density and peak values on the field components in the ecliptic plane and perpendicular to it in the range from 4.7 to 2,200 Hz. After amplification they are band-limited by low pass filters in the WFC and analog integrators give output signals $\sim H(t)$ for digitization and transmission. In the case of F2 the integrators were replaced by amplifiers and signals $\sim H(t)$ are transmitted. The SPA contains 2 sets of 8 bandpass filters. The digitized output voltages are fed into a computer which calculates squared mean values and peak values for adjacent time intervals of programmable durations.		15. No. of Figures 20
Because of the high rate and large amount of data produced by this experiment an adaptive and effective data reduction has to be applied:		
The WFC-data is fed into an on-board memory at a rapid rate and later only the most interesting parts are slowly read out and transmitted. The SPA data flow is inversely proportional to the duration of the averaging time intervals and is automatically adapted to the telemetry capacity enabling a continuous transmission.		
19. Keywords search-coil magnetometer experiment space experiment solar probe HELIOS 1/2		
20.	21.	22. Price DM 15.75 *

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	6
2. Wissenschaftliche Zielsetzung	11
3. Wirkungsweise, Meßbereiche und Daten	14
3.1 Sensor und Vorverstärker	15
3.2 Wellenformkanal	16
3.3 Spektralanalysator	27
4. Elektronischer und mechanischer Aufbau	36
4.1 Sensortripel	37
4.2 Elektronikbox	43
5. Test- und Flugbetrieb	51
5.1 Kommandos und Steuersignale	51
5.2 Housekeeping-Daten	55
5.3 Funktionstests	57
5.4 Umwelttests	62
5.5 Flugbetrieb	64
6. Ausblick	68
7. Zusammenfassung	69
8. Schlußbemerkungen	71
9. Schrifttum	72

1. Einleitung

Für das deutsch-amerikanische Raumfahrtprojekt der Sonnen-
sonden HELIOS 1 und 2 haben die Institute für Geophysik und
Meteorologie (IGM) und für Nachrichtentechnik (IFN) der Tech-
nischen Universität Braunschweig gemeinsam das Experiment 4
- Induktionsspulen-Magnetometer<sup>+) - beigesteuert. Hierbei er-
gaben sich im wesentlichen die folgenden Aufgaben:</sup>

1. Aufstellen der wissenschaftlichen Zielsetzung
2. Konzipieren des Experimentes
3. technische Entwicklung und Herstellung
4. Vorbereitung des Experimentbetriebes und
5. Datenauswertung

Die Aufgaben 1 und 5 sind vorwiegend vom IGM, die Aufgaben
2 und 4 vom IGM und IFN gemeinsam und die Aufgabe 3 ist
vom IFN übernommen worden. Wegen der engen Wechselbeziehun-
gen zwischen diesen Aufgabenstellungen konnten sie jedoch
weder in strenger zeitlicher Reihenfolge noch nach strik-
ter Zuständigkeit gelöst werden. Vielmehr war gerade die
ständige enge Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen in den bei-
den genannten Instituten und ihre Unterstützung durch das
Institut für Datenverarbeitungsanlagen (IDA) Kennzeichen
der Beteiligung der TU Braunschweig an diesem Projekt. In
dem vorliegenden Abschlußbericht über das Forschungsvor-
haben HELIOS-Experiment 4 sollen nach einer einleitenden
Rückschau auf seine Vorgeschichte der Aufbau und Betrieb
des Experimentes beschrieben werden. Hierzu werden die
schon an anderen Stellen gebrachte wissenschaftliche Ziel-
setzung und Wirkungsweise wiederholt. Darüber hinaus sind

<sup>+) Vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (früh-
her Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft) in den
Jahren 1968 - 1976 gefördertes Forschungsvorhaben "Entwick-
lung, Fertigung und Tests des Induktionsspulen-Magnetome-
ters für die Sonden HELIOS".</sup>

im Abschnitt 3 "Wirkungsweise" jetzt alle Einzelheiten über den Eichzustand und die Meßauflösung der beiden Flugeinheiten F 1 in HELIOS 1 und F 2 in HELIOS 2 zusammengestellt. Im Abschnitt 4 "Elektronischer und mechanischer Aufbau" ist das wichtigste aus der Entwicklungsphase der Hardware enthalten. Der Abschnitt 5 "Test- und Flugbetrieb" enthält nach einer Übersicht über den Datenfluß zwischen Sonde und Experiment für seine Steuerung auch Kommentare zu allen Tests nach der Fertigstellung der Experimenteinheiten. Der Abschnitt 6 "Ausblick" ist ein kurzer Kommentar zum Stand der Datenauswertung und im folgenden Literaturverzeichnis sind schließlich alle im Zusammenhang mit diesem Experiment erschienenen Berichte zusammengestellt.

Während das IGM durch seine Mitarbeit an früheren Weltraumprojekten von Anfang an Verbindung zu dem Projekt "Sonnensonde" hatte, bekam das IFN Ende 1967 zum ersten Mal Berührung damit. Auf einer von ihm angeregten Zusammenkunft der Experimentatoren in Braunschweig wurden die Technik der Raumsonde und die Wirkungsweise ihrer physikalischen Experimente, soweit sie damals bekannt waren /1, 2/, insbesondere aber die Art der Meßwerterfassung und Datencodierung bei den Experimenten diskutiert. Mitarbeiter des IFN erläuterten die allgemeinen Prinzipien, Verfahren und Möglichkeiten der Redundanz- und Informationsreduktion im Hinblick auf ihre Anwendung bei den Sonnensonden-Experimenten. Denn damals war noch unsicher, ob (die schließlich verwendeten) Telemetrie-Bitraten der Größenordnung kbit/s zur Verfügung stehen würden. Oft wurde nur von etwa 100 bit/s gesprochen, was einschneidende Veränderungen für die ganze Sonde bedeutet hätte. Zur bitsparenden speziellen Codierung der Digitaldaten einiger Experimente wurden konkrete Vorschläge ausgearbeitet /3/. Erst später konnten dann neben den beim Entwurf der Codierung verwendeten nachrichtentheoretischen Gesichtspunkten auch einige zusätzliche praktische Forderungen berücksichtigt werden, die dem Ziel möglichst weitgehender Reduktion teilweise ent-

gegenständen. Die Experiment-Datenstruktur (Zahl der Bits je Wort, Wortgruppengröße, Blockgröße usw.) mußte an diejenige der Sonde und besonders an deren im Verlauf der Mission sehr unterschiedliche Bitraten angepaßt werden, es mußte für einen zeitlich gleichförmigen Datenfluß aus jedem Experiment gesorgt werden, und auch dafür, daß bruchstückweise empfangene Daten weitgehend interpretierbar sind. Daneben beteiligte sich das IFN an der bis Mitte 1968 bestehenden "Studiengruppe Sonnensonde" der Arbeitsgemeinschaft für Weltraumforschung und der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) zur Beratung in Fragen der Daten-Codierung und -Verarbeitung innerhalb der Sonde /4, 5/.

Ab Mitte 1968 übernahm das IFN zunächst technische Einzelaufgaben im Zusammenhang mit dem vom IGM neben dem Förster-sonden-Magnetometer auch vorgeschlagenen Induktionsspulenmagnetometer-Experiment zum Beobachten des schnell veränderlichen Anteils des interplanetaren Magnetfeldes /6, 7, 8/. Auf dem "2.Joint Mission Definition Group Meeting" (JMDGM) im Oktober 1968 wurde die Ergänzung der Reihe der deutschen Experimente durch amerikanische diskutiert, die prozentualen Anteile aller Experimente an dem ihnen erlaubten Gesamtgewicht, Stromverbrauch und Datenfluß festgelegt und die erste Kurzbeschreibung der Experimente gegeben. Für das Induktionsspulenmagnetometer wurde damals zwar noch ein Sensor mit drei 400-mm-Luftspulen angegeben, aber bereits das beabsichtigte vorübergehende Speichern und spätere Übertragen gemessener Wellenformdaten hoher Auflösung für entsprechend kurze Zeitabschnitte nach Erkennen einer magnetischen Stoßwelle beschrieben /9/. Bei der Präsentation der für die Sonde schließlich vorgesehenen 7 deutschen und 3 amerikanischen aktiven Experimente und deren endgültiger Auswahl auf dem "3.JMDGM" im Februar 1969 im Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., wurde für das Experiment 4 - Search Coil Magnetometer - ein inzwischen als günstiger und realisierbar erkannter triaxialer

Sensor mit Mumetallstäben vorgeschlagen, ähnlich den entsprechenden Sensoren der OGO-Stelliten, nur mit einer von 1 auf etwa 3 kHz erhöhten Resonanzfrequenz.

Die Arbeiten zwischen der Experimentauswahl im Frühjahr 1969 und der Auswahl des Sonden-Hauptauftragnehmers (HAN) Anfang 1970 bestanden in der weiteren Diskussion der wissenschaftlichen Zielsetzung, der Entwicklung des Sensors, der Untersuchung von Schaltungen für die Datenverarbeitung im Experiment und der Diskussion der technischen Eigenschaften von Sonde und Experiment. Die wissenschaftlichen Zielsetzungen der Experimente und ihre Abstimmung aufeinander wurden vor allem auf dem HELIOS-Helgoland-Symposium im Juni 1969 behandelt und durch Diskussionen über mögliche Bahnkurven und Einzelheiten der Sonden-Betriebsarten, Datenübertragungsraten, Meß- und Zeitauflösungen im Verlauf der Mission sowie Speicherung der "Black-out"-/Stoßwellen-Daten und der "dynamischen Schockerkennung" auf den Experimentatorensitzungen bis um die Zeit der Auswahl des HAN präzisiert. Das Ziel der E 4-Sensor-Entwicklung war ein Dreiachsensensor mit einer Empfindlichkeit ähnlich der der OGO-Sensoren, aber mit einer Grenzfrequenz von etwa 3 kHz. Sein Rauschen sollte möglichst kleiner als das der OGO-Sensoren sein und das Gewicht etwa 1 kg betragen. Einige um die Jahreswende 1969/70 existierende wichtige grundsätzliche Fragen mußten bis zur Auswahl des HAN offenbleiben: E 4-Sensor auf axialem (Antennenmast) oder radialem Ausleger, Erfüllbarkeit der durch die Sensor-Grenzempfindlichkeit gegebenen Forderungen an die elektromagnetische Reinheit der Sonde und das Thermalkonzept des Sensors. Das Untersuchen elektronischer Schaltungen (Verstärker, Bandfilter mit großem Dynamikbereich, Analog-Digital-Wandler mit nichtlinearer Kennlinie, digitaler Mittelwertrechner, Datenspeicher) für die Datenverarbeitung im Experiment diente dazu, die Schwierigkeiten bei der Realisierung des Experimentes unter

den gegebenen Randbedingungen kennenzulernen und Zahlenwerte über die gegenseitigen Anforderungen an Sonde und Experiment zu erhalten.

Nach der Auswahl des HAN im April 1971 wurde das Interface zwischen der Sonde und den Experimenten (Organisation der Digitaldaten und deren Übernahme zur Sonde, Kommando- und Housekeepingdaten-Übertragung, Datenspeicherung in der Sonde, Borduhr, Telemetrierahmen, Einzelheiten der Stromversorgung und Verkabelung, Unterbringen der Boxen in der Sonde) festgelegt, und damit begann die Phase der endültigen Experiment-Entwicklung. Als Ausschreibungsunterlage wurde vom IFN eine ausführliche technische Beschreibung des Experimentes (Stand Ingenieurmodell mit laufenden Ergänzungen) /10/ zusammengestellt und im Juli 1971 die Firma Dornier AG (später Dornier System GmbH), Friedrichshafen, mit der Vollendung der Entwicklung und der Herstellung des Experimentes beauftragt. In den Jahren 1971 bis 1974 entstanden dort ein Labormodell (LM), das Ingenieurmodell (EIM), ein Prototyp (PT) und zwei Flugeinheiten (F 1 für HELIOS 1 und F 2 für HELIOS 2). Außerdem wurden zwei Experiment-Testgeräte (ETE 1 und ETE 2) gebaut. Als letzter Auftrag wurde schließlich 1975 von Dornier noch der PT zur F 2-Ersatzeinheit aufgerüstet. Wirkungsweise und Aufbau der zustande gekommenen Experimenteinheiten sind teilweise bereits beschrieben worden /8, 11, 12, 13/.

2. Wissenschaftliche Zielsetzung

Das Ziel dieses Induktionsspulenmagnetometer-Experimentes ist das Beobachten der magnetischen Komponente elektromagnetischer Wellen im interplanetaren Plasma und von "eingefrorenen" vom Plasma mitgeführten Elektronenstrukturen. Der Frequenzbereich der Messungen beginnt bei der oberen Grenzfrequenz von 4 Hz des Förstersonden-Magnetometers E 2 /14/ und erstreckt sich bis 2,2 kHz. Wegen der geringen Datenübertragungsrates ist es notwendig, die anfallende Datenmenge zu reduzieren. Das wird erreicht mit einem Spektralanalysator (SPA), der kontinuierliche Messungen im gesamten Frequenzbereich ermöglicht, da er dabei über aufeinander folgende Zeitabschnitte und Frequenzbänder mittelt. Auch die Messungen mit dem Wellenformkanal (WFC) führen trotz ihrer hohen Zeitauflösung zu einer weiterverarbeitbaren Datenmenge, da Ergebnisse nur für besonders ausgewählte kurze Zeitabschnitte und mit der gerade notwendigen und möglichen Bandbreite übertragen werden. Die SPA-Messungen überdecken den gesamten Frequenzbereich bis herauf zur Elektronengyrofrequenz, deren erwartetes Maximum zu der genannten oberen Grenzfrequenz des Experimentes von 2,2 kHz führte. In einem heißen Magnetoplasma wie dem des solaren Windes existieren ja im wesentlichen zwei Frequenzbereiche, in denen Wellenausbreitung möglich ist. Der untere Bereich reicht von 0 Hz bis etwa in die Nähe der Elektronengyrofrequenz, wenn man von den "Bernstein-Moden" absieht. Der obere Bereich beginnt erst in der Nähe der Elektronenplasmafrequenz oberhalb etwa 10 kHz. Die WFC-Messungen werden je nach Missionsabschnitt bis zu Grenzfrequenzen von 24, 64 oder maximal 128 Hz durchgeführt. Diese Frequenzen wurden gewählt, um Skalenlängen von einem Protonengyrationsradius $V_A/\omega_{gi} = c/\omega_{pi}$ auch in Sonnennähe noch mit mehreren Punkten belegen zu können. Dabei ist V_A die Alfvéngeschwindigkeit, ω_{gi} die Protonengyrofrequenz und ω_{pi} die Protonenplasmafrequenz.

Die in diesem Frequenzbereich beobachteten Plasmawellen können einmal in großem Abstand von der Sonde entstanden sein. In diesem Fall lassen die Meßergebnisse Schlüsse auf die Ausbreitungseigenschaften des Plasmas für diese Wellen einschließlich ihrer Dämpfung und Anfachung zu. Zum anderen können die Wellen auch direkt im Entstehungsgebiet angetroffen werden. Hierbei werden die Plasmaeigenschaften identifizierbar, die das Entstehen der Wellen begünstigen. Quellgebiete sind im allgemeinen Gebiete mit instabilen Plasmaverteilungen. Sie können etwa in der Nähe der Sonne liegen. Bei Annäherung an die Sonne wird ein immer breiteres Frequenzband im genannten 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 Massengeschwindigkeiten, Temperaturen und Dichten einander durchsetzen. Schließlich sind die Übergangsbereiche von Plasmadiskontinuitäten für die instabile Wellenerzeugung sehr aufschlußreich, da die durchweg gleichzeitig auftretenden starken Änderungen des Gleichmagnetfeldes auf starke Stromdichten in der Diskontinuität schließen lassen. Ein weiterer Mechanismus für das Entstehen "hochfrequenter" Wellen ist schließlich die nichtlineare Kopplung von niederfrequenten Wellen. Solche nichtlinearen Welleneffekte bestimmen ja auch die Struktur von stoßfreien Stoßwellen. Diese Stoßwellen stellen eines der interessantesten Probleme der Plasmaphysik dar. Die vorgeschlagenen Mechanismen für ihre Struktur beinhalten eine große Zahl von linearen und nichtlinearen Instabilitäten, bei denen zum Teil elektromagnetische Wellen auftreten. Messungen der magnetischen Fluktuationen sind daher ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel. Sein Wert wird noch dadurch hervorgehoben, daß Stoßwellen bei einem Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck ≈ 1 wie im solaren Wind bisher theoretisch kaum verstanden werden. Aus den beiden

letzten genannten Punkten ergibt sich ein Meßprogramm für dieses und andere Experimente an Bord von HELIOS, die sogenannte "shock-mode", bei dem durch einen Ereignisdetektor interessante Vorgänge, z.B. auch Stoßwellen, erkannt werden /14/ und deren Daten vom WFC für die schon erwähnten kurzen Zeitintervalle in einen Speicher eingelesen und später übertragen werden.

3. Wirkungsweise, Meßbereiche und Daten

Eine Übersicht über die Anordnung der wichtigsten elektronischen Funktionseinheiten des Experimentes, die seine Meßbereiche und Meßauflösungen in Amplitude, Frequenz und Zeit bestimmen, gibt Bild 1.

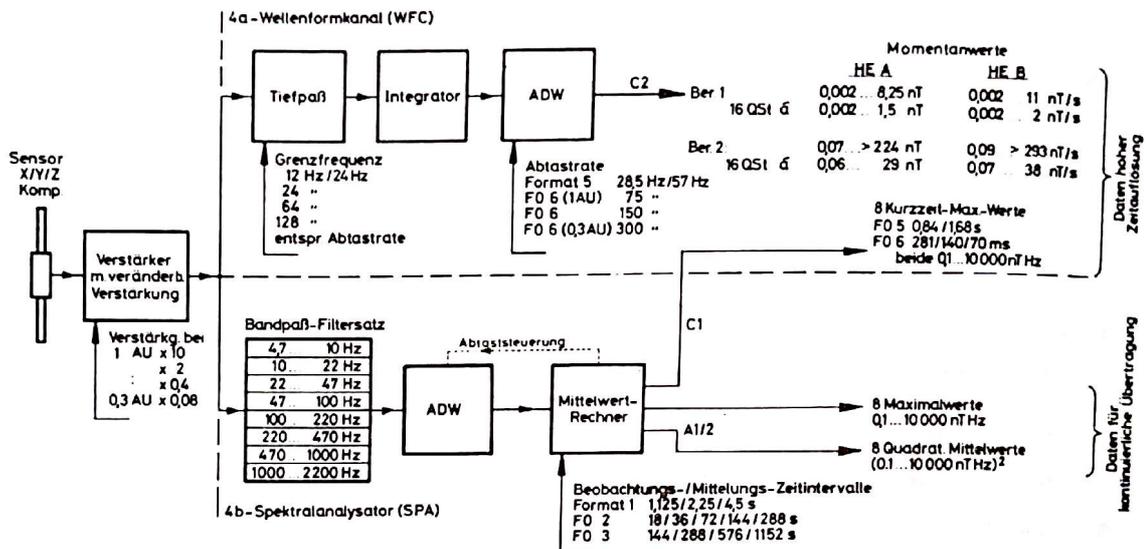


Bild 1 Funktionsblöcke mit Meßbereichen und Meßdaten

In diesem Bild ist der vom Sensor ausgehende Signalfluß und seine Aufteilung auf den WFC und den SPA angedeutet. Durch die dargestellte Einwirkungsmöglichkeit auf verschiedene Funktionseinheiten mit Experiment-Kommandos oder Telemetrie-Signalen der Sonde können Bereiche und Auflösung umgeschaltet werden. Dann ergeben sich die angegebenen Zahlenwerte für die Bereiche und Auflösungen der Magnetfeld-Meßdaten^{+) , die über die Experiment-Datenausgänge A 1/2, C 1 und C 2 an das Telemetriesubsystem der Sonde abgegeben werden. Mit Hilfe des Bildes 1 soll zunächst die allgemeine Wirkungsweise des Experimentes erklärt werden.}

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

3.1 Sensor und Vorverstärker

Veränderliche Magnetfelder induzieren in den Spulen der drei senkrecht aufeinander stehenden Sensorkomponenten x, y und z Spannungen, die der zeitlichen Änderung der Felder oder dem Produkt Magnetfeldstärke x Frequenz proportional sind. Die Resonanzfrequenz $f_r \approx 2,7$ kHz der Sensoren, bestimmt durch die Induktivität der Spulen, ihre Eigenkapazität und die Eingangskapazität des rauscharmen Vorverstärkers in jeder Komponente, begrenzt den Meßfrequenzbereich nach oben. In Bild 2 ist die Empfindlichkeit der Sensor-Vorverstärkereinheit E_o (z.B. der Scheitelwert der sinusförmigen Ausgangsspannung bezogen auf das Produkt Scheitelwert x Frequenz eines stationären sinusförmigen Wechselmagnetfeldes) in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Außerdem ist in dieses Bild eingetragen die frequenzabhängige Spannungsdichte des Sensor-Vorverstärker-Eigenrauschen

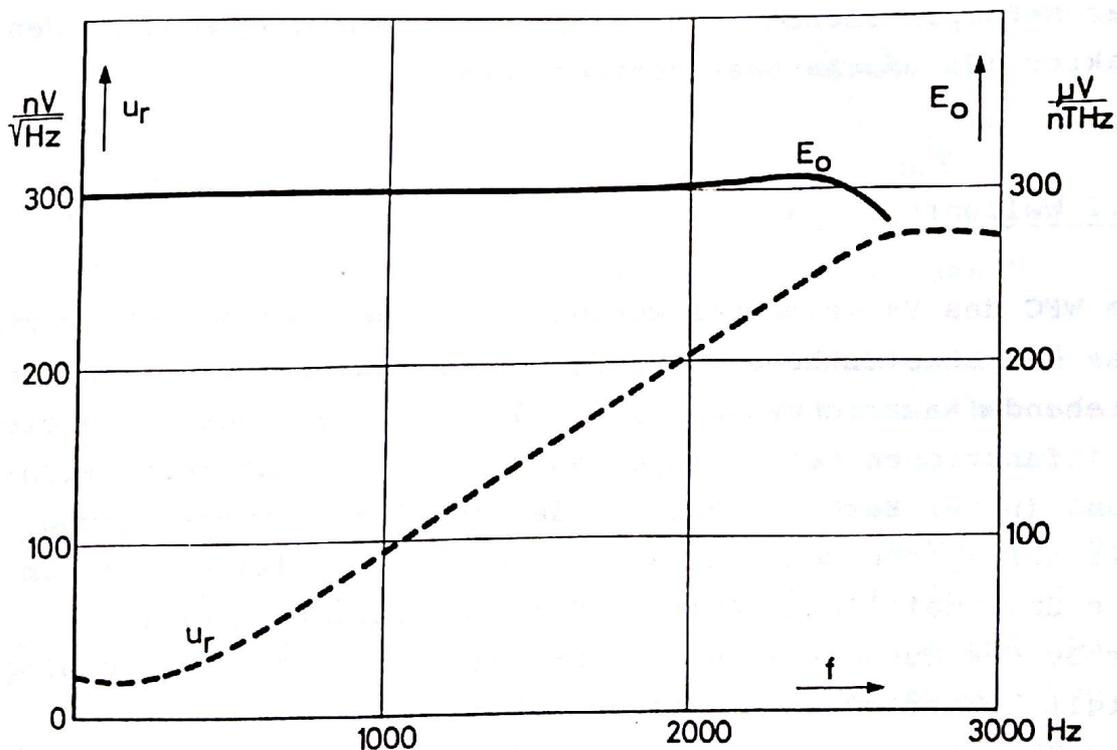


Bild 2 Empfindlichkeit E_o und Eigenrauschen u_r der Sensor-Vorverstärker-Einheit in Abhängigkeit von der Frequenz

schens bezogen auf den Vorverstärker-Eingang. Bei der Resonanzfrequenz ist bereits die Empfindlichkeit gegenüber der bei tiefen Frequenzen merklich abgesunken und das Rauschen auf den höchsten Wert gestiegen. Die besten Werte von Sensorempfindlichkeit und Eigenrauschen erreicht man durch eine verhältnismäßig komplizierte Optimierung bei gegebenem zulässigen Gewicht und geforderter Grenzfrequenz des Sensors.

