Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Institut für Astronomie und Astrophysik
Abteilung Astronomie

Tests und Softwaresimulation der On-Board-Datenverarbeitung des IBIS-Instruments auf INTEGRAL

DIPLOMARBEIT

von

Manfred Grünwald

Dezember 2000

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **9**

2 Der INTEGRAL Satellit **11**
2.1 Wissenschaftliches Konzept 11
2.2 Technisches Konzept 12
2.2.1 Aperturmasken 13
2.2.2 Dithering 14
2.3 Die Instrumente 15
2.3.1 IBIS 15
2.3.2 SPI 16
2.3.3 JEM-X 17
2.3.4 OMC 18

3 Die Komponenten des Instruments IBIS **19**
3.1 Die Detektoren ISGRI und PICSIT 19
3.2 Der Präprozessor: HEPI 21
3.3 Der Rechner des Instruments DPE 22
3.4 Die Kalibrationsquelle 23
3.5 Der aktive Schild VETO 23
3.6 Die Datenverwaltung des Satelliten CDMU 24

4 Die wissenschaftliche Datenverarbeitung von IBIS **26**
4.1 Funktionen und Modi 26
4.2 Die IASW 27
4.3 Die HEPI 28

5 IBIS-Simulator **31**
5.1 Aufgabe 31
5.2 Aufbau 31
5.3 Ausführung 34
5.3.1 Eingabedatei 34
5.3.2 Initialisierung 34
5.3.3 Interne Datenstrukturen 34
5.3.4 Datenerzeugung 35

5.3.5 Datenauswahl und Ausgabe 35

6 Die Module im Einzelnen **38**
6.1 main 38
6.2 getdevent 38
6.3 makevalid 39
6.3.1 ac 39
6.3.2 mer 39
6.3.3 pol 40
6.4 comp 41
6.4.1 cdteac 41
6.4.2 compang 42
6.4.3 timeset 43
6.5 putfevent 43
6.5.1 dia 44
6.5.2 hist 44
6.5.3 specti 45
6.5.4 ppm 45

7 Tests **50**
7.1 Tests während der Entwicklung 50
7.1.1 Entwicklung von Komponenten 50
7.1.2 Tests beim Übergang zu neuen Versionen 51
7.2 Tests mit IBISIM 51
7.3 Hierarchie der Modelle 52
7.3.1 Entwicklungsmodell 52
7.3.2 Thermisches Strukturmodell 53
7.3.3 Qualifikationsmodell 53
7.3.4 Flugmodell 53
7.4 Qualifizierungstests 53
7.4.1 Stoßtests 54
7.4.2 Vibratonstests 55
7.4.3 Thermal-Vakuum Tests 55
7.4.4 Elektrical-Interface Tests 57
7.4.5 Funktionstests 57

8 Zusammenfassung **60**

Tabellenverzeichnis

2.1 Instrumenten-Daten im Überblick 12
2.2 Eckdaten von IBIS 16
2.3 Eckdaten von SPI 17
2.4 Eckdaten von JEM-X 18
2.5 Eckdaten von OMC 18

3.1 Die wesentlichen Datenraten von IBIS 22

4.1 Wissenschaftliche Funktionen der IASW 27
4.2 Wissenschaftliche Funktionen des HEPI in den IBIS-Modi . . 29

5.1 Eventformate des IBISIM 37

6.1 Ermittlung der Pixelkoordinate bei Mehrfachereignissen. . . . 40
6.2 Definition des *poldat* Polarimetrie-Index 41

7.1 Tabelle der Modelle und ihrer Tests 51
7.2 Die Prozeduren der QM-Funktionstests 59

Abbildungsverzeichnis

2.1 Der INTEGRAL Satellit 11
2.2 Die IBIS-Aperturmaske beim Zusammenbau 13
2.3 Die Komponenten von INTEGRAL 15

3.1 Die Detektorebenen 20
3.2 Schnitt durch das IBIS-Instrument 25

4.1 Die Modi von IBIS 30

5.1 Der Datenfluss des IBIS Simulators 36

6.1 Der Progrmmablauf von IBISIM 46
6.2 Von Detektorevents zu Fullevents 47
6.3 Rekonstruktion von Mehrfachereignissen und Polarimetrie . . 48
6.4 Erzeugung von Compton-Ereignissen 49
6.5 Einführung des 32 Bit Zeitformats 49

7.1 Die DPE auf der Apparatur für Stoßtests 54
7.2 Die DPE auf der Apparatur für Vibrationstests 55
7.3 Temperaturverlauf der TV-Tests 56

Abkürzungen

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CDMU	Central Data Management Unit, die Datenverwaltung des Satelliten
CSSW	Common Service Software, auf allen DPEs identisch
Dithering	Das definierte Abrastern einer ε-Umgebung der Beobachtungsrichtung
DPE	Data Processing Electronics, der Rechner des Instruments
FPGA	Field Programmable Gate Array
HEPI	Hardware Event Preprocessor for IBIS, instrumentspezifische Datenverarbeitungs-Hardware von IBIS
IASW	Instrument Application SoftWare, instrumentspezifische Datenverarbeitungs-Software der DPE
IBIS	Imager on Board Integral Satellite, das Instrument
IBISIM	Ibis Simulator Programm
INTEGRAL	International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory
ISGRI	Integral Soft Gamma Ray Imager, der CdTe-Detektor
JEM-X	Joint European Monitor for X-ray
LSB	Least Significant Bit, auch Plural
LUT	Look Up Table, Nachschlagtabelle
MSB	Most Significant Bit, auch Plural
OBDH	On Board Data Handling, Simulation der CDMU
OMC	Optical Monitor Camera
PICSIT	Pixellated Imaging CsI Telescope, der CsI-Detektor
SIS	Spacecraft Interface Simulator
SPI	Spectrometer on Integral
TC	TeleCommand, Steuerkommando an den Satelliten
TOC	Time Overflow Counter, zählt die Überläufe der Detektorzeit
TM	TeleMetriepaket, Datenversendungseinheit

Kapitel 1

Einleitung

Die aktuellen Erkenntnisse über die spektakulären Vorgänge in Aktiven Galaxienkernen, Schwarzen Löchern und Neutronensternen, sind die Ergebnisse der satellitengestützten Gamma- und Röntgenastronomie. In den extremen Gravitationsfeldern dieser kompakten Objekte bestehen derart exotische Materiezustände, daß die Übertragung irdischer Vorstellungen kein Hilfsmittel zur Beschreibung mehr sein kann. Der klassischen Astronomie unbekannte Begriffe und Vorstellungen wie Akkretionsscheiben, Jets und inverse Comptonisierung konnten aus bisherigen Beobachtungen abgeleitet werden. Zur Präzisierung und Weiterentwicklung der physikalischen Modelle, muß die Datenbasis verbessert werden.

Die Information über diese hochenergetischen Prozesse steckt in ihrer vorwiegend im Röntgen- und Gammabereich emittierten elektromagnetischen Strahlung. Um möglichst viel Information aus dieser Strahlung extrahieren zu können, muß sie messtechnisch optimal erfasst werden. Dazu hat die European Space Agency (ESA) 1994 den Bau des INTEGRAL[1]-Satelliten im Rahmen einer mittleren Mission beschlossen.

INTEGRAL wird das spektrale Auflösungvermögen von HEAO 3 von 1979/80, der letzten Mission im Gamma-Bereich, die den Schwerpunkt spektrale Hochauflösung hatte, um den Faktor hundert übertreffen. Bei der GRANAT-Mission von 1995 wurde im SIGMA-Instrument die Abbildungstechnik der 'Coded-Mask' erfolgreich im Gammabereich erprobt, die auf INTEGRAL mit verbesserten Detektoren zum Einsatz kommen wird. Ebenso wird die Technologie des Compton-Gamma-Ray-Observatory (CGRO), einer weiteren Mission der neunziger Jahre, von INTEGRAL in verbesserter Form angewendet werden. [BW93]

[1] International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory

Die Datenverarbeitung eines der beiden Hauptinstrumente von INTEGRAL, des Gamma-Ray-Imagers[2] IBIS wurde am Astronomischen Institut Tübingen entwickelt. Die Abbildung wird mit Hilfe einer Aperturmaske und einem erheblichen Rechenaufwand indirekt realisiert. Entsprechend komplex ist auch die Steuerung und Datenverarbeitung des Instruments.

Die Aufgabestellung der vorliegenden Diplomarbeit bestand aus zwei Teilen. Erstens in der Durchführung funktionaler und physikalischer Tests der IBIS-Datenverarbeitung und zweitens in der Erstellung eines Simulationsprogramms der Datenverarbeitung des Instruments.

Die Tests bezogen sich auf das Qualifikationsmodell und die Flugmodelle, (siehe Abschnitt 7.3). Die physikalischen Tests mussten entspechend der Vorschriften der ESA durchgeführt werden. Für die funktionalen Tests waren spezielle Testsequenzen durchzuführen, um die erfolgreiche Umsetzung der Anforderungen zu dokumentieren.

Die Auswertung dieser Tests hatte sich während der Entwicklung der IBIS-Datenverarbeitung als sehr aufwendig erwiesen. Mit der Entwicklung einer Gesamtsimulation der Datenverarbeitung, des IBIS-Simulators, sollte dieser Zeit- und Personalaufwand künftig entscheidend verringert werden.

Als Werkzeug zur Testauswertung soll der IBIS-Simulator dienen, indem er eine Datenverarbeitungs-Referenz zur Verfügung stellt. Ausgehend von identischen Eingabedaten und gleicher Prozessierung, können die Ausgabedaten der realen Datenverarbeitung mit den Ausgabedaten der Soll-Datenverarbeitung des Simulators verglichen werden. Auftretende Differenzen der Ausgabedaten lassen, bei korrekt arbeitender Simulation, eventuelle Fehler der realen Datenverarbeitung erkennbar werden.

Bei Modifikationen und Einstellungen am Instrument soll der Simulator eine schnelle Abschätzung zu erwartender Ausgabedaten und damit eine Vorab-Optimierung der Einstelldaten ermöglichen. Während der fünfjährigen Mission von INTEGRAL durchzuführende Änderungen, können so mit geringem Zeitaufwand umgesetzt werden.

[2]Gamma-Abbildungsinstruments

Kapitel 2

Der INTEGRAL Satellit

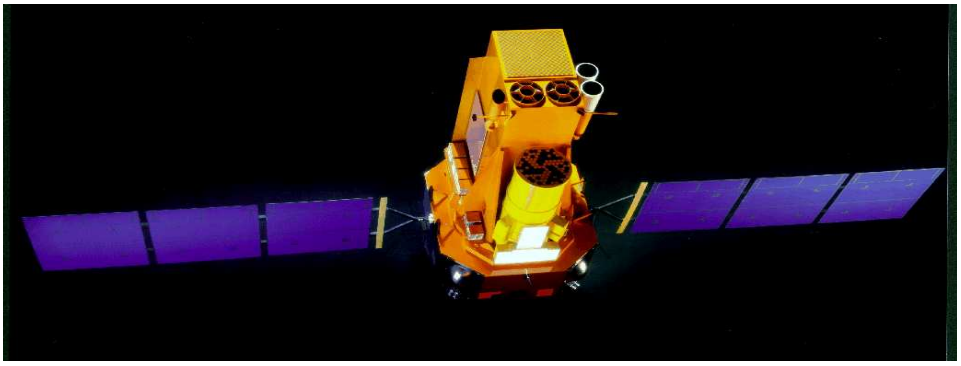

Abbildung 2.1: Der INTEGRAL Satellit

2.1 Wissenschaftliches Konzept

Der Satellit INTEGRAL trägt eine Gruppierung von Spezialinstrumenten. Die Gesamtleistung ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Instrumente. Da die Instrumente des Satelliten in einer gemeinsamen Achse ausgerichtet sind, betrachten sie grundsätzlich alle das identische Himmelsobjekt. Die Spezialisierung des Imagers IBIS auf eine gute Ortsauflösung und des Spektrometers SPI auf eine gute spektrale Auflösung kombinieren sich zu einer bisher unerreichten Leistungsfähigkeit im Energiebereich von 15 keV bis 10 MeV. Die Optical Monitor Camera (OMC) ermöglicht eine Einordnung in existierende optische Aufnahmen. Der Röntgen-Monitor (JEM-X) erfüllt die gleiche Aufgabe im Röntgenbereich.

Für die Beobachtung der in der Hochenergie-Astrophysik typischen Kurzzeitphänomene, verfügen die Instrumente über eine Zeitauflösung im Bereich von Mikrosekunden.

Eine russische Proton-Rakete wird den Satelliten in eine hochexzentrische 72 Stunden Umlaufbahn mit einem erdnächstem Punkt von 10 000 km und einem erdfernstem Punkt von 150 000 km bringen. Dadurch werden lange Beobachtungszeiten möglich. Die Beobachtung sehr schwacher Objekte wird dadurch sinnreich, trotz eines 50-prozentigen Intensitätsverlusts durch die Absorption der Aperturmasken[1] der Hauptinstrumente.

Tabelle 2.1: Instrumenten-Daten im Überblick

Instrument	IBIS	SPI	JEM-X	OMC
Energiebereich	15 keV - 10 MeV	20 keV - 8 MeV	3 - 35 keV	0,5 - 0,6 μm
Energieaufl. $\frac{\Delta E}{E}$	0.09 bei 100 keV	0,002 bei 1 MeV		
Sichtfeld	9 x 9 Grad	16 Grad	4,8 Grad	5 x 5 Grad
Quellauflösung	1 arcmin	2,5 Grad	30 arcsec	6 arcsec
Zeitauflösung	61 μs	129 μs	122 μs	1s
Max. Datenrate	59,8 kBaud	20.2 kBaud	7,9 kBaud	2.2 kBaud

2.2 Technisches Konzept

Um die Kosten niedrig zu halten, hat die ESA eine einheitliche Satelliten-Plattform[2] entwickeln lassen [BW93]. Diese wurde bereits bei XMM-Newton verwendet und wird nun auch bei Integral eingesetzt. Der Gedanke der Standardisierung findet sich bei Integral auch bei der Datenverarbeitung wieder. Sie wird von insgesamt neun, im wesentlichen identischen Rechnern, den Data Processing Electronics (DPE) gewährleistet. Die Anpassung an die speziellen Aufgaben dieser DPEs, erfolgt über deren jeweilige Software.

Der Grundaufbau der Instrumente besteht aus einer Aperturmaske, einem abgeschirmten Tubus und einer ebenfalls abgeschirmten Detektorebene am Fuß des Schachts. Die Funktion der Abschirmung, die sowohl passiv als auch aktiv durchgeführt wird, ist dabei ganz entscheidend. Durch sie

[1] coded masks
[2] common bus

wird der Rauschuntergrund und damit Auflösungsvermögen entscheidend beeinflußt.

2.2.1 Aperturmasken

Drei der INTEGRAL-Instrumente, IBIS, SPI und JEM-X arbeiten mit einer Aperturmaske. Für Gammaphotonen gibt es keine andere Möglichkeit Abbildungen zu erzeugen.

Eine Aperturmaske ist ein Amplitudenmodulator. Entsprechend dem gewählten Muster wird die Transparenz der Maske auf null bzw. auf eins gesetzt. Weder die Null noch die Eins sind realisierbar, weil sich erstens auch in den Löchern der Maske Material zur Kapselung und Stabilisierung befindet und zweitens weil die Materialstärke der Dunkelstellen nicht beliebig groß werden kann. Um die Absorption der Gammaquanten zu erreichen, muß ein Material hoher Ordnungszahl in ausreichender Dicke verwendet werden[3]. Aufgrund der makroskopischen Abmessungen der Maskenstruktur[4] spielt Beugung keine Rolle.

