

## Abschlussbericht

### ATHENA: X-IFU und WFI Technologieentwicklung

Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 50 QR 1903 gefördert.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Dr. Karl Remeis-Sternwarte, Bamberg, Astronomisches Institut,  
und Erlangen Centre for Astroparticle Physics

Projektleitung:

Prof. Dr. Jörn Wilms

Sonstige beteiligte Wissenschaftler:

Dr. Ingo Kreykenbohm

Dr. Thomas Dauser

Christian Kirsch, MSc

Maximilian Lorenz, MSc

Ole König, MSc

Amy Joyce, MSc

Prof. Dr. Manami Sasaki

Nina Grabmann

Saurabh Mittal

Matthias Rohe

Berichtszeitraum:

01.04.2019–31.12.2022

## **Inhaltsverzeichnis**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Aufgabenstellung</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</b> | <b>3</b>  |
| <b>3 Planung und Ablauf des Vorhabens</b>                             | <b>3</b>  |
| <b>4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn</b>           | <b>3</b>  |
| <b>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>                           | <b>9</b>  |
| <b>6 Eingehende Darstellung der Ergebnisse</b>                        | <b>10</b> |
| 6.1 Die Simulationssoftware SIXTE . . . . .                           | 10        |
| 6.2 Simulationen für den WFI . . . . .                                | 14        |
| 6.3 Simulationen für den X-IFU . . . . .                              | 14        |
| 6.4 Wissenschaftliche Simulationen . . . . .                          | 17        |
| <b>7 Publikationen</b>  | <b>20</b> |
| 7.1 Publikationen in begutachteten Zeitschriften . . . . .            | 20        |
| 7.2 Konferenzpublikationen . . . . .                                  | 21        |
| 7.3 Abschlussarbeiten . . . . .                                       | 21        |
| <b>8 Zitierte Literatur</b>   | <b>21</b> |

**1 Aufgabenstellung**

Aufgabe des Vorhabens war die Beteiligung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg an den vorbereitenden Studien für das ESA-Projekt *ATHENA*. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung genauer Simulatoren für die Simulation der Instrumente Wide Field Imager (WFI) und X-ray Integral Field Spectrometer (X-IFU). Neben der Mitgliedschaften des ECAP in den Instrumententeams für WFI und X-IFU ist dies auch durch die Mitgliedschaft von J. Wilms in der *Athena* Instrument Working Group und der Science Working Group dokumentiert.

**2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Vorhaben ist das Anschlussvorhaben der vom DLR geförderten Projekte 50 QR 0903, 50 QR 1103 und 50 QR 1402, in denen die wissenschaftliche und technische Vorbereitung zu *IXO* und *Athena* gefördert worden war.

Die detaillierten Aufgaben zu *Athena* ergaben sich im Rahmen der Durchführung der Studie unter der Leitung der Europäischen Weltraumagentur und häufig als Reaktion auf konkrete Anfragen zur Untersuchung bestimmter Fragestellungen durch die ESA. Der internationale Kontext der Studie ist durch die in Abschnitt 5 aufgelisteten wichtigsten Kollaborationspartner dokumentiert.

**3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Der Ablauf des Vorhabens richtete sich nach dem Verlauf der Studie und der Phase A von *Athena*, wie sie von der ESA vorgegeben worden war, d.h. es war durch die Weiterentwicklung der in den vorherigen Vorhaben erstellten Software sowie durch die Erstellung von Studien für sich aus der Phase A ergebenden Fragestellungen mit dieser Software gekennzeichnet. Ab Mitte 2022 ergaben sich dann durch den Beginn von Studien im Rahmen der durch das neu eingeführte "Cost Cap" von *Athena* notwendig gewordenen Änderungen starke Änderungen am Arbeitsprofil.

Weitere Änderungen in den Aktivitäten ergaben sich durch die COVID-19 Pandemie. Diese erforderte, dass ein sehr großer Teil der im folgenden beschriebenen Arbeit im Home Office erfolgen mußte. Projektmeetings fanden größtenteils in Videokonferenzen statt. Das mit *Athena* befasste Team an der FAU arbeitete schon vor Beginn der Pandemie gut zusammen und war auch innerhalb der Instrumententeams von *Athena* gut vernetzt, so dass das "Kerngeschäft" der Arbeit nur wenig von COVID-19 betroffen war. Insgesamt war in dieser Zeit jedoch der Informationsfluß deutlich reduziert und auch die Einarbeitung neuer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sehr erschwert. Daher wurde im Berichtszeitraum auch deutlich weniger auf studentische Hilfskräfte zurückgegriffen, als dies normalerweise Tradition in der Arbeitsgruppe ist, da deren Einarbeitung in die komplexe Softwareumgebung, die an der FAU entwickelt wurde, nur schwer möglich war.

**4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn**

1

Am 28. November 2013 wurde "Das Heiße und Energetische Universum" (Nandra et al. 2013) als wissenschaftliches Thema für die nächste große wissenschaftliche ESA Satellitenmission mit einem damals vorgesehenen Startdatum im Jahr 2031 ausgewählt. Diese Auswahl ist der Verdienst der europäischen Röntgenastrophysikgemeinde, die nach der Arbeit, die mit XEUS, IXO und dem ersten *Athena* Vorschlag in 2011 begann, nun endlich die Möglichkeit hatte, das

<sup>1</sup>Dieser Teil des Abschlussberichts ist eine modifizierte Version der Beschreibung des wissenschaftlichen Stands von *Athena* aus dem Antrag auf das Folgevorhaben von 50 QR 1903 sowie von allgemeinen Beschreibungen aus dem Abschlussbericht von 50 QR 1402, die weiterhin gültig bleiben und hier übernommen wurden, um den Abschlussbericht ohne Lektüre anderer Quellen verständlich zu halten.

nächste große Röntgenobservatorium vorzubereiten. Als Reaktion auf die Missionskonzept-ausschreibung im Januar 2014 wurde am 10. April 2014 der überarbeitete Vorschlag für das Röntgenobservatorium *Athena* (Advanced Telescope for High-ENergy Astrophysics), an die ESA übergeben und am 27. Juni 2014 von der ESA zur Implementation ausgewählt.

Wissenschaftliche Ziele der Mission sind

- die Untersuchung Schwarzer Löcher, insbesondere die Bildung der frühesten Schwarzen Löcher, das Wachstum supermassiver Schwarzer Löcher und der sie umgebenden Galaxien, sowie die Eigenschaften der Umgebung Schwarzer Löcher und von Akkretionsflüssen sowie transienten Ereignissen wie "Tidal Disruption Events",
- die Erforschung des "Cosmic Feedback", also des Wachstums Schwarzer Löcher und dessen Einfluß auf die Entwicklung von Strukturen im Universum,
- die Erforschung der Struktur des Universums auf großen Skalen, insbesondere die dynamische, thermische und chemische Entwicklung von Galaxienhaufen, Kosmologie mit Galaxienhaufen, und die Suche nach den fehlenden Baryonen, sowie
- die Erforschung heißer ( $T > 10^6$  K) Plasmen im Universum, vom Sonnensystem über Röntgenstrahlung von Sternen und ihre Wechselwirkung mit Exoplaneten über Supernovae hinaus zu Skalen von Galaxien.

Aufbauend auf den 2011 definierten wissenschaftlichen Fragestellungen wurde seither ein genaues Konzept für die wissenschaftliche Nutzlast definiert. Diese besteht aus einer Optik, die in Silizium-Poren-Technologie gefertigt werden soll (Bavdaz et al. 2022; Bavdaz et al. 2021) und die Röntgenstrahlung im Bereich von 0.2–12 keV auf eines von zwei Instrumenten fokussiert:

- Der **Wide Field Imager (WFI)** ist auf eine besonders gute Bildgebung mit moderater Energieauflösung optimiert. Er besteht aus einer siliziumbasierten Kamera aus DepFET Pixeln, die eine hohe räumliche Auflösung (2.2'') und moderate spektrale Auflösung von <80 eV bei 1 keV und <170 eV bei 7 keV liefert. Der WFI besteht aus zwei Kameras, dem Large Detector Array (LDA) mit einem Gesichtsfeld von 40'  $\times$  40', die in 5 ms ausgelesen wird, sowie dem Fast Detektor (FD) mit einem Gesichtsfeld von 2.4'  $\times$  2.4' und einer Auslesezeit von 80  $\mu$ s. Die Leitung des für die Entwicklung des WFI verantwortlichen Konsortiums liegt bei Prof. Dr. Kirpal Nandra (Max Planck Institut für extraterrestrische Physik).
- Das **X-ray Integral Field Unit (X-IFU)** hat eine sehr hohe spektrale Auflösung von besser als 2.5 eV unterhalb 7 keV, die auf besser als 0.4 eV in absoluter Energie kalibriert ist. Das Gesichtsfeld des X-IFU ist mit 5' kleiner als das des WFI, die räumliche Auflösung liegt bei 20''. Die Gesamtverantwortung für das X-IFU liegt beim französischen Centre National d'Études Spatiales (CNES), das wissenschaftliche Konsortium wird von Dr. Didier Barret (IRAP Toulouse) geleitet.

Der Aufbau der Instrumente und insbesondere auch die Struktur der Instrumentenkonsortien und die Aufgaben der einzelnen an den Konsortien teilnehmenden Institutionen wurden im Sommer 2018 in sogenannten "Instrument Consortium Consolidation Documents" (ICC) zusammengefasst. Die Remeis-Sternwarte und das Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) sind dabei unter Leitung von Prof. Jörn Wilms für die Entwicklung der sogenannten end-to-end-Simulationssoftware für den WFI und den X-IFU verantwortlich. Dieses Softwarepaket ist für die Modellierung der Gesamtperformance der Instrumente notwendig. Es erlaubt, sehr realistische Simulationen der Beobachtung astrophysikalischer Objekte unter Berücksichtigung aller relevanter detektorphysikalischen Effekte durchzuführen und so einen Abgleich des "ist-Zustandes" des Detektordesigns mit dem in den wissenschaftlichen Anforderungen definierten "soll-Zustand" zu vergleichen. Viele der dafür notwendigen Werkzeuge, wie die Modellierung

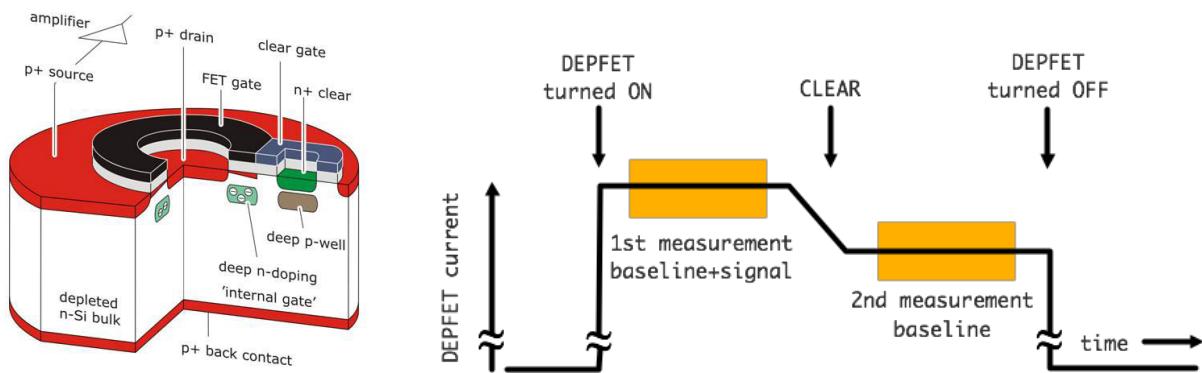


Abbildung 1: Links: Schnitt durch einen DePFET Pixel. Rechts: Prinzip der DePFET Signalmessung.

der Abbildungseigenschaften der Teleskope aber auch die Post-Prozessierung der simulierten Daten, und viele Datenformate sind für den X-IFU und den WFI identisch. Das DLR hat sich daher entschieden, aufgrund der hier vorliegenden Synergien die entsprechenden Arbeiten am ECAP für beide Instrumente zu fördern. J. Wilms ist Mitglied der Science Teams von WFI und X-IFU, verantwortlich für die Arbeitsgruppen Simulation beider Instrumente (sowie für die Arbeitsgruppe "Simulation" von Athena allgemein) und Mitglied des X-IFU Consortium Board. J. Wilms und T. Dauser sind zudem Mitglieder der Arbeitsgruppen zur Vorbereitung des Science Ground Segments beider Instrumente sowie Cols bei X-IFU. An der FAU ist zudem Prof. Manami Sasaki mit der wissenschaftlichen Vorbereitung von *Athena* betraut, mit einem Schwerpunkt auf diffuse Emission von Supernova-Überresten und Sitz im Science Team von WFI.