Nach der Vorverstärkung im Sensor selbst gelangen die Signale in Verstärker mit durch Kommandos umschaltbarer 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 Erdbahn- bis Sonnen-Nähe (Entfernung Sonde - Sonne = 1...0,3 AE) 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 Meßamplitudenbereich des Experimentes insgesamt um den Faktor 125 umschaltbar gemacht worden.

3.2 Wellenformkanal

Im WFC des Experimentes werden durch Abtasten Momentanwerte des Magnetfeldstärke-Verlaufs in drei senkrecht aufeinander stehenden Raumrichtungen x, y und z gewonnen, aus denen die Zeitfunktionen des Betrages der Feldstärke und ihrer Richtung (unter Berücksichtigung der ständigen Sensordrehung mit der spinnenden Sonde) rekonstruiert werden können. Um die unvermeidlichen Abtastfehler (Aliasingfehler) in der Größe des Quantisierungsfehlers zu halten, sind dem Analog-Digital-Wandler (ADW) frequenzbandbegrenzende Tiefpässe vorgeschaltet, deren umschaltbare 3-dB-Grenzfrequenzen 12, 24, 64 oder 128 Hz für die vorkommenden ADW-Abtastfrequenzen 28,5 75, 150 und 300 Hz verwendet werden. Zwischen den

Tiefpässen und dem ADW werden außerdem noch Integratoren benutzt, um die noch der Magnetfeld-Änderungsgeschwindigkeit $\dot{H}(t)$ proportionalen Tiepaß-Ausgangsspannungen in Eingangsspannungen des ADW umzuformen, die dem Magnetfeldstärke-Zeitverlauf $H(t)$ selbst proportional sind.

Den durch die Tiefpässe, die Integratoren und zwei Hochpaß-Koppelglieder vor und nach den Integratoren bestimmten Frequenzgang der Empfindlichkeit des WFC der Flugeinheit 1 zeigt Bild 3. Hier ist aufgetragen die Eingangs-

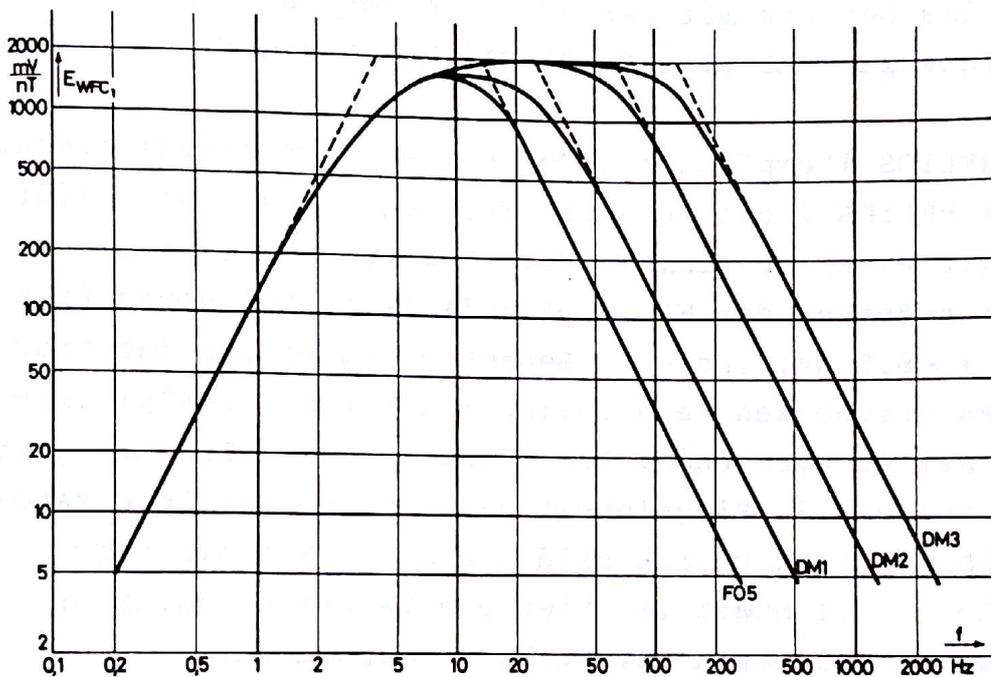


Bild 3 Frequenzabhängigkeiten der WFC-Empfindlichkeit der Flugeinheit 1 für $V_{umsch.} = 10$

spannung des WFC-ADW für 1 nT Feldstärke am Sensor in Abhängigkeit von der Frequenz. Dabei ist die Empfindlichkeit des Sensors einschließlich Sensor-Vorverstärker von $E_0 = 0,3 \frac{mV}{nT \cdot Hz}$ berücksichtigt und eine Verstärkung von 10 des umschaltbaren Verstärkers angenommen. Der Abfall der Empfindlichkeit zu tiefen Frequenzen ist bestimmt durch die Koppelglieder. Da zwei von ihnen eine Zeit-

konstante von 40 ms haben, ergibt sich der Knick der einhüllenden Bode-Geraden bei 4 Hz und eine 3-dB-Grenzfrequenz von 6,18 Hz. Ein weiteres Koppelglied besitzt eine Zeitkonstante von 2 s und führt zu einer weiteren Verstärkung des Abfalls bei 0,08 Hz, der nicht dargestellt ist. Der Abfall der Empfindlichkeit zu hohen Frequenzen ist durch die passend zur Datenübertragungsrate (Telemetry-Format 5, Datenmoden 1 - 3) bzw. Abtastfrequenz umschaltbaren Tiefpässe bestimmt. Dazwischen ist durch eine waagerechte Gerade im Bode-Diagramm ein Frequenzbereich gekennzeichnet, in dem sich die differenzierende Wirkung des Sensors mit der des Integrators aufhebt und eine frequenzunabhängige Empfindlichkeit existiert.

Die von HELIOS 1 empfangenen Daten ließen es ratsam erscheinen, bei HELIOS 2 die Integratoren wegzulassen und dafür Verstärker einer bestimmten Verstärkung einzusetzen, um eine Vergrößerung der WFC-Empfindlichkeit bei hohen Frequenzen ($> 8,5$ Hz) und eine Benachteiligung der darunter liegenden Frequenzen (einschließlich der Sonden-Spinfrequenz 1 Hz) zu erreichen. Den entsprechenden Frequenzgang des WFC bei der 2. Flugeinheit nach Ersatz der Integratoren durch Verstärker gibt Bild 4 wieder. Bei gleicher Sensor-Empfindlichkeit ist hier ein Verstärkungsfaktor 0,08 des umschaltbaren Verstärkers angenommen.

Der ADW besitzt eine bei beiden Flugeinheiten identische quasilogarithmische Umwandlungskennlinie mit zwei Teilbereichen. In Bild 5 sind die zu den 32 Quantisierungsstufen gehörenden Intervalle der Eingangsspannung des ADW U_{ADW} angegeben. Übersteigt die Eingangsspannung 132 mV, wird mit dem Wechsel des Ausgangspegels eines Komparators ein im Eingang des ADW liegender Vorverstärker 32,9 umgangen und mit dem Bereichsbit "0" die Gültigkeit des oberen Teilbereichs markiert. Die Breite der ersten Stufe in jedem Teilbereich (0 und 16) sind in der logarithmi-

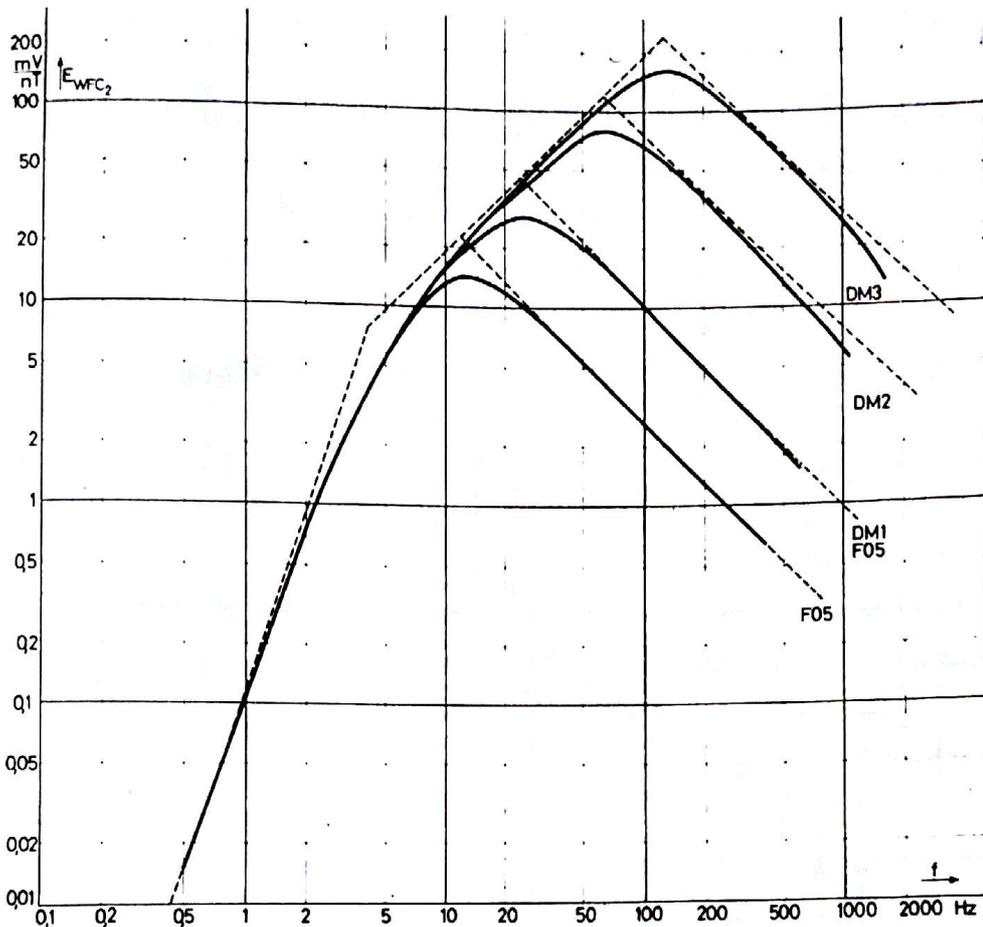


Bild 4 Frequenzabhängigkeiten der WFC-Empfindlichkeit der Flugeinheit 2 für $V_{umsch.} = 0,08$

schen Darstellung unregelmäßig, da die Stufe 0 keine untere Grenze hat und die Stufe 16 eine vom Komparator bestimmte untere und vom ADW bestimmte obere Grenze besitzt. Erst Spannungen > 160 mV werden vom ADW nach Umgehen des $\times 32,9$ -Verstärkers wieder regulär quantisiert.

Mit den Höchstwerten der frequenzabhängigen Empfindlichkeiten ($2000 \frac{mV}{nT}$ für $V_{umsch.} = 10$ aus Bild 3 für Flugeinheit 1 und $1,95 \frac{mV}{nT \cdot Hz} = 0,31 \frac{mV \cdot s}{nT}$ für $V_{umsch.} = 0,08$ abzulesen aus Bild 4 für Flugeinheit 2) und den Bereichs-

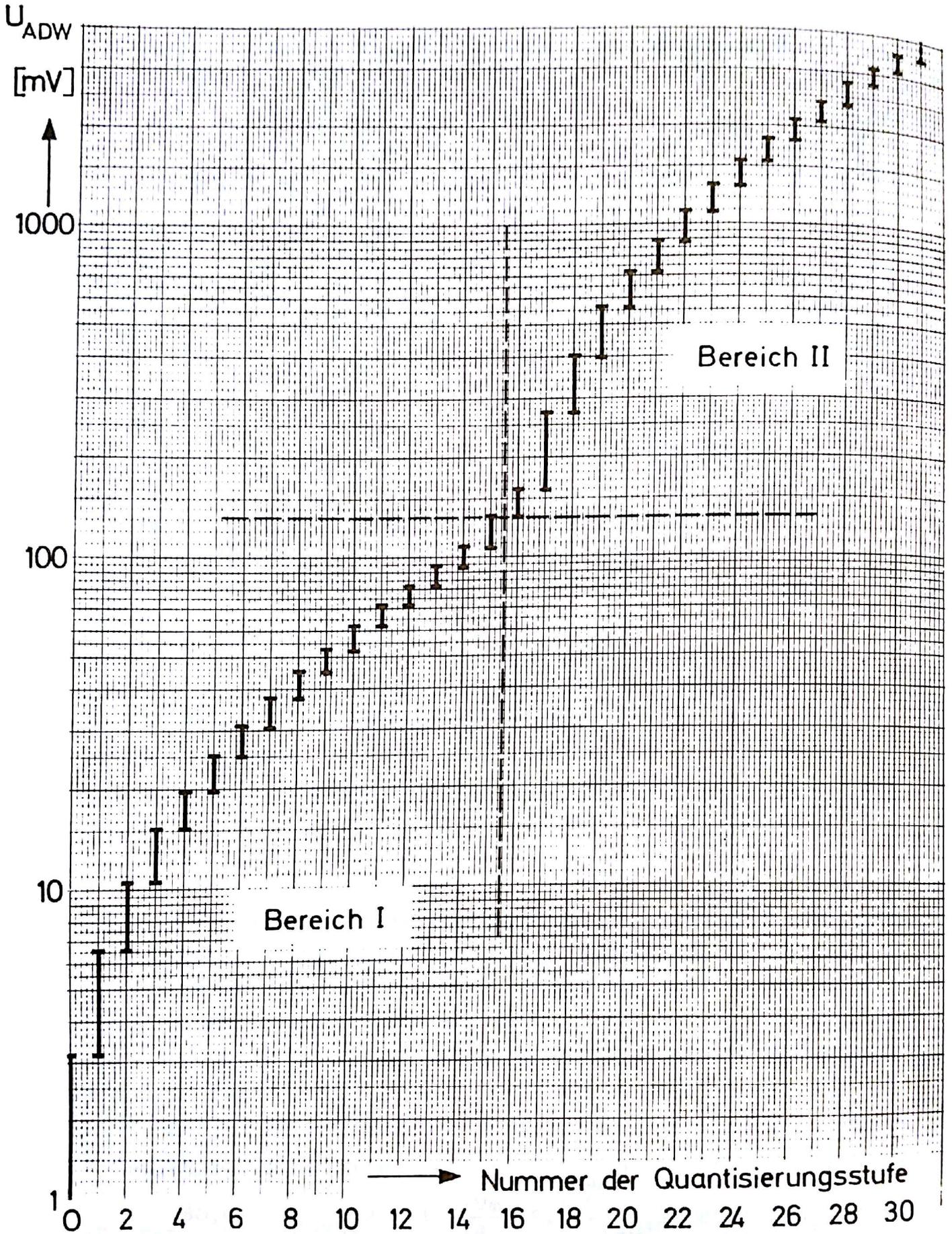


Bild 5 Quasilogarithmische Umwandlungs-Kennlinie des WFC - ADW

grenzen bzw. Stufenbreiten in mV aus Bild 5 kommt man zu den Zahlenwerten für die WFC-Meßbereiche bzw. Auflösungen, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind.

Die zwei Übertragungsmöglichkeiten für Wellenformdaten und ihre zugehörigen Abtastfrequenzen bzw. übertragenen Bandbreiten sind der Tabelle 2 "Datenübertragungsarten" zu entnehmen. Eine Direktübertragung ist nur im Telemetrieformat 5 möglich. Dabei werden den Wellenformdaten mit 28,5 (57) Hz Abtastfrequenz und 12 (24) Hz Grenzfrequenz noch alle etwa 1,7 (0,84) Sekunden ein Satz Kurzzeit-Maximalwerte aus dem SPA (für die 8 Frequenzbänder der beiden Komponenten x oder y und z) beigegeben. Wellenformdaten (einschließlich der Kurzzeit-Maximalwerte) der insbesondere für Messungen in Sonnennähe vorgesehenen höheren Abtastfrequenzen 75 - 300 Hz werden während der Direktübertragung der Spektraldaten im WFC gewonnen (Format 1 - 3 mit Speichereinlesen), müssen aber in einem sondeneigenen Kernspeicher zunächst zwischengespeichert werden. Diese Daten werden nach Format 6 gruppiert und mit einer der Abtastfrequenz entsprechenden hohen Rate im Datenmode DM 1, 2 oder 3 eingelesen. Später werden sie in derselben Anordnung dem Speicher wieder entnommen und bei DM 7 mit einer der Telemetrie-Bitraten übertragen. Je nach verwendetem Datenmode DM 1, 2 oder 3 (umschaltbare Kernspeichereinleseraten 4096, 8192 oder 16384 bit/s) beträgt der allein von diesem Experiment erzeugte und nicht direkt übertragbare Datenfluß 1735 bis 6940 bit/s, und es belegt etwa 42 % der vorhandenen Speicherkapazität von 0,52 Mbit. Damit können Wellenformdaten aber nur für Zeitabschnitte von 101, 51 oder 25 Sekunden gespeichert werden. Deshalb wird die Information in diesem Speicher laufend überschrieben bis der "Stoßwellenidentifikationscomputer" im Experiment 2 /14/ eine Wellenform entdeckt hat, die "interessanter" ist als alle seit dem letzten Speicherauslesen. Dann wird das Überschreiben angehalten und die Daten werden

Verstärkung d. umschaltb. Verstärkers V_{umsch}	0,08	0,4	2	10	Einheit
Teilbereich I	Grenzen	0,2 ... 8,25	0,04... 1,65	0,008... 0,33	0,0016... 0,67
	Auflösung	0,21... 1,5	0,04... 0,3	0,008... 0,06	$(1,7... 12) \cdot 10^{-3}$
Teilbereich II	Grenzen	8,25... 224,2	1,65... 44,8	0,33 ... 9	0,07 ... 1,8
	Auflösung	7 ... 28,9	1,4 ... 5,8	0,28 ... 1,16	0,056 ... 0,23
Teilbereich I	Grenzen	0,26... 10,8	0,053... 2,16	0,01... 0,43	0,002... 0,056
	Auflösung	0,27... 1,96	0,054... 0,39	0,01... 0,078	$(2,2... 15,7) \cdot 10^{-3}$
Teilbereich II	Grenzen	10,8... 292,8	2,16... 58,6	0,43... 11,7	0,036... 2,35
	Auflösung	9,1... 37,7	1,93... 7,56	0,37... 1,51	0,073... 0,3

Flugeneinheit 1

Flugeneinheit 2

Grenzen ohne die unten offene Quantisierungsstufe 0 und die oben offene Quantisierungsstufe 31, Auflösung ohne die Quantisierungsstufen 0 und 16

Tabelle 1 Meßbereiche und Auflösung des Wellenformkanals

DATEN ÜBERTRAGUNG		SPEKTRALDATEN (8 Freq. 2 Komp.)			WELLENFORM-DATEN (3 Komp.)	
		AUSG: A 1/2	C1		C2 S	
		Mittelwerte	Maximalwerte	Kurzzeit-Max.	Momentanwerte	Sektorinfo.
DIREKT-ÜBERTRAGUNG ohne Speichereinlesen	FORMAT: FO 1,2 oder 3 2046...8bit/s	1,125...1152s	1,125...1152s	—	—	—
	FO 1-3 DM1 DM2 DM3	1,125...1152s	1,125...1152s	281,3 ms	75 (24) Hz	$\frac{2\pi}{512}$
				140,6 ms	150 (64) Hz	
FO 6	70,3 ms	300 (128) Hz				
DIREKT-ÜBERTRAGUNG mit Speichereinlesen und spät. Auslesen	FO 5 2048bit/s HEB auch 4096bit/s	—	—	1,69 s 0,84 s	28,5 (12) Hz 57 (24) Hz	—
DIREKT-ÜBERTRAGUNG Speichereinlesen bei Blackout und spät. Auslesen	DM 7	1152	1152	—	—	—
		Zeitauflösung			Abtastfrequenz (Bandbreite)	Winkelauflösg.