Abbildung 2.2: Die IBIS-Aperturmaske beim Zusammenbau

Die auftreffenden Photonen projezieren die Maske in die Detektorebene. Aus der Lage dieser Projektion in Bezug auf die bekannte Lage der Maske, kann der Ort der Quelle rekonstruiert werden. Das entscheidende Problem besteht in der Zuordnung verschiedener Quellen zu ihren sich überlagernden Bildern. Um dies zu gewährleisten, ist die konkrete Form der Masken in wissenschaftlichen Arbeiten optimiert worden.

[3] bei IBIS ist das Wolfram, 15 mm dick

[4] in der Größenordnung der zugehörigen Detektorpixel

Ist eine Quelle so positioniert, daß die von ihr erzeugten Photonen die gesamte Detektorfläche durch die Aperturmaske beleuchten, befindet sie sich im vollkodierten Blickfeld[5]. Probleme bei der Rekonstruktion machen vor allem die Quellen, deren Bilder nur teilcodiert sind, d.h. bei denen Teile der Detektorfläche von der Abschirmung verdeckt werden.

2.2.2 Dithering

Der Begriff Dithering beschreibt das Beobachten einer Quellverteilung unter definierten, leicht variierenden Beobachtungswinkeln. Dem entspricht das Ausrichten des Satelliten auf benachbarte Objektpunkte. Diese Technik wurde eingeführt, um für das Instrument SPI, trotz seiner geringen Ortsauflösung, die Identifikation der Quellen zu ermöglichen. Da die Instrumente starr zusammen montiert sind, müssen alle mit-dithern.

Wenn sich der Satellit bei der Umorientierung bewegt, geht die Datenverarbeitung in den Slew-Mode. Solange er eine Position unbeweglich anvisiert, arbeitet IBIS im Pointing-Mode. Für IBIS stellt das Dithering eher eine Behinderung dar, da beim Übergang in den Slew-Mode die Histogrammbildung unterbrochen werden muß, (siehe Kapitel 4)

[5]Fully Coded Field of View, FCFOV

2.3 Die Instrumente

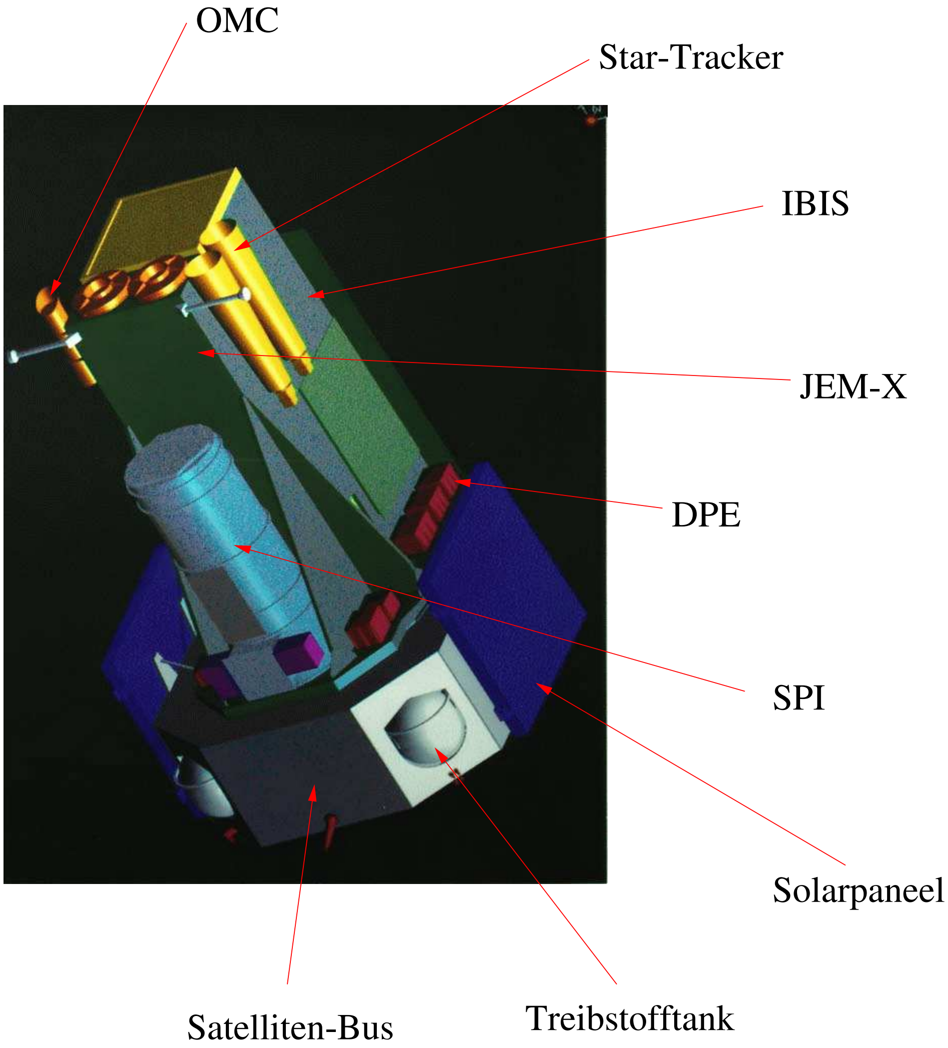

Abbildung 2.3: Die Komponenten von INTEGRAL

2.3.1 IBIS

IBIS ist ein abbildendes Gamma-Teleskop mit einer Aperturmaske, die 3.1 m über den Detektoren angebracht ist. Es verbindet eine sehr gute Ortsauflösung mit einer mittleren Energieauflösung. Seine zwei übereinander angeordneten Detektorebenen, ein Halbleiterdetektor (ISGRI) und ein Szintilationsdetektor (PICSIT), arbeiten mit einer Zeitauflösung von 61 ns und können einzelne Gammaquanten nachweisen. Die erzeugten Messdaten können sowohl als Einzelereignisse weitergegeben werden, als auch zur Bildung von Histogrammen verwendet werden.

Photonen mit Energien oberhalb 100 keV, die nicht aus der Beobachtungsrichtung einfallen, werden mittels einer aktiven Abschirmung erkannt und verworfen. Zur Abschimung niederenergetischer Photonen ist der Teleskoptubus mit Wolframfolie umgeben. Zur Kalibration verfügt IBIS über eine innerhalb des Tubus angebrachte ^{22}Na-Quelle, deren 511 keV und 1275 keV Photonen der Eichung der Detektoren besonders im Bereich der Elektron-Positron Vernichtungsstrahlung dienen.

Tabelle 2.2: Eckdaten von IBIS

Detektor	ISGRI	PICSIT
Detektortyp	CdTe Halbleiter	CsI Szintillator
Aufbau	128 x 128 Pixel	64 x 64 Pixel
Pixelgröße	4 x 4 mm, Dicke 2 mm	8,55 x 8,55 mm, Dicke 30 mm
Detektorfläche	2600 cm^2	3100 cm^2
Energiebereich	15 keV bis 250 keV	150 keV bis 10 MeV
Energieauflösung	$\frac{\Delta E}{E} = 0,09$ bei 100 keV	$\frac{\Delta E}{E} = 0,06$ bei 1 MeV
Sichtfeld	9 x 9 Grad, vollkodiert	
Winkelauflösung	12 arcmin FWHM	
Quellauflösung	1 arcmin	
Empfindlichkeit	$3\,\sigma\ bei\ 10^3\ ksec\ und\ 1\,MeV$:	$2\,x\,10^{-5}\,\frac{Photonen}{s \cdot cm^2}$
Zeitauflösung	61 μs	
maximale Datenrate	59,8 kBaud	
Arbeitstemperatur	270 K	
Abschirmung	aktiv und passiv	

2.3.2 SPI

SPI arbeitet mit einem Detektorarray von 19 hexagonalen Germaniumdetektoren mit einer Kantenlänge von 3,2 cm und mit einer aktiven Abschirmung nach dem Antikoinzidenz-Prinzip. Die Arbeitstemperatur der Detektoren liegt bei 85 K, so daß sie aktiv gekühlt werden müssen. Aus der relativ großen Pixelfläche und der geringen Pixelzahl resultiert die schlechte Ortsauflösung von SPI und die Notwendigkeit des Dithering. Die Aperturmaske ist 1,7 m über der Detektorebene angebracht.

Mit einer leicht energieabhängigen Energieauflösung von $\frac{\Delta E}{E} = (0,002)$ ermöglicht SPI das genaue Vermessen von Spektrallinien über einen weiten Bereich von 20 keV bis 8 MeV. Damit werden mehrere physikalische Größen der Entstehungsregion zugänglich: Druck, Temperatur, chemische Zusammensetzung können aus den Parametern der exakt vermessenen Spektrallinien abgeleitet werden.

Tabelle 2.3: Eckdaten von SPI

Detektortyp	Germanium-Detektor mit 19 hexagonalen Pixeln
Pixelgröße	Kantenlänge 3.2 cm, Dicke 17 cm dick
Detektorfläche	$500\, cm^2$
Energiebereich	20 keV bis 8 MeV
Energieauflösung	$\frac{\Delta E}{E} = (0,002 - 0,003)$
Sichtfeld	16 Grad,
Quellauflösung	2,5 Grad FWHM
Empfindlichkeit	$3\,\sigma\ bei\ 10^3\ ksec\ und\ 1\, MeV\ :\quad 5,1\, x\, 10^{-6} \frac{Photonen}{s \cdot cm^2}$
Zeitauflösung	$129\,\mu$s
maximale Datenrate	20,2 kBaud
Arbeitstemperatur	85 K, gekühlt
Abschirmung	aktive Veto-Abschirmung (Antikoinzidenz)

2.3.3 JEM-X

Die mit einer 9 zu 1 Xenon-Methan-Mischung befüllten Microstrip-Detektoren arbeiten mit Molybdän-Kollimatoren und Streifenplatten. Die Abschirmung ist passiv. Die Aperturmaske befindet sich 3,2 m oberhalb der Detektoren.

Tabelle 2.4: Eckdaten von JEM-X

Detektortyp	Microstrip, Xe-Gasdruckkammer bei 5 bar
Pixelgröße	entspricht ca 1 mm
Detektorfläche	2 mal 500 cm^2
Energiebereich	3 bis 35 keV
Sichtfeld	4.8 Grad,
Winkelauflösung	3 arcmin
Quellauflösung	30 arcsec
Empfindlichkeit	$3\,\sigma\ bei\ 10^3\ ksec\ und\ 6\,keV\ :\ \ 1,7\,x\,10^{-5}\,\frac{Photonen}{s \cdot cm^2}$
Zeitauflösung	122 μs
maximale Datenrate	7,9 kBaud
Arbeitstemperatur	270 K

2.3.4 OMC

Die optische Monitorkamera erlaubt die Einordnung des betrachteten Objekts in die oft vielfältig vorhandenen optischen Beobachtungsdaten. OMC verfügt über eine Optik mit einer 50 mm Linse und einen CCD-Chip mit 1024 x 1024 Bildpunkten. Mit einer Quellauflösung von 6 arcsec hat er die beste Ortsauflösung aller Integral-Instrumente.

Tabelle 2.5: Eckdaten von OMC

Detektortyp	CCD-Chip mit 1024 x 1024 Pixeln
Pixelgröße	13 x 13μm^2
Wellenlängenbereich	500 bis 600 nm
Blickfeld	5 x 5 Grad
Winkelauflösung	25 arcsec
Quellauflösung	6 arcsec
Empfindlichkeit	18,2 mag
Integrationzeit	1 bis 100 s
maximale Datenrate	2,2 kBaud
Arbeitstemperatur	270 K

Kapitel 3

Die Komponenten des Instruments IBIS

3.1 Die Detektoren ISGRI und PICSIT

Der Integral-Soft-Gamma-Ray-Imager (ISGRI) und das Pixellated-Imaging-CsI-Teleskope (PICSIT) sind zwei übereinander angeordneten Pixelfelder. Von beiden Detektoren werden 64 Bit breite Datenstrukturen erzeugt, die Ereignis oder Event[1] genannt werden. Jeder Detektor verfügt über eine eigene serielle Datenleitung, um diese Ereignisse an die Datenverarbeitung weiterzugeben. Die Bits der jeweiligen Detektorereignisse sind allerdings unterschiedlich belegt. Die Datenverarbeitung muß dies beachten.

Jeder der 128 x 128 Pixel von ISGRI ist ein CdTe[2]-Halbleiterdetektor. Die geringe Dicke von 2 mm begrenzt, über die sinkende Wechselwirkungswahrscheinlichkeit höherenergetischer Photonen, den Arbeitsbereich auf maximal ca. 250 keV.

Das Meßsignal dieses Detektors ist abhängig vom Ort der Wechselwirkung innerhalb des Pixels. Teile der erzeugten Ladung werden von Störstellen des Halbleiters eingefangen, so daß das an der Elektrode nachgewiesene Signal in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg schrumpft. Dieser Weg ist wiederum über die Ladungstransportgeschwindigkeit an die Signalanstiegszeit gekoppelt. Deshalb wird außer dem Energiewert auch die Signalanstiegszeit in den Ereignisdaten festgehalten und später zur Korrektur des Energiewerts verwendet. Die Elektronik von ISGRI ist in acht Modulen zusammengefasst. Sie kann defekte Pixel ausschalten und erzeugt das 64 Bit-

[1] Beide Begriffe werden synonym gebraucht
[2] Kadmium-Tellur

Format der Ereignisdaten.

Die 64 x 64 Pixel von PICSIT bestehen aus 3 cm dicken thalliumdotierten Cäsiumjodid-Szintillatorkristallen, die in acht Modulen zusammengefaßt sind. An die Szintillatorkristalle sind Photodioden direkt angekoppelt, die deren Lichtblitze in Ladungspulse umsetzen. Die Bandbreite des PICSIT-Detektors, von 150 keV bis 10 MeV, ist größer als die von ISGRI.

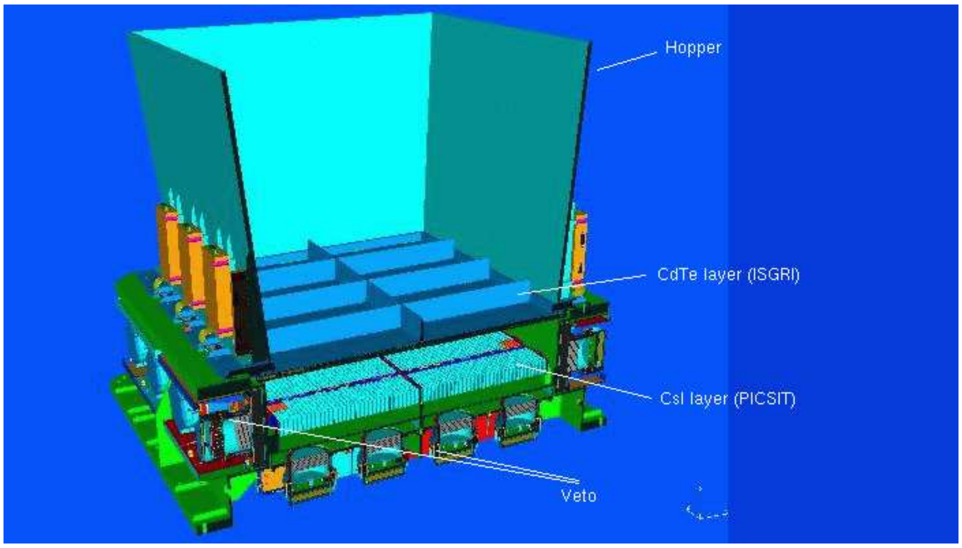

Abbildung 3.1: Die Detektorebenen

Wenn ein Photon in einem Detektor Compton-gestreut wird und das Streuphoton wieder auf ein Detektorpixel trifft, kann es weitere Ereignisse erzeugen. Dabei knnen beide Detektoren beteiligt sein, dann spricht man von Compton-Ereignissen. Wenn mehrere PICSIT-Pixels beteiligt sind, spricht man von Mehrfachereignissen. Innerhalb der PICSIT Detektorschicht sind mehr als die Hälfte der Ereignisse solche Mehrfachereignisse. Auch mehr als drei Wechselwirkungen pro Urspungsquant kommen vor, sind aber so selten, daß sie vernachlässigt werden können. Um die Quanten, die Mehrfachereignisse erzeugen, weder zu verlieren, noch deren Teilereignisse fälschlich als Gesamtereignisse zu interpretieren, müssen sie erkannt und zusammengefasst werden. Dazu setzt die Detektorelektronik in den Ereignisdaten ein Flag, das die Anzahl der gleichzeitig detektierten Teilereignisse beschreibt.

