

5. Die Eichung

Eine Eichung kann in Deutschland rechtlich gesehen nur vom Eichamt durchgeführt werden. Handelt es sich um physikalische Geräte, spricht man nicht von Eichung, sondern von Kalibration. Der Unterschied zwischen beiden Begriffen ist aber lediglich administrativer Art: Da die Eichbehörde keine Gerätschaften zur Eichung eines Röntgen-pn-CCDs zur Verfügung stellt und sich die Eichung des pn-CCDs nicht auf vom Eichamt tangierte Bereiche auswirkt, werden die Begriffe Eichung und Kalibration im folgenden äquivalent verwendet.

Die Eichung des pn-CCDs des ersten Flug-Modells für XMM (siehe 5.3) wurde in zwei Phasen unter der Leitung von Dr. Ulrich Briel ("Head of Calibration") vom MPE durchgeführt. Eine erste Phase fand in der PANTER-Testanlage in Neuried, eine zweite in Orsay bei Paris in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE) und dem L'Institut d'Astrophysique Spatial (IAS) statt. Für ABRIXAS entfällt diese zweite Phase.

5.1 Die PANTER-Testanlage in Neuried



Abbildung 5-1: Luftbild der PANTER-Testanlage

Zur Charakterisierung und Eichung von Röntgenteleskopen und Detektoren betreibt das MPE die PANTER-Testanlage in Neuried bei München. Zwischen 1977 und 1980 wurde sie zur Charakterisierung von ROSAT gebaut und danach weiter genutzt. Im letzten Jahrzehnt wurden viele astronomische Röntgenexperimente an der PANTER-Anlage getestet, so z. B. ROSAT(1977-1990), EXOSAT (1980-1982), MIR-HEXE (1981), AXAF (1982-1996), BEPPO-SAX (1985-1994), ROSAT-WFC (1987-1997), JET-X (1990-1997), SOHO/CDS (1997-1994) und nicht zuletzt XMM (seit 1987) und ABRIXAS (seit 1995).

Abbildung 5-1 zeigt eine Luftaufnahme der PANTER-Testanlage: Im kleinen Gebäude rechts unten am Bildrand befindet sich die Röntgenquelle. Auf der linken Seite in dem weißen Gebäude am Waldrand sind Testkammer und Kontrollräume untergebracht.

Die Vakuum-Testkammer hat einen Durchmesser von 3,5 m und eine Länge von 12 m, um darin Satellitendetektoren inklusive der meist großen Teleskope unterbringen zu können. Quelle und Testkammer sind über eine 130 m lange Metallröhre verbunden, die im Betriebszustand evakuiert wird. Durch diese Entfernung will man die sehr große Distanz eines Röntgenobjektes simulieren und so fast paralleles Licht erhalten. Im Betrieb können diverse Manipulatoren Teleskop und Detektor mit hoher Präzision positionieren.

Neben der Charakterisierung von Röntgenteleskopen werden an der PANTER-Testanlage Messungen von reflektiertem Licht und Streulicht an ebenen Spiegeln und einzelnen Spiegelschalen sowie die Charakterisierung der Bildqualität von kompletten Teleskopen durchgeführt. Ebenso können die Eigenschaften von Fokalinstrumenten (Detektoren, Gitter, Filter) untersucht werden.

Vor dem Start der jeweiligen Satelliten kann im PANTER ein sogenannter „End-To-End-Test“ durchgeführt werden, bei dem das gesamte System in seiner endgültigen Konfiguration noch einmal überprüft wird. In zwei kleineren Vakuumkammern können zusätzliche Thermalvakuum-Tests stattfinden, um Teile der Satelliten zu qualifizieren.

In der PANTER-Testanlage war es wegen der Größe des Vakuumtanks möglich, Eichungen mit Spiegel vor dem Detektor zu machen. Für die Eichung des pn-CCDs von XMM und ABRIXAS wurden in der Zeit vom 17. Februar 1998 bis zum 22. März 1998 600 Stunden Eichmessungen in dieser Anlage durchgeführt. Dabei wurden 4×10^9 Photonen detektiert. Die Messungen der PANTER-Eichung stellen eine Säule für die Auswertungen dieser Arbeit dar.