Tabelle 2 Datenübertragungsarten

bis zum nächsten Auslesen des Speichers aufgehoben. Da die Übertragung interessanter und ungestörter Wellenformdaten bei diesem "shockmode"-Betrieb des Speichers vom richtigen Funktionieren der Stoßwellen-Erkennung abhängt und da auch Wellenformdaten geringer Grenzfrequenz für längere Zeitabschnitte wertvoll sind, wurde für dieses Experiment der Betrieb des Formates 5 mindestens für wenige Stunden je Tag bei Entfernungen von weniger als 0,4 AE zwischen Erde und Sonde gefordert. Zu den in Tabelle 2 zusammengestellten Datenübertragungsarten soll noch einmal klargestellt werden: Beim Auslesen und Übertragen der Wellenformdaten aus dem Sonden-Speicher gibt es ebenso wie beim Übertragen der von allen Experimenten gespeicherten Meßdaten zu "Black-out"-Zeiten Lücken in der Direktübertragung, und das Auslesen nach "shockmode"-Betrieb liefert Wellenformdaten (mit hoher Auflösung aber nur für die oben schon genannten Zeitabschnitte von etwa 100 bis 25 Sekunden), passend zu den u. U. einige Stunden vorher direkt übertragenen Spektralanalysatordaten nach. Die Daten sind als kleine Blöcke zu je 24 bit (= 4 Abtastwerte á 6 bit) gleichmäßig über die Rahmen der Formate 5 und 6 verteilt.

Wellenformdaten werden für die drei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen x, y und z der Sensorkomponenten getrennt gemessen und übertragen. Da sich der Sensor mit der Sonde um die z-Richtung dreht, muß für das Reduzieren der x- und y-Daten auf ein raumfestes Koordinatensystem der zu jedem 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 Telemetrierahmens 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 bei-

den Impulsen, als "Sektorinformation" übertragen. Da auch die Zeitdifferenz zwischen der Aufnahme des Meßwertes und seiner Einordnung in den Telemetrierahmen sowie die Sonden-drehgeschwindigkeit bekannt ist, kann auf den Drehwinkel der Sonde zum Meßzeitpunkt zurückgerechnet werden.

Zur näherungsweise richtigen Rekonstruktion der Magnetfeld-stärke-Wellenformen muß schließlich noch die frequenzabhän-gige Phasendrehung der WFC-Analogelektronik berücksichtigt werden. Bild 6 zeigt die berechneten Frequenzgänge des Pha-senwinkels zwischen der Ausgangs- und der Eingangsspannung der in Bild 7 wiedergegebenen vereinfachten Schaltung die-

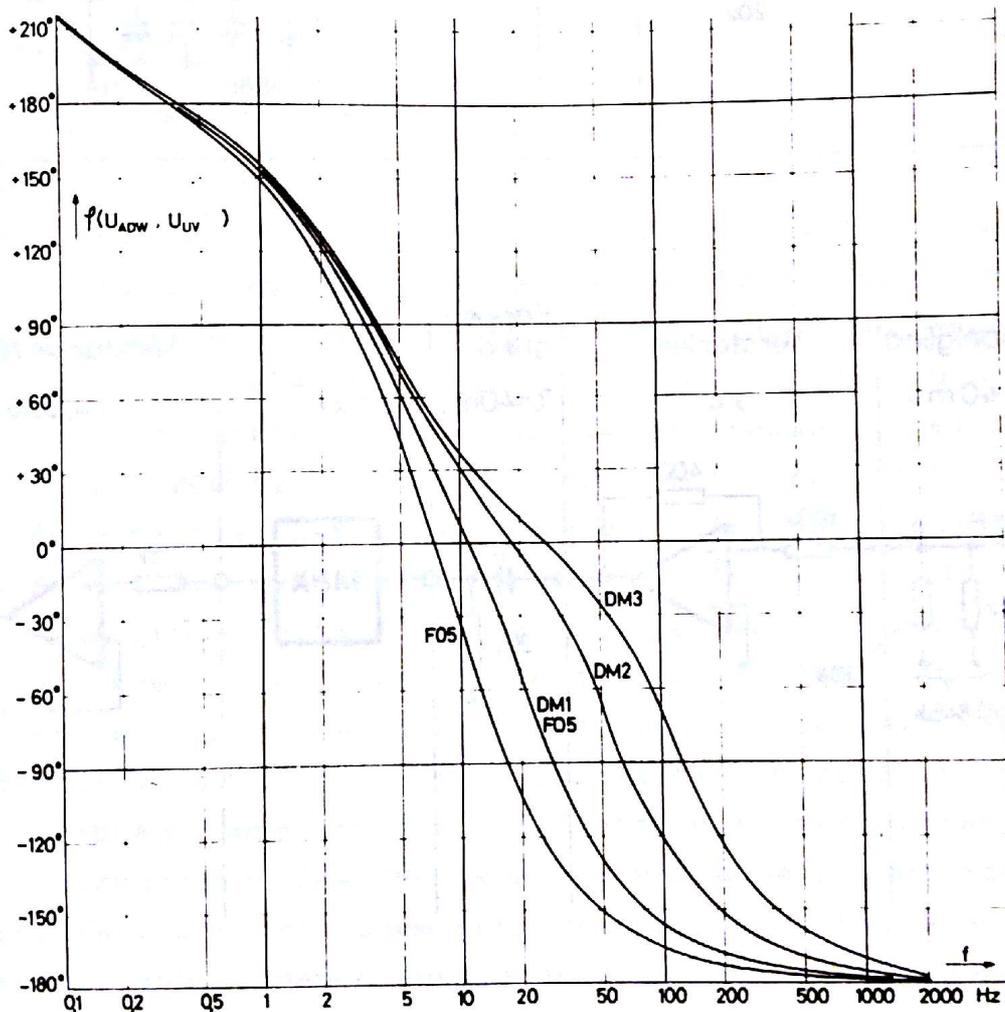


Bild 6 Frequenzabhängigkeiten des Phasenwinkels zwischen der Eingangsspannung des WFC-ADW und der Eingangsspannung des umschaltbaren Verstärkers

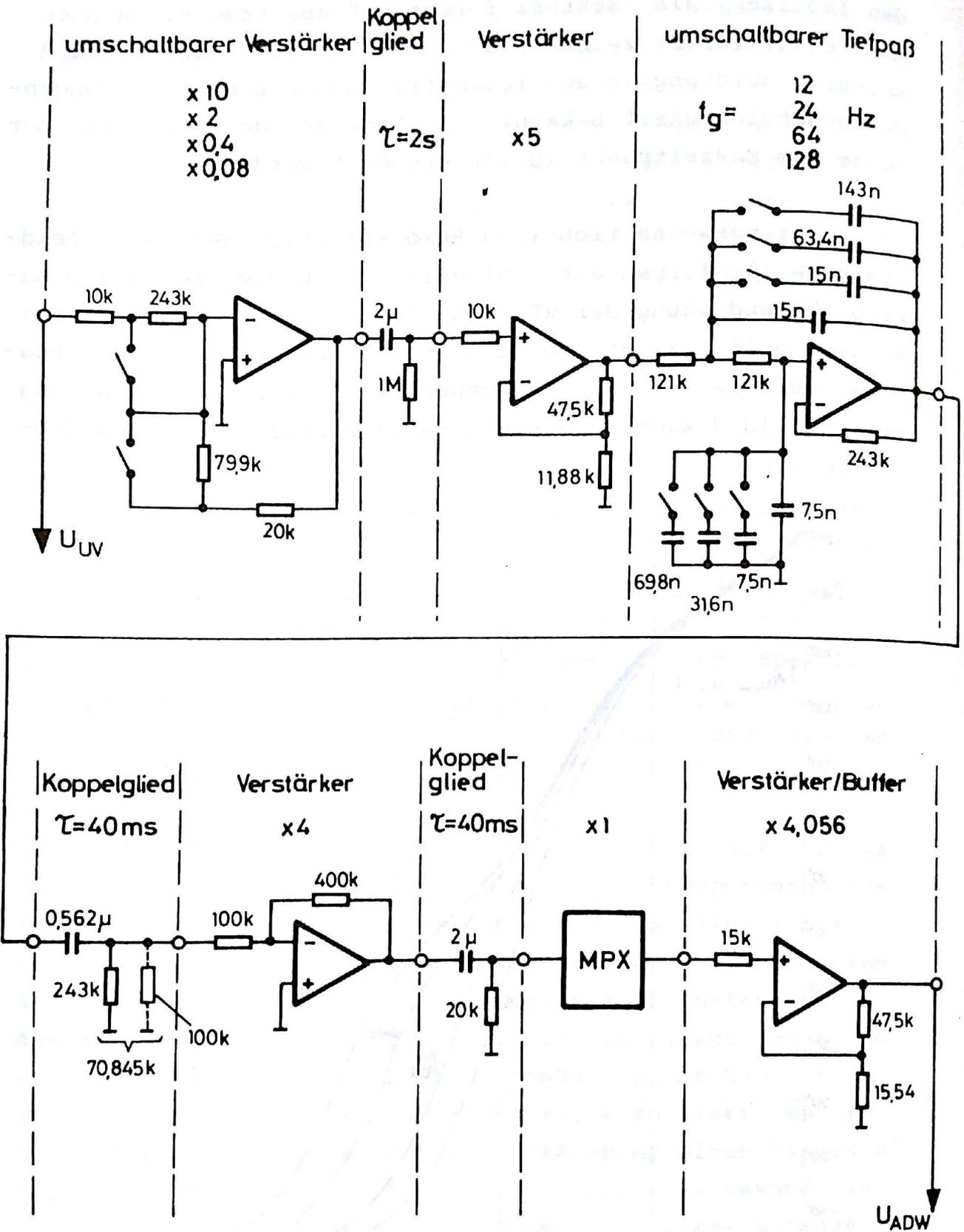


Bild 7 Schaltungsausszug der WFC-Analogelektronik zwischen dem Eingang des umschaltbaren Verstärkers und dem Eingang des WFC-ADW

ser Elektronik. Sie liegt zwischen dem Ausgang der Sensorvorverstärker-Einheit = Eingang des umschaltbaren Verstärkers (U_{UV}) und dem Eingang des WFC-ADW (U_{ADW}). Die Phasendrehungen steigen umso stärker, je niedriger die passend zu dem Telemetrieformat bzw. Datenmode eingestellte Tiefpaßgrenzfrequenz ist. Phasenwinkel-Frequenzabhängigkeit und Schaltungsauszug gelten zunächst für die Flugeinheit 2. Für die Flugeinheit 1 muß im Bild 6 der Verstärker x 4 durch einen Integrator ersetzt werden und aus Bild 7 ist dann der Phasenwinkel zwischen der Verstärker-Eingangsspannung proportional $\dot{H}(t)$ und der ADW-Eingangsspannung proportional $H(t)$ zu entnehmen.

3.3 Spektralanalysator

Wie im Bild 1 dargestellt ist, werden die Meßsignale aus den Verstärkern mit umschaltbarer Verstärkung auch dem Spektralanalysator (SPA) des Experimentes zugeführt. Dieser liefert zur kontinuierlichen Direktübertragung Frequenzspektren des magnetischen Rauschens oder der Wechselfeld-Anteile in zwei Komponenten, in der Ekliptik und in der Richtung senkrecht dazu. Der Gesamtfrequenzbereich von 4,7 Hz bis 2200 Hz ist mit 8 Bandfiltern (drei je Frequenzdekade) gleicher relativer Bandbreite aufgeteilt. Bild 8 gibt die gemessenen Durchlaßkurven wieder, die die erreichte große Weitabdämpfung der aktiven RC-Filter mit sehr geringer Leistungsaufnahme zeigen. Hierbei ist ein annehmbarer Kompromiß geschlossen worden. Denn mit wachsender Zahl der Bandfilter steigen elektronischer 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 eine Wahl zwischen mehr oder weniger großer Frequenz-

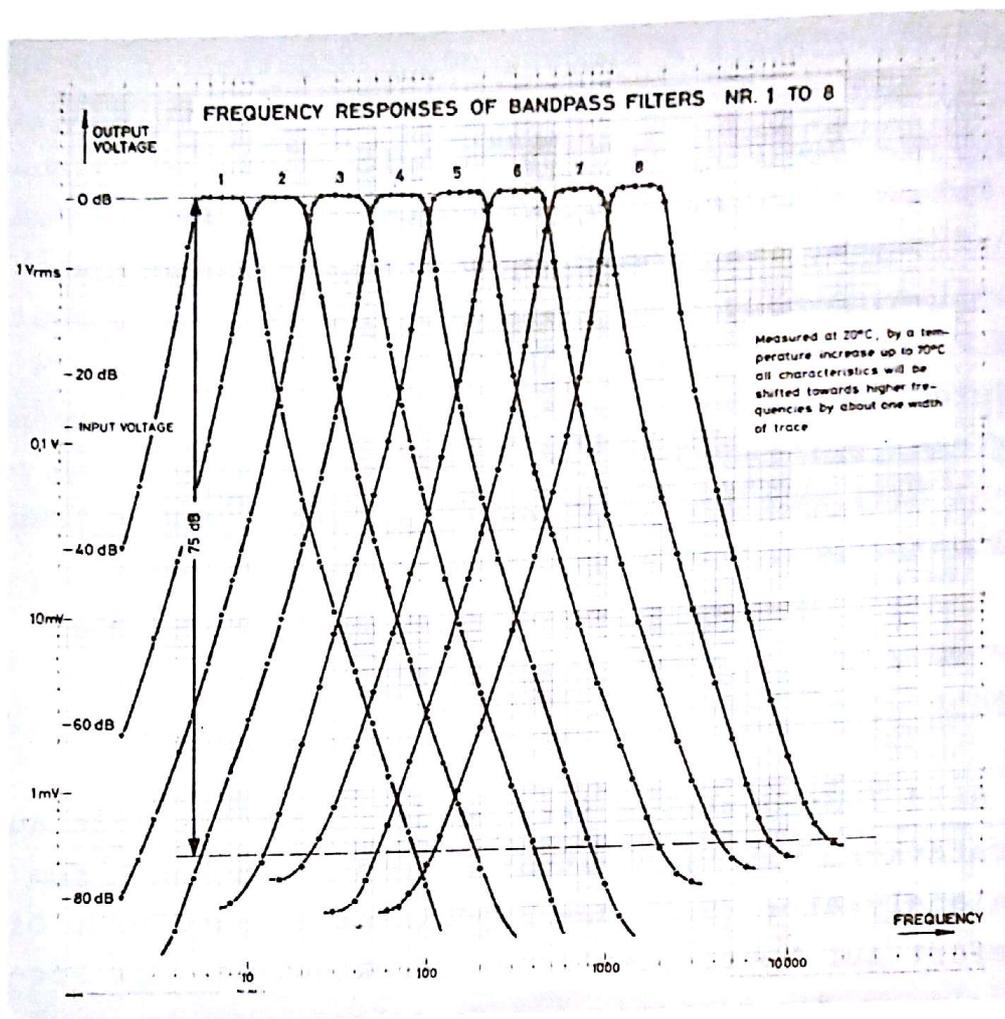


Bild 8 SPA-Bandfilter-Durchlaßkurven (aus /10/)

oder Zeitauflösung getroffen worden. Die Ausgangs-Wechselspannungen der 8 Filter werden über einen Multiplexer und einen schnell einschwingenden Präzisionsgleichrichter, der für die Durchschaltzeit des Multiplexers den Betrag der Filterspannung bildet, einem 8-bit-Analog-Digital-Wandler (ADW) mit linearer Quantisierungskennlinie zugeführt (vergl. Bild 11). Liegt der Betrag der Filterspannung innerhalb der untersten Quantisierungsstufe ($0 \dots < 20 \text{ mV}$), wird noch ein ADW-Vorverstärker $\times 32$ zwischengeschaltet und das Umwandlungsergebnis durch Verschieben um 5 bit mit dem Faktor 2^5 multipliziert. So entstehen digitalisierte Abtastwerte der Filterausgangsspannungen in einem Dynamikbereich entsprechend 13 bit und mit einer Auflösung entsprechend 8 bit.

Eine Übersicht über die Aussteuerungsverhältnisse in der SPA-Analogelektronik gibt Bild 9. Dort ist gezeigt, wie der vom Produkt Magnetfeldstärke \times Frequenz abhängige Sensor-Ausgangsspannungsbereich von 0,1 μ V bis 100 mV bei im Verlauf der Mission zwischen 1,0 und 0,3 AE schwankender Entfernung zwischen Sonde und Sonne an den Umwandlungsbereich des ADW angepaßt ist. Für diesen großen Dynamikbereich unerläßlich ist das Umschalten der Verstärkung $V_{\text{umsch.}} = 10$ bis 0,08 des umschaltbaren Verstärkers. Außerdem sind die Verstärkungen des Sensor-Vorverstärkers ($\times 30$), der Bandfilter im Durchlaßbereich ($\times 20$) und des wahlweise benutzten ADW-Vorverstärkers ($\times 32$) berücksichtigt. Der Umwandlungsbereich des linearen ADW liegt zwischen 0 und 5120 mV mit 256 Quantisierungsstufen \hat{a} 20 mV.

Mit der genannten Empfindlichkeit der Sensor-Vorverstärkereinheit $E_{\circ} = 0,3 \text{ mV/nT}\cdot\text{Hz}$, den Verstärkungen der SPA-Analogelektronik und dem Umwandlungsbereich des ADW ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Meßbereiche des SPA bezogen auf den ADW-Ausgang und daher noch in $\text{nT}\cdot\text{Hz}$.

Die digitalisierten Abtastwerte der Filterausgangsspannungen werden als 9-bit-Wörter (8 bit Meßgröße und 1 Bereichsbit) einem Mittelwertrechner (MVC) zugeführt. Er berechnet quadratische Mittelwerte der Filterausgangsspannungen für einstellbare Zeitintervalle und liefert außerdem die größten in diesen Intervallen aufgetretenen Momentanwerte als Maximalwerte. Entsprechend der in Tabelle 2 angegebenen Zeitauflösung der SPA-Daten gelten die Mittel- und Maximalwerte für sich aneinanderreihende Mittelungs- bzw. Beobachtungszeitintervalle, die bei Direktübertragung der SPA-Daten zwischen 1,125 und 1152 Sekunden liegen. Da für ein Zeitintervall jeweils nur ein Satz Spektraldaten erzeugt wird, kann durch Verändern der Intervalldauer die Menge dieser zu Übertragenden Experimentdaten an die Kapazität des Telemetriekanals angepaßt werden. Bei den sehr unterschiedlichen Sonden-Bitraten zwischen 2048 und 8 bit/s, abhängig

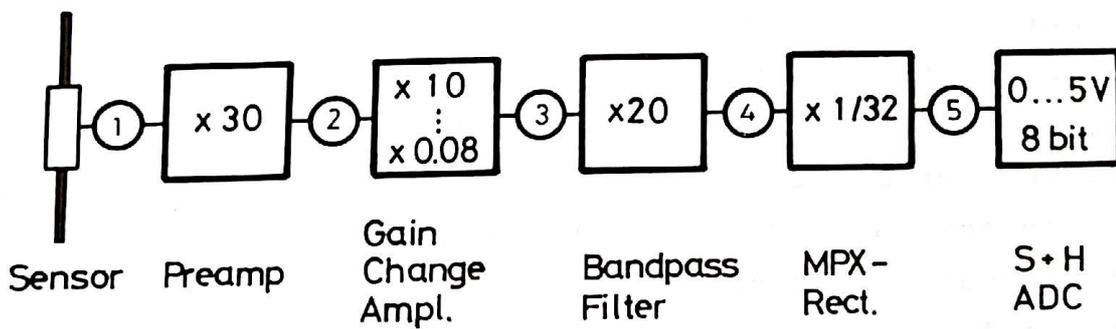
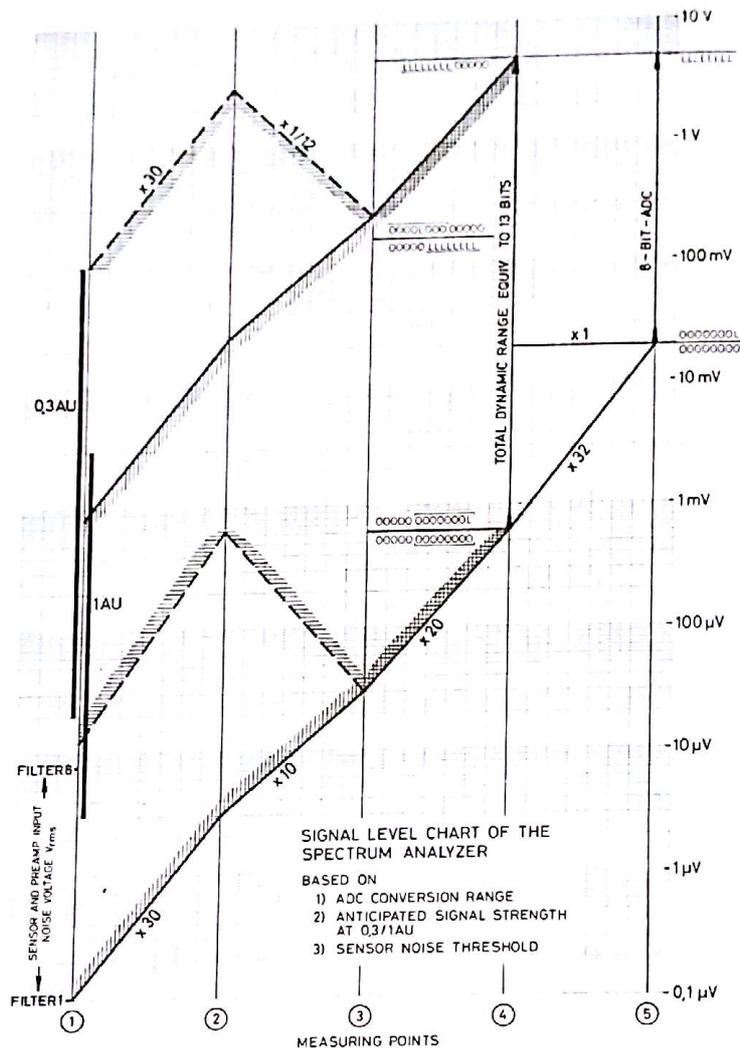


