

Radiometrische Charakterisierung von Weltrauminstrumentierung

Alexander Gottwald*, Roman Klein, Michael Krumrey, Peter Müller, Wolfgang Paustian, Thomas Reichel, Frank Scholze, Reiner Thornagel

* Dr. Alexander Gottwald, Arbeitsgruppe „UV- und VUV-Radiometrie“, E-Mail: alexander.gottwald@ptb.de

Jahr der Kalibrierung	Wellenlängenbereich / nm	Instrument	Mission
1994	50 bis 160	SUMER <i>Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation</i>	SOHO <i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
1994	15 bis 80	CDS <i>Coronal Diagnostic Spectrograph</i>	
1996	15 bis 80	SERTS <i>Solar EUV Rocket Telescope and Spectrograph</i>	
1997	0,1 bis 10	Chandra	
1998	0,1 bis 10	EPIC <i>European Photon Imaging Camera</i>	XMM Newton <i>X-ray Multi Mirror</i>
1998	1 bis 20	SEE XPS <i>Solar EUV Experiment XUV Photometer System</i>	TIMED <i>Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics</i>
1998	1 bis 20	XPS <i>XUV Photometer System</i>	SORCE <i>Solar Radiation and Climate Experiment</i>
2004	115 bis 135	TWINS <i>Two Wide-Angle Imaging Neutral-Atom Spectrometers</i>	
2004	15 bis 80	EIS <i>EUV Imaging Spectrometer</i>	SOLAR-B
2005	15 bis 80	MOSES <i>Multi-Order Solar EUV Spectrograph</i>	
2005	0,02 bis 0,1	GBM <i>Gamma ray Burst Monitor</i>	Fermi <i>Gamma-Ray Space Telescope</i>
2007	17 bis 37	EUNIS <i>Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrometer</i>	
2005 2006 2007	1 bis 240	LYRA <i>Lyman-alpha Radiometer</i>	PROBA II <i>Project for On Board Autonomy</i>
		SWAP <i>Sun Watching using APS</i>	
2004 2006	10 bis 240	SOL-ACES <i>Solar Auto-Calibrating EUV/UV Spectrophotometers</i>	SOLAR <i>Solar Monitoring Observatory / ISS</i>
2002 2007	10 bis 240	SOL-SPEC <i>Solar Spectral Irradiance Measurement</i>	
2008	0,1 bis 2,4	SphinX <i>Solar Photometer in X-Rays</i>	CORONAS
2009	0,1 bis 12	eROSITA <i>extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array</i>	Spektrum Röntgen Gamma
2011	0,1 bis 2,5	MIXS <i>Mercury Imaging X-ray Spectrometer</i>	BepiColombo
2010 bis 2015	10 bis 240	EUI <i>Extreme Ultraviolet Imager</i>	SoLO <i>Solar Orbiter</i>
2012 bis 2015	70 bis 105	SPICE <i>SPectral Imaging of the Coronal Environment</i>	

Bild 1: Übersicht der Kalibrierungen von Raumfahrtinstrumenten bei der PTB unter Nutzung von Synchrotronstrahlung. Quellengestützte Kalibrierungen [1] sind gelb, empfangergestützte Kalibrierungen [2] sind blau unterlegt.

Einleitung

Die Erdatmosphäre absorbiert den kurzwelligen Teil des elektromagnetischen Spektrums, beginnend im Spektralbereich des Ultraviolett (UV) bis in den Bereich der Röntgenstrahlung. Was für das Leben auf der Erde einerseits ein wichtiger Schutz ist, erschwert andererseits die Erforschung des Weltraums: Messungen der Emission stellarer Objekte in diesem Spektralbereich können nur außerhalb der Erdatmosphäre vorgenommen werden. Dabei ist dieser Teil des Spektrums von elementarer Bedeutung, nicht nur für die Beobachtung und das Verständnis astro- und solarphysikalischer Prozesse, sondern auch wegen der intensiven Wechselwirkung mit der äußeren Erdatmosphäre und der entsprechenden klimatologischen und atmosphärenchemischen Bedeutung.