### a) Der Wide Field Imager

Der Schwerpunkt der Aktivitäten in Deutschland liegt auf dem Wide Field Imager, der angeführt vom MPE zusammen mit den deutschen Partnern in Erlangen-Nürnberg und Tübingen und weiteren europäischen Partnern entwickelt wird. Dabei wird stark auf den Erfahrungen der für IXO und *Athena*-L1 konzipierten Wide Field Imager aufgebaut (Stefanescu et al. 2010).

Eine genaue Beschreibung des WFI wird von Meidinger et al. (2020) gegeben. Das Herz des WFI wird von vier Matrizen von DePFET (Depleted P-channel Field Effect Transistor; Kemmer et al. 1987; Kemmer et al. 1990) aktiven Pixelsensoren gebildet (siehe Abbildung 2). Diese bilden das Large Detector Array (LDA), das ein Gesichtsfeld von  $40' \times 40'$  hat. Ein weiteres kleines DePFET-Array bildet den Fast Detektor (FD), der neben dem LDA in defokussierter Position montiert ist. Jedes der  $130 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$  großen Pixel auf dem  $450 \mu\text{m}$  dicken depletierten Silizium ist eine Kombination aus einem Sensor, in dem auftreffende Photonen Ladung erzeugen, und einer Struktur in der diese Elektronen gesammelt werden. Diese Struktur liegt unterhalb eines MOS-Feldeffekttransistors. Da die Leitfähigkeit des Transistors proportional zur Zahl der gespeicherten Elektronen ist, kann so die Photonenenergie rekonstruiert werden. Über einem zweiten "clear"-Transistor können die gespeicherten Elektronen abfließen und der Sensor in seinen Ausgangszustand zurückgesetzt werden. DePFETs sind also kombinierte Detektor-Verstärker Strukturen bei denen das Signal direkt in jedem Pixel verstärkt wird und nicht über makroskopische Entfernung transportiert werden muss.

Jeder der fünf Detektoren besteht aus dem DePFET-Sensor und einem zugehörigen Fontend-Board, auf dem die Auslese- und Kontroll-ASICs montiert sind (Abb. 3). Zusammen mit der mechanischen Supportstruktur, thermischen Verbindungen zu den Radiatoren und der Abschirmung gegen kosmische Strahlung bilden diese Komponenten den Kamerakopf. Zu jedem Detektor gehört zudem eine Detektorelektronik, die den Detektor mit den notwendigen Span-

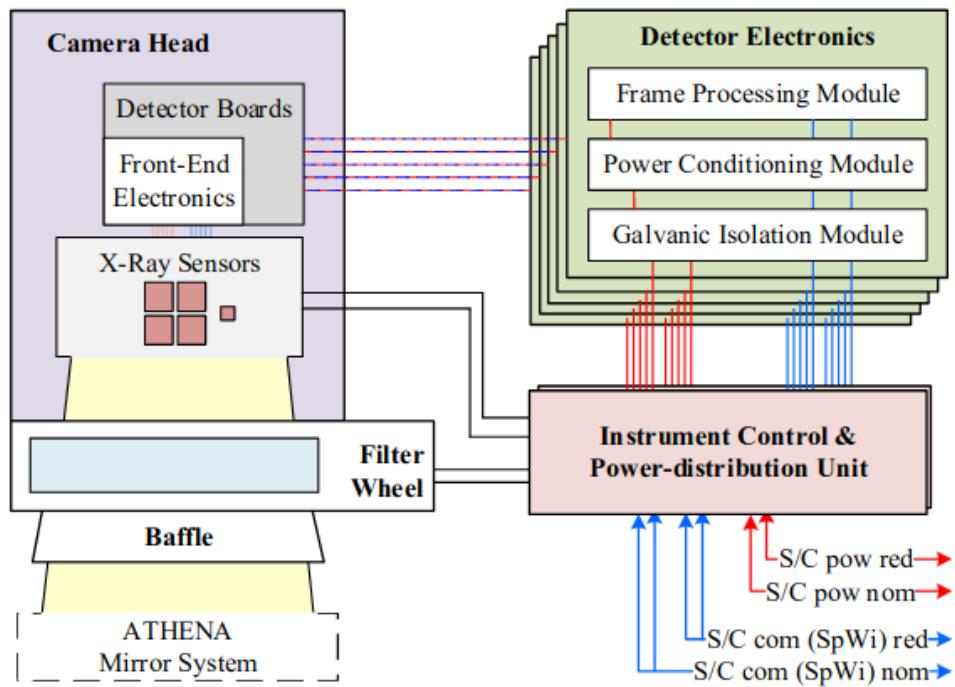


Abbildung 2: Funktionales Blockdiagramm des WFI (Plattner et al. 2020).

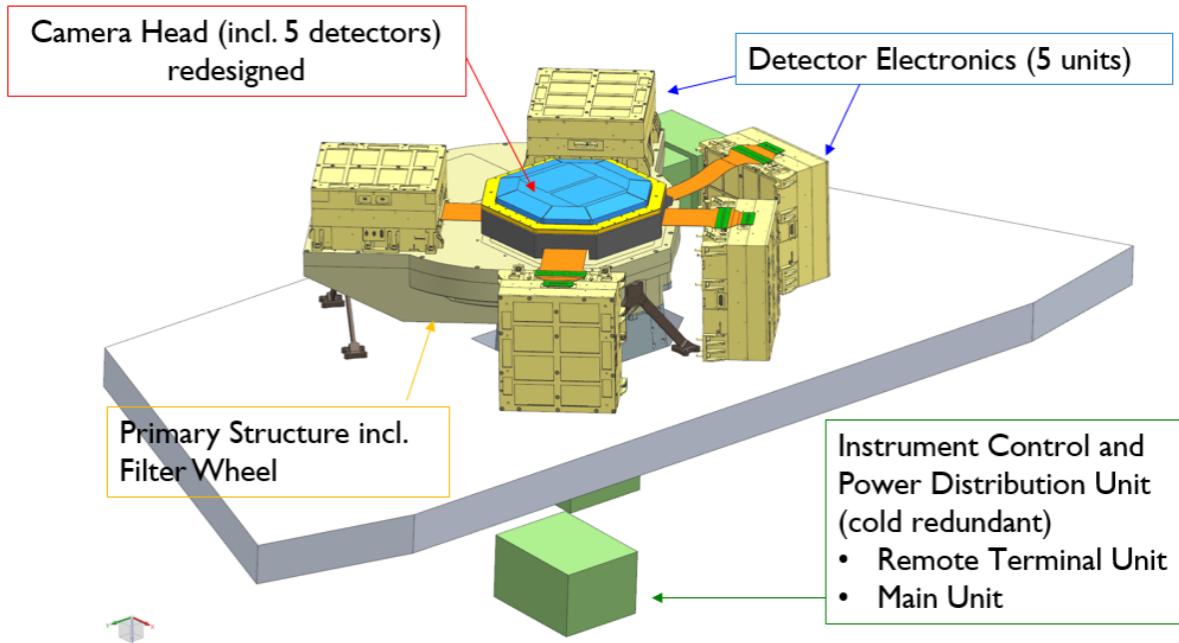


Abbildung 3: Aufbau der Fokalebene des WFI (Meidinger et al. 2020).

nungen und digitalen Signalen versorgt, das analoge Detektorsignal digitalisiert und prozessiert. Die hier erstellten Signale fließen in die Instrument Control and Power Unit (ICPU), die die elektrische Leistung verteilt, das Filterrad kontrolliert und die Detektortemperatur steuert. Die ICPU führt die Datenströme der Detektoren zusammen und kommuniziert diese dem Satelliten. Da die DEPFETs für Röntgenstrahlung optimiert sind, sind sie auch empfindlich für optische Strahlung und Teilchen der kosmischen Strahlung. Siehe Miller et al. (2022) und Eraerds et al. (2021) für Diskussionen des Teilchenhintergrunds.

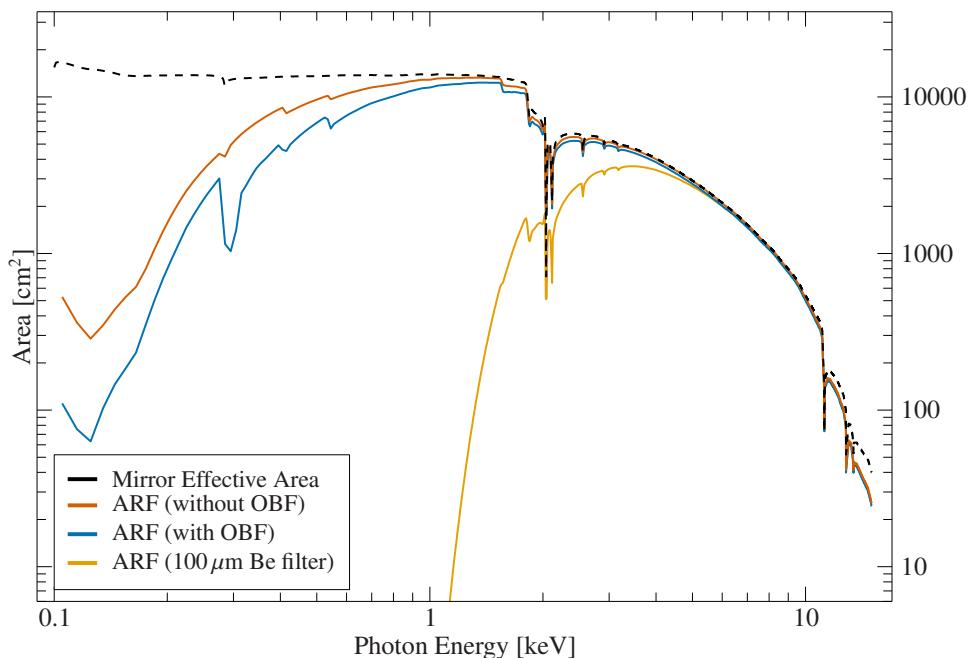


Abbildung 4: Effektive Sammelflächen des WFI mit und ohne optical blocking filter (OBF) und mit einem zusätzlichen Be-Filter für die Beobachtung besonders heller Quellen.

Aus diesem Grund ist der WFI mit einem Filter konzipiert, der undurchlässig für optische Strahlung ist. Der Filter besteht aus zwei Teilen, einer 90 nm-dicken Schicht aus Aluminium, die direkt auf den Sensoren aufgebracht ist und beim LDA aus einem weiteren Filter aus 30 nm Aluminium auf einem 150 nm dicken Polyimid-Substrat, das in ein Stahlnetz eingelassen ist (Bozzo et al. 2016; Puccio et al. 2020; Polak et al. 2023). Das Filterrad enthält zusätzlich noch eine  $^{55}\text{Fe}$ -Quelle zu Kalibrationszwecken und eine offene und eine vollständig geschlossene Stellung. Der FD hat ebenfalls einen 30 nm Al-Filter, zusätzlich ist hier noch in Beryllium-Filter vorgesehen, um Röntgenstrahlung  $<2\text{ keV}$  vollständig zu blockieren und so die Beobachtung sehr heller Röntgenquellen im wissenschaftlich wichtigen Eisenband um 6.4 keV herum zu ermöglichen.

Abbildung 4 zeigt die sich aus der Kombination der *Athena*-Spiegel, der Quanteneffizienz der Sensoren und der Filterdurchlässigkeit ergebende effektive Fläche des WFI.

### b) Das X-ray Integral Field Unit

Der Schwerpunkt der Arbeiten am ECAP liegt auf Simulationen. Da viele der an die Simulationen gestellten Fragen sowohl für den WFI als auch für den X-IFU relevant sind, ist es sinnvoll, innerhalb des internationalen *Athena*-Konsortiums diese Tätigkeiten entsprechend zu bündeln und zu koordinieren. Diese Aufgabe wurde vom ECAP übernommen, so dass neben dem deutschen Schwerpunkt WFI auch Aktivitäten für den X-IFU notwendig sind.