Bild 9 Pegelbereich der Meßsignale in der SPA-Analogelektronik (aus /10/)

Verstärkung des umschaltbaren Verstärkers V _{umsch} =	0,01	0,4	2	10	Einheit	
SPA-Analogteil- Gesamtverstärk.	min. bei (x1)	1,6	3	40	200	1
	max. bei (x32)	51,2	256	1280	6400	
SPA-Empfindlichkeit	(x1)	0,43	2,4	12	60	$\frac{mV}{nTxHz}$
	(x32)	15,4	76,8	384	1920	
untere Meßgrenze *)	1,3	0,26	0,05	0,01	nTxHz	
obere Meßgrenze	10 667	2133	427	85		

+) untere Grenze der zweiten Quantisierungsstufe, ohne Berücksichtigung des Eigenrauschens

Tabelle 3 Meßbereiche des Spektralanalysators bezogen auf den Umwandlungsbereich des AD-Wandlers

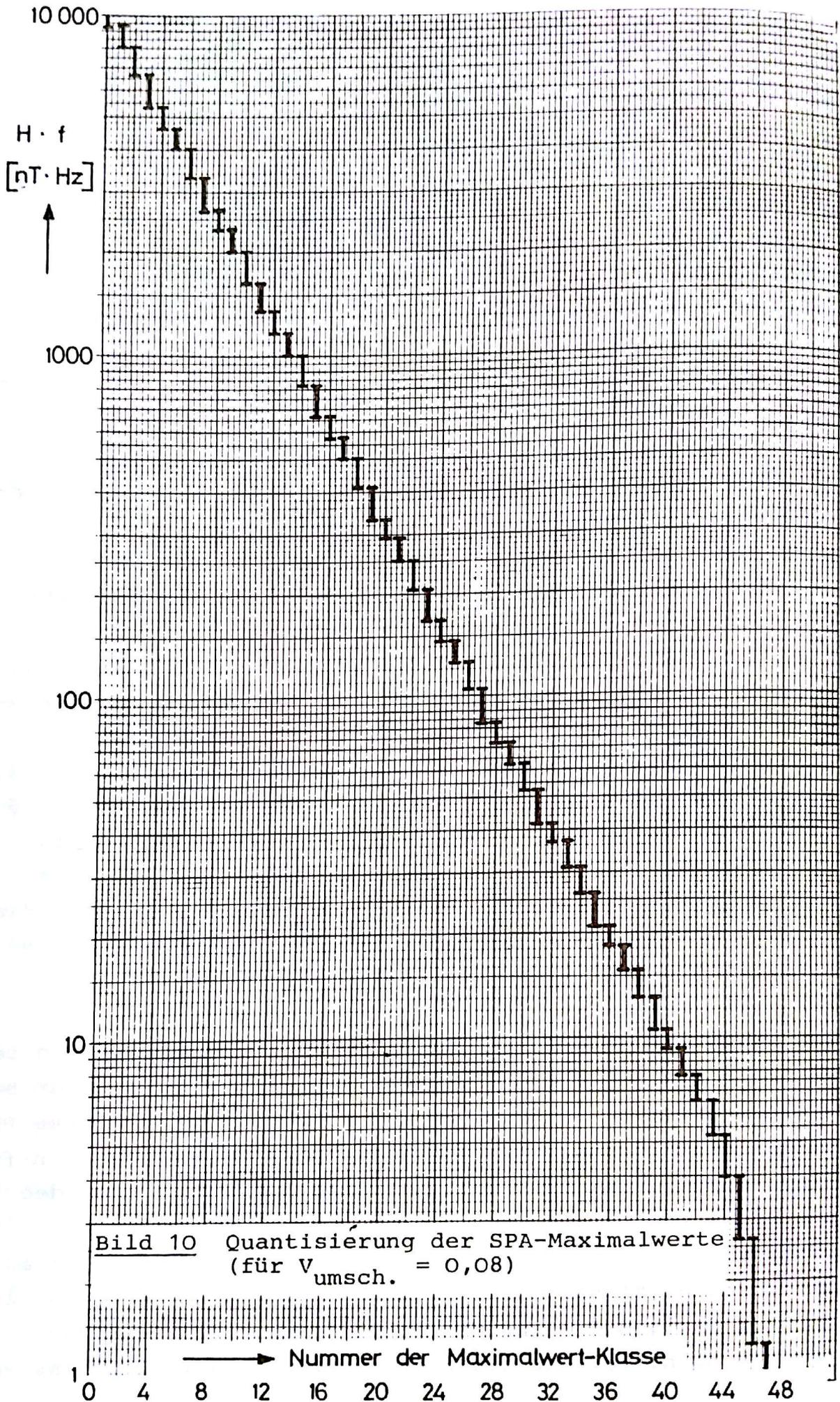
von der Entfernung Sonde - Erde und der Empfangsqualität auf der Erde, ist diese Anpassung besonders wichtig. Die Intervallauern werden auf einfachste Weise automatisch vom Telemetrie-Subsystem der Sonde gesteuert: Beim Beginn eines Blocktransferimpulses wird innerhalb einer vernachlässigbaren Zeit des Aufsummieren der quadrierten Abtastwerte für die Mittelwertbildung und der Vergleich neuer Abtastwerte mit dem größten vorausgegangenen zur Maximalwertsuche beendet, der Datenblock aus Mittel- und Maximalwerten zusammengestellt, seine Übertragung begonnen und schließlich die Mittelwertbildung und die Maximalwertsuche

für ein neues Zeitintervall begonnen. Das Zwischenschalten des Rechners mit der durch seine Arbeitsweise bedingten Datenspeicherung bringt den Vorteil, daß zwischen Abtasttakt und Daten-Übernahmetakt zur Telemetrie (= Sendetakt) kein fester Zusammenhang zu bestehen braucht. Für die Betriebszeiten des Experimentes, in denen die hochauflösenden WFC-Daten gewonnen werden (Betrieb des Telemetrie-Formates 1 - 3 und gleichzeitig Format 6 (DM 1, 2 oder 3) oder des Formates 5) kann außerdem der Rechner während seiner Maximalwertsuche für kürzere Zeitunterabschnitte zu den WFC-Daten passende "Kurzzeit-Maximalwerte" mit einer Zeitauflösung von 281 bis 70 Millisekunden oder 0,84/1,69 Sekunden liefern.

Der MVC ist ein leistungsfähiger und in "real-time" arbeitender digitaler Prozeßrechner. Er enthält eine Dateneingabeeinheit, eine Prozessoreinheit mit 3 Prozessoren, in denen insgesamt neun festverdrahtete Programme ablaufen, außerdem eine Steuereinheit und einen eigenen 4-kbit-Kernspeicher /12, 15/. 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...6,5, das durch Anpassen der Abtastrate an die Frequenzlage der Filter ermöglicht wird. So wird das erste Filter (4,7... 10 Hz) mit $f_A = 65,1$ Hz, das zweite Filter (10...22 Hz) mit $2 \cdot f_A = 130,2$ Hz, das achte Filter (1000...2200 Hz) schließlich mit $2^7 \cdot f_A \approx 8333$ Hz abgetastet. Der Rechner muß zunächst die in 9-bit-Wörter codierten Filterspannungen mit einer Rate von über 33 kHz übernehmen, als 13-bit-Wörter interpretieren und für die 2 x 8 Frequenzkanäle getrennt weiterverarbeiten.

Für das Berechnen der Mittelwerte folgt ein Umcodieren in eine Gleitkommazahl (6 bit Mantisse und 4 bit Exponent), das Quadrieren der Mantisse nach einer Tabelle in 5-bit-Quadrat-Mantissen und das Aufsummieren der vollständigen Quadratzahlen bis zum Ende des Mittelungs-Zeitintervalls. Dabei können Wörter bis zu einer Länge von 50 bit entstehen. Ihre Übertragung ist unmöglich und auch überflüssig, da so dargestellten Quadratsummen eine unsinnig hohe Meßauflösung entsprechen würde. Daher codiert der Rechner die Quadratsummen erneut in eine Gleitkommazahl (4 bit Mantisse und 5 bit Exponent) um, wobei die mitgezählte, von der Dauer des Mittelungszeitintervalls und von der Filterordnungszahl abhängige Abtasthäufigkeit berücksichtigt wird /10, 16/. So entsteht ein von Mittelungszeit und Filter abhängiger Zusammenhang zwischen Quadratsummen-Übertragungscode und Magnetfeldstärke-Frequenz-Produkt. Auch die entstehende Meßwert-Unsicherheit ist nicht einfach anzugeben, da die verschiedenen Fehler (relativer Quantisierungsfehler 0...12,5 % ohne die 8 ersten Quantisierungsstufen, Mittelungsfehler, 1. Umcodierungsfehler 0...1,6 %, Quadrierfehler 0...11,1 % und 2. Umcodierungsfehler 0...6 %) je nach Größe und Amplitudenstatistik der Meßsignale innerhalb eines Frequenzkanals verschieden stark eingehen. Bei den meistens vorliegenden Meßsignalen mitteln sich die Fehler beim Summieren der Quadrate aus, und es bleibt im wesentlichen der 2. Umcodierungsfehler.

Zum Übertragen der Maximalwerte teilt der Rechner jeden der 13-bit-Momentanwerte nach einer Tabelle einer von 48 Größenklassen zu. Bild 10 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Produkt Magnetfeldstärke x Frequenz und den Klassennummern für einen angenommenen Verstärkungsfaktor $V_{\text{umsch.}} = 0,08$ des umschaltbaren Verstärkers. Bei den größeren Experimentempfindlichkeiten mit $V_{\text{umsch.}} = 0,4, 2$ und 10 entsprechen der obersten Klasse 0 bei um den Faktor 5, 25 oder 125 gedehnter Skala $H \cdot f$ Magnetfeldstärke-Maximalwerte um 2000, 400 und 80 nT·Hz. Für jeden Frequenzkanal wird die Klassen-



nummer des größten im Beobachtungszeitintervall vorgekommenen Momentanwertes mit 6 bit codiert als Maximalwert übertragen. Neben dem aus Bild 9 entnehmbaren Quantisierungsfehler tritt hier noch ein Abtastfehler auf, wenn die Abtastung nicht den Spitzenwert der Sinushalbwellen der Filterausgangsspannung trifft. Bei der vorkommenden Zahl der Abtastungen je Beobachtungszeitintervall und einer nicht stark schwankenden Amplitude der Sinusspannung im Intervall ist jedoch dieser Abtastfehler mit 95 % Wahrscheinlichkeit kleiner als 10 % /17/. Das beim Berechnen der Mittelwerte und Heraussuchen der Maximalwerte mehrfach vorgenommene Abrunden und Umcodieren reduziert ganz wesentlich sowohl die Rechenarbeit als auch die Datenmenge und ermöglicht überhaupt erst den "real-time"-Betrieb des Rechners und das Direktübertragen der Daten.

Die Mittelwerte und Maximalwerte sind zu einem 16x16-bit-Datenblock zusammengefaßt, der über den Experiment-Datenausgang A 1/2 zum Telemetrie-Subsystem der Sonde geleitet wird. Im Telemetrieformat 1 wird in aufeinanderfolgenden Rahmen jeweils 1/2 Experimentblock und in den Formaten 2 und 3 je 1/8 Experimentblock übertragen. Die Kurzzeit-Maximalwerte gelangen in den Formaten 5 und 6 über den Experiment-Datenausgang C 1 als Gruppen zu vier 8-bit-Wörtern /18/ zur Telemetrie.

Wie im WFC ist auch im SPA-Analogteil die Verstärkung so gewählt, daß bereits das durch die Bandfilter bewertete Eigenrauschen der Sensor-Vorverstärker-Einheit, vor allem in den breitbandigeren Filtern der höheren Frequenzen, die untersten Quantisierungsstufen überstreicht. Dadurch wird sichergestellt, daß auch kleinste Signale beobachtbar werden. Bei den gewählten Filterdurchlaßkurven ist übrigens die Rauschbandbreite der Filter nahezu identisch mit der 3-dB-Bandbreite.

4. Elektronischer und mechanischer Aufbau

Das Blockschaltbild der Experiment-Elektronik zeigt Bild 11. Das Wesentliche der Schaltungstechnik wurde bereits beschrieben /12, 13/. Hier soll mehr auf die technologische Seite des Elektronikaufbaues und seine Entwicklung im Zusammenhang mit dem entstandenen mechanischen Aufbau des Experimentes und dem Thermalkonzept des Sensors eingegangen werden. Daher werden auch wichtige Tests und Untersuchungen während der Entwicklungszeit erwähnt. Die Einzelheiten aller Schaltungen können den ausführlichen Schaltungs- und Aufbauunterlagen der Herstellfirma Dornier /19, 20/ entnommen werden.

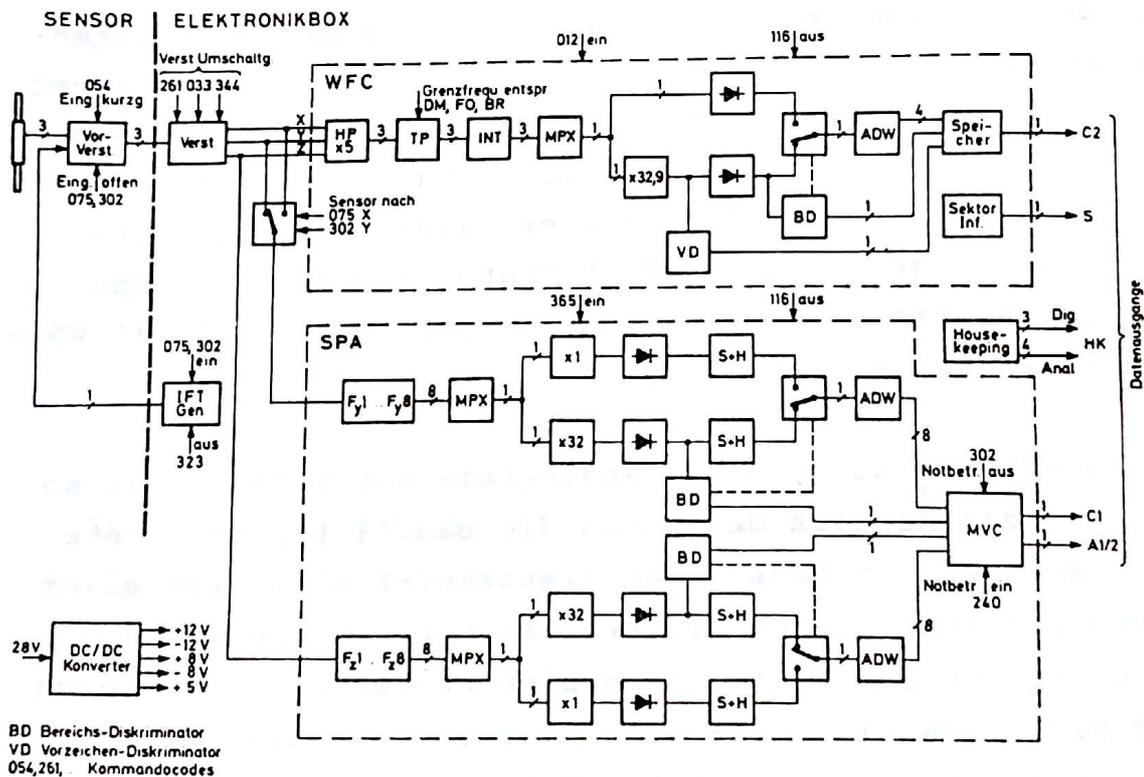


Bild 11 Blockschaltbild der Experiment-Elektronik

Gleichzeitig mit dem Festlegen aller Einzelheiten des Experiment-Konzeptes wurden die ersten Schaltungsentwicklungen im IFN gemacht. Es entstand hier der komplette Sensor für das Labormodell (LM) und Ingenieurmodell (EIM) des Experimentes, letzterer anbaufertig an das EIM der Sonde. Weiter wurden entwickelt die Schaltungen für den SPA-Analogteil und Schaltung und Layout der Tochterplatine mit dem "Inflight-Test"-Generator. Der Digitalteil des SPA, der MVC, ist im Auftrag des IFN vollständig im Institut für Datenverarbeitungsanlagen (IDA) konzipiert, entwickelt und für das EIM aufgebaut worden. Auch für den Experiment-Prototyp (PT) und die Flugeinheiten F 1 und F 2 wurden Herstellunterlagen für den MVC von IDA an Dornier geliefert. Eine Ausnahme macht der im MVC enthaltene Kernspeicher mit Ansteuerungselektronik /21/, der als komplette Einheit nach einer Entwicklung von IDA von Dornier (auch für andere HELIOS-Experimente) hergestellt und zum Einbau in das Experiment bezogen wurde. Die Analog- und Digitalelektronik des WFC ist vollständig von Dornier entwickelt worden und selbstverständlich wurden die, wenn auch nicht sehr umfangreichen, so doch wichtigen Nachentwicklungen (vom EIM zum PT und vom PT zu F 1/2) sämtlich von Dornier gemacht. Vom Beginn des Elektronikaufbaues an war schließlich vorgesehen, daß die zwei SPA-Analog-Digital-Wandler von AEG-Telefunken, Ulm, und der DC/DC-Konverter des Experimentes von Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, Ottobrunn, als selbständige Einheiten zum Einbau in das Experiment übernommen werden sollten.

4.1_Sensortripel

Das Sensortripel ohne Thermalaustrüstung zeigt Bild 12. Die drei Komponenten enthalten je eine Spule mit Mumetallstab und einen rauscharmen Vorverstärker, die in der geöffneten Komponente zu sehen sind. Die Metall-Grundplatten der Kom-

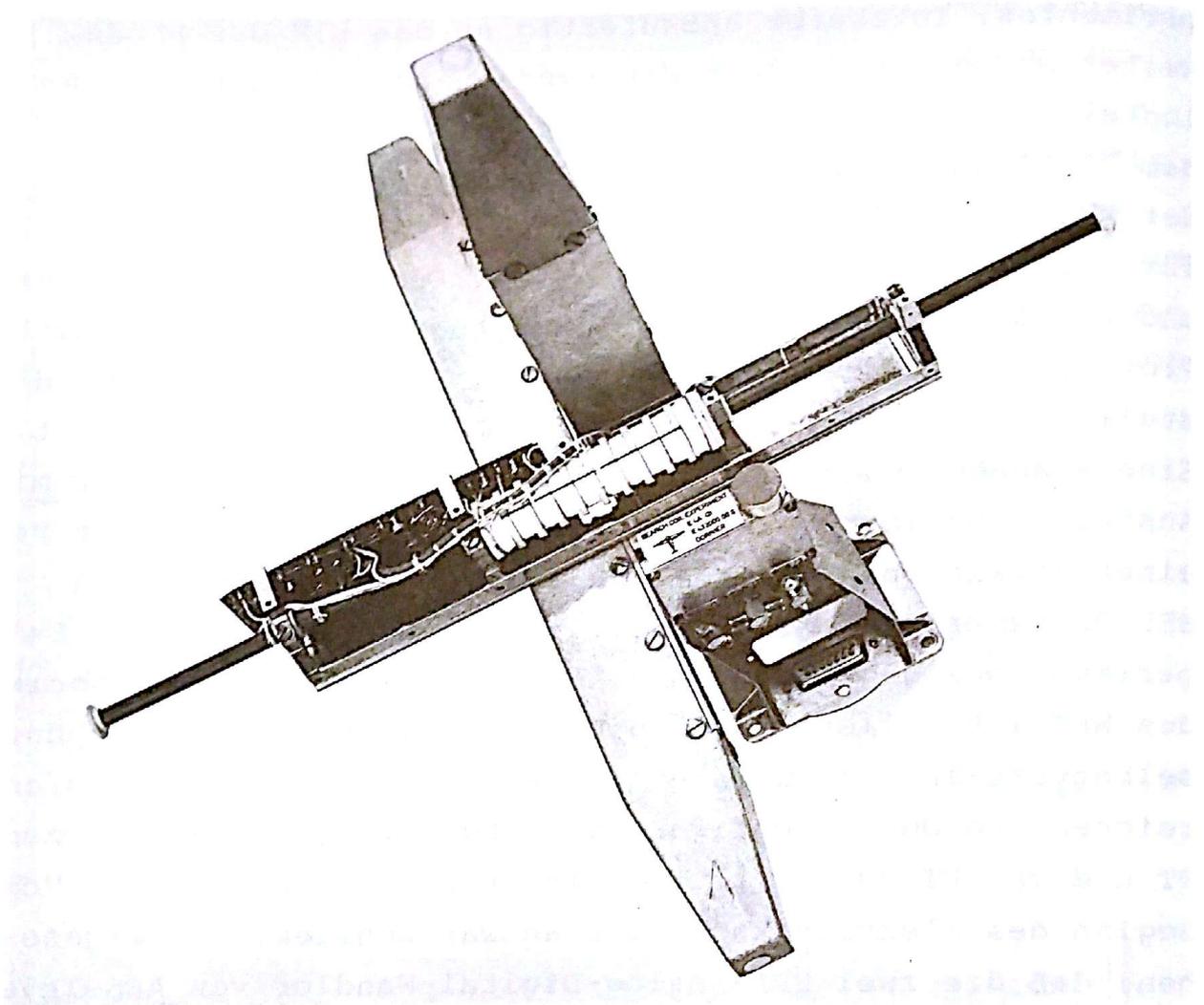


Bild 12 Sensortripel mit einer geöffneten Komponente (ohne Thermalausrüstung)

ponenten sind auf den drei Seiten einer Ecke des Sensor-Zentralgehäuses festgeschraubt. Eine Verlängerung des Gehäuses, die einem Stück Doppel-T-Träger ähnlich ist, endet mit dem Montageflansch mit Anschlußsteckern.