3.2 Der Präprozessor: HEPI

Jedes Ereignis, das die beiden IBIS-Detektoren messen, wird in einer 64 Bit breiten Datenstruktur übertragen. Dazu verfügt jeder Detektor über eine High-Bit-Rate Datenleitung (HBR) mit Raten von je 5 MBaud. Bei geschätzten maximalen Ereignisraten von 1200 (ISGRI) und 25.000 (PICSIT) Ereignissen pro Sekunde werden bis zu 1,6 MBaud Detektordaten erzeugt. Für die Übertragung zur Bodenstation steht IBIS allerdings nur eine maximale Telemetrierate von 59 kBaud zur Verfügung, (siehe Tabelle 3.2)

Um diese Diskrepanz zu beheben, muß eine Datenkompression um den Faktor 20 stattfinden. Dazu wird sowohl die mit Datenverlust verbundene Möglichkeit der Datenauswahl, als auch die der Datenkompression an Bord des Satelliten realisiert. Den wesentlichen Beitrag zur Kompression leistet die instrumenteneigene Datenverarbeitung von HEPI, durch die Zusammenfassung der PICSIT-Ereignisse in Histogrammen.

Bei der Histogrammintegration wird ein Ereignis auf die Inkrementierung eines Zählerstands im Histogrammspeicher abgebildet. Der Speicherplatz, dem das Ereignis zugeordnet wird, wird definiert über die Koordinaten des Pixels und den Energiewert. Die präzise, 23 Bit breite Zeitinformation geht dabei verloren, bzw. wird auf die Zeit zwischen Start und Ende der Histogrammintegration reduziert. Ebenso wird die Energieauflösung von 10 Bit auf 8 Bit reduziert.

Die Erfordernis der Strahlungsfestigkeit bedeutet eine deutliche Einschränkung der Rechenleistung der Satellitenrechner. So hat der im Rechner von IBIS, der DPE[3], verwendete Prozessor[4] eine Taktfrequenz von 13 Mhz bei einer Address- und Datenbusbreite von 16 Bit. Damit hat er geringfügig mehr Rechenleistung als ein Intel 8086 der frühen 80er Jahre und die identischen Probleme mit der Adressierung großer Speicherbereiche.

Die DPE muß außer der Verarbeitung und der Weitergabe der Detektordaten, die sie schon alleine überfordert hätte, noch die Aufgabe der Steuerung des Instruments erfüllen. Um die dafür notwendige Rechenkapazität frei zu halten, wurde für die einfache Datenkompression eine schnelle Hardware-Vorstufe in den Datenfluß eingesetzt: die HEPI. Sie erzeugt die verschiedenen Ereignistypen und die Histogramme. Dabei reduziert sie die Daten auf das Maß, welches erstens von der DPE verarbeitet werden kann und zweitens den Rahmen der Telemetrierate einhält.

Die logische Einheit der HEPI ist ein Application-Specific-Integrated-

[3]hier und im Folgenden ist mit "DPE" immer die DPE von IBIS gemeint

[4]Typ 1750A, mit militärischer Abstammung

Circuit (ASIC). Auf einer zweiten Platine sind zusätzliche 2,5 Mb Histogrammspeicher untergebracht. Zusammen mit den 2 Mb der Hauptplatine stehen insgesamt 4,5 Mb Speicher zur Bildung von Histogrammen der PICSIT-Ereignisse zur Verfügung. Es gibt zwei Datenpfade mit jeweils eigener Schnittstelle zur DPE. Eine ist die HBR-B zur Übertragung der Histogrammdaten, die andere die HBR-A für Einzelereignis-Typen. Zu diagnostischen Zwecken verfügt die HEPI über einen transparenten Betriebszustand, in dem sie die Detektordaten unverarbeitet weiterreicht.

Tabelle 3.1: Die wesentlichen Datenraten von IBIS

Maximale Datenrate	Ereignisse	Baudraten
erwartet für ISGRI	1200 Ereignisse/sec	78 kBaud
erwartet fürPICSIT	25000 Ereignisse/sec	1.600 kBaud
erwartet von der HEPI zur DPE	HBR A und B	300 kBaud
Telemetrierate für IBIS	insgesamt	59 kBaud
Telemetrierate für INTEGRAL	insgesamt	85,8 kBaud

3.3 Der Rechner des Instruments DPE

In der DPE ist die Schnittstelle zwischen der instrumentspezifischen Datenverarbeitung und der allgemeinen Datenverwaltung des Satelliten. Dies wird von der Instrument-Application-Software (IASW) und der Common-Service-Software (CSSW) [Ren98] vollbracht. Das Betriebsystem der DPE ist Astres, ein Multitasking-Betriebsystem.

Die IASW wurde im Rahmen von zwei Diplomarbeiten am Astronomischen Institut Tübingen entwickelt. Sie besteht aus zwei wesentlichen Anteilen. Erstens aus der wissenschaftlichen Datenverarbeitung, ausgeführt von Martin Stuhlinger [Stu99]. Zweitens aus der Steuerung des Instruments und der Darstellung des Systemzustands, dem sogenannten Housekeeping, von Eckart Göhler [Goe99].

Die wissenschaftlichen Daten werden über zwei High-Bit-Rate Datenleitungen (HBR A und B) mit je 5 MBaud maximaler Datenrate von der HEPI zur DPE übertragen. Deren Verarbeitung wird von der IASW abgeschlossen durch die Energieselektion der ISGRI-Ereignisse und die Verarbeitung der Compton-Ereignisse. Dazu wird die Amplitudenkorrektur für ISGRI-Ereignisse durchgeführt und, unter bestimmten Bedingungen, die Konsistenz von Streuenergieverlust und Streuwinkel der Comptonereignisse nachgerechnet.

Die wesentliche Aufgabe des wissenschaftlichen Teils der IASW, ist das Verpacken der von der HEPI gelieferten Daten. Sie erzeugt die verschiedenen Typen von Telemetriepaketen (TM), das von der Central-Data-Management-Unit (CDMU) zum Versenden akzeptierte Format. Für die Zuordnung und Auswertung sind die unterschiedlichen TM mit einer Application-Idendity-Number (APID) versehen.

Die Steuerung des Instruments und die Übertragung der Housekeeping-Daten erfolgt über eine eigene Leitung, der Low-Bit-Rate Line (LBR) mit 16 kBaud, mit der auch die Housekeeping-Daten übertragen werden.

Zur Kontrolle des Betriebszustands des Instruments werden Housekeeping-TM erzeugt. Die IASW fordert dazu von den Detektoren,VETO und der HEPI entsprechende Daten und übergibt sie der CSSW. Diese fügt noch eigene Parameter hinzu und erzeugt das Format. In den periodischen Housekeeping-TM werden alle 8 Sekunden die regulären Betriebsparameter zusammengefasst und übertragen. Darin findet sich der aktuelle Betriebsmodus, diverse Zähler verarbeiteter Ereignisse und Telekommandos und Felder für On-Event-Messages (OEM). In letzteren werden außerordentliche Vorkommnisse mitgeteilt, bei denen die vorgesehenen Betriebsabläufe verlassen wurden.

Bei Änderungen des Betriebszustands, die auf größeren Zeitskalen erfolgen, wie zum Beispiel das Ende des Histogramm-Modus, werden zusätzlich eigene Housekeeping-TM erstellt. Ebenso für den platzaufwendigen Report von Tabellenwerten der Look-Up-Tables.

3.4 Die Kalibrationsquelle

Die ^{22}Na-Kalibrationsquelle befindet sich innerhalb des Teleskoptubus. Die von ihr emittierten Linien von 511 keV und 1275 keV werden von zwei, bei der Quelle positionierten Szintillationszählern, nachgewiesen. Koinzidente Ereignisse der Detektoren werden durch ein Flag als Kalibrationsereignisse gekennzeichnet. Aus diesen Ereignissen bildet die HEPI eigene Histogramme, die der Eichung dienen.

3.5 Der aktive Schild VETO

Photonen mit Energien bis 100 keV werden von der passiven Abschirmung ausreichend absorbiert. Photonen mit größerer Energie, die seitlich und von unten einfallen, werden von einer weiteren Detektorschicht nachgewiesen. Dies ist der aktive Schild VETO[5], ein BGO[6]-Detektor.

ISGRI- und PICSIT-Ereignisse, die zeitgleich mit VETO-Ereignissen nachgewiesen werden, werden verworfen. Auf diese Art werden Mehrfachereignisse aus Teilchenstrahlung herausgefiltert, aber auch Photonen, die bei Wechselwirkungen im VETO-Detektor erzeugt wurden und danach auf ISGRI oder PICSIT treffen. VETO erstellt außerdem qualitative Spektren mit den von ihm detektierten Quanten. Daraus kann auf den allgemeinen Strahlungshintergrund geschlossen werden.

3.6 Die Datenverwaltung des Satelliten CDMU

Die CDMU hat die Aufgabe, die von verschiedenen Instrumenten kommenden TM an die Sendeeinrichtung des Satelliten-Busses weiter zu reichen. Dazu werden die TM von der CSSW der Instrumente im Instrument-Communication-Buffer (ICB) abgelegt. Entspechend dem Polling-Sequence-Table (PDT), in dem die Prioritäten der Instrumente festgelegt sind, fordert sie die TM bei den jeweiligen DPEs an und stellt sie dem Sendemodul zur Verfügung.

Die CDMU ist außerdem für die Verteilung satelliteninterner Steuerungkommandos zuständig. Sie verschickt in sogenannten Broadcast Packages (BC) Kommandos, die den allgemeinen Betriebsmodus des Satelliten und damit alle Instrumente gleichermaßen betreffen.

[5]lateinisch: ich sage nein

[6]Wismut-Germanium-Oxid

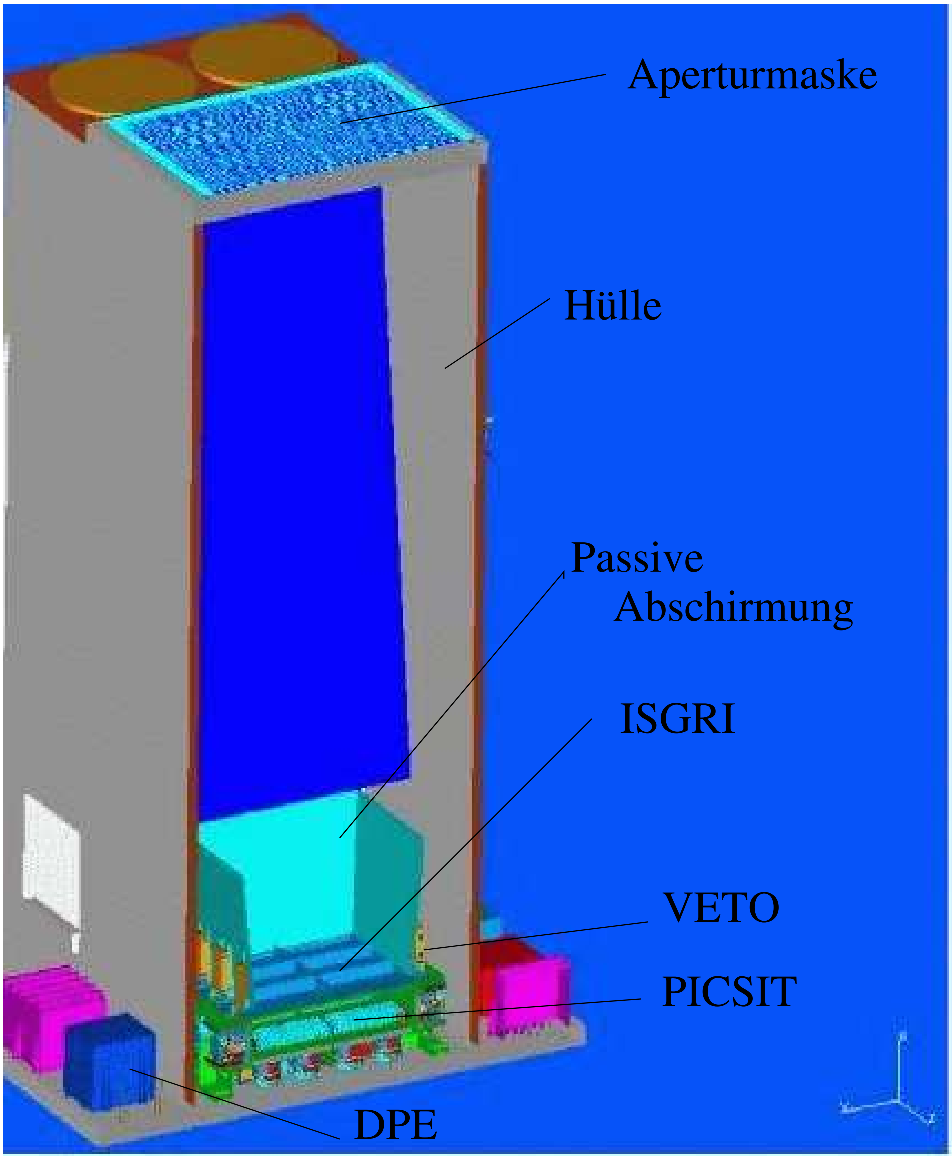

Abbildung 3.2: Schnitt durch das IBIS-Instrument

Kapitel 4

Die wissenschaftliche Datenverarbeitung von IBIS

Der Begriff wissenschaftliche Datenverarbeitung beschreibt erstens das Erstellen der Ereignistypen aus den Detektordaten und die Histogrammbildung, zweitens deren Zusammenfassung und Formatierung in die Telemetriepackete. Dies wird von HEPI und IASW durchgeführt, [Vol99].

4.1 Funktionen und Modi

Die Gesamtfunktion des Instruments wird in Einzelfunktionen aufgeschlüsselt. Aus der Menge aller Einzelfunktionen, die kurz Funktionen genannt werden, werden Teilmengen zu Modi zusammengefaßt. Der Modus des Gesamtinstruments bestimmt so auch den Modus der HEPI.

Während der Histogrammintegration darf die Ausrichtung des Instruments und damit des Satelliten nicht verändert werden, da in die Definition der Histogrammspeicherplätze die Pixelkoordinaten eingehen.

Daraus resultieren zwei grundlegende Gruppen der IBIS-Modi: Die Pointing-Modes, die einen unbeweglichen Satelliten voraussetzen, in denen die wissenschaftlichen Histogramme erstellt werden und diejenigen Modi, bei denen nur Einzelereignisse übergeben werden. Diese Einzelereignisse mit ihrer vollständigen Zeit und Ortsinformation können dann unter Berücksichtigung der Satellitenposition gedeutet werden.