Während der WFI auf qualitativ hochwertige Abbildung des gesamten *Athena*-Gesichtsfelds mit guter Energieauflösung optimiert ist, ist der Schwerpunkt des zweiten Instruments auf *Athena*, dem X-ray Imaging Field Unit (X-IFU), die qualitativ hochwertige Spektroskopie mit guter Abbildung in den zentralen 5' des Gesichtsfeldes. X-IFU wird dabei im Bereich von 0.2–12 keV eine Energieauflösung von 2.5 eV haben, was bei hohen Energien vergleichbar ist mit dem, was heute mit den Gitterspektrographen auf Chandra und XMM-Newton erreicht wird. Im Gegensatz zu diesen Instrumenten ist der X-IFU jedoch ein abbildendes Spektrometer, so dass auch ausgedehnte Quellen wie Galaxienhaufen spektroskopiert werden können. Eine genaue

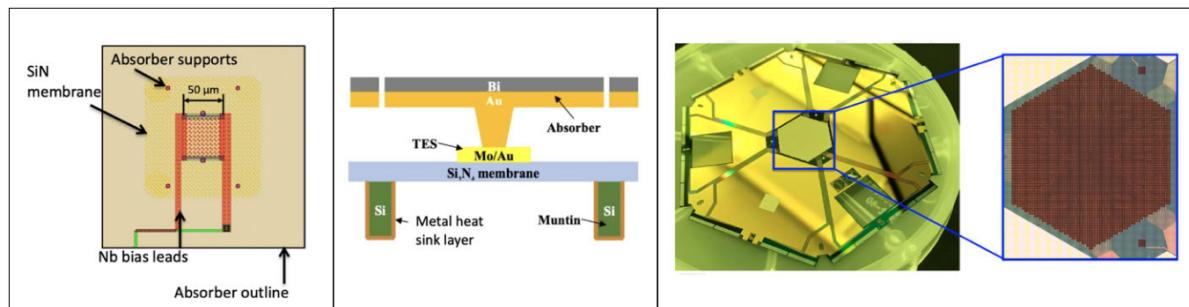


Abbildung 5: Aufbau von X-IFU. Ein Pixel besteht aus Bismuth, das mit Gold mit einem Mo/Au-Transition Edge Sensor verbunden ist. Dieser wird am Übergang zwischen seinem supraleitenden und seinem normalen Zustand betrieben. Durch Absorption eines Röntgenphotons wird der Absorber aufgewärmt, damit ändert sich sein Widerstand, was gemessen werden kann. Der X-IFU besteht aus mehr als 3000 derartiger Pixel (Barret et al. 2023, Abbildung aus).

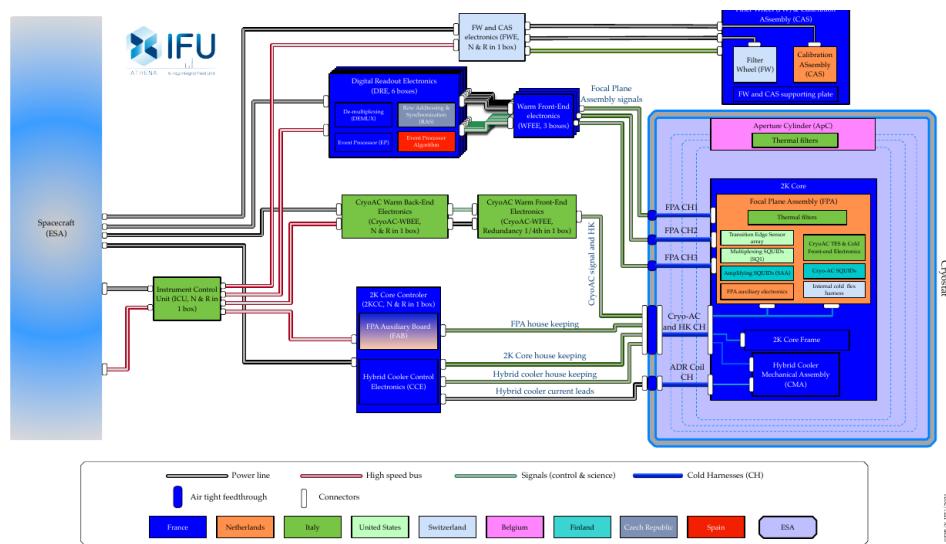


Abbildung 6: Blockdiagramm des X-IFU

Beschreibung des X-IFU wird von Barret et al. (2023) gegeben.

Der X-IFU ist ein Detektorarray von Transition Edge Sensor (TES) Mikokalorimetern. Das Messprinzip dieser Sensoren ist, die durch die Absorption eines Röntgenphotons entstehende Temperaturerhöhung eines auf  $<100\text{ mK}$  abgekühlten Sensors zu messen. Die Messung dieser sehr geringen Temperaturänderung ist möglich, weil der Sensor auf dem Übergang zwischen supraleitendem und normalem Zustand gehalten wird, wo der elektrische Widerstand des Sensors sehr stark temperaturabhängig ist. Für die Sensoren, die jeweils eine Größe von  $250 \times 250\text{ }\mu\text{m}^2$  haben werden, wird im X-IFU ein Mo/Au-TES mit Au/Bi-Absorbern gewählt.

Der sehr kleine Strom im TES wird in X-IFU durch eine Abfolge von rauscharmen Verstärkern ausgelesen, die auf SQUIDs (superconducting quantum interference devices) basieren. Diese befinden sich sowohl in der  $50\text{ mK}$  kalten Elektronik direkt am TES-Array (cold front end electronics; CFEE) als auch in der mit  $2\text{ K}$  etwas wärmeren Umgebung im Dewar (siehe Blockdiagramm in Abb. 6). Das so vorverstärkte Signal wird dann in einem Halbleiterverstärker in der Warm Front End Electronics (WFEE) weiter verstärkt und über einen an die Instrumentenelektronik weitergereicht.

Zu Beginn des Vorhabens war noch geplant, das Signal mit der Methode des Frequenz-Multiplexens auszulesen, im Lauf des Berichtszeitraums wurde hiervon abgewichen und die

Methode des Time-Domain-Multiplexing gewählt (siehe unten). Ferner wurde im Berichtszeitraum die Pixelzahl des X-IFU von 3840 auf 2376 reduziert.

Der Aufbau des X-IFU ist wegen der zu erreichenden sehr niedrigen Temperaturen sehr komplex. Sowohl das thermische Design als auch die sehr empfindliche Auslese stellen sehr hohe Anforderungen an das Instrument. Da die einzelnen Pixel des X-IFU nicht komplett elektrisch getrennt sind, sondern es sich effektiv um gekoppelte Schwingkreise handelt, haben Effekte, die in einem Pixel aufgrund der Absorption eines Photons gesehen werde, auch Auswirkungen auf andere Pixel. Dieser "Cross Talk" muß genau verstanden und kontrolliert werden. Ferner sind sowohl das anfänglich untersuchte Frequenz-Multiplexing als auch das später gewählte Time-Domain Multiplexing nicht trennscharf. Temperaturänderungen im Kältebad, z.B. durch Absorption von kosmischer Strahlung und Magnetfeldänderungen können ebenfalls die Performance des Detektors beeinflussen.

### c) Vorhabensziel

Ziel des Vorhabens war es, aufbauend auf den bisherigen Arbeiten in Zusammenarbeit mit unseren nationalen und internationalen Partnern die Technologieentwicklung der beiden Instrumente auf *Athena* voranzutreiben, um am Ende der Phase A im den Nachweis des Technology Readiness Level (TRL) 5/6 erbringen zu können und ein endgültiges Design der Instrumente zu erhalten. Die Aufgabe des Teams an der FAU war es, durch die Erstellung von Simulationssoftware für sogenannte end-to-end-Simulationen die Grundlage zu legen, dass mit Simulationen gezeigt werden kann, dass das Instrumentendesign die wissenschaftlichen Anforderungen auch erfüllt (siehe Rau et al. 2016; Peille et al. 2018, für Zusammenfassung der Ziele). Die Begutachtung der Instrumente durch die ESA im Frühjahr 2022 zeigte, dass diese letztendlich die Ziele auch erreicht hatten, allerdings änderte die ESA im Sommer 2022 dann die Herangehensweise an das Projekt, da Kostenschätzungen zu hohe Gesamtkosten für die Mission erwartet ließen. Daher wurde die Phase A abgebrochen und eine Neukonzeption der Mission begonnen. Diese ist mittlerweile (Sommer 2023) fast abgeschlossen, die ESA hat mittlerweile auch bestätigt, dass die Mission wieder im Kostenrahmen ist.

Neben der Entwicklung von Simulationssoftware für den WFI und den X-IFU war ferner Teil der Aufgaben des ECAP die Beteiligung an der wissenschaftlichen Vorbereitung der Mission, z.B. im Zusammenhang mit der Mitarbeit in den wissenschaftlichen Teams für beide Instrumente. Zudem war und ist unser Team für die Entwicklung der Detektor-Response-Matrizen und anderer für die Beschreibung der Detektoren notwendigen Dateien für Systemsimulationen verantwortlich.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die hier dargestellten Arbeiten sind in Zusammenarbeit im internationalen *Athena* Team insbesondere mit Wissenschaftlern der folgenden Institutionen entstanden:

- Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching bei München
- Max-Planck-Halbleiterlabor, München
- Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen
- SRON, Niederlande
- IRAP Toulouse, Frankreich
- CNES Toulouse, Frankreich
- Universität Santander, Spanien
- Universität Alicante, Spanien
- ESA-ESTEC, Noordwijk, Niederlande
- University of Leicester, Großbritannien
- Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

- NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA
- NIST Boulder, Boulder, CO, USA
- University of Cork, Cork, Irland
- Dublin University, Dublin, Irland
- University College Dublin, Irland
- INAF, OAS Bologna, Italien

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Software wird überdies durch eine große Zahl weiterer Institutionen genutzt.

## 6 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden beschreiben wir die im Vorhaben erzielten Ergebnisse. Ein Großteil der Ergebnisse ist dabei in den in Abschnitt 7 aufgelisteten Publikationen dokumentiert, ferner in der im Rahmen des Vorhabens erstellten Abschlussarbeit und dem Handbuch zu dem entwickelten Softwarepaket. Es soll daher hier nur eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse gegeben werden.

### 6.1 Die Simulationssoftware *SIXTE*

#### a) End-to-end Simulationen

Ziel von end-to-end-Simulationen für wissenschaftliche Raumfahrtmissionen ist es, ein numerisches Modell für die wissenschaftliche Datennahme der Raumfahrtmissionen zu geben. Im Fall astrophysikalischer Missionen bedeutet dies, dass ausgehend von realistischen Beschreibungen der beobachteten Objekte, die z.B. die spektrale Form, die Intensitätsverteilung von Bildern oder die Zeitvariabilität beinhalten, der gesamte Beobachtungsprozess beschrieben werden wird. Die beinhaltet die Modellierung der Abbildung der Röntgenstrahlung auf die Instrumente, die Modellierung der Detektion der Röntgenstrahlung unter Einbeziehung der Detektorphysik und des Verhaltens der Mission (z.B. Pointing-Stabilität, Beobachtungsstrategie usw.), und die Modellierung der Datenprozessierung auf dem Satelliten oder im Bodensegment. Für die Auswertung dieser Daten, die möglichst nahe an denen liegen sollten, die während der Mission tatsächlich gemessen werden, muss zudem weitere Software bereitgestellt werden. Die Verifikation der Software erfolgt dabei mit Hilfe von Labormessungen und nach Start der Mission mit Hilfe der Beobachtungen selbst, wobei die Arbeitsgruppe an der FAU auch Pionier beim direkten Einsatz von Simulationen in der Datenanalyse war (König et al. 2022).

Ein gutes Simulationsprogramm stellt ein sorgfältig entwickeltes mathematisches Modell der geplanten Instrumente dar, bevor diese gebaut worden sind (Wilms et al. 2014; Dauser et al. 2019). Während der Vorschlags- und Definitionsphasen einer Mission erlauben es Simulationen, Wissenschaftlern die Fähigkeiten der Mission zu demonstrieren und zu optimieren, indem sie die Erzeugung von Datenprodukten der geplanten Mission wie Spektren, Bildern oder Zeitreihen ermöglichen. Andere Simulationen, die z.B. mit Programmen wie GEANT4 durchgeführt werden, widmen sich der Wechselwirkung von Teilchen und Photonen mit der geplanten Hardware, um den Hintergrund im Detektor zu bestimmen. Gemein allen diesen Simulationsansätzen ist es, dass sie es während der Entwicklungsphase der Mission ermöglichen, Entscheidungen über das Instrumentendesign anhand der wissenschaftlichen Zielsetzungen der Mission zu überprüfen. Im Bereich dieser Simulationen hat die Arbeitsgruppe Röntgenastronomie der FAU mit der auch in diesem Vorhaben weiterentwickelten Software *SIXTE* (Simulation of X-ray Telescopes Dauser et al. 2019) mittlerweile eine Führungsrolle erreicht. Neben den unten genauer dargelegten Arbeiten zu *Athena* hat die Arbeitsgruppe beispielsweise Untersuchungen zum Wide Field Imager WFI Stefanescu et al. 2010; Schmid et al. 2010 und dem High Resolution Timing Spectrometer

(HTRS Barret et al. 2010; Schmid et al. 2011) auf dem International X-ray Observatory (IXO, dem Vorgänger von *Athena*) oder den Large Observatory for Timing (LOFT Feroci et al. 2012; Brandt et al. 2012; Schmid et al. 2012) durchgeführt, Beiträge zur NASA Phase A-Studie für ARCUS Smith et al. 2017 geliefert, Arbeiten zur Simulation der Detektoren für eXTP (Zhang et al. 2019; Zhang et al. 2020) erstellt und die Simulationssoftware für eROSITA entwickelt (Schmid et al. 2010; Predehl et al. 2021). Über diese Arbeiten hat ECAP mittlerweile die Führungsrolle bei der Entwicklung von Simulationssoftware für momentane und zukünftige Röntgenmissionen erreicht. So ist das Team z.B. im Rahmen der Vorbereitungen auf die Ausschreibung der Probe-Class Missionen der NASA von den Instrumententeams eingeladen worden, für die Missionen ARCUS, AXIS, HEX-P und STROBE-X Simulatoren zu entwickeln und hat auch einen Simulator für die 2023 startende XRISM-Mission fertig gestellt.