Die Entwicklung des Sensors begann vom Stand ähnlicher Sensoren in den letzten amerikanischen Satelliten der OGO-Reihe. Der stabförmige Eisenkern aus einem Paket zusammengeklebter dünner und langer Mumetallstreifen (geliefert von Fa. Vacuumschmelze, Hanau) wurde bald durch einen selbst herstellbaren und daher zunächst für Entwicklungszwecke leichter modifizierbaren Stab aus einem mit Kunststoff vergossenen Bündel dünner Mumetalldrähte ersetzt. Da diese mit Unterstützung des Instituts für Flugzeugbau der DFVLR, Abteilung Werkstoffe unter Weltraumbedingungen, hergestellte Bauform sich in ausführlichen Tests bewährte /22, 23, 24/, wurde sie für alle Experiment-Modelle beibehalten. Insbesondere wurde durch die Tests festgestellt, daß Stabilität und Klebfähigkeit des Kunststoffes auch nach langer Lagerung im Thermalvakuum erhalten bleiben und das Schrumpfen des Kunststoffes beim Erhärten sowie die verschiedenen Wärmeausdehnungen von Kunststoff und Mumetall nicht zu unannehmbarem Erniedrigen der Stabpermeabilität führen. Für die Sensorspulen wurden Spulenkörper aus Delrin mit 10 Kammern hergestellt und mit insgesamt 47000 Windungen 0,048 mm CuL-Draht bewickelt. Nach anfänglichen Schwierigkeiten konnten auf einer Wickelmaschine mit Überkopf-Drahtabziehvorrichtung für sehr dünne Drähte alle benötigten Spulen problemlos selbst hergestellt werden. Bei keinem Experimentmodell oder Umwelt- bzw. Funktionstest trat je ein Fehler an diesen Sensorteilen auf oder veränderte sich der Eichzustand der Sensorkomponenten.

Die Vorverstärker mit zwei Differenzstufen am Eingang enthalten nur flugerpobte Bauteile, für die Kommando-/House-keeping-Elektronik im Zentralgehäuse wurden auch zwei CMOS-

Schaltkreise verwendet, um auch bei der Logik mit den vorhandenen ± 12 -V-Betriebsspannungen auszukommen. Als Eingangstransistoren wurden rauscharme Exemplare aus einer größeren Anzahl Doppel-Feldeffekt-Transistoren 2 N 5520 selektiert. Die Ausbeute ergab auch genügend Ersatzstücke, und in einem Fall wurde ein nach vielen Funktionstests aus nicht erklärten Gründen plötzlich viel stärker rauschender Transistor ausgewechselt. Um diesen Eingangstransistor vor zu großen Spannungen z.B. von starken Störfeldern auf der Erde zu schützen und auch Rauschmessungen während des Fluges zu ermöglichen, schließt ein eingebautes Relais (Teledyne 422-A-12) auf Kommando den Vorverstärker-Eingang kurz. Da das TO 5-Gehäuse des Relais in der verwendeten Schaltung von der Eingangsspannung mitgesteuert wird, vergrößert es die notwendige kleine Verstärker-Eingangskapazität nur wenig. Die zwei vorhandenen Kontakte wurden in Reihe geschaltet, um bei einem Fehler den für die Magnetfeld-Messungen wichtigen offenen Zustand wahrscheinlicher zu machen. Während Transporten und Montagearbeiten wurde der Verstärkereingang zusätzlich durch eine von Hand einsteckbare Kurzschlußbrücke geschützt, da dabei das Kleben des Latch-Relais nicht sichergestellt ist. Dieser Sensor ist in der Nähe der Sensoren für das magnetische Gleichfeld (Experiment 2) aus Ausleger der Sonde montiert. Daher wurde das magnetische Streufeld der Relais-Magneten gemessen. Dabei ergab sich ein unkritischer Wert von maximal etwa 2 nT in 30 cm Abstand. Der empfindliche Verstärker wird gegen geleitete elektrische Störungen auf den Versorgungsleitungen geschützt durch die verwendeten, auch bei tiefen Frequenzen noch dämpfenden LC-Filter mit Einlochbefestigung im Zentralgehäuse, durch aktive Siebglieder in den Versorgungsleitungen und seine Gleichtaktunterdrückung. Die im Experiment getrennt geführte Digitalelektronik-Masseleitung endet isoliert auf der Kommando- und Housekeeping-Elektronik-Platine im Zentralgehäuse. Die Außenleiter der koaxialen Signalkabel bilden gemeinsam die Analogelektronik-Masseverbindung

zum Sensor. Sie ist am Ende mit dem elektrisch isoliert am Ausleger der Sonde befestigten Sensorgehäuse verbunden. Metallstab, Spule und Vorverstärker jeder Komponente sind von Kunststoffhauben eingeschlossen, die innen mit ausgasarmer Silberleitfarbe gespritzt sind, um elektrische Störfelder abzuschirmen.

Ursprünglich sollte der Sensor, für den ein Arbeitstemperaturbereich von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ angegeben wurde, vor der starken Sonneneinstrahlung nur durch mehrfach um die Komponenten und das Zentralgehäuse herumgewickelte Thermal-superisolation geschützt werden. In Erdbahnnähe sollte das Unterschreiten der unteren Grenztemperatur durch elektrische Heizung (1,5 W), in Sonnennähe das Überschreiten der oberen Grenztemperatur durch die stärkere Abstrahlung geschwärzter Flächen in den Schatten verhindert werden. Ein Solarsimulationstest /25/ ergab jedoch, daß diese Temperaturregelung nicht ausreicht und sich bei 0,9 bzw. 12,8 Solarkonstanten Temperaturen von -24°C bzw. $+180^{\circ}\text{C}$ einstellen. Als Gründe dafür wurden ein schlechterer Wärmeisolationwert der geknickten Thermalsuperisolation sowie eine Verringerung der Kühlwirkung der Radiatoren durch einfallendes Sonden-Streulicht angenommen und deshalb ein zusätzlicher Sonnenschirm angebracht /26/ und die Leistung der elektrischen Heizung auf 4 W erhöht. Gleichzeitig wurde entdeckt, daß bei maximaler Neigung der Sonden-Spinachse gegen die Verbindungslinie Sonde - Sonne das untere Ende der z-Komponente des Sensors Sonnenzellen am oberen Rand des unteren Arrays abschatten kann und dann elektromagnetische Störungen von 16 Hz und Oberwellen zu befürchten sind. Daher wurde ein kompletter neuer Prototyp des Sensortripels mit verkürzten Komponenten und den Befestigungsvorrichtungen für den Sonnenschirm gebaut. Im Verlauf der Qualifikation mußte später noch einmal ein neues Zentralgehäuse hergestellt werden, da wegen seiner (zunächst simulierten) zusätzlichen dynamischen Belastung beim Schütteltest Haar-

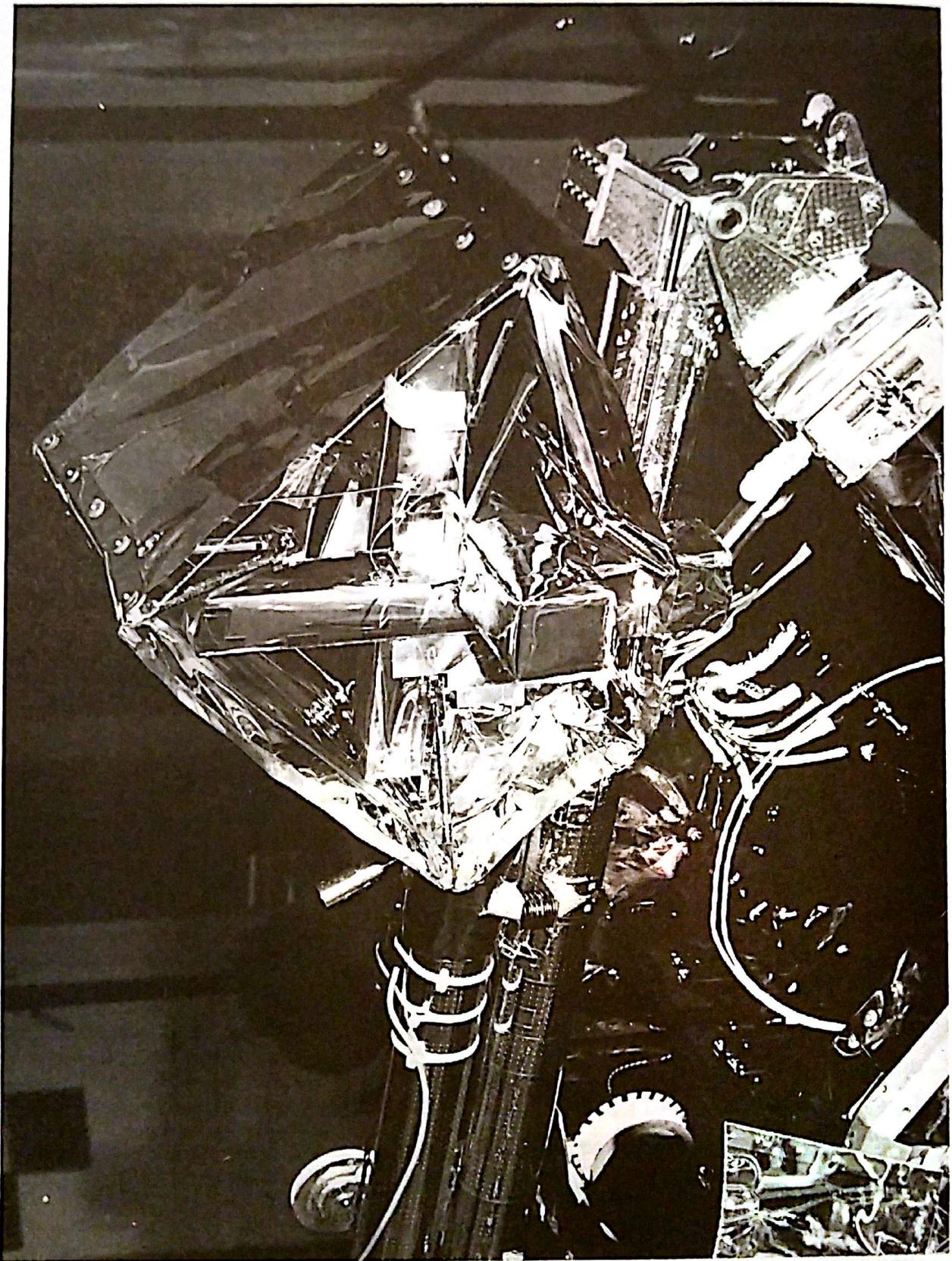


Bild 13 Sensor mit Thermalausrüstung am Ende des
(zusammengeklappten) Sondenauslegers montiert

risse am Befestigungsflansch aufgetreten waren. Den dann mit Erfolg verwendeten Sensor mit seiner Thermalaustrüstung und montiert aus Ausleger der Sonde zeigt Bild 13. Im übrigen wurde durch Versuche sichergestellt, daß die Metallstruktur der Sonnenschirmhalterung und das mehrfache Einhüllen mit der auch elektrisch leitenden Thermalsuperisolation den Sensor nicht in unzulässiger Weise elektromagnetisch abschirmen. Bei einem Eichtest in der Magnetfeldsimulationsanlage der IABG in Ottobrunn, bei dem der Sensor am ausgeklappten Ausleger der Sonde montiert war und neben Sensor und Ausleger auch wenigstens die dem Sensor zugekehrte Seite der Sonde sich noch im Magnetfeld befand, zeigte sich erwartungsgemäß die ebenfalls vernachlässigbare Rückwirkung der Sondenstruktur auf den Sensor. Für die vorher bei der Entwicklung des Sensors und bei der Eichkontrolle aller hergestellten Einheiten notwendigen Messungen der Frequenzabhängigkeit von Empfindlichkeit und Eigenrauschen, der Richtcharakteristik und der Kreuzkopplung zwischen den Komponenten wurde eine im IFN dafür aufgebaute Sensor-Eich- und Testanlage /27/ verwendet.

4.2 Elektronikbox

In der Elektronikbox, Bild 14, ist die weitere Elektronik des Experimentes untergebracht. Aus Gründen des verfügbaren Platzes in der Sonde mußte eine etwas ungünstige Form gewählt werden, bei der sich jedoch eine gute Aufteilung zwischen Analog- und Digitalteil der Elektronik mit jeweils einer eigenen Mutterplatine ergab.

Die Analogelektronik des WFC (vergl. Bild 11) enthält Verstärker, Tiefpaß-Filter und Integratoren, aufgebaut nur mit integrierten Schaltkreisen LM 108 H und LM 4250 H. Die Gegenkopplungs-Netzwerke sind mit Relais Teledyne 422-A-12 und 424-AD-12 umschaltbar, um Verstärkung bzw. Grenzfrequenz

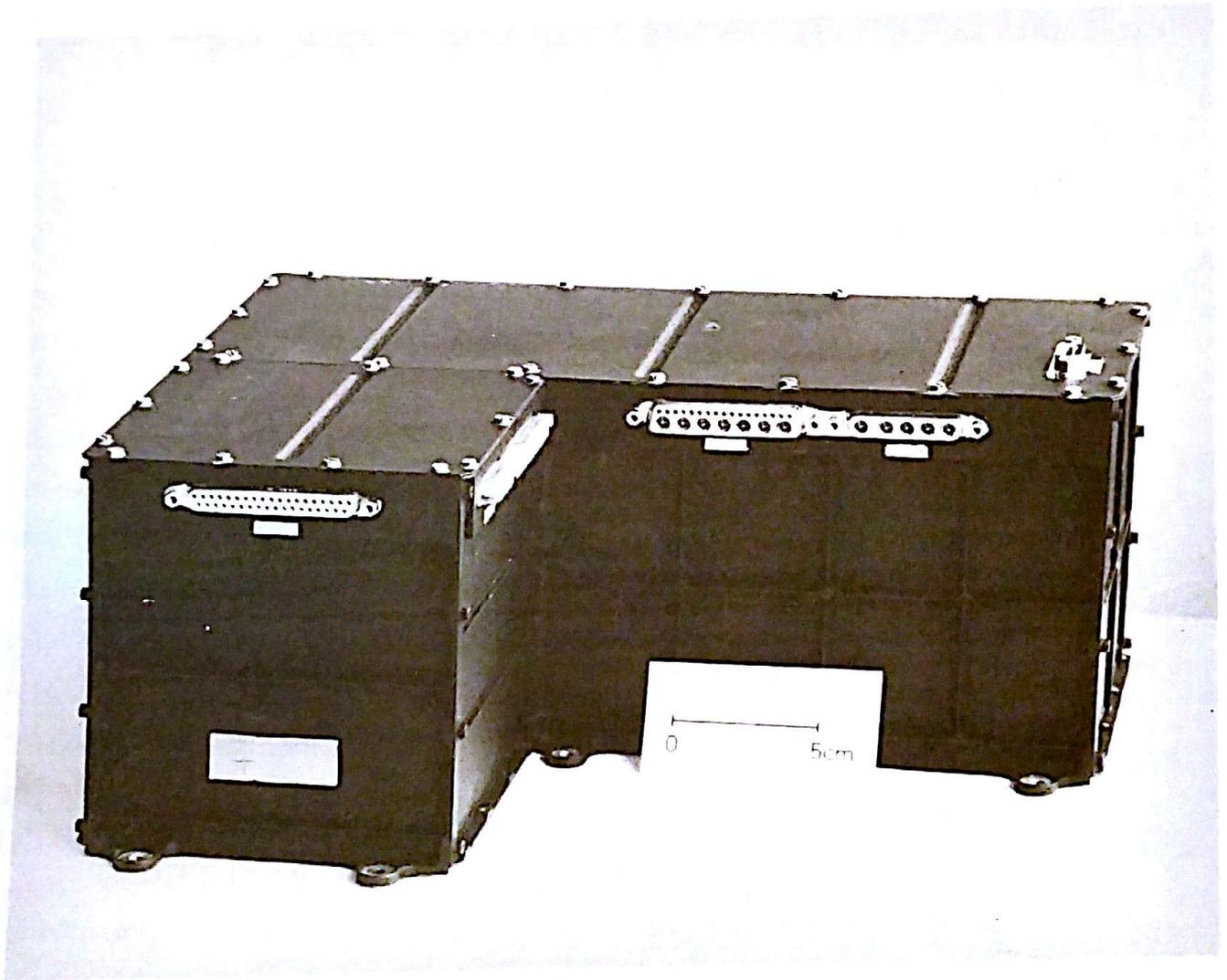


Bild 14 Elektronikbox

mittels Kommandos veränderbar zu machen. Lediglich zum Ansteuern der Relais sind neben Schaltkreisen SN 54 L noch Schalttransistoren 2 N 2222 A und 2 N 2907 A eingesetzt. Die Signaleingänge und einige zu einem äußeren Teststecker geführte Testeingänge sind durch Z-Dioden geschützt, die Testausgänge durch Widerstände kurzschlußfest gemacht. Während der Erprobung des EIM ergaben sich zeitweise große Schwierigkeiten mit den Relais, als sich beim Umschalten nicht genügend genau definierte Verstärkungen und Grenzfrequenzen einstellen. Da das Schalten kleiner Ströme mit mechanischen Kontakten problematisch ist, mußte an einen Ersatz durch Schalttransistoren gedacht werden. Die genaue Untersuchung der ausgefallenen Relais lieferte jedoch als Grund für den schwankenden Übergangswiderstand der Kontakte Fremdstoff-Ablagerungen auf deren Oberfläche. Ausführliche Tests (nach PPL 11 und entsprechend MIL-R-5757 F IV) mit Ersatzrelais eines anderen Loses bei großen und kleinen Strömen zeigten eine geordnete Streuung und Änderung des Kontaktwiderstandes bei bis zu 10^6 Schaltspielen, so daß die Relais doch beibehalten werden konnten.

Der Analog-Multiplexer (MPX) ist ein integrierter Schaltkreis DG 118 AL (Siliconix). Da sein Ausgang an den Teststecker geführt ist und durch ein äußeres Signal sein zyklisches Umschalten auf dem x-, y- oder z-Kanal angehalten werden kann, sind die WFC-Analogelektronikzüge für jede Komponente einzeln zu prüfen. Außerdem ist der vierte Eingang des MPX als Testeingang herausgeführt, um die für alle drei Komponenten gemeinsame Elektronik einschließlich der Umwandlungskennlinie des ADW ohne äußeren Eingriff messen zu können. Die folgenden Verstärker, Gleichrichter, Bereichs- und Vorzeichen-Diskriminatoren (BD und VD) arbeiten im Zeitmultiplex und enthalten daher integrierte Schaltkreise NH 0003 H mit höherer "slew rate" für schnelles Einschwingen. Eine besondere Entwicklung ist der ADW, der durch Zählen von Taktimpulsen die Dauer der Entladung eines von der Signalspannung aufgeladenen Kondensators

mißt und so die quasilogarithmische Umwandlungskennlinie erhält. Er ist aus Transistoren 2 N 2222 A / 2907 A / 2369 A / 3271 A, aus Dual-Transistoren 2 N 3811 / 4044 und JFETs 2 N 2842 aufgebaut. Da im WFC nur Signale niedriger Frequenzen verarbeitet werden und keine durchgehende Gleichstrom-Kopplung erforderlich ist, gab es keine ungewöhnlichen Entwicklungsschwierigkeiten. Ein genügend kleines Eigenrauschen der WFC-Elektronik wurde allerdings nur mit ausgesuchten Exemplaren LM 4250 im ersten Verstärker und im Integrator erreicht, und für eine Übersprechdämpfung von ca. 46 dB zwischen den x-, y- und z-Kanälen mußten am MPX ein Hochpaß-RC-Glied und ein Impedanzwandler-Verstärker eingesetzt sowie die Signalspannungen um den Umschaltzeitpunkt herum ausgetastet werden.

Die Analogelektronik des SPA (vergl. Bild 11) enthält für die x/y- und die z-Komponente zwei Bandfiltersätze mit je 8 Bandfiltern aus 2-poligen Tief-, Hoch- und Bandpässen mit je einem LM 4250 H in dieser als optimal gefundenen Reihenfolge. Darauf folgen Multiplexer (MPX) aus zwei integrierten Schaltkreisen DG 118 AL und Verstärker x1 und x32 mit Schaltkreisen LM 4250 H bzw. LM 108 H. Die den Betrag der Filterausgangswechselspannung bildenden Präzisionsgleichrichter sind nach einer üblichen Schaltung mit Operationsverstärkern NH 0003 H aufgebaut. Als Dioden sind jedoch die Kollektor-Emitterstrecken von komplementären Transistoren 2 N 2920 und 2 N 3811 mit dem geringeren Spannungsabfall in Durchlaßrichtung verwendet, und die zweiten Systeme dieser Doppeltransistoren dienen zur Kompensation des Temperaturganges des Spannungsabfalls /12/. Als Bereichsdiskriminatoren sind Schaltkreise LM 111 verwendet, und die "Sample-and-hold"-Verstärker enthalten JFET-Schalter 2 N 4416, angesteuert über Transistoren 2 N 2222 A, und Schaltkreise LM 4250 H in Elektrometerschaltung. Die Analog-Digital-Wandler ADW 88 L von AEG-Telefunken sind eine Spezialentwicklung für Raumfahrtanwendungen. Sie enthalten großintegrierte Dickfilmschaltungen und einzelne integrierte Schaltkreise mit weiteren Bauelementen, in Mikrobauweise zusammengebaut /28/. Ihre dokumentierte Fertigung und Qua-

lifikation erfolgte auf der Grundlage des in einem Technologie-Basisprogramm entwickelten Bausteins KS 113 bzw. 313. Auch die SPA-Analogelektronik enthält geschützte Testausgänge nach den Verstärkern x 1 und x 32 zum Prüfen der Übertragungseigenschaften der Bandfilter, Multiplexer und Verstärker und Testeingänge zu den "Sample-and-hold"-Schaltungen zum Kontrollieren der ADWs. Von diesen Bausteinen abgesehen, sind keine besonderen elektronischen Bauteile verwendet worden. Zum Erreichen des notwendigen großen Dynamikbereiches der Analogsignal-Verarbeitung mußten aber in den Tiepaß-Teil der Bandfilter wieder ausgesuchte Schaltkreise LM 4250 H mit einem Eingangsräuschstrom $I_r \leq 0,3 \cdot \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ eingesetzt werden, deren Selektion aber keine Schwierigkeiten bereitete.