4.2 Die IASW

Die vom HEPI gelieferten Daten werden von der IASW in Telemetriepakete verpackt. In Abhängigkeit vom eingestellten Modus werden unterschiedliche Typen von Telemetriepaketen erzeugt. TM mit wissenschaftlichen Daten werden mit ¨ S¨ gekennzeichnet und beschreiben die in der Tabelle 4.2 aufgeführten Funktionen. TM mit Housekeeping Daten werden mit ¨ H¨ gekennzeichnet. Auf Letztere wird hier nicht weiter eingegangen.

Tabelle 4.1: Wissenschaftliche Funktionen der IASW

Funktion[1]	Typ der Telemetriepakete
CdTe Photon by Photon (PPM)	S1
CdTe Calibration	S2
Compton Photon by Photon	S3
CsI Photon by Photon	S4
CsI Calibration Histogram	S5
CsI Polarimetry Histogram	S6
CsI Standard Histogram	S7
CsI Spectral Timing Histogram	S8
Diagnostic	S13

IBIS hat drei grundlegende Betriebsarten oder Modi, den Stand By Mode, den Science Mode und den Diagnostic Mode. Nach dem Einschalten geht die IASW automatisch in den Stand By Mode. Dort erzeugt die DPE Housekeeping Pakete, erhält und sendet Telekommandos an die Subinstrumente. Moduswechsel zwischen den beiden anderen Modi sind nie direkt möglich, sondern gehen immer über den Stand By Mode.

Im Diagnostik Modus werden unverarbeitete Detektorereignisse verpackt. Diese enthalten insbesondere die 238 ns Detektorzeit und damit die Möglichkeit, in Ausnahmefällen die Standardzeitauflösung von 61 μs noch erheblich zu verbessern.

Der wissenschaftliche Modus oder Science Mode, ist in drei Submodes unterteilt, die jeweils eine Pointing und eine Slew Variante haben. In allen Science-Modes werden TM von CdTe-, CdTe-Kalibrations- und Compton-Einzelereignissen erstellt, ebenso von CsI-Kalibrationshistogrammen. Wenn sich der Satellit im Pointing befindet, werden zusätzlich im Standard Submode Histogramme von CsI-Einfach- und CsI-Mehrfachereignissen erstellt

[1] Dem Sprachgebrauch folgend auf englisch

und im Polarimetry Submode Histogramme von CsI Polarimetrieereignissen. Die TM Typen S3, S5 und S7 sind in jeweils zwei Untergruppen gegliedert, die Histogramme von Einfach- bzw. Mehrfachereignissen beschreiben.

Sobald IBIS in den Slew Mode geht, wird die Bildung der S6 und S7 Histogramme abgebrochen. Die Integrationszeiten sollten also mit dem Dithering koordiniert sein. Im PPM Submode werden Einzelereignisse verpackt. Bei sehr geringen Datenraten kann in diesem Modus die vollständige Information auch des CsI-Detektors übertragen werden, anstatt sie in Histogramme zu komprimieren.

4.3 Die HEPI

Aus den IBIS-Modi ergeben sich für HEPI zwei Pointing-Modes. Im Standard-Pointing werden Histogramme von Einfach- und Mehrfachereignissen erstellt, im Polarimetrie-Pointing Histogramme von Polarimetrie-Ereignissen. Der für eine Historammart verfügbare Speicher wird jeweils halbiert. In der einen Hälfte des Speichers wird ein Histogramm integriert, während die andere ausgelesen wird. Die Daten dieser Histogramme werden über die HBR-B zur DPE übertragen.

In beiden Pointing-Modes werden außerdem Spectral-Timing Histogramme gebildet. Das sind Histogramme mit Integrationszeiten im Millisekundenbereich, mit sehr geringer spektraler Auflösung (2-8 Kanäle), deren Bildung beim Übergang in den Slew-Modes ebenso abgebrochen wird.

Alle anderen Funktionen der HEPI, das heißt alle, die sich auf Einzelereignisse beziehen, werden sowohl im PPM-Mode, als auch in den Slew-Modes weiterbetrieben. Das sind die Rekonstruktion von Mehrfach-Events (mer), die PICSIT-Amplitudenkorrektur (ac) und die Zeitkontrolle (comp, time).

Außerdem werden auch die Kalibrationshistogramme, deren Quelle ja mitgeschwenkt wird (cali), unabhängig von Position oder Bewegung des Satelliten weitergeführt. Um der entstehenden Datenflut Herr werden zu können, besteht im Slew-Mode die Möglichkeit, über ein Energiefilter CsI-Ereignisse uninteressanter Spektralbereiche auszublenden. [2]

[2]Detaillierte Funktionsbescheibungen der Funktionen finden sich in den in Klammern angegebenen Absätzen des Kapitels IBISIM

Tabelle 4.2: Wissenschaftliche Funktionen des HEPI in den IBIS-Modi

Wiss.Funktionen	Transp. Mode	PPM-Mode	Pol. Pointing	Std.Pointing
Energie Filter		X		
Amplitudenkorrektur		X	X	X
Compton-Koinzidenz		X	X	X
Multi-Event Rekonstr.		X	X	X
Kalibration Hist		X	X	X
Spektral Timing Hist			X	X
Polarimetrie Hist			X	
Single u. Multi Hist				X

Wenn IBIS im Diagnostik-Modus betrieben wird, ist der HEPI "transparent ". Die Detektorereignisse werden dann nur vom 64 Bit Detektorformat ins 80 Bit DPE-Format geschrieben, ohne die Einträge zu ändern. Diese Betriebsart eröglicht einen direkten Zugriff auf die Detektorereignisse und damit die Möglichkeit, die Detektoren direkt zu interpretieren.

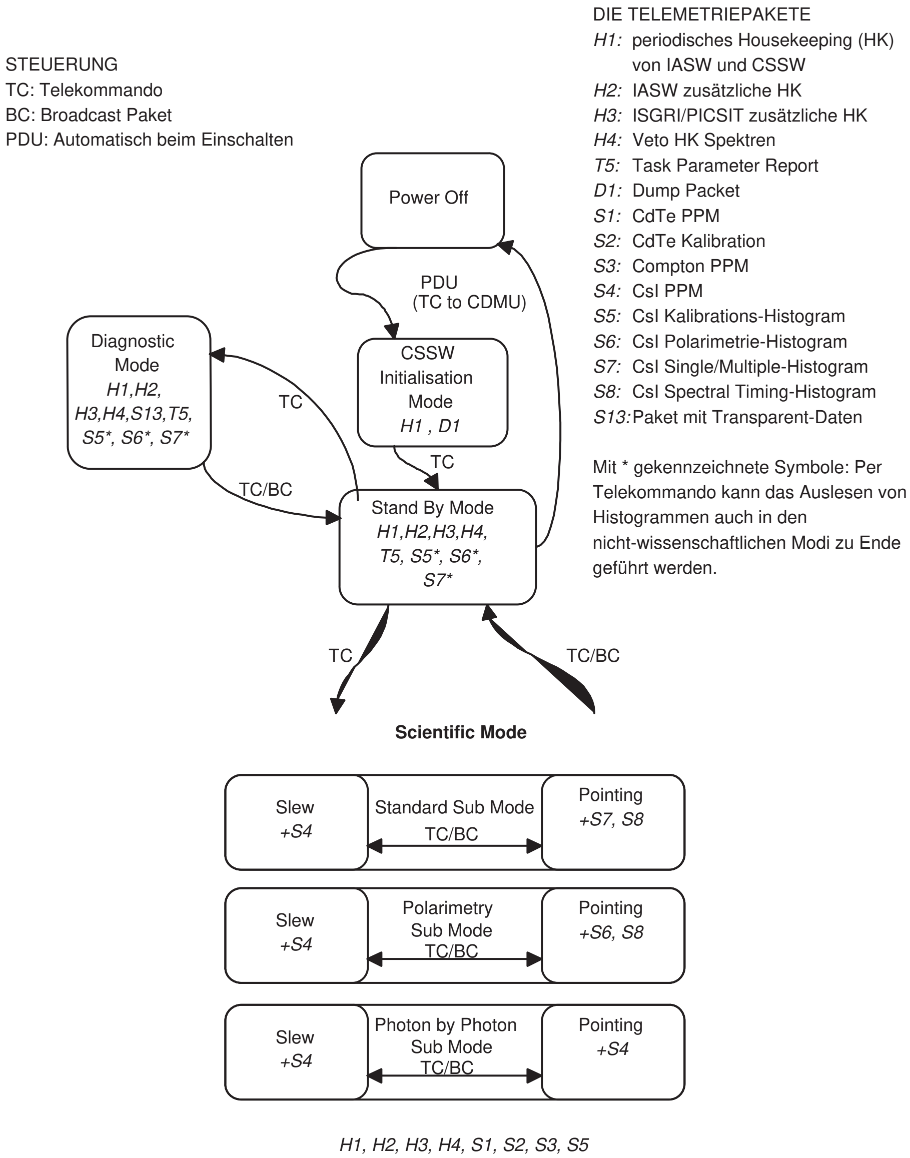

Abbildung 4.1: Die Modi von IBIS

Kapitel 5

IBIS-Simulator

5.1 Aufgabe

Der IBIS-Simulator[1] (IBISIM) hat die Aufgabe, das 'Soll' der wissenschaftlichen Datenverarbeitung von IBIS zu beschreiben. Um die korrekte Datenverarbeitung des realen Systems prüfen zu können, muß IBISIM dieselben Daten mit der gleichen Einstellung verarbeiten wie diese. Die Ausgabedaten der beiden Prozessierungen können dann verglichen werden. Dies wird als ¨End to End-Test¨ bezeichnet. Bei Übereinstimmung haben beide Systeme richtig gearbeitet.

Der Simulator muß dazu auf das Eingabeformat der realen Datenverarbeitung zugreifen können. Die Simulation muß über Einstellmöglichkeiten verfügen, die die Erzeugung aller möglichen Verarbeitungsvarianten zulässt. Die Daten müssen dann in ein Ausgabeformat gespeichert werden, das auch für die Realdaten verfügbar ist und das für maschinellen Vergleich geeignet ist. Er sollte außerdem eine flexible Ausgabe ermöglichen, um ihn auch an andere Testsituationen anpassen zu können.

5.2 Aufbau

Der IBISIM hat den strategischen Vorteil, die vielfältigen Einschränkungen der realen Satellitendatenverarbeitung schlicht auslassen zu können. Innere Schnittstellen mit ihren dynamischen Unwägbarkeiten und ihre Formate, werden nicht simuliert. Beispielweise enthält er nicht den Kompressionsalgorithmus, den die IASW beim Verpacken der Histogrammdaten verwendet,

[1]Spezielle Begriffe und Bezeichnungen des IBIS-Simulators sind *kursiv* gedruckt

da diese Daten vor der betrachteten Ausgangsschnittstelle wieder dekomprimiert werden. Nur die Eingabeschnittstelle zu den Detektoren und die Ausgabeschnittstelle zur Datenauswertung sind zu beachten.

Es wurde versucht, einen möglichst einfachen Aufbau zu finden. Dessen Übersichtlichkeit und Klarheit sollte es zulassen, Fehler zu minimieren und, im umgekehrten Sinne, falls doch welche auftreten, sie relativ leicht beseitigen zu können. Entsprechend dem unabhängigen Aufbau, sind zufällige Parallelitäten mit der realen Datenverarbeitung sehr unwahrscheinlich. Übereinstimmung der jeweiligen Ausgabedaten bedeutet mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit, daß beiderseits eine korrekte Verarbeitung stattgefunden hat.

Der IBISIM ist in C++ geschrieben. Den leicht unterschiedlichen Ereignisdaten der beiden Detektoren wird bei der Eingabe ein gemeinsames Format *Detectorevent* zugeordnet. Die Verarbeitung führt dieses unabhängig vom Ereignistyp in das zweite Ereignisformat des IBISIM über, dem *Fullevent.* Sämtliche Ereignisdaten werden also in nur zwei Strukturen gehalten. Dieser Aufbau wurde wegen seiner Einfachheit einer Klassenstruktur mit spezialisierten Ereignisklassen vorgezogen.

Die gemeinsamen Ereignisformate sind natürlich größer als es spezialisierte wären. Dem Satellitenrechner mit seinen bescheidenen Möglichkeiten hätte man das nicht zumuten dürfen. Die um mindestens einen Faktor 100 größere, am Boden verfügbare Speicher- und Rechenkapazität, bewältigt die Aufgabe jedoch leicht.

Die Steuerung erfolgt über die Konfigurationsdatei und die Kommandozeile beim Programmaufruf, wo die Eingabedatei angegeben wird. Das Programm liest automatisch die Konfigurationsdatei ein, in der der Betriebsmodus steht und auf die Registerdatei, die die Tabellendaten enthält, verwiesen wird.

Das Konzept, das sich ergab, stellt den Ablauf der realen Datenverarbeitung quasi auf den Kopf, was auch der Forderung nach Unabhängigkeit bestens entgegenkommt. In der ersten der beiden Verarbeitungsstufen von IBISIM, der Stufe der Datenerzeugung, werden die die LUTs und Schwellwerte aus der Registerdatei benötigt . Seine Funktionen werden von den Modulen *makevalid* und *comp* aufgerufen. Hier werden aus den Eingabedaten Einfach- und Mehrfach-Ereignisse, Kalibrations-Ereignisse, Compton-Ereignisse und Polarisations-Ereignisse erzeugt.

Die zweite Stufe der Datenverarbeitung steckt im Modul *putfevent*, wo der Betriebsmodus umgesetzt wird. Dort werden aus den Ereignissen die verschiedenen Histogramme gebildet, bzw. sie als PPM-Ereignisse in Dateien ausgegeben. Das ist die Verarbeitungsstufe der Datenauswahl.

Als Ausgabeformat wurde vorläufig das Format des TM-Encoders gewählt.

Der TM-Encoder ist ein Softwaretool, das in der Testauswertung vielfach eingesetzt worden ist und dessen Ausgabeformat einen maschinellen Vergleich zuläßt. Das verbreitete Fitsfile-Format ist als endgültige Variante vorgesehen.

5.3 Ausführung

5.3.1 Eingabedatei

In der Eingabedatei liegen die Ereignisdaten als fünf Wort breite Zeilen in ASCII-Text vor. Das erste Zeichen ist ein Typ-Flag, das angibt, von welchem Detektor das Ereignis stammt. Die Ereignisse müssen in monoton steigender Zeitfolge sortiert sein. Für die standardisierten Funktionstests werden meist systematisch erstellte Eingabedateien verwendet. Deren Ereignisse enthalten zum Beispiel stückweise konstante Amplituden, oder inkrementieren sie, oder beschreiben alle Kanäle etc.. Diese Dateien haben den Vorteil, daß sie vielfach verarbeitet und die Ergebnisse archiviert worden sind und somit zu Vergleichszwecken zugänglich sind. Genau so gut können aber auch simulierte oder real gemessene Detektordaten verwendet werden.

5.3.2 Initialisierung

Beim Aufruf des Programms wird die Konfigurationsdatei *ibisim.cfg* eingelesen. Dort steht der Betriebsmode und es wird auf die Registerdatei *ibisim.rg* mit den Werten der LUTs und der Schwellwerte verwiesen. Überall wo keine speziellen Werte angegeben werden, werden Standardwerte eingetragen. Die Eingabedatei wird für den Zugriff der Einlesefunktion geöffnet.

5.3.3 Interne Datenstrukturen

IBISIM liest die Ereignisse von PICSIT und ISGRI aus der Eingabedatei durch aufrufen des Funktion *getdevent* in ein gemeinsames Format *Detectorevent* oder *devent* ein. Dies ist ein C++ *s*truct, in dem es für alle Parameter, die von den Detektorereignissen geliefert werden, entsprechende Variablen gibt. Zum Teil stimmen die Parameter der beiden Detektoren überein (Zeit, Amplitude, Position, Typ-Flags).