Der Grund für die führende Rolle des ECAP in diesem Bereich ist, dass im Unterschied zu end-to-end-Simulationen anderer Missionen wie MARX für Chandra (Wise, 1997), SciSim für XMM-Newton (Gabriel et al. 2005) oder NuSim für NuSTAR (Madsen et al. 2011; Zoglauer et al. 2011) bei der Entwicklung der Simulatoren an ECAP schon früh darauf geachtet wurde, dass das Design der Simulationssoftware sehr modular ist (Schmid et al. 2010; Dauser et al. 2019). Durch die Trennung von Programmmodulen, die für die Simulation astronomischer oder Laborquellen notwendig sind, und der Programme, die die instrumentenspezifischen Eigenschaften simulieren, ist es in großem Maß möglich, für andere Projekte entwickelte Software weiter zu verwenden. Durch die Betonung standardisierter Datenformate für die Definition der Beobachtung und der erzeugten Zwischen- und Endprodukte, sowie die Kompatibilität dieser Produkte mit existierenden Standards der Röntgenastronomie – sofern vorhanden – kann es erreicht werden, dass große Teile der Software instrumentenunabhängig gehalten werden können und die Eingaben in die Simulationen gleich bleiben können. Das ermöglichte es uns zum Beispiel beim Übergang von IXO zu *Athena*, Modellsimulationen sehr schnell an die geänderte Mission anzupassen.

### ***b) Entwicklungsphilosophie***

Der Quellcode für SIXTE ist unter der Gnu Public License auf <https://www.sternwarte.uni-erlangen.de/sixte/> publiziert. Die Software war ursprünglich in Standard-C geschrieben worden. Ein großer Teil der auf allgemeine Softwarewartung zurückgehenden Arbeitszeit im Berichtszeitraum wurde darauf benutzt, den Code neu zu strukturieren und in noch besser wartbares C++ zu konvertieren. Grund für diese Umstellung war, dass die Objektorientierung von C++ eine programmtechnisch bessere Abbildung der Simulationsschritte in Code erfordert. Im Vergleich zu vielen anderen objektorientierten Sprachen wird C++ als ISO-standardisierte Sprache (ISO/IEC 14882:2020) auch noch in den nächsten Jahrzehnten zur Verfügung stehen. Die Standardisierung stellt zudem auch die Rückwärtskompatibilität sicher. Dieser Aspekt ist für Software, die über den gesamten Zyklus einer Raumfahrtmission zur Verfügung stehen muß, von großer Bedeutung. Nur einige der kleineren Pipelines für spezielle Zwecke wurden in Perl und Python erstellt, wo derartige Anforderungen weniger wichtig sind.

Die Softwareentwicklung folgt den entsprechend üblichen Standards: zur Versions- und Konfigurationskontrolle wird git genutzt, kritische Bestandteile der Software werden Regressions- und Unit-Tests unterworfen und betriebssystemspezifische Eigenschaften werden mit Hilfe der autotools abgetestet. Die Programme funktionieren daher auf einer breiten Palette von Unix-Derivaten wie Linux und MacOS, ferner wurde im Berichtszeitraum über eine Zusammenarbeit mit der NASA auch der Zugang zu einer SIXTE-Installation auf dem Sciserver der Johns Hopkins Universität, Baltimore, (<http://www.sciserver.org>) eingerichtet

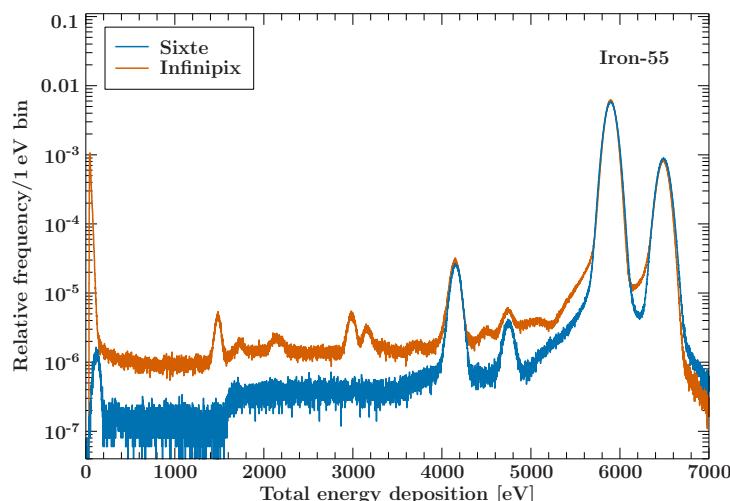


Abbildung 7: Vergleich zwischen im Labor bei MPE gemessenen und simulierten Spektrum eines WFI-Prototypen bei Bestrahlung mit einer  $\text{Fe}^{55}$ -Quelle.

Da das Ziel der Instrumententeams ist, die Simulatoren durch den gesamten Lebenszyklus der Mission zu nutzen, ist davon auszugehen, dass die generischen User-Interfaces der Computer sich stark ändern werden. Daher wurde aus Effizienzgründen bewußt auf die Entwicklung eines in die Programme eingebauten graphischen Interface verzichtet. Stattdessen besteht der Wunsch, dass es möglich ist, die Simulatoren web-basiert zu nutzen. Hier wurden im Berichtszeitraum erste Prototypen entwickelt.

### c) Schwerpunkte der allgemeinen **SIXTE**-Entwicklung im Berichtszeitraum

Neben den unten in Abschnitt 6.2 und 6.3 beschriebenen speziellen Entwicklungen für den WFI und den X-IFU und der bereits oben erwähnten Umstellung der Software von C auf C++ wurden im Berichtszeitraum auch die folgenden Punkte bearbeitet:

- Implementation von Routinen zur Berechnung der Auxiliary Response Files für komplexere Extraktionsregionen, wie sie notwendig sind, um systematische Studien für Beobachtungen ausgedehnter Quellen durchführen zu können. Hier wurde ein auf Monte Carlo Simulationen basierender Ansatz gewählt, der zusammen mit einer Beschreibung einer theoretischen, potentiell energieabhängigen Flussverteilung im Gesichtsfeld und der Ausleseregion die effektive Fläche ermittelt.
- Erstellung von Routinen zur Simulation der Detektorkalibration im Labor und in der Flugphase zur Verifikation der Kalibrationspläne, insbesondere auch zur Erstellung der simulatorbasierten Responsematrizen,
- Entwicklung einer eigenen, instrumentenabhängigen Pipeline für die Bestimmung der Performance von Sensoren bei hohen Zählraten,
- Anpassung einer für eROSITA entwickelten Pipeline zur Ermittlung von Response-Matrizen für allgemeine silizium-basierte Sensoren.

Ein besonderer Schwerpunkt der allgemeinen Entwicklung war zudem die Verbesserung des Absorptionsmodells für allgemeine Pixel-Detektoren. Das ist sowohl für die weitere Verbesserung von SIXTE allgemein wichtig, als auch für die Generierung von Response-Matrizen für WFI und X-IFU.

Wird ein Röntgenquant in einem Sensor absorbiert, dann streut das entstehende Photoelektron im Festkörper, ferner hinterlässt das Absorptionsereignis ein angeregtes Ion, das durch Abstrahlung eines Fluoreszenzphotons sich abregt. Auch dieses Fluoreszenzphoton muß im Detektor absorbiert werden, damit die gesamte vom Ursprungsphoton deponierte Energie nachgewiesen werden kann. Ferner können Photonen vor ihrer endgültigen Absorption auch noch an Elektronen

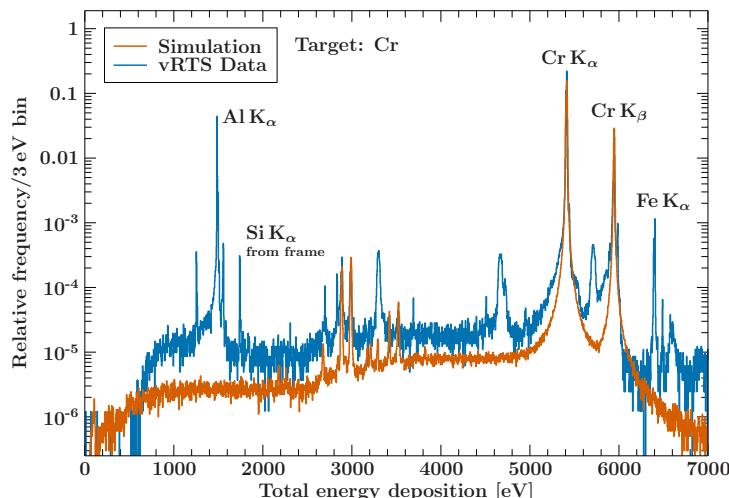


Abbildung 8: Vergleich zwischen im Labor bei LLNL gemessenen und simulierten gemessenen Spektrum bei Bestrahlung mit einer Chrom-Quelle. Die Detektorparameter wurden für den für die Messung benutzten Prototyp-Detektor von Hitomi angepasst.

im Medium Compton-streuen. Wir entwickelten im Berichtszeitraum ein allgemeines Verfahren, wie diese Prozesse für Materialien beliebiger Element-Zusammensetzung modelliert werden können, einschließlich von Modellen des Elektronentransports und der Compton-Streuung. Das Modell ist in Lorenz et al. (2022) dokumentiert. Es ist um Größenordnungen schneller, als das in GEANT implementierte (Laufzeiten von Sekunden im Vergleich zu Stunden) und gibt die Fluoreszenzlinien und Compton-Schulter im Sensor sehr gut wieder, was durch den Vergleich mit GEANT und mit Labormessungen bestätigt werden konnte. Labormessungen mit Si-Detektoren bei MPE und mit einer variablen Röntgenquelle bei LLNL zur Verifikation (Abb. 7 und 8) zeigen auch, dass das Modell die entstehenden Fluoreszenzlinien und ihre relativen Intensitäten gut wiedergibt. Dabei ist zu beachten, dass in den in den Abbildungen gezeigten Rechnungen eine genaue Behandlung der Detektorgeometrie und der Physik des Elektronenaustritts aus dem Sensor ("Austrittsarbeit") nicht enthalten ist, so dass das gemessene Kontinuum, das auf den partiellen Verlust von Elektronen, vom Modell abweicht. Diese Physik ist Teil der aktiven Weiterentwicklung des Modells.

#### d) Dokumentation

Da SIXTE ein sehr komplexes Softwaresystem ist, wurde im Berichtszeitraum das umfangreiche SIXTE-Handbuch weiter verbessert und sprachlich überarbeitet. In dem Handbuch werden die Simulatoren genau beschrieben und ihre Anwendung auf verschiedene technische und wissenschaftliche Probleme demonstriert. Die Anleitungen sind dabei so angelegt, dass die Anwender sehr schnell eigene Simulationen erstellen können, da alle üblicherweise vorkommenden Fragestellungen adressiert werden. Das Handbuch wird ständig erweitert und an neu entwickelte Funktionalitäten angepasst. Das Handbuch ist auf den oben genannten Webseiten, die im Rahmen des Vorhabens erweitert wurden, frei verfügbar.

Für Fragen aus der Nutzercommunity, die sich mittlerweile auf fast alle Kontinente erstreckt, wurde zudem ein Helpdesk mit einer generischen Email-Adresse eingerichtet. Mitarbeiter des SIXTE-Teams sind in wöchentlichem Wechsel verantwortlich für die Beantwortung der eingehenden Fragen. Diese Betreuung von Nutzern des Paketes, die wissenschaftliche Probleme für *Athena* simulieren wollten, war Teil der Arbeit im Projekt.

Neben dem Handbuch und der Betreuung dieses Email-Helpdesks haben wir während der Projektlaufzeit mehrere Workshops durchgeführt, die wegen der Pandemie überwiegend online durchgeführt werden mussten:

- 11.5.2020 – SIXTE Webinar (3 h, online; Teilnehmerzahl unbekannt; <https://www.ster>

- [nwarте.uni-erlangen.de/sixte/sixte-athena-webinar-11-may-2020/](https://sternwarte.uni-erlangen.de/sixte/sixte-athena-webinar-11-may-2020/)
- 29.03.–31.03.2022 – SIXTE Online workshop (3 Tage, mit online Tutorials, ca. 80 Teilnehmenden; <https://www.sternwarte.uni-erlangen.de/sixte/end-to-end-simulations-with-sixte-an-online-workshop-2022/> und <https://indico.ifca.es/event/2552/>).
  - 20.06.–24.06.2022 – 1st ATHENA School, Toulouse, 21 Teilnehmende (praktisches Training mit SIXTE, ca. 6h; <http://x-ifu.irap.omp.eu/education-outreach/athena-school>)

Die bei diesen Workshops benutzten Trainingsmaterialien sind auf den SIXTE-Webseiten frei verfügbar. Ferner wurde SIXTE auch in zwei Vorträgen auf einem allgemeinen Online-Workshop des ESO zu Detektorsimulatoren am 14.–16. Juni 2020 einem breiteren Kreis vorgestellt<sup>2</sup>.