Die gesamte Analogelektronik in der Elektronikbox ist auf 13 Platinen 11 cm x 11 cm mit 2 Leiterbahnebenen untergebracht, die über eine 8-Lagen-Multilayer - Mutterplatine verbunden sind. Die Tochterplatinen des EIM wurden zunächst mit Cannon-Milstrip-Steckern ausgerüstet, um leichtes Auswechseln und einzelnes Prüfen und Betreiben zu ermöglichen. Da diese Aufbauweise sich bewährte, wurde sie auch für den PT und die F 1/2-Modelle beibehalten, die allerdings mit entsprechenden nichtmagnetischen Microdot-Steckern versehen sind. So konnte das während der gesamten Bau- und Erprobungszeit beim Hersteller verfügbare LM auch als "Tochterplatinen-Prüfgerät" für die qualifizierbaren Einheiten verwendet werden.

Die Digitalelektronik des Experimentes besteht insgesamt ebenfalls aus 13 Platinen, zusammengefaßt durch eine 6-Lagen-Mutterplatine. Auf einer Tochterplatine sind Taktsteuerung und Datenausgabe (C 2) des WFC, sowie die Elektronik für das Erzeugen der Sektorinformation und eines Teiles der Digital-Housekeeping-Daten untergebracht. Eine weitere Platine enthält die restliche Interface-Elektronik zum Telemetriesubsystem der Sonde, nämlich die Ausgabe-

steuerung und Zwischenspeicherung der SPA-Daten (A 1/2 und C 1), das Kommando-Interface und die Elektronik für den zweiten Teil der digitalen Housekeeping-Daten. Sechs Tochterplatinen sind ebenfalls 6-Lagen-Multilayer-Platinen und tragen die Logikschaltungen des SPA-MVC. Aus weiteren vier Platinen besteht der zu einem Block zusammengefaßte MVC-Kernspeicher. Mit Ausnahme der Schreib- und Lese-Elektronik des Kernspeichers ist diese Digitalelektronik vollständig aus integrierten "low-power"-TTL-Schaltkreisen der Serie SN 54 L aufgebaut. Das zeitplangerechte Herstellen der Multilayer-Platinen machte Schwierigkeiten, auch mußten mehrfach solche ungenügender Qualität an den Unterlieferanten zurückgewiesen werden. Nach aufwendiger Eingangsprüfung als gut erkannte Exemplare wurden bestückt, und bei ihnen trugen später keine Fehler mehr auf. Die zur Gewichtsersparnis notwendige dichte Packung (42 "flat-pack"-IC's je Platine) wäre ohne Multilayer nicht zu erreichen gewesen.

Die letzten im Blockschaltbild der Elektronik, Bild 11, eingezeichneten Funktionseinheiten sind schließlich der "Inflight-Test" (IFT)-Generator und der Gleichspannungswandler (DC/DC-Konverter). Der IFT-Generator (auf einer Platine im Digitalteil) erzeugt eine Prüfimpuls-Sequenz, die bei kurzgeschlossenem Haupteingang des Sensor-Vorverstärkers in einen Nebeneingang eingespeist wird und die Funktion von SPA und WFC zu beurteilen gestattet. Seine Schaltung enthält neben logischen Schaltkreisen einen integrierten Multiplexer DG 118 AL, einen Operationsverstärker LM 4250 H und Transistoren 2 N 2222 A / 2 N 2907 A. Der Gleichspannungswandler ist als komplette Einheit mit eigenem Gehäuse und Stecker in das Experiment eingebaut und bildet zusammen mit zwei Teilplatinen die Stromversorgungseinheit des Experimentes. Der Wandler erzeugt aus dem 28-V-Bordnetz der Sonde die experimentinternen Betriebsspannungen ± 8 V, ± 12 V (beide ± 1 %) und +5 V (± 5 %). Er enthält einen synchronisierbaren 20-kHz-Gegentakt-Zerhacker, strombegrenzende Regelschaltungen zum Stabilisie-

ren und Sieben der Ausgangsspannungen und arbeitet mit einem Gesamtwirkungsgrad von 72 %. Seine weiteren wichtigen Funktionen sind das Trennen der Experiment-Masse von der 28-V-Null-Leitung, Schutz der Sonde vor Kurzschlüssen im Experiment und Abschirmen des Experimentes gegen Schwankungen der Versorgungsspannungen oder ihr überlagerter Störungen. Auf einer der Teilplatinen der Stromversorgungseinheit befinden sich zwei Babcock-Relais mit Ansteuerelektronik zum experimentinternen Abschalten der Stromversorgung, so daß bei Störungen WFC oder SPA auch unabhängig voneinander betrieben werden können. Die andere Teilplatine enthält die Elektronik zum Messen der Ströme der vier experimentinternen Spannungen +12 V, ± 8 V und +5 V, die über vier Analog-Housekeeping-Kanäle übertragen werden.

Das Experiment enthält insgesamt etwa 250 Transistoren und Dioden, 120 analoge und 400 digitale Schaltkreise sowie 2000 passive Bauelemente. Alle Einzelbauteile sind formal in einer hochzuverlässigen Qualität erhältlich gewesen, die Einzelhalbleiter als JANTX-Typen, die linearen integrierten Schaltkreise nach Std. 883/B, die Digitalschaltkreise der Serien SN 54 L und 2 Schaltkreise der Serie CD 4000 nach Std. 883, alle passiven Bauteile als CKR-, CSR-, RCR-, RNR- und RWR-Typen. Ausnahmen bilden die Feldeffekttransistoren 2 N 5520 und 2 N 4847 A, die Teledyne- und Babcock-Relais (Typenauswahl nach PPL 11) und die integrierten Multiplexer DG 118 AL (nach MBB-Spezifikation). Die als komplette Funktionseinheiten eingebauten Analog-Digital-Wandler ADW 88 L von AEG-Telefunken und Gleichspannungswandler von MBB wurden dokumentiert gefertigt und einem Qualitätssicherungsprogramm der Hersteller unterzogen und der von Dornier hergestellte MVC-Kernspeicher formal qualifiziert /29/. Den letzten Stand der Leistungs- und Gewichtsbilanz mit abgerundeten Zahlen geben die Tabellen 4 und 5 wieder.

Funktionseinheit	aufgen.elekt. Leistg. in mW
Sensor-Vorverstärker	60
umschaltbare Verstärker	35
WFC-Tiefpässe	2,5
WFC-Verstärker/Integr.MPX I	95
WFC-Verstärker x 32,9/Gleichr./	
Bereichs- u. Vorzeichen-Diskr.	114,5
WFC-Bereichsumschalter/ADW	100
SPA-Bandfilter	40
SPA-MPX/Gleichr./Ber.-Diskr.	265
SPA-S+H/ADW's	582
<hr/>	
Analogelektronik	1294
WFC-Digitalelektronik/ Digitalinterface	609
SPA-MVC/Kernspeicher	1990
IFT-Gen. (Ruheleistung)	52
<hr/>	
Digitalelektronik	2651
Elektronik für Stromverteilg., Analog-HK.	40
Verlustleistung Gleichspg.- Wandler	1550
<hr/>	
Gesamtleistungsaufnahme	5535

Tabelle 4 Leistungsbilanz

Baueinheit	Gewicht in g
<u>Sensor:</u>	
Spulen u. Stäbe	290
Platinen	115
Stecker, Kabel, Kleinteile	165
Kunststoffgehäuseteile	260
Aluminiumteile d. Gehäuses	515
<hr/>	
Sensor (ohne Thermalausrüstung)	1345
<u>Elektronikbox:</u>	
WFC-Analogplatinen (einschl.ADW)	407
SPA-Analogplatinen (ohne ADW)	548
WFC-Digitalplatinen/Digital- interface	98
SPA-ADW auf 2 Platinen	235
SPA-MVC mit Kernspeicher	608
IFT-Generator	58
Stromversorgungsteil (Wandler + Platinen)	310
Aluminiumgehäuse mit Mutterpla- tinen, Stecker, Verkabelung	2007
<hr/>	
Gesamtgewicht Elektronikbox	4271
<hr/>	
Gesamtgewicht Experiment	5616

Tabelle 5 Gewichtsbilanz

5. Test- und Flugbetrieb

Das Verwenden der verschiedenen Betriebsarten im "Normalbetrieb" des Experimentes zum Gewinnen der Meßdaten ist bereits beim Beschreiben seiner Funktion anhand des Bildes "Meßbereiche und Meßdaten" oder beim Aufzählen der verschiedenen Möglichkeiten der Datenübertragung erläutert worden. Hier soll noch etwas zum Einstellen des Experiment-Betriebes, z.B. mit Kommandos und zu seiner Kontrolle über die Housekeeping-Daten ergänzt werden.

5.1 Kommandos und Steuersignale

Die Kommandos sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Da im Normalfall das Experiment von der Sonde ein- und ausgeschaltet wird, dienen die Kommandos 1 bis 3 nur Testzwecken oder zum teilweisen Betrieb z.B. im Falle eines Kurzschlusses oder bei ungenügender Leistungsfähigkeit der Stromversorgung der Sonde etwa im sonnenfernen Bereich der Flugbahn. Die einzigen im normalen Meßbetrieb des vollständig funktionierenden Experimentes angewendeten Kommandos sind die Nr. 4 bis 6. Mit ihnen kann die Verstärkung des umschaltbaren Verstärkers und damit Empfindlichkeit und Meßbereich des Experimentes geändert und entsprechend der unten angefügten Ergänzungstabelle eingestellt werden. Für den Fall eines Fehlers im MVC können nach Kommando 7 seine Dateneingabe-Einheit und der Prozessorteil umgangen und digitalisierte Filterausgangsspannungen in zufälliger Reihenfolge mit zugehörigen Kennungen zu A 1/2-Datenblöcken zusammengestellt werden. Mit dem Kommando 8 wird der Vorverstärkereingang kurzgeschlossen. Dieses ist zum Schutz des Eingangstransistors häufig bei Tests angewendet worden. Die Kommandos 9 oder 10 schalten den SPA-Eingang auf die für ihn gleichwertigen Ausgänge der Sensorkomponenten x oder y, so daß im Fall eines Fehlers in einer dieser beiden Sensorkomponenten wenigstens die SPA-Daten voll-

Nr.	Code	Funktion	Einwirkung
1	012	WFC ein	Relais A an
2	365	SPA ein	Relais B an
3	116	WFC + SPA aus	Rel. A + B ab
4	033	Verstärkung $v_{umsch.}$ ändern	Rel. C an
5	344	" " "	Rel. D an
6	261	" " "	Rel. C + D ab
7	240	MVC-Notbetrieb	Flip-Flop E an
8	054	Vorverstärker kurzgeschl.	Rel. F an
9	075	SPA umschalten auf Sensor X Vorverstärker offen, MVC- Notbetrieb aus	Rel. G an Rel. F und FF E ab
10	302	SPA umschalten auf Sensor Y Vorverstärker offen, MVC- Notbetrieb aus	Rel. G ab Rel. F und FF E ab
11	323	IFN-Sequenz ein und auto- matisch aus (Vorverst. offen)	Rel. F und Rel. H an automatisch beide ab

Stand der Verstärkung $v_{umsch.}$		
$v_{umsch.}$	Rel. C	Rel. D
0,03	ab	an
0,4	ab	ab
2	an	an
10	an	ab

Tabelle 6: Experiment-Kommandos

ständig erhalten werden. Das Einschalten des "Inflight-Test"-Programmes geschieht mit Kommando 11. Damit auch bei einem Fehler im Kommando-Decoder der Sonde der für den Meßbetrieb notwendige Zustand "Vorverstärkereingang offen" erreicht werden kann, sind die Kommandos 9 bis 11 hinsicht-

lich dieser Wirkung redundant. Aus konstruktiven Gründen ist im MVC ein 4-kbit-Kernspeicher eingebaut, das Experiment benötigt aber nur 2-kbit Speicherplatz. Deshalb sind die beiden Kernspeicher-Teile getrennt benutzbar gemacht worden, falls in dem einen oder anderen Teil eine Störung auftritt. Eine Kommandofolge 7, 8 oder 7, 10 führt zum Umschalten auf den jeweils vorher nicht benutzten Speicher- teil, was im ungünstigsten Fall zum Verlust eines halben A 1/2-Datenblockes führt, sonst aber nicht bemerkt wird.

Das Bild 15 gibt eine Übersicht über den Datenfluß zwischen dem Experiment und dem Telemetriesubsystem der Sonde. Neben den erwähnten Kommandos und den reinen Taktimpulsen für die Übergabe der Meßdaten (Bitschiebetakte, Wort- und Blocktransfer-Signale) empfängt das Experiment noch Steuersignale von der Telemetrie, die wie Kommandos Einfluß auf seine Betriebsart haben. Im WFC müssen Messungen und Datenübergabe synchron zueinander laufen, da kein Speichern der C 2-Daten möglich ist. Außerdem müssen Grenzfrequenz der Tiefpaßfilter und Abtastrate des ADW passend zur Datenübergaberate (d.h. zur Sende-Bitrate bei Format 5 oder zur Einleserate in den Kernspeicher der Sonde bei Format 6) eingestellt werden. Beides wird mit Hilfe des Meßdaten-Grundtaktes und des Datenmode-Signals für DM 1, 2 oder 3 erreicht. Die Sektorinformationselektronik mißt mit Hilfe des Sektorzähltaktes, der erwähnten 512-Hz-Pulsfolge, den Zeitabstand zwischen "see-sun"-Puls und dem Anfang des Telemetrierahmens, in den die WFC-Daten eingelesen werden. Beim SPA ist mit dem Meßprinzip eine Datenspeicherung verbunden, daher wird hier kein Meßtakt benötigt. Das Ende des laufenden und der Beginn eines neuen Mittelungs- bzw. Beobachtungs- Zeitintervalls wird von der Vorderflanke des Blocktransfer-Impulses bestimmt.

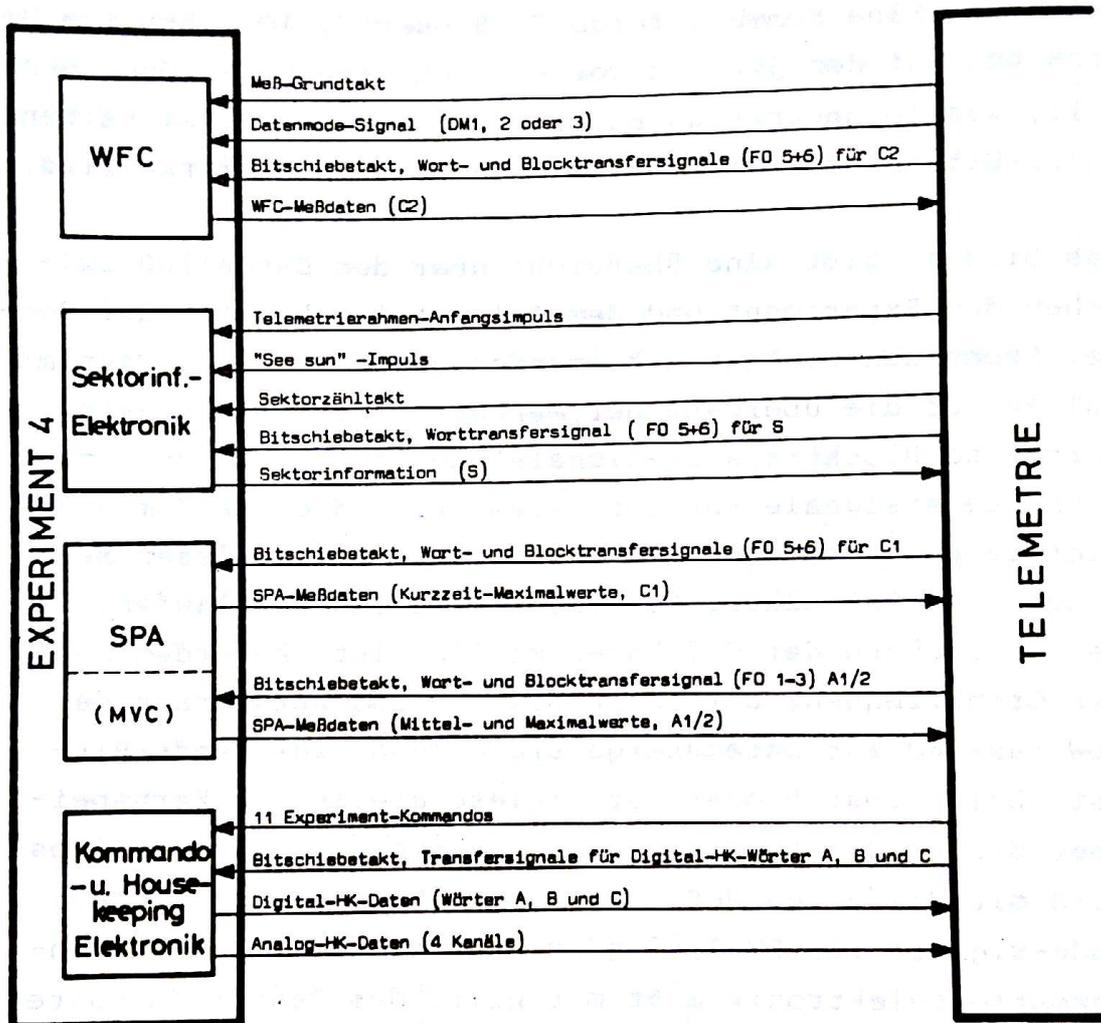


Bild 15 Datenfluß zwischen dem Experiment und dem Telemetrie-Subsystem der Sonde

5.2 Housekeeping-Daten

Kenntnis über den tatsächlich erreichten Betriebszustand geben die digitalen und analogen Housekeeping-Daten, Tabelle 7. In den 8 Bits des Digital-HK-Wortes A ist die Reaktion des Experimentes auf die Kommandos verschlüsselt. Das Wort B zeigt den zum Abtastzeitpunkt gerade vorliegenden Arbeitszustand des MVC an. Da Zeitdauer und Häufigkeit der Arbeitszustände bekannt und sehr unterschiedlich sind, können typische Wahrscheinlichkeiten für ihr zufälliges Antreffen beim Abfragen der HK-Daten berechnet werden. Ein Vergleich dieser theoretischen Zahlen mit der Information aus einer größeren Zahl von B-Wörtern zeigt, ob der MVC richtig arbeitet. Mit den ersten 6 Bits des Digital-HK-Wortes C sind die Einstellungen der WFC-Tiefpaß-Relais codiert, die zu dem zur Meß- und Übertragungszeit gerade verwendeten Telemetrie-Datenmode passen müssen. Die letzten beiden Bits dieses Wortes zeigen an, ob sich infolge des Ausfalls des Taktgenerators im MVC-Kernspeicher ein redundanter äußerer Generator eingeschaltet hat und welcher Teil des Speichers gerade benutzt wird. Die Zustandüberwachung der Relais, mit denen fast alle Kommandos ausgeführt werden, ist besonders zuverlässig, da dafür freie Kontrollkontakte benutzt werden. Über vier analoge Housekeeping-Kanäle wird schließlich der Stromverbrauch bei den experimentinternen Betriebsspannungen +12 V, +8 V und +5 V an die Sonde gemeldet. Dort wird die dem Strom proportionale Spannung (von max. 5 V) digitalisiert und mit 8 bit übertragen. Zum Überwachen des Experimentes dienen auch noch zwei Thermistoren, die die Temperatur am Zentralgehäuse des Sensortripels und an der Bodenplatte der Elektronixbox messen. Da sie zum Thermalsubsystem der Sonde gehören, sind die Meßwerte in den Housekeeping-Daten der Sonde enthalten.

DIGITAL - HOUSEKEEPING - DATEN

Wort	Bit-Nr.	Bedeutung
A Kommando- Verifikation	0	Infl.-Test ein/aus
	1	SPA an Sensor x/y
	2	Vorverst. Kurzschluß ein/aus
	3	Notbetrieb ein/aus
	4	Verst.-Relais D ein/aus
	5	" " C ein/aus
	6	SPA ein/aus
	7	WFC ein/aus "L" Δ ein, "O" Δ aus
B MVC-Status	0	"O" = Einschr. MVC-Speicher
	1	"L" = SPA-MPX Zähler Kontr.
	2	"O" = Accumul. läuft
	3	"L" = Max.-Suche läuft
	4	"L" = Reduktion läuft
	5	"L" = Interrupt
	6	"O" = Redukt., Suche führ.1
	7	"O" = Auslesen MVC-Speicher
C WFC-Tiefpaß MVC-Speicher	0 } 1 } 2 } 3 } 4 } 5 } 6 } 7 }	Relais R1 ... R6 der WFC-Tiefpässe an/ab "L" Δ an, "O" Δ ab "L" = ext. Takt-MVC-Speicher "L" = 1. Teil MVC-Speicher

ANALOG - HOUSEKEEPING - DATEN

Kanal	Bedeutung
C 32	Strom bei +12V intern. versorg.-Spg.
C 33	" " + 8V " "
C 34	" " - 8V " "
C 35	" " + 5V " "

Tabelle 7 Digitale und analoge Housekeeping-Daten

5.3 Funktionstests

Um das Experiment während der zahlreichen Tests zunächst außerhalb der Sonde betreiben und prüfen zu können, sind zwei (gleichartige) Experiment-Testgeräte (ETE) gebaut worden. Ihre Herstellung erforderte einen erheblichen Teil der gesamten Entwicklungs- und Fertigungsarbeiten. Zum Betrieb des Experimentes muß das ETE die 28-V-Stromversorgung einschließlich der Synchronisierimpulse für den Gleichspannungswandler liefern, alle Kommandos und Telemetriesignale geben, die Digitaldaten übernehmen, decodieren und anzeigen und schließlich für Prüfzwecke definierte Steuerspannungen umschaltbarer Größe und Frequenz abgeben. Bild 16 zeigt das ETE, einen verhältnismäßig komplizierten Systemprüfplatz, der diese genannten Aufgaben erfüllt. Er enthält einen Digitalrechner MULBY C der Firma Krantz Elektronik, Aachen, einen Satz CAMAC-Einschübe mit Interface-Einheiten zum Experiment, einen digital steuerbaren Prüfspannungsgeber, einen Lichtschreiber für Wellenformaufzeichnen und schließlich eine Fernschreibmaschine als Befehlseingabe- und Datenausgabe-Einheit /30, 31/. Da eine störungsfreie Signalübertragung zwischen Experiment und ETE auch über ein 12 m langes Kabel gefordert war, gehört zur Ausrüstung des ETE noch ein "Check-Out-Adapter", der am Ende des Kabels in der Nähe des Experimentes betrieben wurde und die Pegelwandlung der analogen und digitalen Testsignale übernahm.