Der Wertebereich der Variablen ist so gewählt, daß sie die Daten beider Detektoren aufnehmen können. Die Amplituden und die Positionen der Detektoren haben unterschiedliche Bit-Breite und werden von der gleichen Variablen gespeichert. Bei detektorspezifischen Parametern (Signalanstiegszeit, Mehrfachereignis-Flags) werden die jeweils nicht benutzten Variablen Null gesetzt.

Das Format *Fullevent* oder *fevent* ist analog zum *Detectorevent* aufgebaut. Es enthält zusätzliche Variablen für die Koordinaten und die Energie der zweiten Teilereignisse von Compton- und Polarimetrieereignissen. Außerdem sind zusätzliche Flags enthalten, die das Modul *putfevent* für die

Datenauswahl benötigt.

Die detaillierten Mehrfachereignis-Flags der *Detectorevents* werden nach der Rekonstruktion der Mehrfachereignisse nicht mehr gebraucht und werden im *fevent* durch ein generelles Flag ersetzt. Es ist das Rückgabeformat des Datenerzeugungsmoduls *makevalid* und enthält fertig prozessierte Ereignisse. Die Amplituden der *Fullevents* sind korrigiert und zusammengefasst und die Zeit steht im 32 bit Ereigniszeit-Format. Die Werte für die Position und die Signalanstiegszeit der CdTe-Events sind die aus den *Detectorevents* übernommenen.

5.3.4 Datenerzeugung

Im Modul *makevalid* werden die Detektorereignisse in das Fullevent-Format geschrieben. Falls PiCsIT-Detektorereignisse Mehrfachstreuungen beschreiben, kann sie der Simulator an einem Flag erkennen. Dann werden sie zusammen gefasst und das *multiple*-Flag im Rückgabe-*Fullevent* gesetzt. *Double*-Events werden grundsätzlich auf Polarimetriedaten geprüft und diese gegebenenfalls eingetragen.

Anschließend werden die Ereignisse verschiedener Detektoren darauf geprüft, ob ihr Zeitabstand kleiner ist als das Compton-Zeitfenster und bei Bedarf ein Compton-Event gebildet. Ist der Zeitabstand kleiner Null, hat ein Überlauf der 23 Bit Detektorzeit statt gefunden und der TimeOverflow-Counter *toc* wird hochgezählt. Dieser wird im Anschluß mit den oberen 15 Bit der Detektorzeit zur 32 Bit Ereigniszeit zusammengesetzt.

5.3.5 Datenauswahl und Ausgabe

Zur Ausgabe werden im Modul *putfevent* die Einträge der Konfigurationdatei interpretiert und die Typ-Flags der von *makevalid* übergebenen *Fullevents* geprüft. Ist eine Ausgabefunktion im HEPI Statusregister eingestellt und bei einem *Fullevent* ein entsprechendes Typ-Flag gesetzt, wird der Zähler des zugehörigen Histogrammkanals hochgesetzt bzw. im PPM-Modus, das Full-Event in eine Ereignis-Datei ausgegeben. Dabei werden alle vom Modus geforderten Flags nacheinander abgefragt. Dasselbe Ereignis wird also mehrfach ausgegeben. Die Bits des HEPI Statusregisters werden nacheinander abgearbeitet. Danach wird das nächste Event geholt.

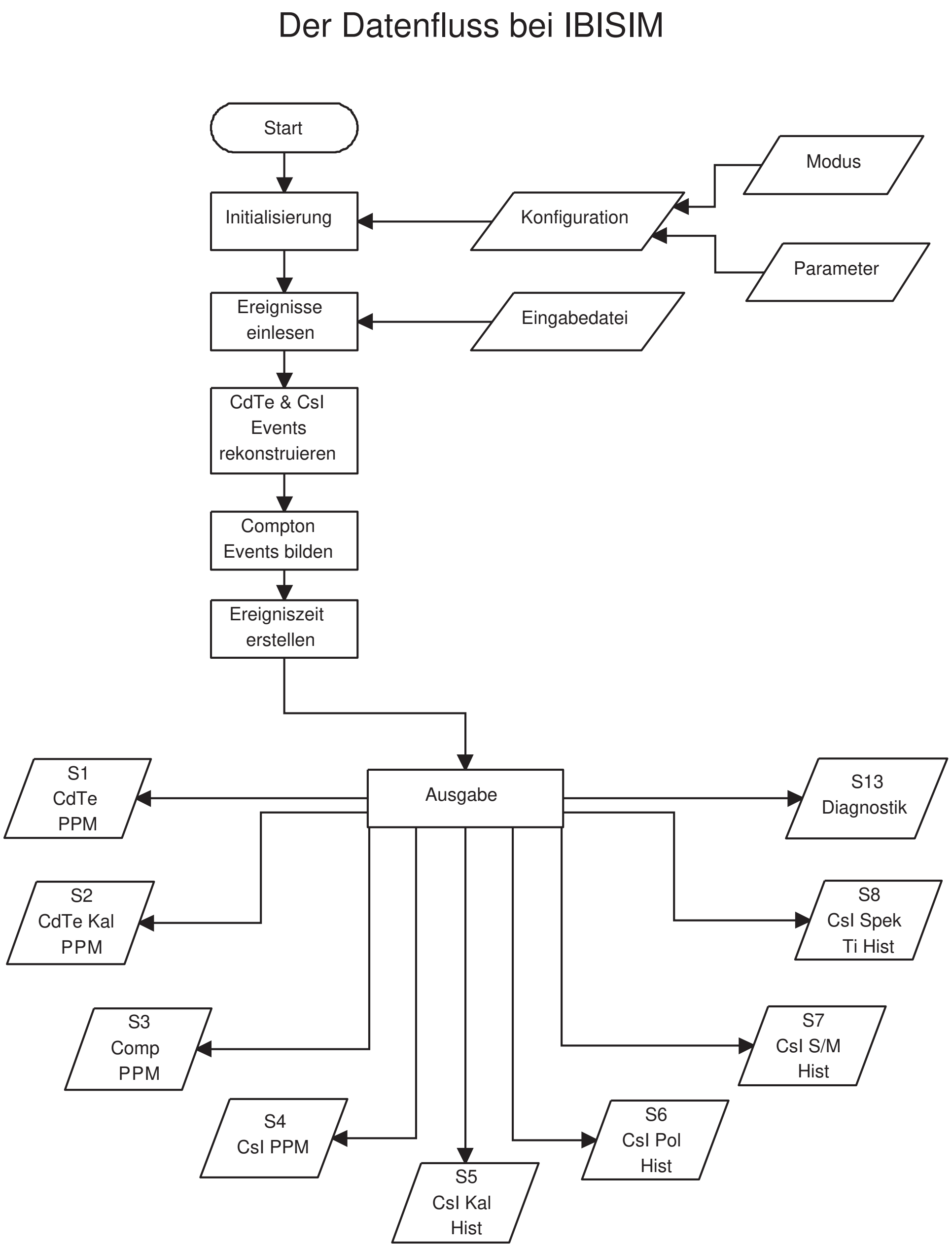

Abbildung 5.1: Der Datenfluss des IBIS Simulators

Tabelle 5.1: Eventformate des IBISIM

Detector-Events

Variablentyp	Interner Name	Bedeutung
bool	cdte	ISGRI-Event Flag
bool	csi	PICSIT-Event Flag
bool	cal	Calibration-Event Flag
bool	mmc	Multi-Module-Coincidence Flag
unsigned short	pid	Sequenz der Multiple-Teilevents
unsigned short	mux	Multiplicity Index
long integer	time	23 Bit Detector-Time
unsigned short	risetime	Risetime der ISGRI-Events
unsigned short	amp	Amplitude
unsigned short	ypos	Y-Position des Pixels
unsigned short	zpos	Z-Position des Pixels

Full-Events

Variablentyp	Interner Name	Bedeutung
bool	cdte	ISGRI-Event Flag
bool	csi	PICSIT-Event Flag
bool	pol	Polarimetry-Event Flag
bool	comp	Compton-Event Flag
bool	cal	Calibration-Event Flag
bool	mult	Multiple-Event Flag
unsigned short	poldat	Polarimetrie-Daten
long integer	time	32 Bit Event-Time
unsigned short	risetime	Risetime der ISGRI-Events
unsigned short	amp	Amplitude
unsigned short	ypos	Y-Position des Pixels
unsigned short	zpos	Z-Position des Pixels
unsigned short	samp	Amplitude des zweiten Pixels
unsigned short	sypos	Y-Position des zweiten Pixels
unsigned short	szpos	Z-Position des zweiten Pixels

Kapitel 6

Die Module im Einzelnen

6.1 main

Main ist das Hauptprogramm und steuert den gesamten Programmablauf. Hier werden nach der Initialisierung die *fevent* Ereignisstrukturen *alt* und *neu* definiert. Ein erstes Event wird mit der Funktion *getdevent* eingelesen, vom Modul *makevalid* prozessiert und in *alt* gespeichert. In der anschließenden Schleife wird in derselben Weise *neu* mit dem nächsten Event beschrieben. Beide *fevents* enthalten jetzt noch die Zeit im Detektorformat und werden dem Modul *comp* übergeben, das *alt* und *neu* bei Bedarf zu einem *Compton-Event* zusammenfaßt. Falls dieser Fall eintritt, werden im Compton-Event beide Ereignisse zurückgegeben. Da die Schleife davon ausgeht, daß schon ein gültiges *alt* Ereignis vorliegt, wird innerhalb von *comp* wieder ein neues *alt* eingelesen, bevor die Schleife erneut durchlaufen wird. Falls die Compton-Bedingungen nicht erfüllt sind, wird *alt* der Ausgabefunktion *putfevent* übergeben und *neu* in *alt* geschoben. Die Schleife läuft bis zum Ende der Eingabedatei.

6.2 getdevent

Mit *getdevent* werden die Zeilen der Eingabedatei in die ifstream[1]-Variable *infile* eingelesen. Der entstandene String wird in Integers umgesetzt und von der Funktion *putldevent* (put-line-detectorevent) in *devents* gefüllt. Dazu werden die zu den einzelnen Parametern gehörigen Bit aus den Integers herauspräpariert und den entsprechenden Variablen zugeordnet.

[1]ifstream ist eine spezielle C++ Variable zum Einlesen von Zeichenketten aus Dateien

6.3 makevalid

Im Modul *makevalid* werden die Detektorereignisse vom *devent*- ins *fevent*-Format geschrieben. Bei CsI-Ereignissen wird die Amplitudenkorrektur *ac* und die Bildung der Mehrfach-Ereignisse *mer* durchgeführt. Da dies Ereignisse im Anschluß in Histogrammen abgelegt werden, ist diese Bearbeitung endgültig und die Ergebnisse der Berechnungen werden in das *fevent* eingetragen.

CdTe-Ereignisse werden als Einzelereignisse oder als Compton-Ereignisse übertragen, so daß die vollständige Information auf dem Boden zur Auswertung zur Verfügung steht. Hier werden die Werte aus dem Detektorereignis einfach übernommen. Eine Amplitudenkorrektur wird erst im Modul *putfevent* durchgeführt, wo sie zur Energiefilterung verwendet wird. Im Ereignis gespeichert wird die korrigierte Amplitude nicht.

6.3.1 ac

Die Amplitudenkorrektur für PICSIT wird mit einer Tabelle durchgeführt. Die Funktion *ac* bildet aus Koordinaten und Amplitudenwert die Speicheradresse der Korrektur. Für jeden Pixel ist im Speicher eine 16 Bit breite Nummer abgelegt, deren oberste sechs Bit einen Offsetwert Ofs darstellen. Die unteren 10 Bit stellen den Multiplikator G des Amplitudenwerts Amp dar. Gemäß

$$Amp_{korr} = G \cdot Amp + Ofs$$

wird die korrigierte Amplitude berechnet.

6.3.2 mer

Die Rekonstruktion von Mehrfachereignissen (MER) wird vom *mux* -Index gesteuert. Dieser Wert ist in den CsI-Detektorereignissen enthalten und kann 0, 1 oder 2 sein. Null heißt, daß der Detektor zur Ereigniszeit des vorliegenden Ereignisses kein weiteres Ereignis gemessen hat. Demzufolge muß ein Single-Event gebildet werden.

Ist der Index 1, dann wurden zur selben Zeit zwei Ereignisse detektiert. Das zweite Ereignis wird nun von der Funktion *makedoubl* mittels *getdevent* eingelesen und ist ebenfalls mit $mux = 1$ gekennzeichnet. Die Amplituden werden zur Gesamtamplituden addiert. Um den 10 Bit breiten Wertebereich der Energie ein zu halten, wird dieser Wert halbiert. Anhand des Schwellwerts *MER[2]* wird entschieden, welchem Pixel die Gesamtenergie zugeordnet wird und das entsprechende *Double-Event* gebildet. Ist die Gesamtamplitude größer als der Schwellwert, wird dem Doppelereignis die Koordinate des größeren Teilereignisses zugewiesen, ansonsten die Koordinate des kleineren.

Bei $mux = 2$ liegt ein Teilereignis eines *Triple-Events* vor. Die Funktion *maketripl* liest dann die zwei folgenden Ereignisse mittels *getdevent* ein. Die Summe der Amplituden wird gebildet, halbiert und geprüft ob der 10 Bit Wertebereich eingehalten ist. Falls nicht, wird das Ereignis gezählt und weggeworfen. Für die Pixelzuordnung werden die Ereignisse nach der Amplitude sortiert.

Wiederum wird mit Schwellwerten, diesmal mit zweien, *MER[0]* und *MER[1]*, der Pixel ermittelt, dem das Ereignis zugeordnet werden muß. Für eine Gesamtenergie A kleiner als *MER[0]* werden dem Dreifachereignis die Koordinaten des kleinsten Teilereignisses zugeordnet. Liegt A zwischen den Schwellwerten sind es die Koordinaten des mittleren Teilereignisses und für A größer *MER[1]* sind es die Koordinaten des größten Teilereignisses.

Tabelle 6.1: Ermittlung der Pixelkoordinate bei Mehrfachereignissen.

Pixelauswahl bei Zweifachereignissen	
Σ der Teilenergien größer als Schwellwert MER[2]	Pixel mit größerer Energie
Σ der Teilenergien kleiner als Schwellwert MER[2]	Pixel mit kleinerer Energie
Pixelauswahl bei Dreifachereignissen	
Σ der Teilenergien kleiner als Schwellwert MER[0]	Pixel mit kleinster Energie
Σ der Teilenergien zwischen MER[0] und MER[1]	Pixel mit mittlerer Energie
Σ der Teilenergien größer als Schwellwert MER[1]	Pixel mit größter Energie

6.3.3 pol

Polarimetrieereignisse werden erstellt, wenn die Teilereignisse eines PICSIT-Doppelereignisses von benachbarten Pixeln kommen. Die Festlegung des Ursprungspixels erfolgt mit dem Mechanismus der Doppelereignisse (6.3.2). Aus der Koordinate des zweiten Ereignisses wird eine Kodierung erzeugt, die dessen Richtung in Bezug auf den Ursprungspixel darstellt. Diese Kodierung wird in der Variablen *poldat* im *fevent* festgehalten.