5.2 Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE)



Abbildung 5-2: LURE/IAS in Orsay

Die zweite Phase der Eichung für XMM fand vom 18. Mai bis zum 2. Juli 1998 in Kooperation mit LURE und IAS in Orsay statt. Die in Orsay genommenen Daten sind ebenfalls grundlegend für die Eichung des CCDs und diese Arbeit gewesen.

In Orsay wurde im Unterschied zur PANTER-Anlage ohne Spiegel gemessen, da die Dimension des dortigen Vakuumtanks dies nicht erlaubte.

Direkt im Anschluß an die Kalibration wurde für XMM in Orsay auch ein "End-To-End-Test" durchgeführt, bei dem die voraussichtlichen Komponenten für die MAXI-Kamera endgültig integriert und als Ganzes auf ihre Funktion hin getestet wurden.

5.2.1 Die Synchrotronquellen

Wenn Elektronen beschleunigt werden, emittieren sie Photonen. Diese abgegebene Strahlung wird als Synchrotronstrahlung bezeichnet. Am LURE/IAS stehen drei Röntgenquellen zur Verfügung. Zwei davon sind Synchrotronquellen, die dritte eine konventionelle Röntgenquelle (siehe 5.2.2). Eine Synchrotronquelle wird durch den Super Accélérateur à Collision d'Orsay (SACO) erzeugt, die andere durch den Dispositif de Collisions sous l'Iglou (DCI). Am LURE/IAS können mehrere Vakuumtanks benutzt werden, von denen der größte mit Namen Jupiter (Abbildung 5-3) ein Volumen von 23m^3 besitzt. Jupiter ist genau am Treffpunkt der beiden Strahlen der Synchrotronquellen platziert. Man bezeichnet den Strahl einer solchen Quelle (aus dem Englischen) als "Beam". Mit Hilfe von Monochromatoren können am LURE/IAS definierte Energien aus dem Strahl separiert

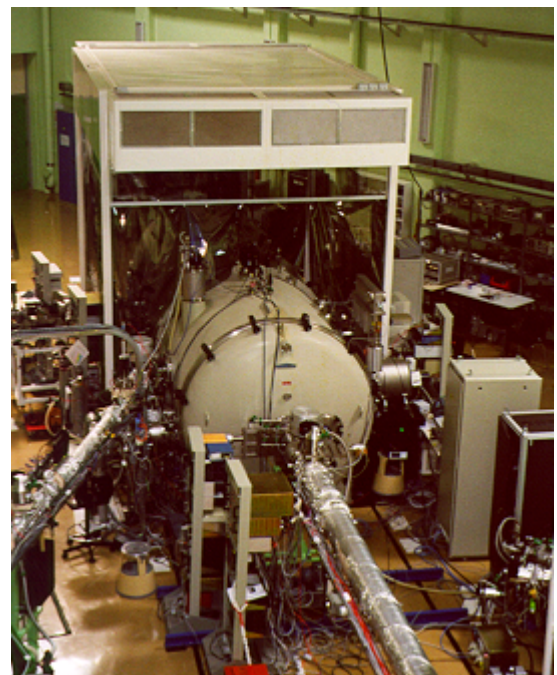


Abbildung 5-3: Jupiter-Vakuumtank

und dann zur Kalibration eingesetzt werden. Weiterhin kann die Intensität der abgegebenen Strahlung mit Hilfe eines Si(Li)-Detektors bzw. eines Proportionalzählers sehr genau bestimmt werden, was zur Flußkalibration und zur Überwachung der spektralen Reinheit dient. Abbildung 5-4 zeigt eine schematische Darstellung der Synchrotronanlage LURE/IAS.