Bei dem "Ausführlichen Gesamttest" (DPT = Detailed Performance Test) des Experimentes mit einer Verbindung zwischen dem ETE und dem Experiment-Teststecker an der Box können in 9 Einzeltests Sensor-Vorverstärker, WFC-Analog-Elektronik, Gesamt-WFC, SPA-Analog-Elektronik, SPA-ADW, MVC, Datenreduktion im MVC, Gesamt-SPA und Housekeeping-/Sektor-Information getestet werden. Für diese Einzeltests wird von Lochstreifen jeweils ein Programm in den Rechner ein-

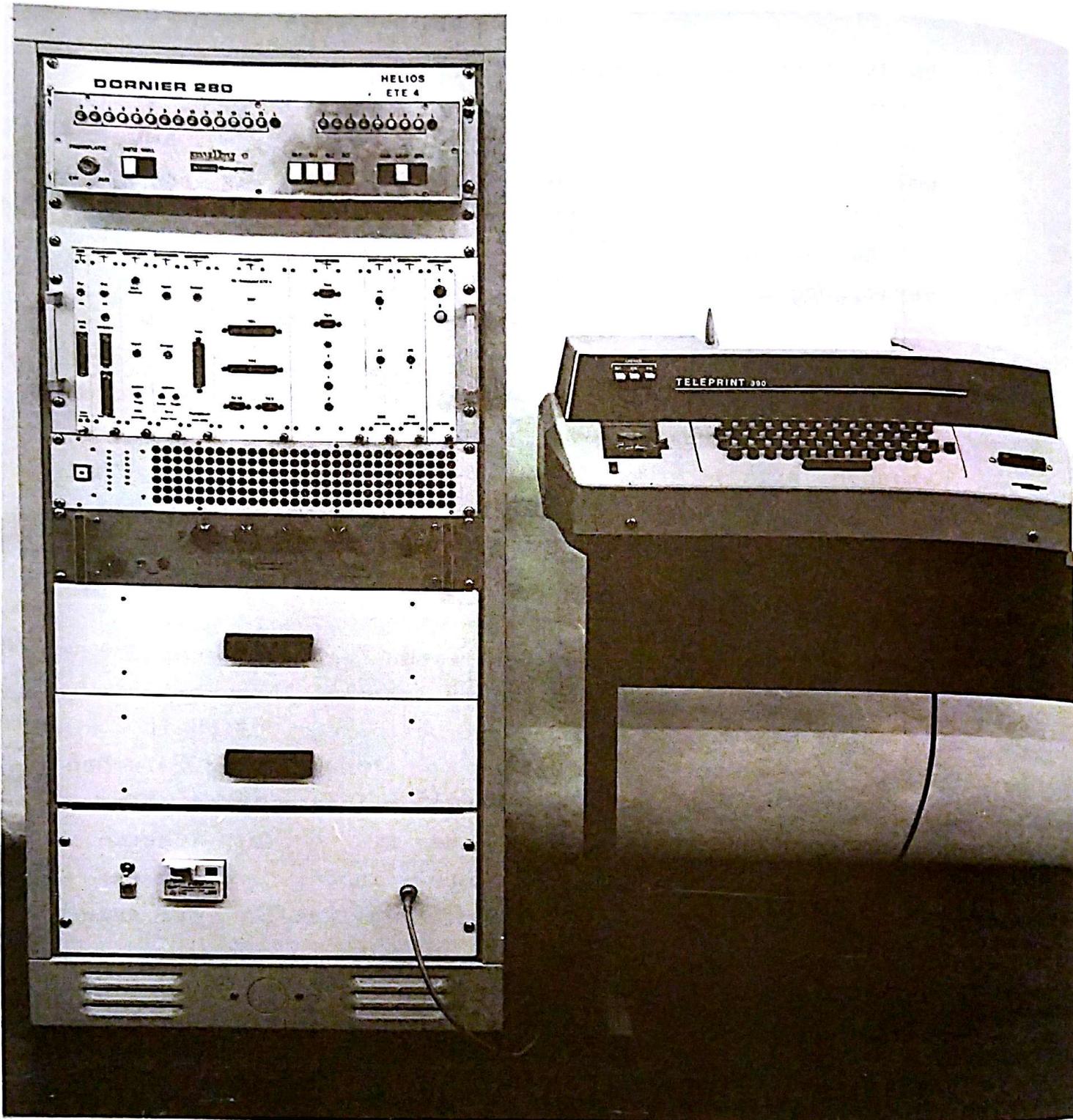


Bild 16 Experiment-Testgerät (ETE)

gelesen, das dann automatisch bis zum Ausdrucken der Testergebnisse abläuft. Dabei werden z. B. Verstärkungsfaktoren, Frequenzgänge, ADW-Kennlinien usw. auch bei den verschiedenen Betriebsarten des Experimentes gemessen /31/. Dieser Test dauert zwar etwa 5 Stunden, es können dabei jedoch Fehler in der Experimentelektronik bis auf mindestens Tochterplatinen-Niveau herunter eingekreist werden. Es war verhältnismäßig schwierig und erforderte einen in dieser Höhe nicht eingeplanten Zeitaufwand, das erste Experiment-Modell (EIM) zusammen mit dem neu gebauten ersten ETE und der noch nicht erprobten Software in Betrieb zu bringen. Anfangs war jede dieser drei Komponenten Prüfgerät und Prüfobjekt zugleich und weiter erschwerend war, daß sie nicht gleichzeitig auf demselben Fertigungsstand waren. Zum Ausprobieren des zweiten ETE wurde deshalb später das Experiment-LM auf den Stand der Flugeinheiten gebracht. Das Verwenden des ETE mit der Möglichkeit, durch Wahl der Programm-Zusammenstellung Testdauer und Schwerpunkt den Notwendigkeiten anzupassen, bewährte sich bei den zahlreichen Funktionsprüfungen des Experimentes zwischen den Umwelttests der qualifizierten Einheiten PT und F 1/2. Auch bei den entsprechenden Tests der integrierten Sonde wurde das Experiment mit Hilfe des ETE im Zusammenwirken mit dem Sondentestsystem HELIOS Test-Set (HTS) überwacht. Bild 17 zeigt als Beispiel für das Zusammenschalten von ETE und ETE+HTS mit dem Experiment die Konfigurationen für den DPT und den "Integrated System Test" IST 2.

Bei diesen Funktionsprüfungen des Experimentes im IST 2 wurde zusätzlich und in dem abgekürzten IST 1 bis kurz vor dem Start der Rakete nur noch der "Inflight"-Test (IFT) gemacht. Er ist bei den Einzeltests des ETE nicht aufgeführt, da hierfür kein Programm notwendig ist und das ETE bzw. später der HTS nur durch Kommando den Test auszulösen und dann die Daten auszudrucken hatte. In Bild 18 ist der Zeitablauf des IFT schematisch dargestellt.

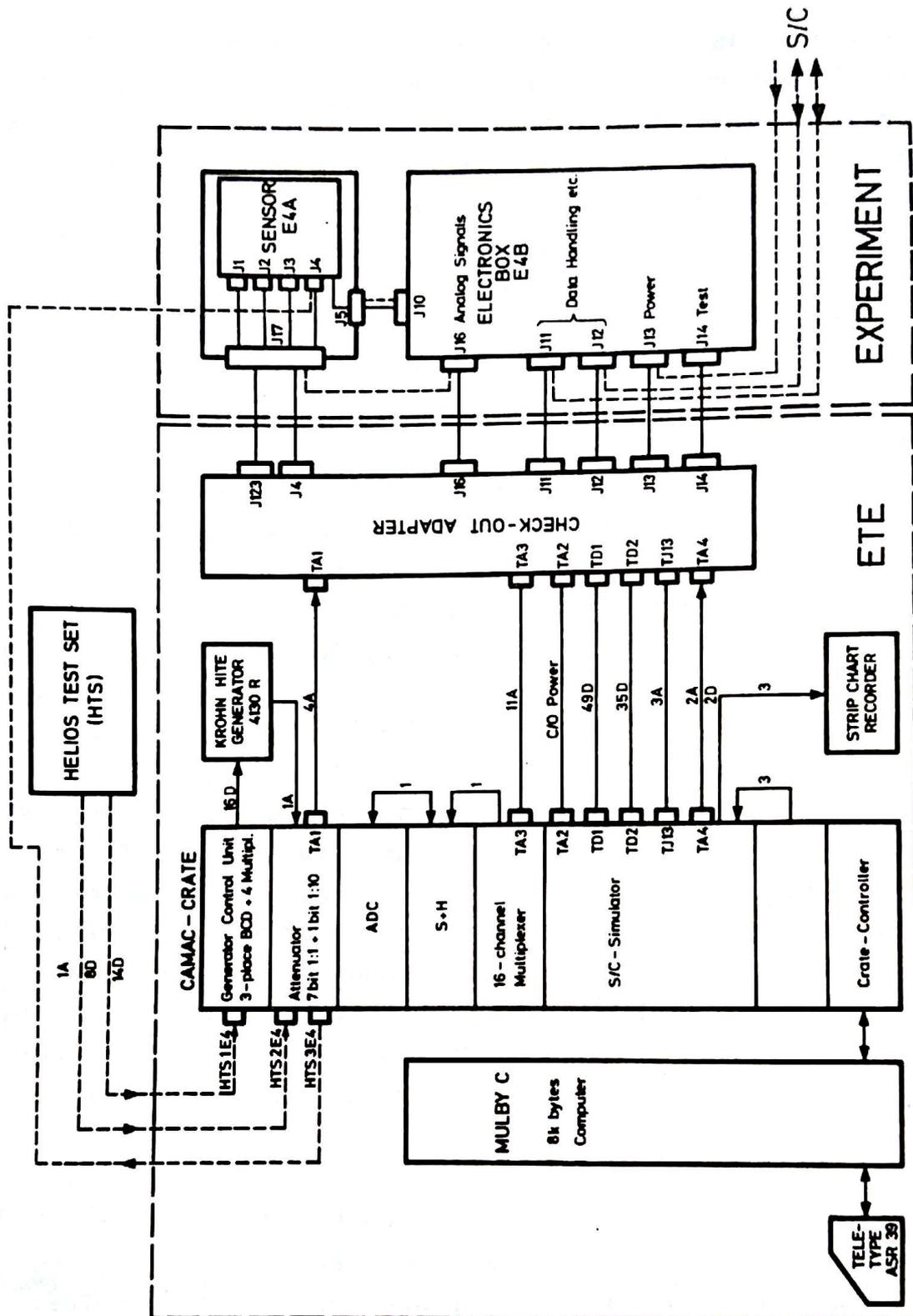


Bild 17 Test-Konfigurationen für den "Ausführlichen Gesamttest (DPT)" und den "Integrated System Test (IST 2)" mit HELIOS Test-Set (gestrichelte Kabelverbindungen)

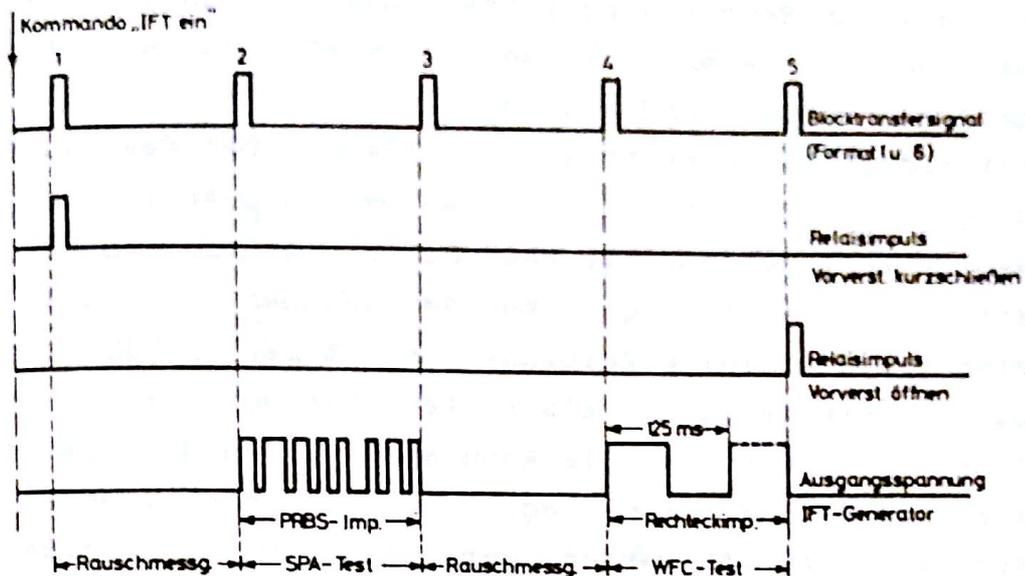


Bild 18 Zeitablauf des "Inflight"-Test

Nach dem Kommando "IFT - ein" wird beim ersten darauf folgenden Blocktransfersignal 1 der Vorverstärker-Haupteingang kurzgeschlossen und die Ausgangsspannung des IFT-Generators in den Nebeneingang eingespeist. In der Zeit bis zum nächsten Blocktransferimpuls 2 ist die Ausgangsspannung noch Null und während dieses ersten Mittelungs- / Beobachtungszeitintervalls wird ein SPA-Datenblock (A 1/2) mit den frequenzabhängigen Mittel-/Maximalwerten des Experiment-Eigenrauschens gebildet. Im zweiten Zeitabschnitt erzeugt der IFT-Generator eine PRBS-Impulsfolge. Die Folgefrequenz der Einzelimpulse beträgt 16,4 kHz und die Wiederholfrequenz der Sequenz 8 Hz. So wird vom SPA nahezu "weißes" Rauschen analysiert und der vom Blocktransferimpuls 3 abgerufene Datenblock enthält insbesondere quadratische Mittelwerte, die mit der Bandbreite der Filter steigen. Darauf folgt wieder eine Rauschmessung und im letzten Zeitabschnitt wird eine 8-Hz-Rechteck-Prüfspannung verwendet.

Beim Abrufen des letzten Datenblockes schaltet sich der IFT-Generator ab und das Relais gibt den Vorverstärkereingang zum Sensor wieder frei. Die während des IFT erhaltenen WFC-Daten (C 2) werden im ETE bzw. HTS digital-analog-gewandelt und als Zeitfunktionen für die x-, y- und z-Komponenten getrennt aufgeschrieben. Bei den Rauschmessungen kann die Lage der ersten beiden Quantisierungsklassen geprüft werden. Die PRBS-Folge erscheint im Wellenformschrieb als tiefpaß-gefiltertes Rauschen, dargestellt durch eine treppenförmige Zeitfunktion mit den charakteristischen Quantisierungsklassen als Stufen. Mit der Form der verschliffenen 8-Hz-Rechteckwelle kann schließlich die richtige Einstellung der WFC-Grenzfrequenz und die nichtlineare ADW-Kennlinie geprüft werden. Der IFT dauert nur wenige Minuten, davon sind bei der Bitrate 2048 bps im Format 1 nur 5,6 s eigentlicher Test, der Rest der Zeit wird für das Aufschreiben der Wellenformen gebraucht. Der Test kann daher leicht für verschiedene Verstärkungen im Experiment und Formate bzw. Bitraten der Telemetrie wiederholt werden und hat sich als sehr nützlich erwiesen. Da die Zahlenergebnisse der SPAMessungen und die Wellenformschriebe zu berechnen sind und die Ergebnisse aller IFT's katalogisiert wurden, konnten bald sehr genaue Sollwerte für ein richtig funktionierendes Experiment angegeben werden.

5.4 Umwelttests

Die vollständige Reihe der Umwelttests während der Qualifikation des Experiment-Prototyps und die daraus ausgewählte Folge der Abnahmetests der Flugeinheiten F 1 und F 2 zeigt Bild 19. Zwischen die einzelnen Tests sind eingeschränkte oder ausführliche Funktionstests des Experiments mit Hilfe des ETE eingeschoben, die das "Überleben" des Experimentes prüfen. Die Qualifikations- und Abnahme-Tests der integrierten Sonde fanden nach einer ähnlichen Reihenfolge statt,

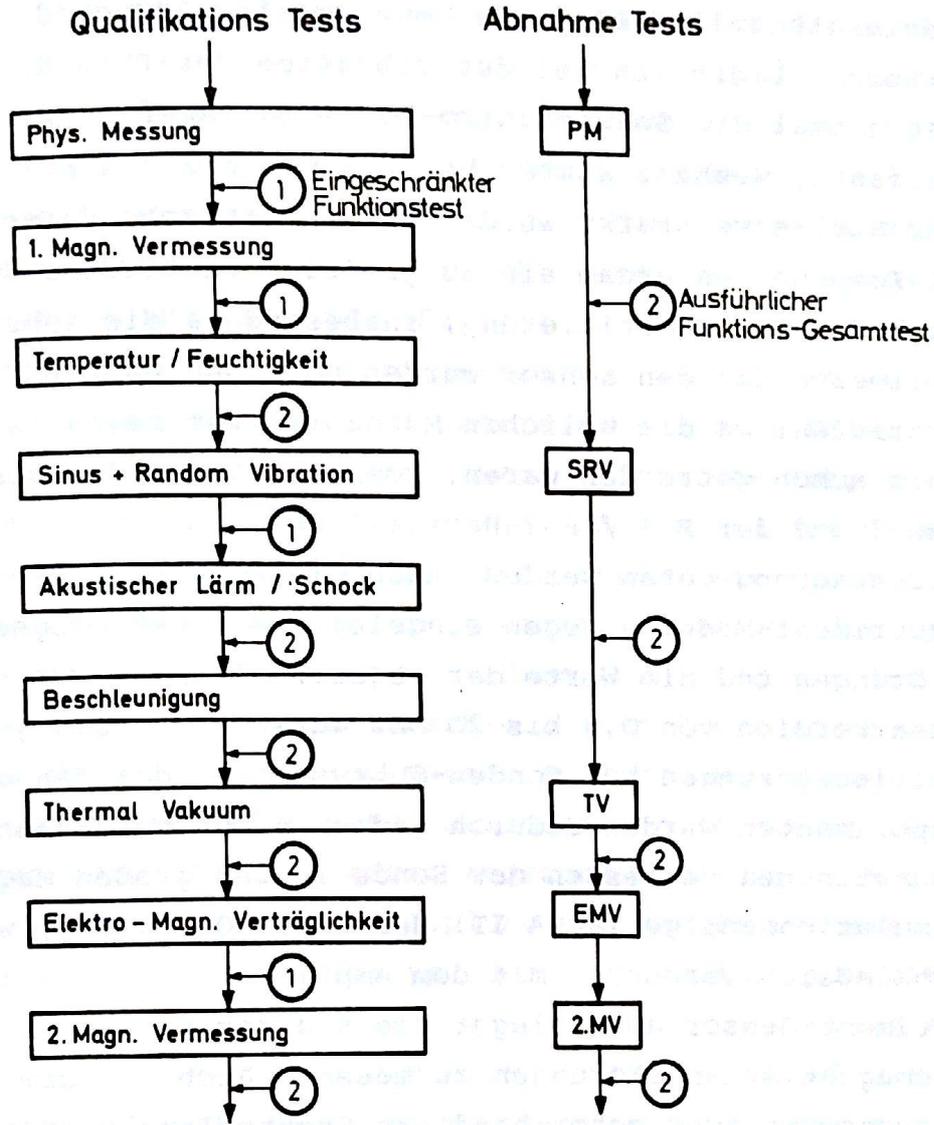


Bild 19 Umwelt- und Funktionstests bei der Qualifikation des PT und der Abnahme von F 1 / F 2

wobei anstelle der eingeschränkten und ausführlichen Funktionstests des Experimentes "Integrated System Tests" IST 1 und IST 2 der Sonde gemacht wurden. Die Sondentests sind noch ergänzt worden durch einen weiteren Temperaturtest, einen Sonnensimulationstest und einen "Open Air"-Test. Alle Experimentmodelle haben die Umwelttests unbeschadet überstanden. Lediglich bei der Vibration des PT-Sensors (II) ist einmal die Sonnenschirm-Folie an ihrer Befestigung eingerissen, weshalb später bei F 1 und F 2 die Folie an dieser Stelle verstärkt wurde. Das magnetische Vermessen der PT-Komponenten ergab ein zu großes magnetisches Streufeld nach der Entmagnetisierung, insbesondere die sehr kleinen Sollwerte für den Sensor wurden um einen Faktor 2...3 überschritten. Da die üblichen Maßnahmen für magnetische Reinheit schon getroffen waren, konnte bei dem fortgeschrittenen Stand der F 1 / F 2-Herstellung nichts mehr zu ihrer Verbesserung getan werden. Auch die Empfindlichkeiten aller Experiment-Modelle gegen eingeleitete elektromagnetische Störungen und die Werte der abgestrahlten Störungen im Frequenzbereich von 0,6 bis 20 MHz waren höher als gefordert. Betriebsstörungen bei Sonden-Subsystemen oder den anderen Experimenten wurden dadurch jedoch nicht verursacht. Beim magnetischen Vermessen der Sonde in der großen Magnetfeld-Simulationsanlage (MFSA II) der IABG, Ottobrunn, wurde schließlich versucht, mit dem empfindlich geschalteten Experiment-Sensor am Ausleger die von der Sonde erzeugten elektromagnetischen Störungen zu messen. Auch mit dem zusätzlich verwendeten sehr schmalbandigen Spektralanalysator (Quan Tech Mod. 304) gelang dies wegen der starken Umwelt-Störungen nur sehr beschränkt.

5.5 Flugbetrieb

Bei den Startvorbereitungen gab es im Zusammenhang mit dem Experiment keine Probleme und durch das Einschalten der

Sonden nach Erreichen ihrer Flugbahnen konnten beide Flugeinheiten in einen einwandfreien Betrieb gebracht werden.