Um verlässliche und vergleichbare Messungen weltraumbasierter Instrumente zu gewährleisten, müssen diese sorgfältig charakterisiert und auf radiometrische Normale rückgeführt werden. Seit nunmehr über 20 Jahren hat sich die PTB im Rahmen zahlreicher Forschungs Kooperationen mit externen Partnern eine weltweite Spitzenposition in der Charakterisierung von Weltrauminstrumentierung mit Synchrotronstrahlung in den Spektralbereichen vom UV bis zum Röntgenbereich erarbeitet. Mit unterschiedlichen Techniken wurde eine Reihe von Missionen – mit dem Schwerpunkt Sonnenradiometrie – radiometrisch unterstützt. Ein weiterer Schwerpunkt ist speziell im Röntgenbereich die Charakterisierung abbildender röntgenoptischer Elemente, wofür ein eigener Strahlrohrzweig durch die europäische Weltraumagentur ESA beauftragt wurde. Bild 1 gibt eine Auswahl von Instrumenten, die durch die PTB unter Nutzung von Synchrotronstrahlung charakterisiert bzw. kalibriert wurden. Farblich unterschieden sind dabei Instrumente, bei denen quellengestützte (gelb) [1] bzw. empfangerge-

stützte (blau) [2] Methoden zur Verwendung kamen. Beginnend mit der Bereitstellung und Kalibrierung von TransfERNormalen für das *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) in 1994 [3] wurden Methoden und Instrumentierung kontinuierlich weiterentwickelt. Seit 2013 steht an der *Metrology Light Source* (MLS) ein dedizierter Vakuumtank zur Kalibrierung von Fluginstrumenten mit bis zu 1,20 m Länge und 100 kg Masse zur Verfügung (Bild 2), der erstmals zur Kalibrierung der Spektrometer des in 2017 startenden *Solar Orbiter* (SolO) eingesetzt wird, der direkten Nachfolgemission für SOHO.

Quellengestützte Kalibrierung von Spektrographen für die Sonnenradiometrie

Die quellengestützte Kalibrierung von Weltraum-Spektrographen kann entweder direkt mit der berechenbaren, primären Strahlung des Elektronenspeicherrings oder mithilfe von Transferstrahlungsquellen erfolgen, die ihrerseits rückführbar auf den Elektronenspeicherring als primäres Strahlernormal kalibriert sind. Eine Kalibrierung mit der ersten Methode muss zwangsläufig am Ort des Elektronenspeicherrings erfolgen, sodass dort die nötige Infrastruktur (z. B. eine entsprechende Vakuumkammer, Reinraum-Umgebung etc.) vorhanden sein muss. Die MLS stellt mit ihren flexiblen Betriebsmodi eine ideale Quelle für diese Aufgabe dar. So lässt sich die spektrale Strahlstärke über einen weiten Bereich durch entsprechende Anpassung des Elektronenstromes variieren. Dies erlaubt z. B. Untersuchungen zur Linearität und zum Sättigungsverhalten im Ansprechverhalten des Spektrometers. Durch Anpassung der Elektronenenergie lässt sich der spektrale Verlauf der Strahlung verändern. An der MLS kann die Elektronenenergie vom Nominalwert von 630 MeV bis ca. 105 MeV reduziert werden, sodass kürzere Wellenlängen, die ggf. zu höheren Beugungsordnungen im zu kalibrierenden Spektrographen führen würden, erheblich unterdrückt werden. Ein Vorteil der direkten Kalibrierung ist, dass auf den „Umweg“ der Transferquellen verzichtet werden kann und sich so im Prinzip kleinere Unsicherheiten erreichen lassen. Auch ist die Kalibrierung bei allen Wellenlängen möglich, da die Synchrotronstrahlung ein kontinuierliches „weißes“ Spektrum liefert. Schließlich lassen sich auch große Eingangsaperturen der Instrumente ausleuchten. Beachtet werden muss aber, dass die Synchrotronstrahlung hochgradig polarisiert ist, sodass ggf. zwei Kalibrierungen unter zwei um 90° verschiedenen Orientierungen senkrecht zur einfallenden Strahlung erfolgen müssen. Auch können aufgrund des weißen Spektrums bei Verwendung von Gitterspektrographen höhere Beugungsordnungen auftreten, die durch geeignete Methoden unter-