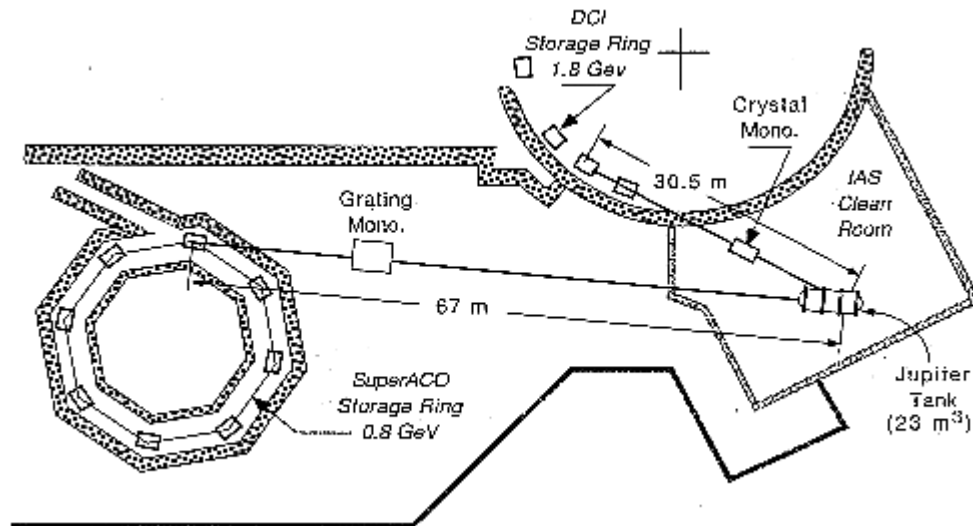


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung: LURE/IAS (Orsay)

Beim SACO-Beam kann die Energie von 0,1 - 1,2 keV variiert werden. Daran schließt sich unterbrochen durch eine Lücke von 0,4 keV energetisch der DCI-Beam mit einer Energiebandbreite von 1,6 - 25 keV an.

Während der Kalibrationsmessungen am LURE/IAS interessierte man sich hauptsächlich für die Beobachtung der Quanteneffizienz des pn-CCDs. Wichtig ist insbesondere die K-Absorptionskante des Siliziums, weil dort der Absorptionskoeffizient einbricht. Um diesen Effekt korrigieren zu können, muß diese Kante des Siliziums des pn-CCDs sehr genau vermessen werden. Man erreicht dies, indem man die Energie der Photonen in der Nähe der Siliziumkante in kleinen Schritten variiert. Dieser Vorgang wird als "Silicon Edge Scan" bezeichnet.

5.2.2 Die Fluoreszenzröntgenröhre

Die dritte Möglichkeit zur Erzeugung von Röntgenstrahlung am LURE/IAS bietet eine Röntgenröhrenkombination aus zwei Röhren. Die erste ist eine konventionelle Röntgenröhre, die zweite arbeitet nach dem Prinzip der Erzeugung von Röntgenstrahlung als Fluoreszenzstrahlung. Man bestrahlt hier mit einer Rhodium-Röntgenröhre verschiedene Targets. Die energiereiche Rhodiumstrahlung schafft es, Elektronen aus den Targetmolekülen zu entfernen. Diese Löcher können durch Elektronen von verschiedenen anderen Schalen aufgefüllt werden. So erhält man von jedem Target charakteristische Linien, ohne daß jedoch ein Bremskontinuum entstehen kann, wie es bei einer normalen Röntgenröhre (z. B. am PANTER) durch den Abbremsvorgang der Elektronen im Potentialfeld des Targets der Fall ist. Die Röntgenröhren haben im Vergleich zu SACO und DCI den Vorteil, daß sie einfacher zu bedienen und schnell in Betrieb zu setzen sind.

5.2.3 Handhabung

Die von SACO, DCI und Röntgenröhre abgegebene Strahlung kann mit Hilfe von Blenden auf einen Spalt begrenzt werden. Es ist wichtig, aus dem Beam, der nicht vollständig homogen ist, einen möglichst homogenen Bereich auszuschneiden. Da man aufgrund dieses Ausschnitts jedoch nicht das gesamte CCD ausleuchten kann, wurde eine Anordnung konstruiert, mit der man die gesamte Kamera bewegen kann. Das MOGSE (Mechanical & Optical Ground Support Equipment), das von der Firma LABEN in Italien entwickelt wurde, kann die Kamera schnell hinter dem Spalt hin und her bewegen und so eine Flat-Field-Bestrahlung simulieren. Außerdem macht es das MOGSE möglich, den gesamten Detektor innerhalb des Tanks in die verschiedenen „Auftreff-Richtungen“ von SACO, DCI und Röntgenröhre zu drehen. Der innere Aufbau im Jupiter-Tank und die Bewegungsmöglichkeiten durch das MOGSE werden in Abbildung 5-5 veranschaulicht. Die Schlitzzeinstellung ohne permanente Bewegung der Kamera durch das MOGSE ist insbesondere für die Eichmessungen in Timing und Burst Mode wichtig (siehe Kapitel 6).