Unmittelbar nach dem Start von HELIOS 1 wurde in den oberen SPA-Frequenzkanälen des F 1 erhöhtes Rauschen entdeckt, das sich nach mehrmaligem Aus- und Einschalten der elektrischen Sensorheizung zweifelsfrei als eine von den Heizmatten auf die x-Komponente des Sensors eingekoppelte Störung herausstellte. Die Größe dieser Störung lag bei 15 - 60 % des Sensor-Eigenrauschens und erhöhte die untere Meßschwelle für die Kanäle 5 bis 8 merklich. Daher wurde mit Hilfe des Kommandos Nr. 10 (Code 302) der SPA auf den Ausgang der y-Komponente des Sensors geschaltet und die Störung dadurch unwirksam gemacht. Das Untersuchen dieses Effektes am EIM-Sensor ergab eine sehr unterschiedliche Kopplung zwischen den Sensorkomponenten x, y oder z und den jeweils auf ihnen befestigten 2 Heizmatten, obwohl sie äußerlich nicht zu unterscheiden und in gleicher Weise auf den Komponenten befestigt sind. Dieser Widerspruch wird mit den zwar kleinen aber sehr unterschiedlichen Restkopplungen der streufeldkompensierten Matten erklärt. Ein wesentlicher Beitrag der verdrehten Heizmatten-Zuleitungen zu der störenden Kopplung kann nicht angenommen werden. Mit dem Höchstwert der gemessenen Kopplung und den Ergebnissen der durchgeführten Spektralanalyse der ungesiebten Heizmatten-Versorgungsspannung an HELIOS 2 läßt sich die Störung auch quantitativ erklären. Da die Verkabelung in HELIOS 2 schon vollständig installiert war, konnten Tiefpaßfilter zum Sieben der Heizspannung nicht mehr eingebaut werden.

Hervorzuheben ist das gute Verhalten der Sensor-Temperatur im bisherigen Missionsverlauf, die in Bild 20 (nach /32/) als Funktion der Entfernung zwischen Sonde und Sonne bis zum ersten Perihel von HELIOS 1 aufgetragen ist. Nach 72 Tagen Flugzeit erreichte die Sensortemperatur zum ersten Mal die obere Grenztemperatur des Thermoschalters,

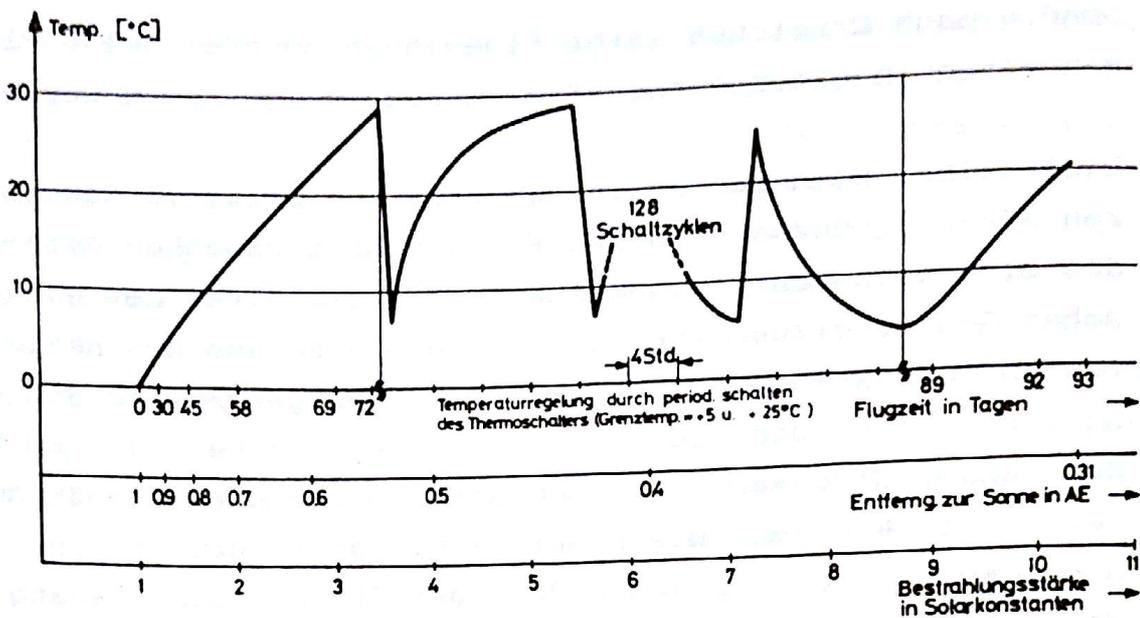


Bild 20 Innentemperatur des Sensors in Abhängigkeit von der Zeit

der dabei die seit dem Start eingeschaltete elektrische Heizung abschaltete. Hierauf folgten 131 Schaltzyklen des Thermostaten, bis am 89. Tag auch bei ausgeschalteter Heizung die untere Grenztemperatur nicht mehr erreicht wurde. Entsprechend der zunächst geringen einfallenden Sonnenstrahlung fällt bei den ersten Schaltzyklen die Sensortemperatur nach dem Ausschalten der Heizung schnell und steigt nach dem Einschalten nur langsam an, während bei der großen Sonneneinstrahlung der letzten Zyklen diese Zeitkonstanten des Temperaturverlaufes vertauscht sind. Bei schleichendem Annähern der Temperatur an die Grenzen schaltet der Thermostat offenbar später als beim schnellen Annähern. Bei größter Sonnennähe erreichte die Sensortemperatur $+21,1^{\circ}\text{C}$ und auch beim dritten Perihel stieg die Sensortemperatur nur auf $+31,7^{\circ}\text{C}$.

Im zweiten Halbjahr des Fluges von HELIOS 1 setzten zeitweise mehrmals die Daten einer WFC-Komponente vorübergehend aus. Störungen der Telemetrie oder der Datenverarbeitung im Experiment scheiden nahezu sicher als Ursache aus. Hin-

weise für einen "Wackelkontakt" bei mechanischer Belastung, z.B. durch zeitliches Zusammenfallen des Datenausfalls mit Lagekorrekturen der Sonde oder ihren Temperaturschwankungen, konnten jedoch auch nicht gefunden werden. Inzwischen werden die Daten wieder ohne Unterbrechung empfangen.

Auch die WFC-Daten der 2. Flugeinheit weisen seit dem 62. Flugtag von HELIOS 2 eine kleine Störung auf: Mit ziemlicher Regelmäßigkeit liegt im Mittel jeder 8. Abtastwert der x-, y- oder z-Komponente deutlich abseits vom "glatten" Wellenform-Zeitverlauf. Diese Störung ist sowohl auf den "Quick-Look"-Ausdrucken zu sehen, als auch auf den Datenbändern verzeichnet, die zunächst für Format-5-Daten verarbeitet wurden. Sie soll im Zusammenhang mit der Auswertung der Format-6-Daten später noch genauer untersucht werden. Eine spezielle Datenverarbeitungs-Routine, die die gestörten Abtastwerte erkennt und durch Mittelung unschädlich macht, kann dann noch auf die Daten angewendet werden.

6. Ausblick

Beide Experiment-Einheiten liefern seit den Starts von HELIOS 1 und HELIOS 2 interessante Magnetfelddaten. Wesentliche Fortschritte gegenüber früheren ähnlichen Experimenten sind auf drei Punkte zurückzuführen:

1. Geringeres Hintergrundrauschen (Experiment- und Raumfahrzeugstörung) als bei allen bisherigen magnetischen Wellenexperimenten im solaren Wind,
2. größere Zeitauflösung der Spektren und
3. Messungen im gesamten Bereich zwischen 1 und 0,3 AE Abstand von der Sonne.

Nach dem etwas verzögerten Beginn der Auslieferung der Datenbänder (Experiment Data Records) verläuft die Routineverarbeitung der Experimentdaten problemlos. Neben einer Anzahl von Spezialprogrammen für die Auswertung werden dabei von allen Daten Schriebe erstellt, die entweder den zeitlichen Verlauf von 40-Sekunden-Mittelwerten über 24 Stunden oder von 8-Sekunden-Mittelwerten über eine Stunde der Spektraldichten (nT/\sqrt{Hz}) sowie den zugehörigen Verlauf der Maximalwerte darstellen. Die wissenschaftliche Auswertung dieser Daten ist erst am Anfang und hat neben verschiedenen Vorträgen bisher zu zwei Veröffentlichungen /33, 34/ geführt.

7. Zusammenfassung

Für die "Sonnensonden" HELIOS 1 und 2 ist von den Instituten für Nachrichtentechnik und Geophysik der TU Braunschweig das Induktionsspulenmagnetometer (Experiment 4) beige-steuert worden. Dieses Experiment untersucht die magnetische Komponente elektromagnetischer Wellen im interplanetaren Plasma auf zweifache Weise. Sein Wellenformkanal (WFC) mißt den zeitlichen Verlauf von Kurzzeitschwankungen der magnetischen Felder bis $\pm 8,25 / \pm 224$ nT bei HELIOS 1 und $\pm 11 / \pm 293$ nT/s bei HELIOS 2 in den drei Raumrichtungen und im Frequenzbereich von 4 Hz bis maximal 128 Hz. Der Spektralanalysator (SPA) liefert Frequenzspektren der Magnetfeldfluktuationen in der Ekliptik und senkrecht dazu bis zu etwa 10 000 nT·Hz, wobei der Gesamtfrequenzbereich von 4,7 bis 2200 Hz aufgeteilt ist in 8 aneinander anschließende Teilbereiche.

Für die Übertragung der Meßdaten von der interplanetaren Sonde zur Erde müssen sie stark reduziert werden. Die Wellenformmessungen ergeben sowohl eine zu hohe, nicht direkt übertragbare Datenrate als auch eine zu große Datenmenge. Deshalb werden diese Daten zunächst in einen sondeneigenen Speicher schnell eingelesen, zwischengespeichert und später langsam ausgelesen und übertragen. Außerdem wird die durch das Speichern gegebene Möglichkeit ausgenutzt, überhaupt nur die interessantesten Daten ausgesuchter Zeitintervalle zu übertragen. Ihre Dauer ist allerdings durch die verfügbare Speicherkapazität auf höchstens 101 Sekunden begrenzt. Die Spektraldaten können dagegen kontinuierlich übertragen werden, da neben der schon mit dem Meßverfahren verbundenen Datenreduktion (Mittelung im Frequenz- und Zeitbereich) noch ein digitaler Mittelwertrechner quadratische Mittelwerte über längere Zeitabschnitte zwischen 1,125 und 1152 s Dauer berechnet. Der auf diese Weise weiter reduzierte Datenfluß aus dem Experiment wird automatisch an die übertragbare Datenrate angepaßt, weil

die Dauer dieser Zeitabschnitte vom Sonden-Telemetriesubsystem bestimmt wird.

Das Experiment besitzt einen 3-Komponenten-Sensor mit Induktionsspulen auf Mumetallstäben, der am Ende eines Sondenauslegers etwa 4,6 m vom Sondenmittelpunkt entfernt montiert ist und eine wirksame eigene Temperaturregelung hat. Die Elektronikbox im Sondeninneren enthält die gesamte weitere Experiment-Elektronik. Durch Telemetrie-Kommandos umschaltbare Verstärker ergeben den notwendigen großen Dynamikumfang aller Meßbereiche. Im WFC folgen je drei umschaltbare Tiefpässe, Integratoren, Verstärker und ein Analog-Digital-Wandler mit logarithmischer Kennlinie. Der SPA besteht aus zwei Bandfilter-Sätzen, Verstärker-/Gleichrichter-Gruppen, Analog-Digital-Wandlern und dem Mittelwertrechner. In der Analogelektronik sind neben diskreten Halbleitern im großen Umfang auch analoge integrierte Schaltkreise eingesetzt. Die Digitalelektronik ist aus "Low-Power"-TTL-Schaltkreisen aufgebaut und der Mittelwertrechner enthält einen 4-kbit-Kernspeicher. Mit 11 Experiment-Kommandos und einigen Telemetriesignalen kann der Betriebszustand des Experimentes eingestellt und über 4 analoge und 24 digitale Housekeeping-Kanäle überwacht werden. Außerdem werden vom Sonden-Thermalsubsystem die Temperaturen der Box gemessen und des Sensors geregelt.

Für eine schnelle Funktionsprüfung des Experimentes während seiner Umwelttests, der Integration der Sonden, der Qualifikations- und Abnahmetests der Sonden und ihrer Probeläufe bis zum Start wurden zwei Experiment-Testgeräte gebaut. Neben speziellen Meßgeräten ist dafür vor allem standardisierte CAMAC-Elektronik verwendet worden. Die Testgeräte enthalten auch einen digitalen Kleinrechner und für Befehlseingabe und Datenausgabe eine Fernschreibmaschine. Als Hilfsmittel für die Entwicklung und den Aufbau der Sensoren diente eine kleine Magnetfeldsimulationsanlage und ein Rauschmeßplatz mit einer schweren Mumetall-Abschirmtonne.

Es wurden insgesamt 5 Experimenteinheiten hergestellt: Labormodell (LM), Ingenieurmodell (EIM), Prototyp (PT) und zwei Flugeinheiten (F 1 und F 2). PT, F 1 und F 2 haben die Umwelttests ohne wesentliche Probleme überstanden. Seit den Starts liefern beide Flugeinheiten praktisch einwandfreie Daten.

8. Schlußbemerkungen

Die Verfasser danken zahlreichen Angehörigen der genannten Institute der TU Braunschweig für ihre Mitarbeit am Experiment und der Firma Dornier System GmbH für den Einsatz bei seiner Entwicklung und seinem Aufbau. Der Firma Vacuumschmelze GmbH (Hanau), dem DFVLR-Institut für Flugzeugbau (frühere Abteilung FC) und der PTB (Abteilung 2.1) in Braunschweig ist für die Unterstützung bei der Sensorentwicklung und den Firmen AEG-Telefunken (Ulm), ERNO (Bremen) und Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH (Ottobrunn) für verschiedene technische Beiträge zu danken. Nach dem Fertigstellen der Experimenteinheiten folgte eine über Jahre andauernde gute Zusammenarbeit mit der HELIOS-Integrations-, Test- und Startmannschaft von MBB-UR, den Angehörigen der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (Ottobrunn) während aller Umwelttests und des Deutschen Satelliten-Kontrollzentrums (GSOC) der DFVLR (Oberpfaffenhofen) bei den schon frühzeitig einsetzenden Vorbereitungen zur Führung des Betriebes beider Sonden und zur Datenaufzeichnung. Schließlich soll besonders auch gedankt werden vielen NASA-Stellen (Headquarters, Goddard Space Flight Center, Kennedy Space Center, Jet Propulsion Laboratory) für die bereitwillige und freundliche Unterstützung und dem Bereich für Projekträgerschaften der DFVLR (Porz-Wahn), früher Gesellschaft für Weltraumforschung mbH, sowie dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für die Betreuung und Finanzierung des Projektes.

Schrifttum

- /1/ Porsche, H.: Deutscher Vorschlag für eine Sonnensonde.
Sterne und Weltraum (1967) H.12, S.280-281
- /2/ Porsche, H.: Projekt einer deutsch-amerikanischen Sonnensonde.
Mitt.d.Astronom.Gesellsch. 25 (1968), S.55-63
- /3/ Lippmann, R., Preuß, D.: Nachrichtenreduktion für Raumfahrtexperimente.
NTZ 25 (1972) H.4, S.179-186
- /4/ Dehmel, G.: Vorschläge für ein zentrales Datenverarbeitungssystem für die Sonnensonde.
Diskussionsbeitrag für die Sitzung der "Studiengruppe Sonnensonde" am 10.1.1968

Dehmel, G.: Informationstheoretische Analyse des Förstersonden-Magnetometer-Experimentes der Sonnensonde.
Beitrag zur Abschlußpräsentation der "Studiengruppe Sonnensonde" am 12.6.1968
- /5/ N.N.: "Projekt Sonnensonde" - Kritische Studie der technischen Probleme (vorläufige Fassung).
Arbeitsgemeinschaft für Weltraumforschung, München, Juli 1968
- /6/ Neubauer, F.M.: Proposal for a Magnetic Field Experiment on a Solar Probe.
Anhang II zu "A Solar Probe Vehicle". Arbeitsgemeinschaft für Weltraumforschung, München, 1967
- /7/ Neubauer, F.M.: Das Förstersonden- und das Induktionsspulenexperiment der Sonnensonde HELIOS.
Teil 1: Forderungen an die Experimente aus der Sicht der wissenschaftlichen Forschung.
Institut für Geophysik und Meteorologie (IGM), TU Braunschweig, Gamma 8, 1969
- /8/ Neubauer, F.M.: Magnetfeldmessungen an Bord der Sonnensonde HELIOS.
Sterne und Weltraum (1970) H.9, S.223-228
- /9/ Neubauer, F.M., Dehmel, G.: Updated Experiment Description of the Three-Axes Search-Coil Magnetometer Experiment on the German Solar Probe.
Institut für Geophysik und Meteorologie und Institut für Nachrichtentechnik (IFN), TU Braunschweig, Nov. 1968
- /10/ Dehmel, G., Lukoschus, D., Schirenbeck, G., Wawretzko, J.:
Technical Description of the HELIOS Experiment 4
- Search Coil Experiment -
IFN, TU Braunschweig, 1971-1973

- /11/ Dehmel, G.: Das Induktionsspulenmagnetometer-Experiment der Sonnensonde HELIOS.
Intern. El. Rundschau, 29 (1975) H.1/2, S.1-4
- /12/ Dehmel, G.: Die Elektronik des Induktionsspulen-Magnetometers der Sonnensonde HELIOS.
Intern. El. Rundschau, 29 (1975) H.4, S.69-72
- /13/ Dehmel, G., Neubauer, F.M., Lukoschus, D., Wawretzko, J., Lammers, E.: Das Induktionsspulen-Magnetometer-Experiment (E 4).
Raumfahrtforschung, 19 (1975) H.5, S.241-244
- /14/ Musmann, G., Neubauer, F.M., Maier, A., Lammers, E.: Das Förstersonden-Magnetfeldexperiment (E 2).
Raumfahrtforschung, 19 (1975) H.5, S.232-237
- /15/ Gliem, F., Dehmel, G., Musmann, G., Türke, C., Krupstedt, U., Kugel, R.P.: Die Bordrechner der HELIOS-Magnetometer-Experimente E 2 und E 4.
Raumfahrtforschung, 20 (1976) H.1, S.16-19
- /16/ Türke, C.: Dokumentation für den Mean-Value-Computer (MVC) des HELIOS Experimentes 4.
Institut für Datenverarbeitungsanlagen (IDA), TU Braunschweig, 1972
- /17/ Gliem, F., Kugel, R.P., Türke, C.: Zur Konzeption des Mittelwertrechners und Maximumsuchers im HELIOS-Experiment 4.
IDA, TU Braunschweig, DA-71/1, 1971
- /18/ N.N.: Users Manual for HELIOS Spacecraft, Vol.I bis IV.
Messerschmitt-Boelkow-Blohm GmbH, Unternehmensbereich Raumfahrt, Ottobrunn bei München, 1974
- /19/ HELIOS Experiment 4, Sensor, Analogteil, Digitalteil von EIM/PT/F 1 und F 2
(12 Bände Schaltungs-/Bauunterlagen mit Entwicklungsberichten Stand EIM/PT), Dornier System GmbH, Friedrichshafen, 1974
- /20/ HELIOS Experiment 4, Meß- und Prüfprotokolle EIM/PT/F 1 und F 2
(4 Bände), Dornier System GmbH, Friedrichshafen, 1974
- /21/ Kernspeicher für HELIOS-Experiment
N.N.: Leistungsspezifikation
Gärtner, M., Gliem, F., Schlenther, M.: Technische Beschreibung
Geuppert, H.: Prüfvorschriften
Dornier AG, Friedrichshafen, 1970

- /22/ Karmann, R.: Umwelt-Testspezifikationen für die HELIOS-Experiment-4 Sensor-Mumetallstäbe und Spulen IFN, TU Braunschweig, 1971
- /23/ Wilkens, W., Bentlage, H., Pfalz, J.: Thermalvakuumtests an Bauelementen des Magnetometerexperimentes der Sonnensonde HELIOS. DFVLR, Braunschweig, IB 085-72/46, 1972
- /24/ N.N.: Prüfberichte "Bestimmung der Koerzitivfeldstärke an Mumetallstäben". Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, 1971 bis 1973
- /25/ Nähle, R.: HELIOS-Komponententest Experiment E 4 A. DFVLR, Porz-Wahn, IB 353-73/14, 1973
- /26/ N.N.: Back-up Paper for Discussion of HELIOS Thermal Control Status. ERNO-Bericht, Februar 1973
- /27/ Lukoschus, D.: Transportable Magnetfeld-Simulationsanlage und Rauschmeßplatz für Induktionsspulen magnetometer. Technisches Messen ATM 43 (1976) H.12, S.379-382
- /28/ N.N.: Baugruppen für zwei HELIOS-Experimente in Präzisionsdickfilmtechnik. Techn. Mitt. AEG-Telefunken 62 (1972) H.1, S.46
- /29/ N.N.: Kernspeicher für HELIOS-Experimente - Dokumentation für Qualifikationsmodell und Prototypen/Flugeneinheiten für HELIOS-Experiment 4. Dornier AG, EE 51-A 93/73, 1973
- /30/ Promoli, J.C., Winkelkemper, W., u.a.: HELIOS Experiment Nr.4 E T E. Band 1 und 2: Technische Beschreibung
Band 3: Testsoftware
Band 4: Unterprogramme
Dornier System GmbH, 1972
- /31/ Schirenbeck, G.: The HELIOS Search Coil Magnetometer and its Test Equipment Using CAMAC. CAMAC-Bulletin, 5 (1972), S.13-15
- /32/ Brichzin, K.: HELIOS A - S/C Performance Analysis Team Support. Phase I + II Summary Report (Thermal Subsystem). DFVLR - GSOC, 1975
- /33/ Neubauer, F.M., Musmann, G., Dehmel, G.: Fast Magnetic Fluctuations in the Solar Wind: HELIOS 1. angenommen von Journal of Geophysical Research, 1977

/34/ Neubauer, F.M., Beinroth, H.J., Barnstorf, H.,
Dehmel, G.: Initial Results from the HELIOS 1
Search-Coil Magnetometer Experiment.
angenommen von Journal of Geophysical Research, 1977