## 6.2 Simulationen für den WFI

### a) Detektormodell

Der WFI besteht aus vier getrennten SDD Matrizen sowie einem defokussierten kleinen Sensor, der für die Detektion heller Quellen verantwortlich ist. In SIXTE werden die vier SDDs sowie der kleine Sensor separat betrachtet, die simulierten Daten können dann zu einem Eventfile kombiniert werden. Die Implementierung des Detektors wurde im Abschlussbericht für 50 QR 1402 bereits beschrieben, auf den daher hier für Details verwiesen wird.

Neben der in Abschnitt 6.1.c bereits beschriebenen Implementierung eines besseren Absorptionsmodells für Sensoren und von Analyseroutinen wie der Bestimmung der effektiven Fläche für ausgedehnte Quellen wurde im Berichtszeitraum unter anderem in den WFI-spezifischen Teilen von SIXTE die Ausleseelektronik des WFI auf Grundlage der Definition der Elektronik durch die Universität Tübingen implementiert. Ferner wurde die Modellierung des Teilchenhintergrundes weiter verbessert, entweder über ein spezifiziertes Spektrum des Hintergrundes oder durch Sampling von GEANT-Simulationen, die von den Arbeitsgruppen für den Hintergrund von *Athena* erzeugt wurden. Hier wurde ein entsprechendes Austauschformat für diese Informationen spezifiziert, siehe Eraerds et al. (2021) für eine Beschreibung dieser Modelle und Miller et al. (2022) für Untersuchungen zur Unterdrückung des Hintergrunds. Hier entwickelten wir auch einen Algorithmus zur Detektion und Elimination von Tracks im Detektor.

Ferner führten wir durch Simulationen heller Quellen eine längere Studie zur Bestimmung der optimalen Dicke des Blocking Filters für den WFI durch. Die Simulationen bezogen sich dabei wissenschaftlich korrekte Modelle für galaktische Schwarze Löcher. Weitere Arbeiten im gesamten Berichtszeitraum bezogen sich auf Änderungen in der Modellierung des Fast Chip und des WFI aufgrund von kleineren Design-Änderungen, um das Modell für den WFI möglichst nahe an der jeweiligen Spezifikation von *Athena* zu halten. Dabei werden immer zwei Konfigurationen mitgeführt, eine öffentlich zugängliche die konsistent ist mit der offiziellen Performance von *Athena* und eine, die tatsächliche (bessere) Performance wiedergibt. Der sich dadurch nachziehende Aufwand für die Anpassung der relevanten Dokumente ist beträchtlich. Neben diesen Simulationstätigkeiten waren Mitglieder der Arbeitsgruppe auch in der Arbeitsgruppe zum *Athena*-Bodensegment aktiv.

## 6.3 Simulationen für den X-IFU

### a) Detektormodell

Das allgemeine Detektormodell für den X-IFU wurde bereits im Abschlussbericht für 50 QR

<sup>2</sup><https://indico.cern.ch/event/1026001/>

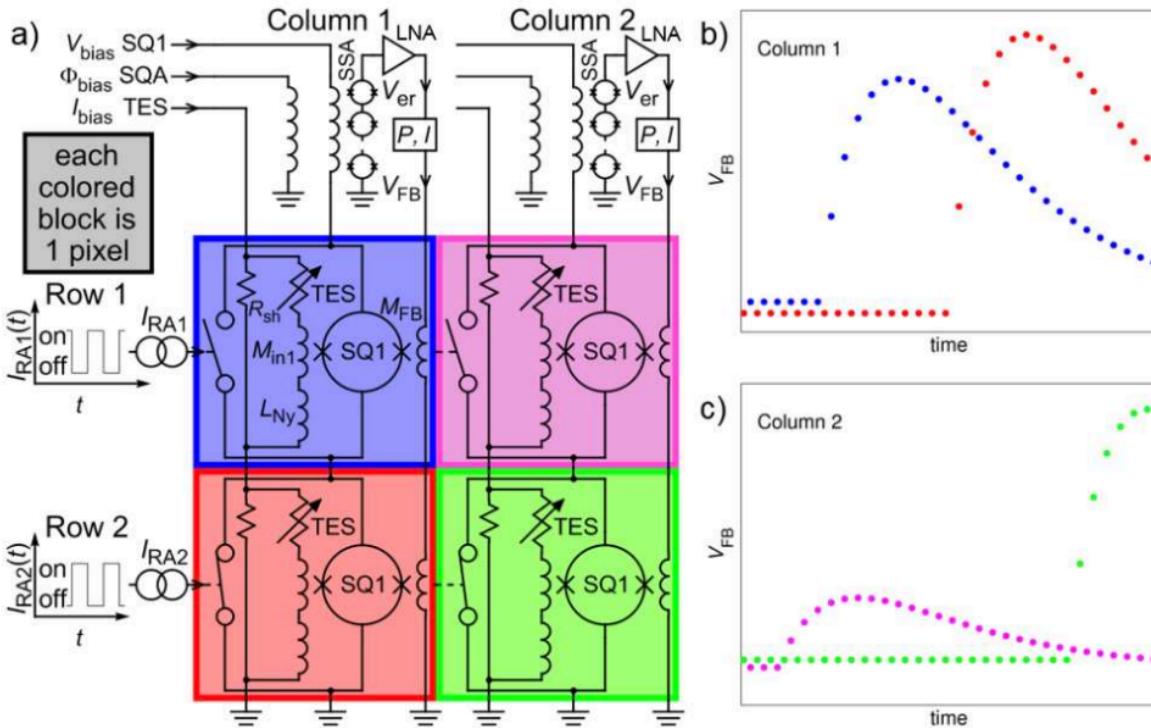


Abbildung 9: Prinzip der Auslese des X-IFU mit Hilfe des “Time Domain Multiplexing”. Jeder farbige Block im Schaltbild auf der linken Seite entspricht einem TES-Pixel. `xifusim` simuliert diese Auslese, einschließlich der durch Streusignale zwischen den Pixeln entstehenden Störungen, durch ein vereinfachtes Modell der gesamten Analog- und Digitalelektronik.

1402 vorgestellt. Für die Details sei daher auf diesen Bericht verwiesen. In Kurzform stellen wir für den X-IFU zwei verschiedene Simulatoren zur Verfügung, `xifupipeline` als eine auf Response-Matrizen aufbauende schnelle Version, die für wissenschaftliche Simulationen gut geeignet ist, und den tiefergehenden Simulator `xifusim`, in dem die Detektorphysik der TES und die Ausleseelektronik einschließlich der Rekonstruktion der Ereignisse exakt modelliert wird. `xifusim` steht formal unter der Verantwortung der CNES, weil es als missionsrelevant angesehen wird, sämtliche Entwicklungstätigkeit findet aber in enger Kollaboration mit der CNES an der FAU statt. Das Team ist eng in das Konsortium eingebettet und arbeitet u.A. in der Performance Working Group, der Calibration Working Group und dem Science Team mit. Genauere Informationen zu `xifusim` wurden von uns in einer Reihe von Veröffentlichungen publiziert (Lorenz et al. 2022; Kirsch et al. 2022), die Implementierung von `xifusim` auf Graphikkarten wurde von Lorenz et al. (2020) dokumentiert.

Neben allgemeiner Wartung des Setup des X-IFU, die vergleichbar ist mit der beim WFI beschriebenen (Anpassungen an Spiegeländerungen usw.), war die Arbeit am X-IFU im Berichtszeitraum besonders von der Umstellung des Auslesesystems von Frequency Domain Multiplexing zu Time Domain Multiplexing gekennzeichnet (Abb. 9). Bei der Modellierung müssen alle elektronischen Komponenten (SQUIDs, Kabel usw.) genau modelliert werden. Ferner beinhaltet unser Modell auch die Möglichkeit, den “cross talk” zwischen verschiedenen Komponenten in der Fokalebene und im Auslesesystem genau zu modellieren. In `xifusim` können z.B. verschiedene Auslesekanäle induktiv gekoppelt werden. Ein Ereignis in einem Kanal kann so ein scheinbares Ereignis in einem anderen Kanal erzeugen bzw. für ein anderes Ereignis in diesem Kanal die Energierekonstruktion verschlechtern. Wir nutzen `xifusim` für die genaue Simulation dieser

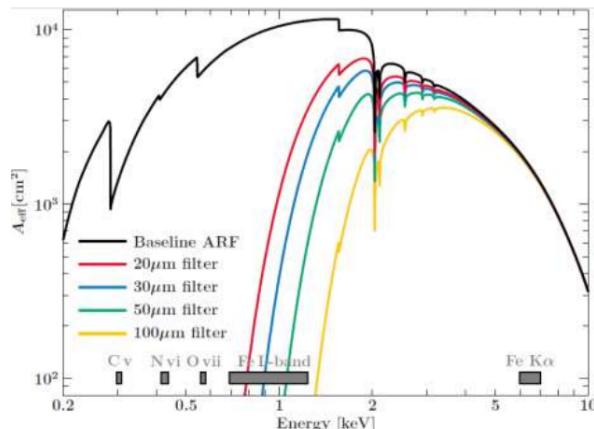


Abbildung 10: Einfluß der Filterdicke auf das gemessene Röntgensignal. Die schwarzen Balken zeigen die Lage verschiedener wissenschaftlich interessanter Linien.

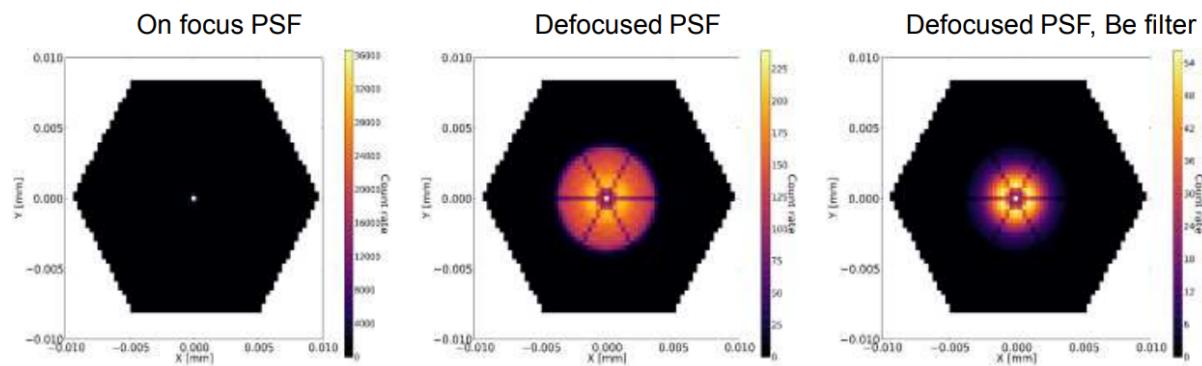


Abbildung 11: Einfluß der Änderung des Fokus des X-IFU am Beispiel einer hellen Quelle. Im rechten Bild ist zusätzlich ein Be-Filter zur weiteren Reduktion des Signals eingeführt worden.

Ereignisse (die dann im Rahmen der Performance Working Group im Rahmen von Requirements an die Hardware-Teams zurückgespiegelt wird) und für die Erstellung von Tabellen, die in `xifupipeline` eingehen, um so auch dort den “cross talk” qualitativ modellieren zu können. Ähnliches gilt auch z.B. für den Einfluß von thermischen Ereignissen durch die kosmische Strahlung im Dewar. Zu letzterem wurden die Ergebnisse unter unserer Teilnahme publiziert (Peille et al. 2020).

Weitere Verbesserungen in `xifusim` beinhalteten die Verbesserung des Modells der SQUIDs in der Auslese des X-IFU, wo das RSJ-Modell der Supraleitung benutzt wurde. Für den Fall des Frequency Domain Modelling konnten wir hier zum ersten Mal genauer zeigen, wie die Dynamik der Pulsgenerierung in TES-Detektoren auf sehr hoher Zeitauflösung aussieht und wie Pulse sich nahe der Sättigung des Detektors verhalten. Dieses nichtlineare Verhalten wird auch im Labor gesehen und kann mit den Modellen prinzipiell erklärt werden, wie wir durch einen Vergleich der Simulationen mit einem Laboraufbau am SRON zeigen konnten. Die Ergebnisse sind publiziert (Kirsch et al. 2020).