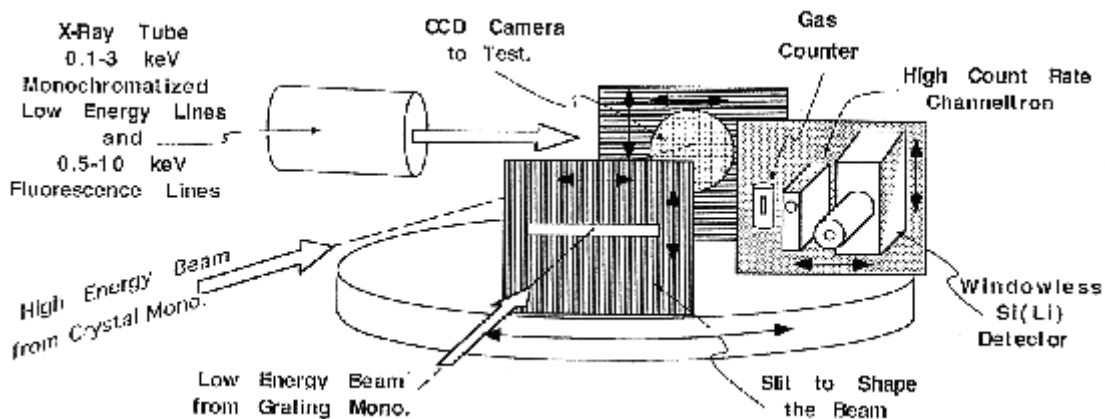


Abbildung 5-5: Möglichkeiten der Bewegung und Justage im geschlossenen Tank

5.3 Flugmodell

Die in Neuried und Orsay durchgeführten Eichmessungen von MAXI wurden mit dem sogenannten Flugmodell (FM) durchgeführt. Bei der Entwicklung und dem Bau dieses Satellitenexperimentes geht man in verschiedenen Stufen vor:

Im Falle des pn-CCDs entstanden zuerst mehrere Labormodelle (LMs), an denen grundlegende Experimente durchgeführt wurden. Hierbei handelte es sich nicht um ein ganzes Array mit zwölf CCDs, sondern nur um ein einzelnes CCD.

Es folgte das Elektrische Modell (EM), ein Modell, bei dem bereits alle 12 CCDs zu einem Array verbunden waren und das auch schon mit allen elektrischen Komponenten zusammenarbeitete. Mit Hilfe verschiedener Tests wurden auch die Funktionen dieses Modells optimiert.

Qualifizierende Tests wurden darauf mit dem Qualifikations-Modell (QM) durchgeführt. Hauptsächlich handelte es sich um Thermal-Vakuum-Tests, Schüttel-Tests und Testmessungen in allen Modes.

Das letzte Modell dieser Reihe ist das oben erwähnte Flugmodell FM. An ihm wurde die Kalibration vorgenommen. Bei Thermal-Vakuum-Tests und Schüttel-Tests wurde das FM geringeren Belastungen (sogenannten Acceptance-Tests) ausgesetzt, um es nicht unnötig zu beanspruchen. Da das FM baugleich zum QM ist, geht man davon aus, daß es auch die gleichen Belastungen wie das QM aushalten wird und man folglich reduzierte Tests vornehmen kann.

Des weiteren existiert noch ein Ersatz-Modell, das sogenannte Flight Spare-Modell, welches im Notfall gegen das Flugmodell ausgetauscht werden kann, sollte letzteres Schaden erleiden.