Tabelle 6.2: Definition des *poldat* Polarimetrie-Index

2	**1**	**0**	
3	**P**	**4**	P ist der Ursprungspixel
7	**6**	**5**	

6.4 comp

Die Detektion von Comptonereignissen ist der Grund für die Einführung der *neu* und *alt* Ereignisstrukturen im Hauptprogramm. In der Funktion *comp* werden die Zeiten der beiden *Fullevents* mit einem Schwellwert verglichen. Bis zu diesem Zeitvergleich haben sie noch die hochauflösende 238 ns Detektorzeit. Wird der Schwellwert unterschritten und sind die beiden Ereignisse unterschiedlichen Typs, d.h. ein CsI- und ein CdTe-Event liegen vor, wird ein Comptonereignis erzeugt.

Liegt die Amplitude des Compton-Ereignisses oberhalb der Schwelle *camp*, wird es als *Fullevent* zurückgegeben. Diese Bedingung wird zuerst geprüft, indem die Amplitude des PICSIT-Teilereignisses mit *camp* verglichen wird. Ist die Bedingung nicht erfüllt, muß zur Berechnung der Gesamtenergie des Comptonereignisses von der Funktion *cdteac* (6.4.1) die Amplitudenkorrektur für ISGRI-Ereignisse durchgeführt werden.

Die korrigierte ISGRI-Amplitude wird dann zur PICSIT-Amplitude addiert und erneut mit der Schwelle verglichen. Ist die Bedingung wieder nicht erfüllt, wird von der Funktion *compang* nachgerechnet, ob der Streuwinkel gemäß der Compton-Streuung konsistent ist mit der gemessenen Energiedifferenz. Erst wenn dieser Test erfolgreich verlaufen ist, wird auch das Compton-Ereignis mit kleiner Energie zurückgegeben.

6.4.1 cdteac

Die ISGRI-Energiekorrektur stellt den funktionalen Zusammenhang zwischen gemessener Anstiegszeit, gemessener Amplitude und realer Quantenenergie in mehreren Stufen dar.

Pixel mit ähnlichen Eigenschaften werden zusammengefasst und einem von 16 Typen zugeteilt. Jeder Typ wird beschrieben durch einen Formparameter $S = S(Amplitude, Risetime)$, der in 128 16 Bit-Werten dargestellt ist.

In einem weiteren Tabellenspeicher ist für jeden der 16384 Pixel ein 16 Bit-Wort abgelegt ist. In diesem Datenwort sind jeweils vier Bit als unsigned Integer den Größen g_{amp}, o_{amp}, g_{rt}, o_{rt} zugeordnet. Aus diesen Werten werden in einer ersten linearen Transformation die jeweiligen Gains und Offsets gewonnen.

$$Gain_{amplitude} = 1,0 + 0,024 \cdot g_{amp} \; ; \; Offset_{amplitude} = 23,455 + 5,390 \cdot o_{amp}$$

$$Gain_{risetime} = 2,141 + 0,16 \cdot g_{rt} \; ; \; Offset_{risetime} = -30,122 + 3,803 \cdot o_{rt}$$

Damit wird dann den beiden Meßgrößen jeweils ein linear korrigierter Zwischenwert zugeordnet.

$$Amplitude_{zw} = Amp_{mess} \cdot Gain_{amp} + Offset_{amp}$$

$$Risetime_{zw} = Risetime_{mess} \cdot Gain_{risetime} + Offset_{risetime}$$

Mit dem einstellbaren Parameter BIN_PAR, der standardmäßig auf 112 gesetzt ist, errechnet sich die erste Energiekorrektur dann wie folgt.

$$E_1 = \frac{167 \cdot Amplitude_{korr}}{167 - Risetime_{korr}} \cdot \frac{1}{BIN\_PAR}$$

Dieses E_1 ermöglicht nun den Zugriff auf den Formparameter und damit die Konstruktion des endgültigen korrigierten Werts, der die Energie in keV angibt.

$$Amplitude_{korr} = E_2 = Amp_{zw} \cdot S(E_1, Risetime_{zw}) \cdot 2 \cdot 10^{-2}$$

siehe dazu [Lau98].

6.4.2 compang

Bei der Compton Streuung eines Photons an einem Elektron ist der Energieverlust des Photons eine Funktion des Streuwinkels θ. Dies wird beschrieben von der Compton Formel

$$\Delta E_{photon} = \frac{E_{photon}}{1 + \frac{E_{photon}(1 - cos\theta)}{m_e c^2}}$$

Die möglichen Ausbreitungsrichtungen der Photonen liegen auf einem Kegel um die Einfallsrichtung, mit der Spitze im Streuzentrum.

Da die Detektoren gerade die Energieaufnahme der gestoßenen Elektronen messen und andererseits über die Pixel-Koordinaten der Winkel errechnet werden kann, kann die Konsistenz der beiden Meßgrößen geprüft werden. Damit lassen sich fälschlich gebildete Compton-Ereignisse aussortieren, wenn ihre Einfallsrichtung hinreichend bekannt ist.

Für niederenergetische Photonen bis ca. 100 keV ist das der Fall. Sie müssen aus Richtungen innerhalb des 9^o großen Gesichtsfelds kommen. Für Photonen mit höherer Energie gilt das nicht mehr, da für sie der Teleskoptubus durchsichtig ist und alle Richtungen des oberen Halbraums möglich sind. Über den Schwellwert *compamax* wird festgelegt, bis zu welcher Energie die Berechnug durchzuführen ist.

Unter Berücksichtigung der Fugenbreite, sowohl zwischen den Pixeln selbst, als auch zwischen den Modulen, wird der horizontale Abstand zwischen den beteiligten Pixeln ermittelt. Der daraus errechnete Winkel wird in die Compton-Formel eingesetzt und das Ergebnis mit dem gemessenen Energiewert verglichen, siehe dazu [Lau98].

6.4.3 timeset

Die Funktion *timeset* stellt die Zeit ins 32 Bit-Format. Für den Compton-Zeitvergleich wird die maximale Zeitauflösung benötigt. Deshalb kann die 238 ns Detektorzeit erst danach auf die Ereigniszeit mit 61μs Einheiten umgestellt werden. Dazu verwendet die Funktion *timeset* die oberen 15 Bit der Detektorzeit als niederwertigen Teil und den 17 Bit *timeoverflowcounter* als höherwertigen Teil.

6.5 putfevent

Das Modul *putfevent* bekommt die fertig prozessierten Ereignisse übergeben. Zur Bestimmung der verschiedenen Ausgabeformate wird das, in der Konfigurationsdatei *ibisim.cfg* eingegebene HEPI-Statusregister abgefragt. Die dort eingestellten Ausgabevarianten werden nacheinander abgeabeitet. Dazu wird die entsprechende Funktion aufgerufen, ausgeführt und das nächste Bit abgefragt. Sobald das Register durchgearbeitet ist, wird das nächste Ereignis geholt.

6.5.1 dia

Im Diagnostik Modus gibt es drei Ausgabevarianten. In den ersten beiden werden von den Funktionen *diacdte* beziehungsweise *diacsi* die unbearbeiteten Detektorereignisse in die Dateien *dia.cdte* bzw *dia.csi* aus gegeben. In der dritten Variante gibt *diall* alle Ereignisse in die Datei *dia.all* aus.

6.5.2 hist

Entsprechend den Angaben des Statusregisters wurde bei der Initialisierung Histogrammspeicher angelegt. Die Speicherarrays der verschiedenen Histogramme haben unterschiedliches Format. Standard Histogramme haben für die 4096 Pixel je 256 Energiekanäle, während Polarimetrie Histogramme für jeden der 4096 Pixel acht Streurichtungen mit je 64 Energiekanälen enthalten. Kalibrationshistogramme benötigen pro Pixel 64 Energiekanäle.

Die Funktionen *[Histogrammtyp]hist* tragen in der ersten Zeile der zugehörigen Ausgabedateien die Integrationszeit und der Startzeitpunkt ein. Für letztere wird die 32 Bit Event-Zeit des ersten einzulesenden Ereignisses genommen. Zur Bestimmung des Endzeitpunktes wird die Integrationsdauer addiert. Die Event-Zeit jedes Ereignisses wird mit der Endzeit verglichen. Sobald sie größer ist als diese, wird das Ereignis zwischengespeichert und das fertige Histogramm in eine Datei mit dem Namen *[Histogrammtyp].hst* ausgelesen. Für die nächste Integration wird die Ereigniszeit aus dem zwischengespeicherten Event als Startzeit entnommen und die Histogrammbildung fortgesetzt.

Zur Konstruktion der Histogrammadresse wird zuerst auf die Binning-Tabelle zugegriffen. Die 10 Bit Ereignisamplitude adressiert den Speicherplatz in der Tabelle und der ausgelesene Wert gibt die Nummer des Energiekanals. Dieser Weg, der auch im realen HEPI beschritten wird, lässt eine freie Zuordnung der Energiekanäle zu. Damit können, abhängig vom Beobachtungsobjekt, einzelnen Bereichen der Energieskala so definiert werden, daß die volle Auflösung der 10 Bit Meßamplitude ausgenützt werden kann.

Aus der Pixelposition und der Nummer des Energiekanals wird die Adresse der Speicherzelle gebildet, deren Zähler inkrementiert wird. Wenn der Maximalstand von 255 überschritten würde, wird nicht mehr die Speicherzelle inkrementiert, sondern stattdessen der Überlaufzähler *[Histogrammtyp]pixoflc*. Dieser Zähler wird auch am Anfang des Histogramms ausgegeben.

Jeder Histogrammtyp hat eine eigene Binning-Tabelle und eine eigene Ausgabedatei. Die Funktion, die Histogramme von Einfachereignissen erzeugt ist *singlehist.* Analog *multihist*, *polhist* und *calhist.*

6.5.3 specti

Spectral Timing Histogramme sind sehr viel kleiner als die anderen Histogramme, da sie die Zeit- und die Ortsinformation ignorieren. Sie haben standardmäßig zwei und maximal acht Energiekanäle. Durch ihre kurze Integrationszeit von 1 bis 500 Millisekunden werden aber trotzdem sehr viele Daten produziert, die zeilenweise ins Ausgabefile *specti.hst* geschrieben werden. Die Definition von Anfangs- und Endzeit erfolgt wie bei den anderen Histogrammen. Die Amplituden der *specti* übergebenen Ereignisse werden mit den Kanalgrenzen verglichen und die entsprechenden Zähler hoch gesetzt. Die Absolutzeit wird nur zu Beginn in die Ausgabedatei geschrieben. Sie kann für spätere Histogramme aber leicht aus Startzeit, Zeilennummer und Integrationszeit errechnet werden.

6.5.4 ppm

Im PPM-Modus werden die *fevents* von den Funktionen *[Eventtyp]ppm* in die jeweils zugehörigen Dateien *cdte.ppm*, *calcdte.ppm*, *csi.ppm* und *comp.ppm* ausgegeben. Zuvor wird ihre Amplitude mit Schwellwerten verglichen. Jeder Typ hat zwei Schwellwerte, einen oberen und einen unteren, die mit *[Eventtyp]ppmo* bzw. *[Eventtyp]ppmo* bezeichnet sind. Liegt die Amplitude außerhalb des eingestellten Bereichs, werden die Ereignisse gezählt und weggeworfen.