Im Rahmen der Performance Working Group führten wir eine große Zahl von Simulationen für den Einfluß der Effekte der Ausleseelektronik auf die Detektorkalibratio durchn. Diese können mit dem entwickelten Simulator erstmals theoretisch untersucht werden und nicht nur bei einzelnen Energien im Labor gemessen werden. Dabei stellt sich heraus, dass die Sensoren deutlich nicht-linearer sind, als allgemein vermutet. Ungefähr 30% des Energieauflösungsbudgets von X-IFU sind in diesem Bereich angesiedelt.

Weitere Studien für den X-IFU bezogen sich auf die Optimierung des Be-Filters (analog zu WFI; siehe Abb. 10) und Untersuchungen zum Performance-Verhalten des X-IFU bei Beobachtungen

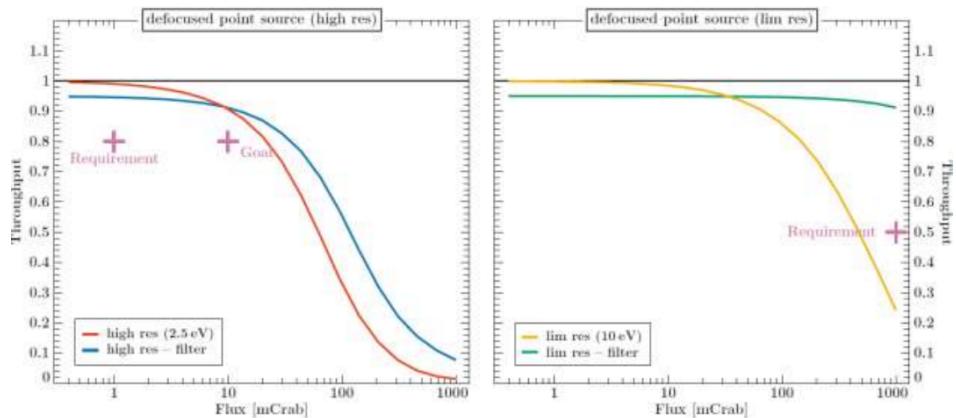


Abbildung 12: Anteil von Ereignissen mit voller und mit leicht reduzierter spektraler Auflösung als Funktion der Helligkeit einer Quelle.

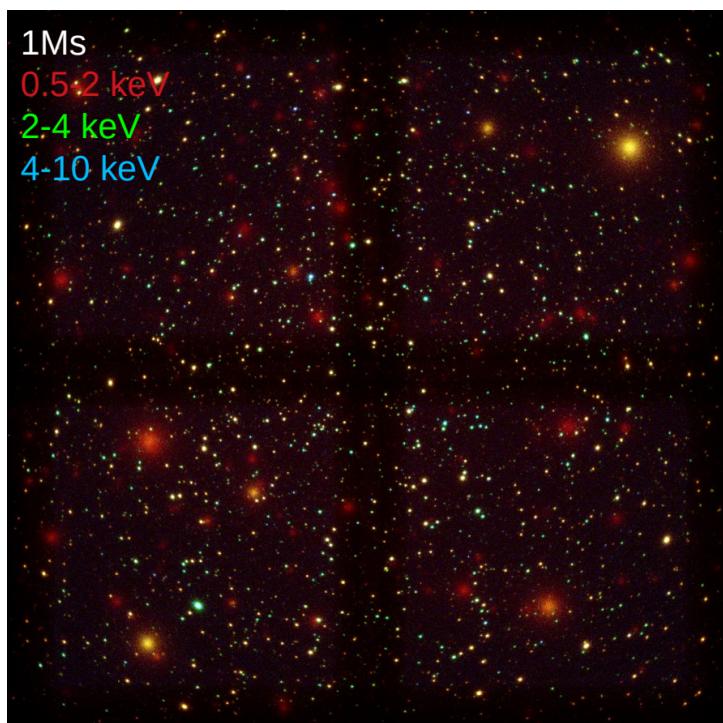


Abbildung 13: SIXTE Beobachtung eines tiefen Feldes zur Bestimmung der Empfindlichkeit des WFI (G. Lanzuisi, priv. comm.)

heller Quellen (Abb. 11 und 12). Hier konnten wir zeigen, dass auch viele wissenschaftlich interessanten Quellen mit Flüssen im Bereich von einigen 100 mCrab noch mit dem X-IFU beobachtet werden können. Zwar reduziert sich durch die hohe Zählrate der Zeitraum zur Bestimmung des thermischen Rauschens des Sensors etwas, was zu einer Reduktion der spektralen Auflösung führt, aber dennoch können auch diese Quellen noch mit sehr guter Energieauflösung beobachtet werden. Die Analyse derartiger Beobachtungen ist relativ aufwendig, wir haben dazu ein Methodenpapier in *Astronomy & Astrophysics* veröffentlicht (Kammoun et al. 2022).

#### 6.4 Wissenschaftliche Simulationen

Im Rahmen des Vorhabens haben wir auch eine große Zahl wissenschaftlicher Simulationen für den X-IFU durchgeführt und vielen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bei der Durchführung ihrer Simulationen geholfen.

##### a) Tiefe Felder und Streulicht

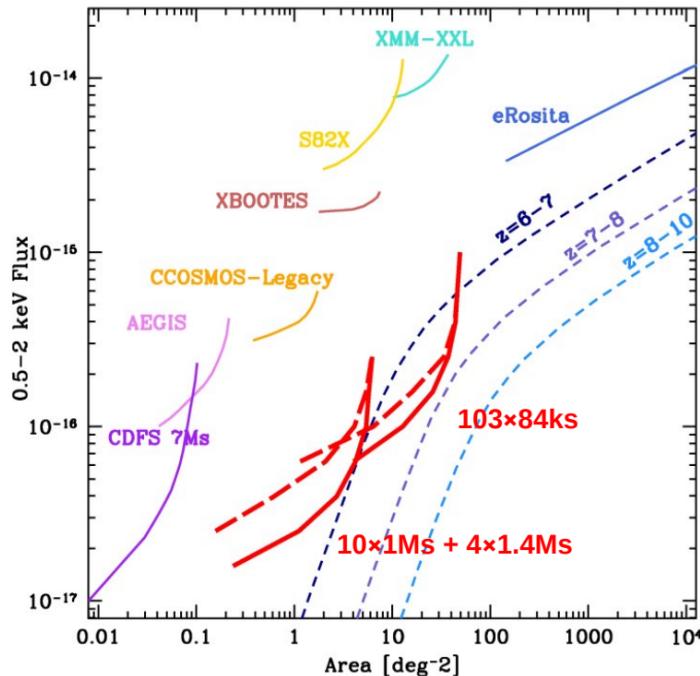


Abbildung 14: Empfindlichkeit des WFI im Vergleich zu anderen Röntgensurveys (G. Lanzuisi, priv. comm.)

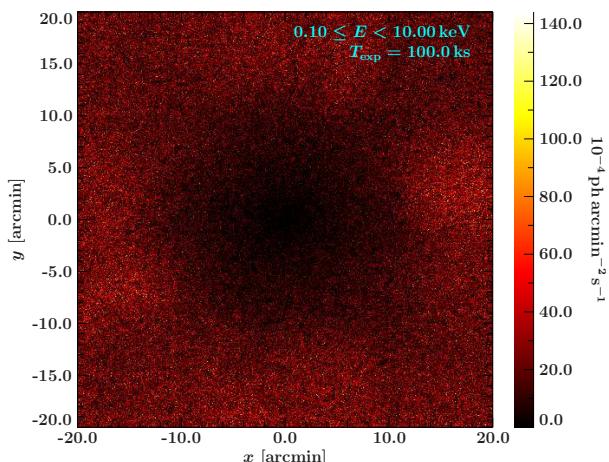


Abbildung 15: Streulicht des extragalaktischen Hintergrunds in einer 100 ks langen WFI-Beobachtung. Der Hintergrund wird auf der Basis der von Marchesi et al. (2020) erstellten SIMPUT-Dateien modelliert.

Zur Untersuchung der Performance von *Athena* für tiefe Aufnahmen zur Entwicklung der Aktiven Galaxien ist ein sehr großer Katalog extragalaktischer Quellen notwendig, der von Marchesi et al. (2020) unter Mitwirkung von ECAP erstellt und dokumentiert wurde. Mit diesem Katalog konnten dann verschiedene tiefe Kampagnen mit dem WFI simuliert und ausgewertet werden. Diese Arbeiten wurden von Giorgio Lanzuisi (OAS Bologna) in enger Zusammenarbeit mit uns durchgeführt, unter anderem führte dies zur Verbesserung der Algorithmen zur Berechnung der effektiven Flächen, die oben schon angesprochen wurde. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel für ein derartiges tiefes Feld, Abb. 14 die sich für *Athena* daraus ergebenden Empfindlichkeiten (zur Bestimmung der Kurven wurden auf den SIXTE-Simulationen eine Quellsuche mit Hilfe der für *Chandra* entwickelten Quelldetektionsalgorithmen durchgeführt).

In die Empfindlichkeit von *Athena* geht neben dem Teilchenhintergrund auch das durch die extragalaktischen Quellen erzeugte Streulicht ein: In der Röntgenoptik von *Athena* können Photonen von Quellen, die sich außerhalb des Gesichtsfelds befinden, nach einer einzelnen Reflexion in die Fokalebene gelangen. Das führt zu einer Erhöhung des Hintergrunds und muß daher in Sensitivitätsstudien wie die oben dargestellte mit eingehen. Für derartige Untersuchungen

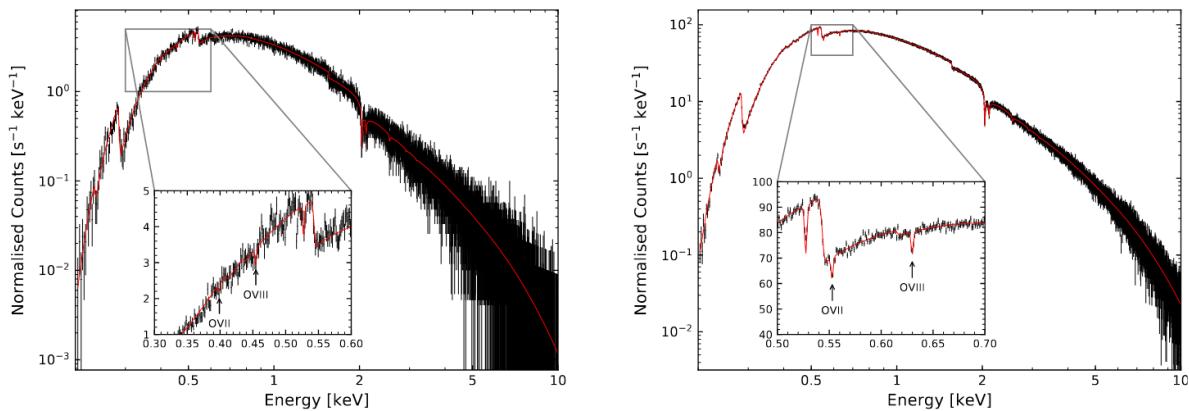


Abbildung 16: X-IFU-Spektren eines Gamma-Ray Bursts bei einer Rotverschiebung von  $z = 2$  (50 ks Beobachtungszeit). In der linken Abbildung ist die absorbierende Struktur bei  $z = 0.4388$ , rechts bei  $z = 0.0382$ . Das Feature bei 0.53 eV ist eine Absorptionslinie im interstellaren Medium (Walsh et al. 2020, Fig. 1).

entwickelten wir einen eigenen externen Code, der auf Ray Tracing aufbaut und berechneten dann das Streulicht in der Fokalebene von *Athena*. Durch ein neues Interface kann dieses Streulicht in Simulationen mit berücksichtigt werden. Die Rechenzeit für die Erstellung des Modells des Streulichts ist dabei sehr aufwendig (ca. 50000 CPU-Stunden pro Modell), so dass nur die Ergebnisse in SIXTE benutzt werden. Das Modell selbst wird nicht exportiert.

### b) Gamma-Ray Burst Beobachtungen mit dem X-IFU

Ein Kernthema von *Athena* ist die Beobachtung des warmen intergalaktischen Mediums. Hier hatten wir in 50 QR 1402 im Rahmen der Dissertation von Thorsten Brand Studien durchgeführt, wie Absorptionslinien in den Spektren von Gamma-Ray Bursts nachgewiesen werden können (Brand et al. 2016; Brand, 2017). Die Arbeiten wurden im Berichtszeitraum von Sarah Walsh, einer Doktorandin am University College Dublin, auf Grundlage der Entwicklungen von Thorsten Brand und in enger Zusammenarbeit mit unserem Team fortgesetzt (Abb. 16). Dabei wurden auch kosmologische Simulationen (EAGLE) benutzt, um die Zahl der beobachtbaren Absorptionsliniensysteme abzuschätzen. Die Arbeiten wurden von uns publiziert (Walsh et al. 2020)

### c) Weitere Simulationen

Kleinere Simulationen beinhalteten die Simulation von Beobachtungen des Perseus-Haufens mit *Athena* zur Demonstration der Beobachtung ausgedehnter Quellen und führten Simulationen von Galaxienhaufen mit räumlich veränderlichen Spektren für verschiedene Rotverschiebungen für das WFI Science Team. Ziel war die Charakterisierung des Rotverschiebungsbereichs, in dem die Struktur des Haufens rekonstruiert werden kann. Ferner erstellten wir ein genaues Simulationsmodell für das Galaktische Zentrum im Rahmen der Bachelor-Arbeit von Matthias Rohe (siehe Abb. 17), halfen bei der Simulation von Messungen der chemischen Anreicherung in Galaxienhaufen mit (Mernier et al. 2020), und untersuchten die Genauigkeit, mit der magnetohydrodynamische Winde von Akkretionsscheiben in Röntgendoppelsternen mit Schwarzen Löchern gemessen werden können (Chakravorty et al. 2023).