Bei den elektronischen Komponenten der MAXI-Kamera unterscheidet sich das FM vom QM hauptsächlich in der Qualität der Bauteile, die beim FM alle strahlungsfest sein müssen.

5.4 Überblick über die vorgenommenen Eichmessungen

5.4.1 PANTER-Anlage Neuried

An der PANTER-Anlage wurde das pn-CCD in allen Modes bei sechs Temperaturen (-80, -90, -100, -110, -120, -130 °C) jeweils in folgenden Energien kalibriert:

<i>Linie</i>	<i>Energie in eV</i>
<i>C-K</i>	277
<i>O-K</i>	525
<i>Cr-L</i>	573
<i>Fe-L</i>	705
<i>Cu-L</i>	930
<i>Mg-K</i>	1254
<i>Al-K</i>	1487
<i>Si-K</i>	1740
<i>Mo-L</i>	2293
<i>Ag-L</i>	2984
<i>Ti-K</i>	4511
<i>Fe-K</i>	6404
<i>Cu-K</i>	8048
<i>Ge-K</i>	9886

5.4.2 LURE/IAS Orsay

Die Messungen in Orsay wurden hauptsächlich bei der Orbit-Betriebstemperatur des CCDs (-110 °C) durchgeführt. Daten wurden wiederum in allen Modes genommen.

Mit SACO konnte die aufgestrahlte Energie von 100 - 1200 eV in Schritten von 1 eV geändert werden. Bei DCI war dies von 1600 - 25000 eV möglich.

Für Bestrahlungen mit der Fluoreszenzröntgenröhre standen folgende Targets zur Verfügung:

<i>Linie</i>	<i>Energie in eV</i>
<i>Ti-L</i>	452
<i>Fe-L</i>	705
<i>Ni-L</i>	852
<i>Ge-L</i>	1118
<i>Mg-K</i>	1254
<i>Al-K</i>	1487
<i>Y-L</i>	1923
<i>Zr-L</i>	2042
<i>Ti-K</i>	4511
<i>Fe-K</i>	6404
<i>Ni-K</i>	7478
<i>Ge-K</i>	9886
<i>Y-K</i>	14165
<i>Zr-K</i>	15775

5.5 Beitrag des IAATs an der Auswertung

Das IAAT kümmert sich bei der Eichung des pn-CCDs hauptsächlich um Timing und Burst Mode, die „schnellen“ Modes. Kern dieser Arbeit ist die Eichung des pn-CCDs in eben diesen Modes und der daraus resultierende Vergleich von CCD-Eigenschaften in den verschiedenen Modes.



Abbildung 5-6: First Light on FM at PANTER-Calibration

Alle zur Eichung verwendeten Daten wurden in Neuried und Orsay genommen und schon während der Eichung mit dem von Gisela Hartner und Andreas Kercek entwickelten "MPE Online Visualization Tool"-Programm „online“ während der Messungen beobachtet. (Dieses Programm wird im täglichen Gebrauch mit "on" bezeichnet.) Dies erlaubte schon erste Schlußfolgerungen während der Messung. Wurden online Unregelmäßigkeiten festgestellt, konnten nachfolgende Messungen dann unmittelbar beeinflußt werden. Abbildung 5-6 zeigt die ersten durch eine Blende aufgetroffenen Photonen der Eichmessung am PANTER, die mit Hilfe von "on" visualisiert wurden.

Die Daten wurden in sogenannten HK-Files abgespeichert, deren Kürzel folgendes bedeuten:

Beispiel:

HK980527.002 enthält die Information:

zweites HK-File vom 27. 05. 1998 (**HK** steht für House Keeping)

Der Name HK-File wurde übernommen, da die Files nicht nur wissenschaftliche Daten enthalten, sondern auch Informationen über den aktuellen Zustand der MAXI-Kamera. Ein HK-File setzt sich aus mehreren Datenpaketen, sogenannten Frames zusammen. Vor jedem Frame wird in einem "Header" die Information angegeben, ob es sich um eigentliche House Keeping oder um wissenschaftliche Daten handelt.

Die Daten selbst wurden offline mit dem von Edgar Bihler geschriebenen "flag"-Programm¹⁰ ausgewertet.