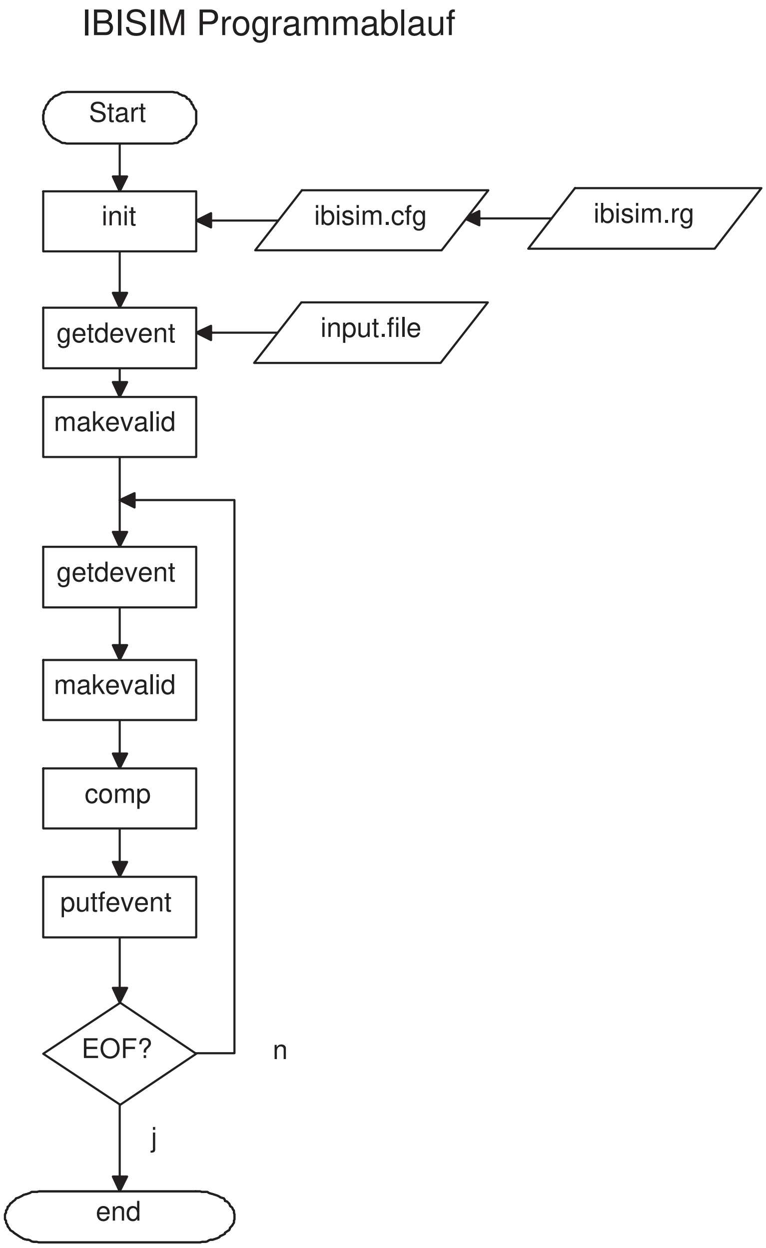

Abbildung 6.1: Der Progrmmablauf von IBISIM

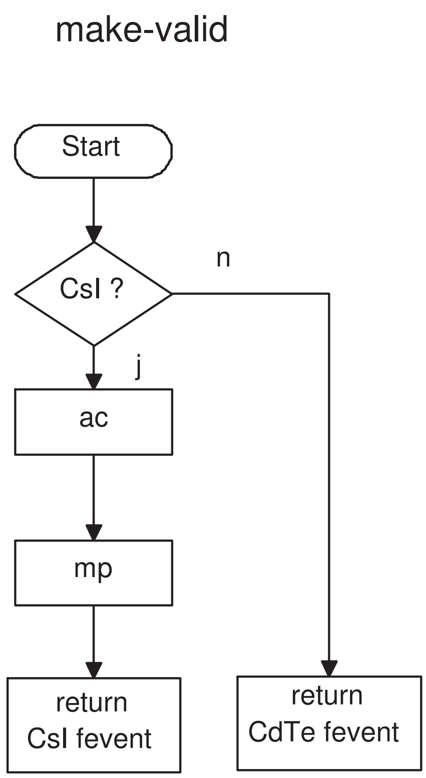

Abbildung 6.2: Von Detektorevents zu Fullevents

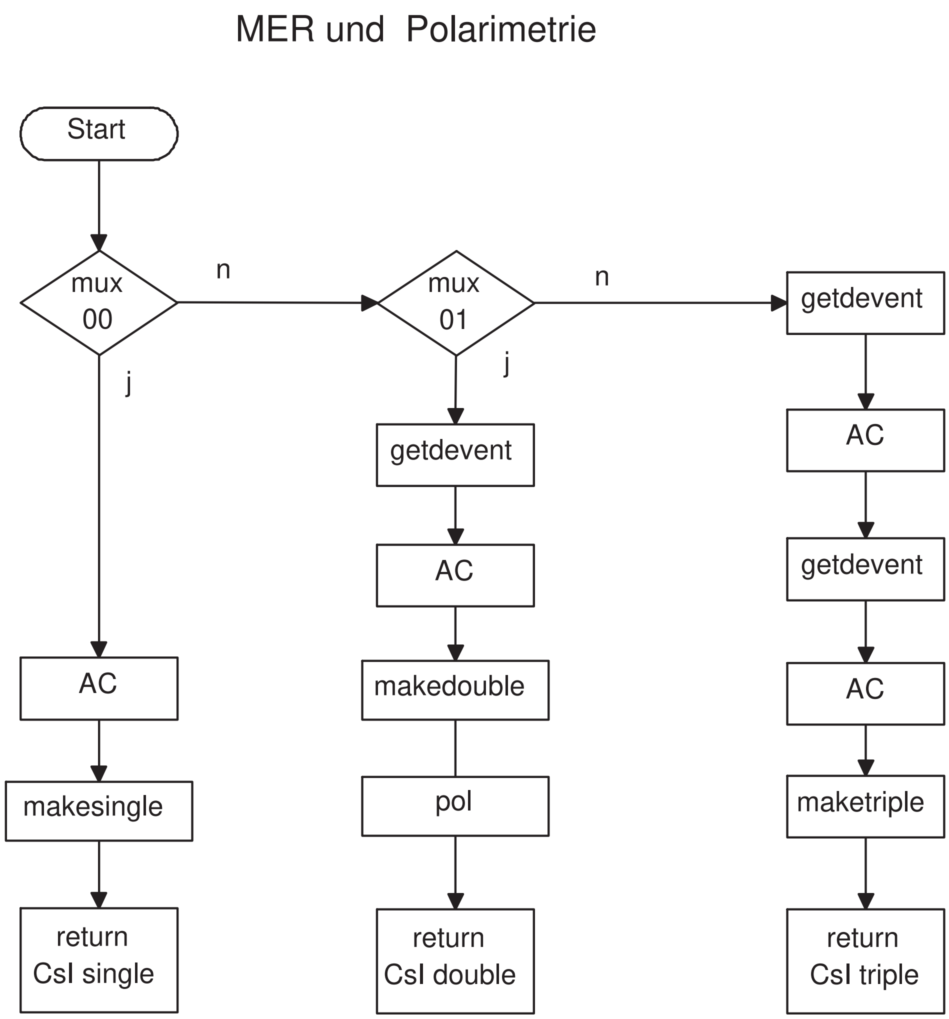

Abbildung 6.3: Rekonstruktion von Mehrfachereignissen und Polarimetrie

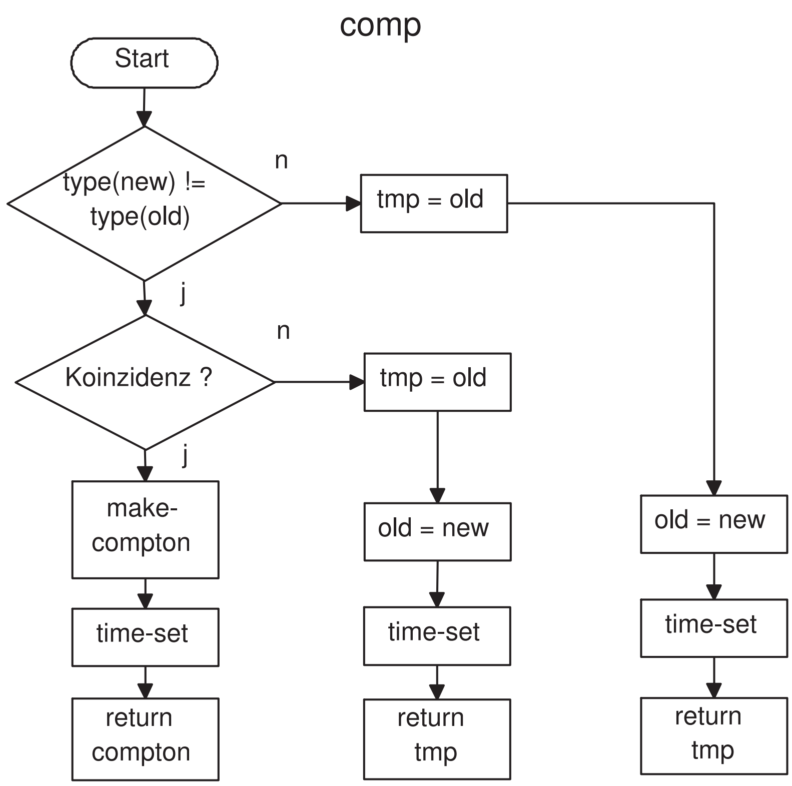

Abbildung 6.4: Erzeugung von Compton-Ereignissen

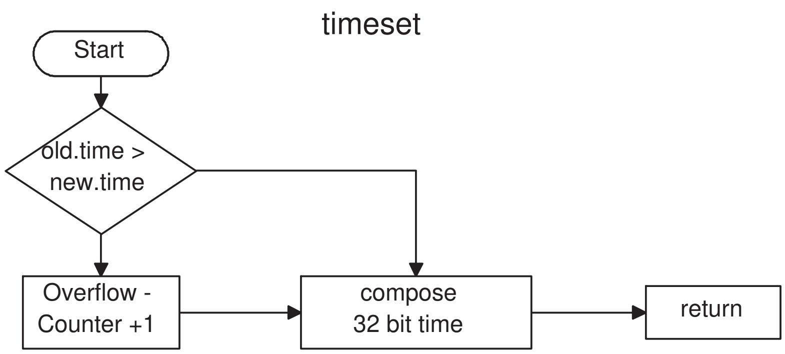

Abbildung 6.5: Einführung des 32 Bit Zeitformats

Kapitel 7

Tests

Die Entwicklung der Komponenten HEPI und IASW des IBIS-Instruments in Tübingen war darauf angewiesen, daß an den Schnittstellen zur Satellitenumgebung Simulationen zur Verfügung standen. Da die Datenverarbeitung und damit das 'Herz' des Gesamtinstruments erarbeitet wurde, musste sowohl die komplette Peripherie als auch die Weiterverarbeitung simuliert werden: die Detektoren (ISGRI und PICSIT), der aktive Schild (VETO), die Data Processing Electronics (DPE), das On Board Data Handling (OBDH) und das SpacecraftInterface (SI). Die meiste Zeit der Entwicklung stand keine umfassende Auswertesoftware zur Verfügung. Das hatte eine gewisse Einschränkung der Testmöglichkeiten zur Folge.

Getestet wurden die geänderten Soft- und Hardwareversionen auf allen Ebenen. Zuerst in Softwaresimulationen, dann als isolierte Komponente und anschließend in das System integriert. Die Tests auf Instrumentenebene werden im Kapitel Qualifizierungstests genauer beschrieben. Sie wurden ausgewählt, weil es die umfassendsten Tests sind, die gemacht wurden. Die Tests anderer Modelle[1] bzw. Entwicklungsstufen sind Untermengen davon.

7.1 Tests während der Entwicklung

7.1.1 Entwicklung von Komponenten

Um eine bestimmte Funktionalität zu prüfen, wurden passende Eingabefiles erstellt. Dies waren konstruierte Verteilungen von Ereignissen, bei denen

[1] Siehe Kapitel "Hierachie der Modelle"

Tabelle 7.1: Tabelle der Modelle und ihrer Tests

Art des Tests	STM	EM	QM	FM
Thermal-Vakuum	X		X	X
Elektrisch		X	X	
Funktional		X	X	X
Vibration	X		X	X
Schock	X		X	

die restlichen Parameter konstant gehalten wurden, so daß eine zweidimensionale Input-Output Zuordnung heraus projeziert wurde. Erst mit der Erweiterung und Verfeinerung der Tests ergab sich eine gewisse Verschränkung der verschiedenen Abhängigkeiten.

Die wesentliche Eigenschaft der Eingabeverteilungen musste sein, daß sich die zugehörige Ausgabe manuell mit Hilfe von Auswertungstools verifizieren lies. Dazu wurde das Ausgabeformat der ¨On Board¨ Datenverarbeitung, die TeleMetrie-Pakete (TM), mit dem TM-Encoder in eine lesbares Format gebracht. Dieses Werkzeug war von Patrick Risse, Eckart Göhler und Martin Stuhlinger entwickelt worden.

7.1.2 Tests beim Übergang zu neuen Versionen

Jede neue Entwicklungsstufe wurde in die erprobte Umgebung eingesetzt und die produzierten Daten mit denen der Vorgängerversion verglichen. Getestet wurde damit vor allem die Stabilität der Weiterentwicklungen. Die beiden wesentlichen Probleme der Tests waren die Erzeugung realistischer Detektordaten sowie die Interpretation der Ausgabedaten. Diese Interpretation manuell durchzuführen ist außerst aufwendig. So war zur Auswertung der Funktionstests des IBIS-QM mehr als ein Doktoranden-Mannjahr erforderlich. Die Notwendigkeit der Automatisierung der Tests und ihrer Auswertung ist hier offensichtlich.

7.2 Tests mit IBISIM

IBISIM wurde bisher eingesetzt zur Auswertung von Funktionstests. Dabei wurde ausgenutzt, daß er leicht auf spezielle Dateneigenschaften eingestellt werden kann. Die erste Aufgabe, die er bei der Testauswertung lösen konnte, war das Herausfiltern von Compton-Einfachevents und Mehrfachevents aus dem Datenstrom. Diese Ereignisse wurden sortiert und gezählt ausgegeben. Damit wurde ein einfacher Abgleich mit den Eingabedaten möglich.

Allerdings beschreiben derartige Tests nur einen Teil der Möglichkeiten von IBISIM. Um wirklich End-to-End Tests durchführen zu können, muß die Datenausgabe noch verfeinert werden. Dafür wäre es wünschenswert, die Vor- und Nachteile der möglichen Ausgabeformate zu präzisieren.

7.3 Hierarchie der Modelle

Die Entwicklungsstufen von Satelliteninstrumente und Komponenten werden beschrieben durch sogenannte Modelle. Es gibt mehrere Stufen: Entwicklungsmodell[2] (EM), Thermisches Strukturmodell[3] (STM), Qualifikationsmodell[4] (QM) und Flugmodell[5] (FM). Diese Modelle bilden zugleich die Grundlage der Zeitplanung für die schrittweise Integration der Instrumente und des Satelliten.

7.3.1 Entwicklungsmodell

Ein EM muß flexibel, variabel sein, um den möglicherweise noch nicht perfekt definierten Anforderungen nachgeführt werden zu können. Das EM des HEPI bildeten zwei mit handelsüblichen Bausteinen bestückte Elektronik-Boards, der Logikbaustein war ein FGPA. Dessen Programmierung wurde solange modifiziert, bis er die geforderte Funktionalität aufwies. Während der Entwicklung hatte sich heraus gestellt, daß ein leistungsfähigerer FPGA notwendig war. Da dieser Baustein größer und mit mehr Anschlüssen versehen war, machte er ein anderes Board notwendig.

Am Ende der EM-Phase musste die definitive Entscheidung zum Abschluß der HEPI-Entwicklung getroffen werden. Das Ergebnis wurde zur Produktion des endgültigen Satellitenbausteins, eines ASICs, verwendet. Ab diesem Moment konnten Fehler nicht mehr korrigiert werden, sondern nur noch verwaltet.

Bei der IASW-Software gab es einen derart harten Übergang naturgemäß nicht. Dort war der Übergang nicht technisch begründet, sondern systematisch. Jede Änderung erfordert die Wiederholung der Testsequenzen, um die Funktionalität sicherzustellen. Zu den Übergabeterminen muß diese garan-

[2]engl. engineering model
[3]engl. structural-thermal model
[4]engl. qualification model
[5]engl. flight model

tiert werden. Deshalb ist es oft besser einen korrekt dokumentierten Fehler zu haben als eine schlecht geprüfte Änderung.

7.3.2 Thermisches Strukturmodell

Das STM ist das zum EM komplementäre Modell. Hier wird anstatt der Funktionalität der mikroelektrischen Signale die mechanische und thermische Funktionalität untersucht. Auch die mechanischen Schnittstellen sind definiert und müssen bedient werden. Dazu wird mit dem STM ihre geometrische und festigkeitsmäßige Tauglichkeit untersucht. Außerdem muß die Struktur im Vakuum die betriebsbedingt freiwerdende elektrische Leistung wegkühlen können, damit keine thermischen Schädigungen auftreten.

7.3.3 Qualifikationsmodell

Für das QM wird die Funktonalität des EM in der authentischen Satellitenstruktur aufgebaut. Die teuren strahlungsfesten Bauteile werden in derselben Art und Weise gelötet, geklebt und beschichtet, wie die eigentlichen Flugbauteile auch. Unter permanenten funktionalen Tests werden von der ESA definierte physikalische Stressbedingungen erzeugt. Unter Stoß, Vibration, Vakuum und Temperaturzyklen darf das Verhalten sich nicht ändern. Erstere stellen die Startfestigkeit sicher, letztere die Dauerfestigkeit im All.

Trotz dieser stark beanspruchenden Tests, ist das allen Flugstandards entsprechend aufgebaute QM der HEPI zugleich das Flug-Ersatzmodell oder Flight Spare Model (FSM). Es würde als redundante Einheit zum Einsatz kommen, wenn aus irgendwelchen Gründen eines der vorgesehenen Flugmodelle ausfallen würde, um die Einhaltung des Starttermins zu ermöglichen.

7.3.4 Flugmodell

Beim Flugmodell werden die Tests auf ein Minimum reduziert, um Verschleiß auszuschließen. Stoßtests entfallen ganz, die Amplituden der Vibrationstests werden reduziert, bei um fünf Grad verringerten Extremaltemperaturen wird die Anzahl der Temperaturzyklen auf vier reduziert.

7.4 Qualifizierungstests

Diese Tests wurden bei der Madrider Kooperationsfirma CRISA (Stoß und Vibration) bzw. dem ebenfalls bei Madrid gelegenen INTA[6] ausgeführt.

[6] Instituto Nacional de Tecnica Aeronautica

Bei allen physikalischen Tests wurde vor und nach den einzelnen Zyklen ein spezieller elektrischer Funktionstest durchgeführt. Dazu musste die komplette Testausrüstung am jeweiligen Testort aufgebaut werden. Dieser Test, genannt QM 20, musste sowohl alle wesentlichen Funktionen und Modi einschließen, als auch möglichst kurz sein, um die teuren Testzeiten nicht unnötig in die Länge zu ziehen. Diese Tests wurden vor Ort ausgewertet um eventuell auftretende Probleme sofort analysieren zu können [Vol00b], [Vol00c]

7.4.1 Stoßtests

Bei Stössen treten innerhalb kurzer Zeitintervalle extreme Beschleunigungen auf. Bei den QM-Tests wurde ein Beschleunigungspuls von 1500g verlangt. Um dies beschädigungsfrei zu realisieren, wurde die DPE auf einer Metallplatte verschraubt. Auf diese Platte fiel dann aus variabler Höhe eine Stahlkugel. Die Auslenkung wurde von der Platte auf das Gehäuse der DPE übertragen.