Weitere Beispiele, bei denen im Rahmen des Vorhabens entwickelte Werkzeuge benutzt wurden (ohne die direkte Beteiligung von Mitarbeitern der FAU), sind unter anderen die Untersuchung der Energierekonstruktion in TES-Devices mit Hilfe von Machine Learning (Vega-Ferrero et al. 2022), die Messung der Geschwindigkeitsstruktur in Galaxienhaufen (Biffi et al. 2022), sowie

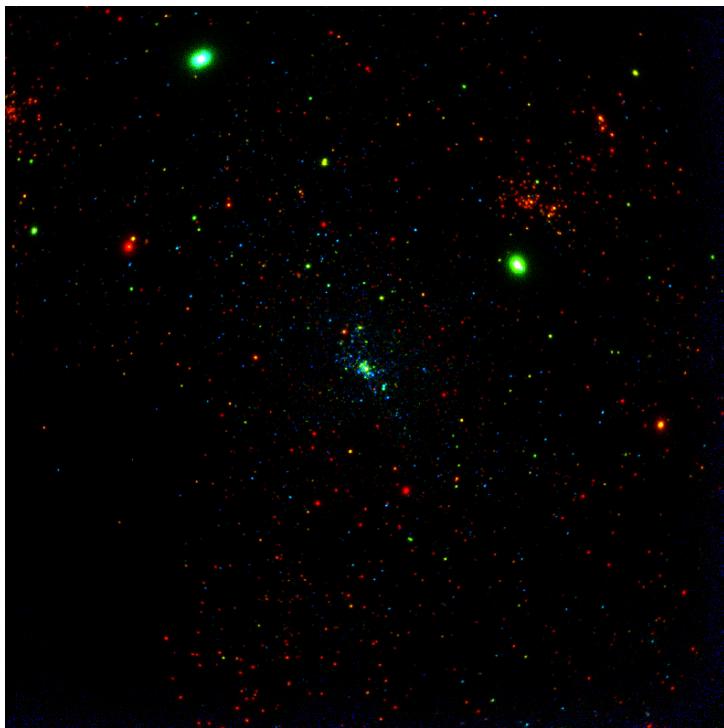


Abbildung 17: Simulation einer 50 ks langen Beobachtung des galaktischen Zentrums mit der bei ECAP entwickelten Simulationssoftware SIXTE (BSc-Arbeit M. Rohe, ECAP); diffuse Emission wurde nicht berücksichtigt. Die Grundlage der Simulation sind Chandra-Beobachtungen, die Farbe gibt die spektrale Härte der Quelle an.

Studien zur Bildrekonstruktion mit XMM-Newton (Sweere et al. 2022).

## 7 Publikationen

### 7.1 Publikationen in begutachteten Zeitschriften

1. D. Barret et al. (2023). "The Athena X-ray Integral Field Unit: A Consolidated Design for the System Requirement Review of the Preliminary Definition Phase". In: *Experimental Astronomy* 55, S. 373–426. doi: [10.1007/s10686-022-09880-7](https://doi.org/10.1007/s10686-022-09880-7)
2. S. Chakravorty, P.-O. Petrucci, S. R. Datta, J. Ferreira, J. Wilms, J. Jacquemin-Ide, M. Clavel, G. Marcel, J. Rodriguez, J. Malzac, R. Belmont, S. Corbel, M. Coriat, G. Henri & M. Parra (2023). "Absorption Lines from Magnetically Driven Winds in X-ray Binaries - II. High Resolution Observational Signatures Expected from Future X-ray Observatories". In: *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 518, S. 1335–1351. doi: [10.1093/mnras/stac2835](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2835)
3. E. S. Kammoun, D. Barret, P. Peille, R. Willingale, T. Dauser, J. Wilms, M. Guainazzi & J. M. Miller (2022). "The Defocused Observations of Bright Sources with Athena/X-IFU". In: *Astron. Astrophys.* 664, A29. doi: [10.1051/0004-6361/202243606](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243606)
4. C. Kirsch, L. Gottardi, M. Lorenz, T. Dauser, R. den Hartog, B. Jackson, P. Peille, S. Smith & J. Wilms (2020). "Time-Domain Modeling of TES Microcalorimeters Under AC Bias". In: *J. Low Temp. Phys.* 199.3, S. 569–576. doi: [10.1007/s10909-019-02261-z](https://doi.org/10.1007/s10909-019-02261-z)
5. C. Kirsch, M. Lorenz, P. Peille, T. Dauser, M. T. Ceballos, B. Cobo, P. E. Merino-Alonso, E. Cucchetti, S. J. Smith, L. Gottardi, R. H. den Hartog, A. Miniussi, M. Durkin, D. Prêle & J. Wilms (2022). "The Athena X-IFU Instrument Simulator Xifusim". In: *J. Low Temp. Phys.* 209, S. 988–997. doi: [10.1007/s10909-022-02700-4](https://doi.org/10.1007/s10909-022-02700-4)
6. O. König, J. Wilms, R. Arcodia, T. Dauser, K. Dennerl, V. Doroshenko, F. Haberl, S. Hämerich, C. Kirsch, I. Kreykenbohm, M. Lorenz, A. Malyali, A. Merloni, A. Rau, T. Rauch,

- G. Sala, A. Schwope, V. Suleimanov, P. Weber & K. Werner (2022). "X-Ray Detection of a Nova in the Fireball Phase". In: *Nature* 605.7909, S. 248–250. doi: [10.1038/s41586-022-04635-y](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04635-y)
7. M. Lorenz, C. Kirsch, P. E. Merino-Alonso, P. Peille, T. Dauser, E. Cucchetti, S. J. Smith & J. Wilms (2020). "GPU Supported Simulation of Transition-Edge Sensor Arrays". In: *J. Low Temp. Phys.* 200.5, S. 277–285. doi: [10.1007/s10909-020-02450-1](https://doi.org/10.1007/s10909-020-02450-1)
8. M. Lorenz, C. Kirsch, P. Peille, R. Ballhausen, V. Fioretti, S. Lotti, T. Dauser & J. Wilms (2022). "Simulation of Radiative Transfer Within X-ray Microcalorimeter Absorbers". In: *J. Low Temp. Phys.* 209, S. 464–472. doi: [10.1007/s10909-022-02754-4](https://doi.org/10.1007/s10909-022-02754-4)
9. S. Marchesi, R. Gilli, G. Lanzuisi, T. Dauser, S. Ettori, F. Vito, N. Cappelluti, A. Comastri, R. Mushotzky, A. Ptak & C. Norman (2020). "Mock Catalogs for the Extragalactic X-ray Sky: Simulating AGN Surveys with ATHENA and with the AXIS Probe". In: *Astron. Astrophys.* 642, A184. doi: [10.1051/0004-6361/202038622](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038622)
10. F. Mernier, E. Cucchetti, L. Tornatore, V. Biffi, E. Pointecouteau, N. Clerc, P. Peille, E. Rasia, D. Barret, S. Borgani, E. Bulbul, T. Dauser, K. Dolag, S. Ettori, M. Gaspari, F. Pajot, M. Roncarelli & J. Wilms (2020). "Constraining the Origin and Models of Chemical Enrichment in Galaxy Clusters Using the Athena X-IFU". In: *Astron. Astrophys.* 642, A90. doi: [10.1051/0004-6361/202038638](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038638)
11. P. Peille, R. den Hartog, A. Miniussi, S. Stever, S. Bandler, C. Kirsch, M. Lorenz, T. Dauser, J. Wilms, S. Lotti, F. Gatti, C. Macculi, B. Jackson & F. Pajot (2020). "Quantifying the Effect of Cosmic Ray Showers on the X-IFU Energy Resolution". In: *J. Low Temp. Phys.* 199.1, S. 240–249. doi: [10.1007/s10909-019-02330-3](https://doi.org/10.1007/s10909-019-02330-3)
12. S. Walsh, S. McBreen, A. Martin-Carrillo, T. Dauser, N. Wijers, J. Wilms, J. Schaye & D. Barret (2020). "Detection Capabilities of the Athena X-IFU for the Warm-Hot Intergalactic Medium Using Gamma-Ray Burst X-ray Afterglows". In: *Astron. Astrophys.* 642, A24. doi: [10.1051/0004-6361/202037775](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037775)

## 7.2 Konferenzpublikationen

Entfällt.

## 7.3 Abschlussarbeiten

- Matthias Rohe, 2022, Simulations of the Galactic Center for Athena, [https://www.sternwarte.uni-erlangen.de/docs/theses/2022-08\\_Rohe.pdf](https://www.sternwarte.uni-erlangen.de/docs/theses/2022-08_Rohe.pdf)

## 8 Zitierte Literatur

- Barret, D. et al. (2010). "The High Time Resolution Spectrometer (HTRS) Aboard the International X-ray Observatory (IXO)". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*. San Diego, California, USA, S. 77321M-77321M-12. doi: [10.1117/12.856955](https://doi.org/10.1117/12.856955).
- Barret, D. et al. (2023). "The Athena X-ray Integral Field Unit: A Consolidated Design for the System Requirement Review of the Preliminary Definition Phase". In: *Experimental Astronomy* 55, S. 373–426. doi: [10.1007/s10686-022-09880-7](https://doi.org/10.1007/s10686-022-09880-7).
- Bavdaz, M. et al. (2021). "The Athena X-Ray Optics Development and Accommodation". In: *International Conference on Space Optics — ICSO 2020*. Hrsg. von B. Cugny, S. Zodnik & N. Karafolas. Bd. 11852. SPIE, S. 842–857. doi: [10.1117/12.2599341](https://doi.org/10.1117/12.2599341).

- Bavdaz, M. et al. (2022). "ATHENA Optics Technology Development". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Hrsg. von J.-W. Den Herder, S. Nikzad & K. Nakazawa. Bd. 12181. SPIE, S. 154–167. doi: [10.1117/12.2629894](https://doi.org/10.1117/12.2629894).
- Biffi, V., J. A. ZuHone, T. Mroczkowski, E. Bulbul & W. Forman (2022). "The Velocity Structure of the Intracluster Medium during a Major Merger: Simulated Microcalorimeter Observations". In: *Astron. Astrophys.* 663, A76. doi: [10.1051/0004-6361/202142764](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142764).
- Bozzo, E. et al. (2016). "The Filter Wheel and Filters Development for the X-IFU Instruments Onboard Athena". In: Bd. 9905, S. 990561-990561–8. doi: [10.1117/12.2232328](https://doi.org/10.1117/12.2232328).
- Brand, T. et al. (2016). "Observing the WHIM with Athena". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*. Hrsg. von J.-W. Den Herder, T. Takahashi & M. W. Bautz. Bd. 9905. Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: SPIE, 99055F. doi: [10.1117/12.2234442](https://doi.org/10.1117/12.2234442).
- Brand, T. (2017). "Detector Simulations for the ATHENA X-ray Observatory". Diss. Bamberg: University of Erlangen-Nuremberg.
- Brandt, S. et al. (2012). "The LOFT Wide Field Monitor". In: 84432G–84432G. doi: [10.1117/12.926060](https://doi.org/10.1117/12.926060).
- Chakravorty, S. et al. (2023). "Absorption Lines from Magnetically Driven Winds in X-ray Binaries - II. High Resolution Observational Signatures Expected from Future X-ray Observatories". In: *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 518, S. 1335–1351. doi: [10.1093/mnras/stac2835](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2835).
- Dauser, T. et al. (2019). "SIXTE: A Generic X-ray Instrument Simulation Toolkit". In: *Astron. Astrophys.* 630, A66. doi: [10.1051/0004-6361/201935978](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935978).
- Eraerds, T. et al. (2021). "Enhanced Simulations on the Athena/Wide Field Imager Instrumental Background". In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 7, S. 034001. doi: [10.1117/1.JATIS.7.3.034001](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.3.034001).
- Feroci, M. et al. (2012). "LOFT: The Large Observatory For X-ray Timing". In: S. 84432D–84432D. doi: [10.1117/12.926310](https://doi.org/10.1117/12.926310).
- Gabriel, C., A. I. Ibaibarriaga & J. Hoar (2005). "SciSim: The XMM-Newton x-Ray Observatory Data Simulator". In: *UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XIV*. Hrsg. von O. H. W. Siegmund. Bd. 5898. SPIE, S. 469–478. doi: [10.1117/12.613895](https://doi.org/10.1117/12.613895).
- Kammoun, E. S. et al. (2022). "The Defocused Observations of Bright Sources with Athena/X-IFU". In: *Astron. Astrophys.* 664, A29. doi: [10.1051/0004-6361/202243606](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243606).
- Kemmer, J. & G. Lutz (1987). "New Detector Concepts". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 253.3, S. 365–377. doi: [10.1016/0168-9002\(87\)90518-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90518-3).
- Kemmer, J. et al. (1990). "Experimental Confirmation of a New Semiconductor Detector Principle". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Proceedings of the Fifth European Symposium on Semiconductors Detectors 288.1, S. 92–98. doi: [10.1016/0168-9002\(90\)90470-Q](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90470-Q).
- Kirsch, C. et al. (2020). "Time-Domain Modeling of TES Microcalorimeters Under AC Bias". In: *J. Low Temp. Phys.* 199.3, S. 569–576. doi: [10.1007/s10909-019-02261-z](https://doi.org/10.1007/s10909-019-02261-z).
- Kirsch, C. et al. (2022). "The Athena X-IFU Instrument Simulator Xifusim". In: *J. Low Temp. Phys.* 209, S. 988–997. doi: [10.1007/s10909-022-02700-4](https://doi.org/10.1007/s10909-022-02700-4).
- König, O. et al. (2022). "X-Ray Detection of a Nova in the Fireball Phase". In: *Nature* 605.7909, S. 248–250. doi: [10.1038/s41586-022-04635-y](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04635-y).
- Lorenz, M. et al. (2020). "GPU Supported Simulation of Transition-Edge Sensor Arrays". In: *J. Low Temp. Phys.* 200.5, S. 277–285. doi: [10.1007/s10909-020-02450-1](https://doi.org/10.1007/s10909-020-02450-1).
- Lorenz, M. et al. (2022). "Simulation of Radiative Transfer Within X-ray Microcalorimeter Absorbers". In: *J. Low Temp. Phys.* 209, S. 464–472. doi: [10.1007/s10909-022-02754-4](https://doi.org/10.1007/s10909-022-02754-4).