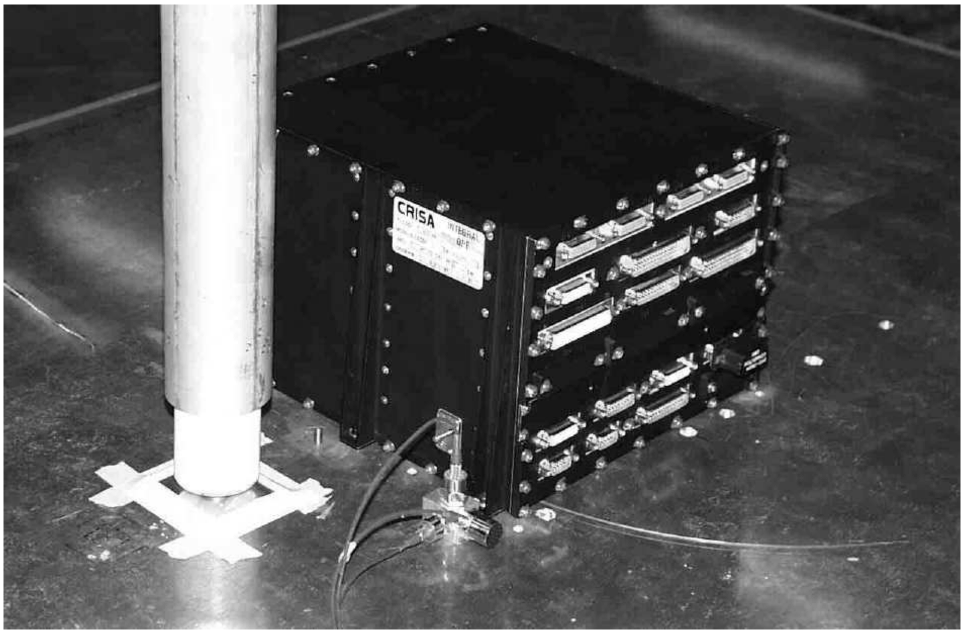

Abbildung 7.1: Die DPE auf der Apparatur für Stoßtests

7.4.2 Vibratonstests

Bei den Vibrationstests wird die DPE in den drei Achsenrichtungen getrennt geschüttelt. Es wurden sowohl Sinusschwingungen mit konstanter Auslenkung durchgeführt, als auch so genannte Random-Tests. Bei letzteren wird mit statistischer Amplitude und Frequenz in allen Achsenrichtungen geschüttelt. Damit wird das Startgeräusch der Trägerrakete simuliert.

Bei den Sinustests wurde die Frequenz, bei einer Amplitude von 5,8 mm, von 5 bis 31 Hz hoch und wieder herunter gefahren. Von 31 bis 100 Hz wurde eine Beschleunigung von 22.5 g vorgeschrieben. Auftretende Resonanzen muß die Mechanik und die Elektronik aushalten können.

Abbildung 7.2: Die DPE auf der Apparatur für Vibrationstests

7.4.3 Thermal-Vakuum Tests

Bei den Thermal-Vakuum Tests geht es um die Dauerfestigkeit im Weltraum. Dazu ist entscheidend, daß beim Betrieb im Vakuum, d.h. unter dem Wegfall der Konvektionskühlung, keine Überhitzung auftreten kann. Thermische Spannungen an den Kontaktstellen, speziell zwischen Metallen und Kunststoffen mit ihren sehr unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten, durften das Verhalten der DPE nicht beeinflussen.

In von der ESA durchgeführten Untersuchungen der thermischen Stabilität von beschichteten Platinen, waren unter bestimmten Bedingungungen schwere Schäden aufgetreten. Die Auswahl des Beschichtungsmaterials und der Schichtdicke stellten vor diesem Hintergrund eine nichttriviale Aufgabe dar. Auch der Erfolg dieser Bemühungen war in den TV-Tests zu erbringen.

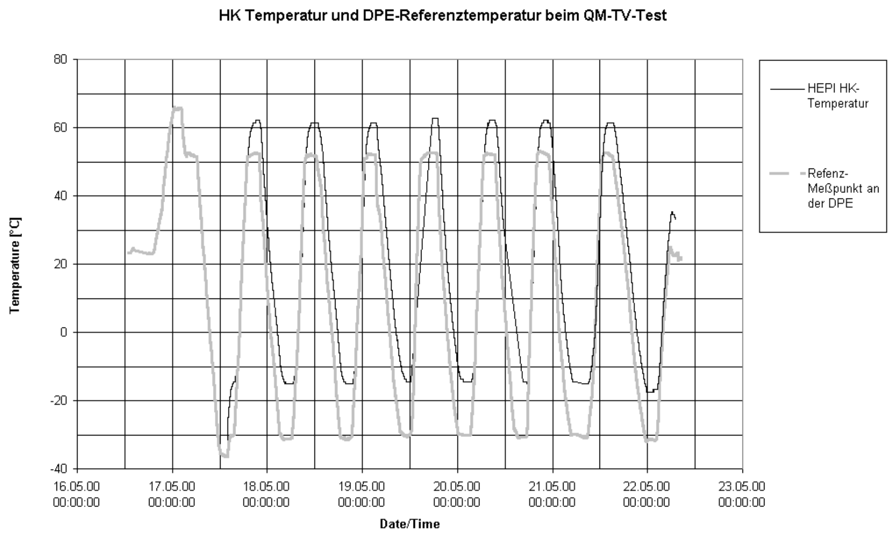

Abbildung 7.3: Temperaturverlauf der TV-Tests

Vor und nach den Zyklen wurden noch zusätzliche Tests mit dem QM 20-Test durcheführt, bei Normaldruck und Raumtemperatur. In einem Vakuum von mindestens 10^{-6} bar musste die DPE 8 Zyklen absolvieren. Das Kühlen/Heizen erfolgte auf zwei Wegen. Mittels Wärmeleitung über die Grundplatte, auf der die DPE verschraubt war und über Strahlungskühlung/-heizung durch ein die DPE umschließendes Thermalhemd. Das obere Temperaturniveau lag bei 50^o C, das untere bei - 30^o C. Beim ersten Zyklus wurden die Extremtemperaturen um fünf Grad erniedrigt bzw um fünfzehn Grad erhöht.

Während des Kühlens/Heizens durften zwischen den verschiedenen Temperaturmesspunkten an der DPE eine Differenz von 10^o C nicht überschritten werden. Nach dem Erreichen der jeweiligen Extremtemperatur wurde zur Beseitigung von Tempraturgradienten zwei Stunden stabilisiert. Erst dann konnte getestet werden. Zwischen den Tests lagen dadurch im Mittel ca. sieben Stunden, so daß im Dreischichtbetrieb gearbeitet werden musste.

7.4.4 Elektrical-Interface Tests

Die Electrical-Interface Tests beinhalten sowohl den elektrischen Leistungsbedarf der Elekronik in den verschiedenen Betriebszuständen, als auch das Verhalten der einzelnen Signalpegel. Sie wurden bei - 35^o C, 20^o C und 70^o C durchgeführt. Der Einschaltstrom und der Verbrauch im Stand By Mode und im regulären Betriebsmodus wurden gemessen.

Entscheidend für die Funktion der Elektronik ist eine korrekte Zeitorganisation der Signale. Sie müssen, abgesehen von der Einhaltung der vorgeschriebenen Spannungswerte, zu den negativen Flanken der Clock, den Übernahmezeitpunkten, stabil sein. Entscheidend ist also auch die Stabilität des Clocksignals selbst. Um die Anstiegszeiten der Signale, eventuelle Überschwinger und Instabilitäten zu ermitteln, wurden die Signale aufgezeichnet und die Werte mit den Anforderungen verglichen. [Vol00d]

7.4.5 Funktionstests

In den Funktionstests wurden für alle Steuerungs-, Housekeeping- und Wissenschafts-Funktionen eigene Testsequenzen definiert. Diese Tests lassen sich in vier Gruppen zusammenfassen. In einer Gruppe werden das Ein- und Ausschaltverhalten, die korrekte Reaktion auf Steuerkommandos, das Housekeeping, die Übernahme der Einstelltabellen und die Ereignismeldungen, kurz, die Systemkontrolle geprüft.

In einer zweiten Gruppe werden die Funktionen der wissenschaftlichen Datenverarbeitung getestet. Die Funktion des Instruments musste dem eingestellten entsprechen. In den Histogrammtests wurden sämtliche Kanäle angesprochen und sichergestellt, daß alle eingegebenen Ereignisse verarbeitet wurden. Es wurde geprüft, ob die Tabellenwerte richtig interpertiert werden. Dies waren die umfangreichsten Tests. Bei der Auswertung dieser Test wurde der IBISIM erstmalig eingesetzt.

Die dritte Gruppe prüft die diversen Automatismen, die dafür sorgen, daß sich die Instrumente des Satelliten selbständig schützten, wenn ihre Detektoren zum Beispiel durch erhöhte Sonnenaktivität oder beim Eintritt in den Strahlungsgürtel bedroht sind. Die CDMU versendet dann Broadcast Packages (BC) an die Instrumente um die Automatismen aus zu lösen.

Um die HEPI Einzelfunktionen testen zu können, wird der Aufbau geändert und der HEPI mit dem DPE-Simulator angesteuert. Damit wird ein direktes Ansteuern und Testen der Einzelfunktionen ermöglicht, die ansonsten in Modi kombiniert werden. Diese Tests stellen die vierte Gruppe dar. Eine Sonderstellung hat der QM_20 Test, der eine kompakte Zusammenfassung der Systemtests darstellt. Als Eingangstest prüft er alle wesentlichen Funktionalitäten ab. Siehe dazu [Vol00a].

Tabelle 7.2: Die Prozeduren der QM-Funktionstests

Testbereich	Testbezeichnung
Allgemeine Funktionen, Steuerung	
Einschaltvorgang, Initialisierung, Housekeeping	QM_01
Hochladen und Herunterladen der Register	QM_02
Ereignismeldungen (On Event Messages)	QM_03
Verarbeitung der Steuerungsbefehle	QM_04
Diagnostik Mode	QM_05
Wissenschaftliche Funktionen	
Standard Histogramme (Scientific Submode Standard)	QM_06a
Polarimetrie Histogramme (Scientific Submode Standard	QM_06b
Photon by Photon (Scientific Submode PPM)	QM_06c
Übertragung der Funktionstabelle ins HEPI Status Register	QM_06d
CdTe Amplitudenkorrektur und Datenauswahl	QM_06e
Compton Datenauswahl	QM_06f
Ausgabepriorität der DPE für TM	QM_06g
Zeitfluss und Zellstatus der Spectral Timing Histogramme	QM_06h
Histogramm Kompressionsalgorithmus	QM_06i
Automatismen	
Eklipse Automatismus (Eclipse)	QM_07a
Strahlungsgürtel Automatismus (Radiation Belt)	QM_07b
Erhöhte Sonnenaktivität (IREM)	QM_07c
Not-Aus Automatismus (ESAM, Imminent Switch-off)	QM_07d
Point/Slew Automatismus	QM_07e
On-Target Flag, Hand-Over-Flag	QM_07f
ACC-Flag, AOCS-Flag	QM_07g
Allgemeine Funktionen, Steuerung	
Ausschaltvorgang	QM_08
IASW Hoch- und Herunterladen	QM_09
HEPI Tests mit DPE Simulator	
HEPI Funktionstest	QM_10
Amplitudenkorrektur von HEPI	QM_13
Rekonstruktion von Mehrfachereignissen von HEPI	QM_14
Polarisationsereignisse von HEPI	QM_15
Spectral-Timing von HEPI	QM_16
Histogramm Binning von HEPI	QM_17
Metatest	
Genereller Eingangstest	QM_20

Kapitel 8

Zusammenfassung

Die Datenverarbeitung des IBIS Instruments war in mehreren Diplomarbeiten am IAAT entwickelt worden. Ende 1999, als ich in das Projekt eintrat, war die Entwicklung des HEPI abgeschlossen, seine Logik im ASIC-Baustein fest geschrieben. Von der IASW existierte seit Mitte 1999 eine vollständige, lauffähige Version, die allerdings ständig weiterentwickelt wurde.

Meine Aufgabe war, die Tests von HEPI und IASW durchzuführen. Es galt also, die verschiedenen Strukturebenen des Satelliten, des Instruments und der Datenverarbeitung, sowie deren Entwicklungs- und Testumgebung zu verstehen. Die Notwendigkeit, dem Termindruck inhaltlich gerecht werden zu müssen, war oft zu Lasten von Dokumentationen gegangen, deren natürliche Halbwertszeit aufgrund der permanenten Weiterentwicklung ihres Gegenstands, schon kurz genug war.

Vorrangig war dem zu Folge, mich in die Kommunikationsstruktur der Arbeitsgruppe einzuarbeiten. Wie die obengenannten inhaltlichen Bereiche, war auch dies eine gewachsene Struktur, die von innen erschlossen werden musste. Interessant ebenso, die Einblicke in die Methodik der Meetings und Konferenzen, in denen die Kooperation mit den IBIS-Wissenschaftlern der anderen europäischen Institute ausgearbeitet wurde.

Die Testskampagnen des QM sind erfolgreich abgeschlossen worden. Einige Tests eines der FM müssen wiederholt werden. Das dafür ursächliche Problem konnte jedoch behoben werden, so daß auch dieser Testerfolg absehbar ist.

Neben der Durchführung der Tests, erstellte ich das Test-Werkzeug IBIS-Simulator, um die gemeinsame Funktionalität von HEPI und IASW übergeordnet testen zu können. Da ich vorher nicht programmieren konnte, musste ich C++, die Sprache der Wahl, erst lernen. Das Verständnis der Arbeitswei-

se der IBIS-Datenverarbeitung, das ich während der Tests erworben hatte, konnte ich nun nutzen. Der Prototyp von IBISIM hat erste Dienste geleistet.

Für die programmiertechnische Unterstützung bedanke ich mich bei Eckart Göhler. Außerdem bedanken möchte ich mich bei Martin Stuhlinger, bei Reiner Volkmer, dem Projektleiter, und bei Herrn Professor Staubert, sowie den anderen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe und des Instituts.

Literaturverzeichnis

[BW93] S. Bergeson-Willis. Report on the Phase A Study of INTEGRAL. Technical report, ESA, April 1993.

[Goe99] Eckart Goehler. Entwicklung einer Steuersoftware des IBIS-Experiments auf INTEGRAL. Master's thesis, AIT, Eberhard-Karls-Universitaet Tuebingen, 1999.

[Lau98] Phillipe Laurent. *The Onboard Compton selection*, September 1998. IN-IB-Sap-RP-045.

[Ren98] Mike Rennie. Software Requirements Document. Technical report, GMV, July 1998. INT-RS-GMV-0001.

[Stu99] Martin Stuhlinger. Die Echtzeit-Datenverarbeitung des IBIS-Experiments auf INTEGRAL. Master's thesis, AIT, Eberhard-Karls-Universitaet Tuebingen, January 1999.

[Vol99] Reiner Volkmer. Software Requirement Document. Technical report, AIT, Universitaet Tuebingen, June 1999. IN-IM-TUB-SRD-001.

[Vol00a] Reiner Volkmer. Eid-C, Annex, Software Acceptance Test Specification. Technical report, Astronomisches Institut Tuebingen, February 2000. IN-IM-TUB-AIV-001.

[Vol00b] Reiner Volkmer. Hepi Board QM Test description. Technical report, Astronomisches Institut Tuebingen, March 2000. IN-IM-TUB-TD-01.

[Vol00c] Reiner Volkmer. Ibis On Board SW Verification and Validation Plan Acceptance Test Specification. Technical report, Astronomisches Institut Tuebingen, January 2000. IN-IM-TUB-AIV-01.

[Vol00d] Reiner Volkmer. Test and Verification of HEPI-Hardware and IBIS-IASW. Technical report, Astronomisches Institut Tuebingen, December 2000. IN-IM-TUB-TN/EL-021.