- Madsen, K. et al. (2011). "Simulating Galactic and Extragalactic Surveys with the NuSTAR Simulator NuSIM." In: 12, S. 43.08.
- Marchesi, S. et al. (2020). "Mock Catalogs for the Extragalactic X-ray Sky: Simulating AGN Surveys with ATHENA and with the AXIS Probe". In: *Astron. Astrophys.* 642, A184. doi: [10.1051/0004-6361/202038622](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038622).
- Meidinger, N. et al. (2020). "Development Status of the Wide Field Imager Instrument for Athena". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*. Hrsg. von J.-W. Den Herder, S. Nikzad & K. Nakazawa. Bd. 11444. SPIE, S. 120–132. doi: [10.1117/12.2560507](https://doi.org/10.1117/12.2560507).
- Mernier, F. et al. (2020). "Constraining the Origin and Models of Chemical Enrichment in Galaxy Clusters Using the Athena X-IFU". In: *Astron. Astrophys.* 642, A90. doi: [10.1051/0004-6361/202038638](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038638).
- Miller, E. D. et al. (2022). "Mitigating the Effects of Particle Background on the Athena Wide Field Imager". In: *JATIS* 8.1, S. 018001. doi: [10.1117/1.JATIS.8.1.018001](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.018001).
- Nandra, K. et al. (2013). "The Hot and Energetic Universe: A White Paper Presenting the Science Theme Motivating the Athena+ Mission". In: *arXiv:1306.2307 [astro-ph]*. arXiv: 1306.2307 [astro-ph].
- Peille, P. et al. (2020). "Quantifying the Effect of Cosmic Ray Showers on the X-IFU Energy Resolution". In: *J. Low Temp. Phys.* 199.1, S. 240–249. doi: [10.1007/s10909-019-02330-3](https://doi.org/10.1007/s10909-019-02330-3).
- Peille, P. et al. (2018). "The Performance of the ATHENA X-ray Integral Field Unit". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray*. Bd. 10699. International Society for Optics and Photonics, 106994K. doi: [10.1117/12.2313720](https://doi.org/10.1117/12.2313720).
- Plattner, M. et al. (2020). "Technology Development of Athena WFI Frame Processor Electronics and Verification of Its Real-Time Performance". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*. Hrsg. von J.-W. Den Herder, S. Nikzad & K. Nakazawa. Bd. 11444. SPIE, S. 681–685. doi: [10.1117/12.2562200](https://doi.org/10.1117/12.2562200).
- Polak, S. et al. (2023). "Design and Acoustic Tests of the ATHENA WFI Filter Wheel Assembly Development Model towards TRL5". In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 9, S. 024002. doi: [10.1117/1.JATIS.9.2.024002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.9.2.024002).
- Predehl, P. et al. (2021). "The eROSITA X-ray Telescope on SRG". In: *Astron. Astrophys.* 647, A1. doi: [10.1051/0004-6361/202039313](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039313).
- Puccio, E. et al. (2020). "Synchrotron X-Ray Transmission Measurements and Modeling of Filters Investigated for Athena". In: *JATIS* 6.3, S. 038003. doi: [10.1117/1.JATIS.6.3.038003](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.6.3.038003).
- Rau, A. et al. (2016). "Athena Wide Field Imager Key Science Drivers". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*. Hrsg. von J.-W. Den Herder, T. Takahashi & M. Bautz. Bd. 9905. Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: SPIE, 99052B. doi: [10.1117/12.2235268](https://doi.org/10.1117/12.2235268).
- Schmid, C. et al. (2010). "Simulations of X-Ray Telescopes for eROSITA and IXO". In: *X-Ray Astronomy 2009*. Hrsg. von A. Comastri, L. Angelini & M. Cappi. Bd. 1248. Melville, NY: AIP Publishing, S. 591–592. doi: [10.1063/1.3475349](https://doi.org/10.1063/1.3475349).
- Schmid, C. et al. (2011). "Simulations of the Performance of the HTRS on IXO". In: *Proceedings of Science HTRS 2011*, S. 70.
- Schmid, C. et al. (2012). "LOFT Simulation Toolkit". In: *9th INTEGRAL Workshop: An INTEGRAL View of the High-Energy Sky*. Bd. INTEGRAL2012. Proceedings of Science, S. 152.
- Smith, R. et al. (2017). "Arcus: Exploring the Formation and Evolution of Clusters, Galaxies, and Stars". In: *UV, X-ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XX*. Hrsg. von O. H. W. Siegmund. Bd. 10397. SPIE, 103897Q. doi: [10.1117/12.2272818](https://doi.org/10.1117/12.2272818).

- Stefanescu, A. et al. (2010). "The Wide Field Imager of the International X-ray Observatory". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. New Developments in Radiation Detectors* 624.2, S. 533–539. doi: [10.1016/j.nima.2010.05.049](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.049).
- Sweere, S. F. et al. (2022). "Deep Learning-Based Super-Resolution and de-Noising for XMM-newton Images". In: *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 517, S. 4054–4069. doi: [10.1093/mnras/stac2437](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2437).
- Vega-Ferrero, J. et al. (2022). "Event Detection and Reconstruction Using Neural Networks in TES Devices: A Case Study for Athena/X-IFU". In: *Publ. Astron. Soc. Pacific* 134, S. 024504. doi: [10.1088/1538-3873/ac5159](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac5159).
- Walsh, S. et al. (2020). "Detection Capabilities of the Athena X-IFU for the Warm-Hot Intergalactic Medium Using Gamma-Ray Burst X-ray Afterglows". In: *Astron. Astrophys.* 642, A24. doi: [10.1051/0004-6361/202037775](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037775).
- Wilms, J. et al. (2014). "ATHENA End-to-End Simulations". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*. Bd. 9144. Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: SPIE, S. 91445X. doi: [10.1117/12.2056347](https://doi.org/10.1117/12.2056347).
- Wise, M. (1997). "Marx". In: *Chandra News* 5, S. 22.
- Zhang, J. et al. (2020). "Investigating the Effect of Source Contamination on eXTP/SFA". In: *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*. Bd. 11444. SPIE, S. 389–394. doi: [10.1117/12.2561944](https://doi.org/10.1117/12.2561944).
- Zhang, S. et al. (2019). "The Enhanced X-ray Timing and Polarimetry Mission—eXTP". In: *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 62.2, S. 29502. doi: [10.1007/s11433-018-9309-2](https://doi.org/10.1007/s11433-018-9309-2).
- Zoglauer, A. et al. (2011). "Simulating Extended Galactic Sources with the NuSTAR Simulator NuSIM". In: 12, S. 43.07.

## Berichtsblatt

|   |   |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN<br>-  | 2. Berichtsart<br>Schlussbericht              |
| 3a. Titel des Berichts<br>ATHENA: X-IFU und WFI Technologieentwicklung  |   |
| 3b. Titel der Publikation<br>Athena: X-IFU und WFI Technologieentwicklung   |   |
| 4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))<br>Wilms, Jörn  | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>31.12.2022 |
| 4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))  |   |
| 6. Veröffentlichungsdatum<br>10.08.2023   |   |
| 7. Form der Publikation<br>interner Report  |   |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Dr. Remeis-Sternwarte und Astronomisches Institut<br>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg<br>Sternwartstr. 7<br>96049 Bamberg  |   |
| 9. Ber.Nr. Durchführende Institution<br>-   |   |
| 10. Förderkennzeichen<br>50 QR 1903   |   |
| 11a. Seitenzahl Bericht<br>24 Seiten  |   |
| 11b. Seitenzahl Publikation<br>-  |   |
| 12. Literaturangaben<br>48  |   |
| 13. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Raumfahrtmanagement des<br>Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.<br>Königswinterer Str. 522-524<br>53227 Bonn  |   |
| 14. Tabellen<br>-   |   |
| 15. Abbildungen<br>17   |   |
| 16. Zusätzliche Angaben<br>-  |   |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>-  |   |
| 18. Kurzfassung<br>Wir fassen die Ergebnisse der Arbeiten an der FAU Erlangen-Nürnberg zur Vorbereitung des Röntgensatelliten der ESA, ATHENA, zusammen, insbesondere auf die Entwicklung von end-to-end Simulationen. Der Bericht beschreibt die weiteren Entwicklungen der Simulationssoftware SIXTE, wobei insbesondere auf die Verbesserung des Absorptionsmodells im Sensor, die Implementierung der Modellierung der Ausleseelektronik und auf die Beschreibung der durchgeführten wissenschaftlichen und technischen Studien eingegangen wird. |   |
| 19. Schlagwörter<br>Röntgenastronomie, Athena, Simulationssoftware, DEPFET-Detektoren, Transition Edge Sensors  |   |
| 20. Verlag<br>-   | 21. Preis<br>-                                |

## Document Control Sheet

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1. ISBN or ISSN  | 2. Type of Report<br>Final Report |
| 3a. Report Title<br>ATHENA: X-IFU and WFI Technology Development   |                                   |
| 3b. Title of Publication   |                                   |
| 4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))<br>Wilms, Jörn  |                                   |
| 4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))  |                                   |
| 5. End of Project<br>31 December 2022  |                                   |
| 6. Publication Date<br>10 August 2023  |                                   |
| 7. Form of Publication<br>Report   |                                   |
| 8. Performing Organization(s) (Name, Address)<br><br>Dr. Remeis-Sternwarte und Astronomisches Institut<br>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg<br>Sternwartstr. 7<br>96049 Bamberg  |                                   |
| 9. Originator's Report No.<br>-  |                                   |
| 10. Reference No.<br>50 QR 1903  |                                   |
| 11a. No. of Pages Report<br>24   |                                   |
| 11b. No. of Pages Publication<br>-   |                                   |
| 12. No. of References<br>48  |                                   |
| 13. Sponsoring Agency (Name, Address)<br><br>Raumfahrtmanagement des<br>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.<br>Königswinterer Str. 522-524<br>53227 Bonn  |                                   |
| 14. No. of Tables<br>-   |                                   |
| 15. No. of Figures<br>17   |                                   |
| 16. Supplementary Notes  |                                   |
| 17. Presented at (Title, Place, Date)  |                                   |
| 18. Abstract<br><br>We summarize the result of the work of FAU Erlangen-Nuremberg related to the preparation of ESA's X-ray mission ATHENA, especially concerning end to end simulations. The report describes the further development of the simulation software SIXTE, concentrating especially on the development of an absorption model for the sensors, the implementation of the modeling of the read out chain, and on a description of the scientific and technical performance studies. |                                   |
| 19. Keywords<br>X-ray astronomy, Athena, simulation software, DEPFET detectors, Transition Edge Sensors  |                                   |
| 20. Publisher  | 21. Price                         |