drückt werden müssen. Ein Beispiel dazu ist die Kalibrierung des Spektrographen SPICE (*Spectral Imaging of Coronal Environment*) [4] der *Solar Orbiter*-Mission. Der Spektrograph arbeitet in diversen Wellenlängenabschnitten im Spektralbereich von ca. 45 nm bis 110 nm. Mit der Synchrotronstrahlung lässt sich die volle Eingangsapertur von 43,5 mm mal 43,5 mm ausleuchten, was mit den vorhandenen Transferstrahlern nicht möglich wäre. Für die Kalibrierung des Wellenlängenabschnittes um 100 nm kann die Kalibrierung bei einer reduzierten Elektronenenergie bei 150 MeV erfolgen. Dadurch lässt sich das Intensitätsverhältnis von 50-nm-Photonen zu 100-nm-Photonen um ca. zwei Größenordnungen senken, im Vergleich zum Betrieb der MLS bei Nominalenergie, und mögliche höhere Beugungsordnungen in ihrer Intensität stark reduzieren.

Herausragende Beispiele für die Kalibrierung mit von der PTB zur Verfügung gestellten Transferstrahlerquellen stellen die Kalibrierung der Spektrographen CDS (*Coronal Diagnostic Spectrometer*) [5] und SUMER (*Solar Ultraviolet Measurement of Emitted Radiation*) [6] der SOHO-Mission dar. Deren Kalibrierung erfolgte in den jeweiligen Instituten der Instrumentenentwickler (für SUMER am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, MPS, und für CDS am *Rutherford Appleton Laboratory*, RAL). Die Kalibrierung der SOHO-Spektrographen wurde später mehrmals mithilfe der NASA-Höhenforschungsrakete SERTS (*Solar EUV Rocket Telescope and Spectrograph*) validiert, deren Kalibrierung wiederum am RAL in Kooperation mit der PTB durch Einsatz der CDS-Strahlungsquelle erfolgte. Viele weitere Beispiele für die quellengestützte Kalibrierung von

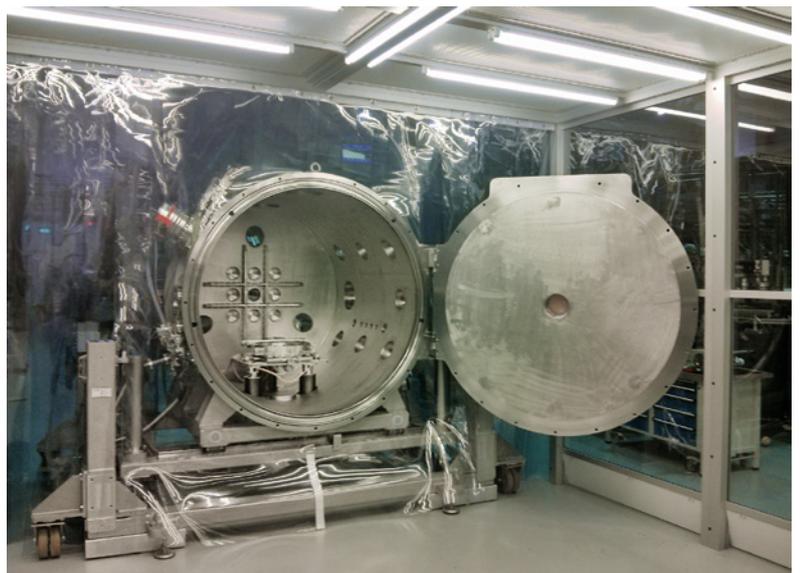


Bild 2:
Großer Vakuumtank zur Kalibrierung von Weltrauminstrumentierung an der MLS. Zum Be- und Entladen steht der Tank in einer entsprechenden Reinraum-Umgebung.

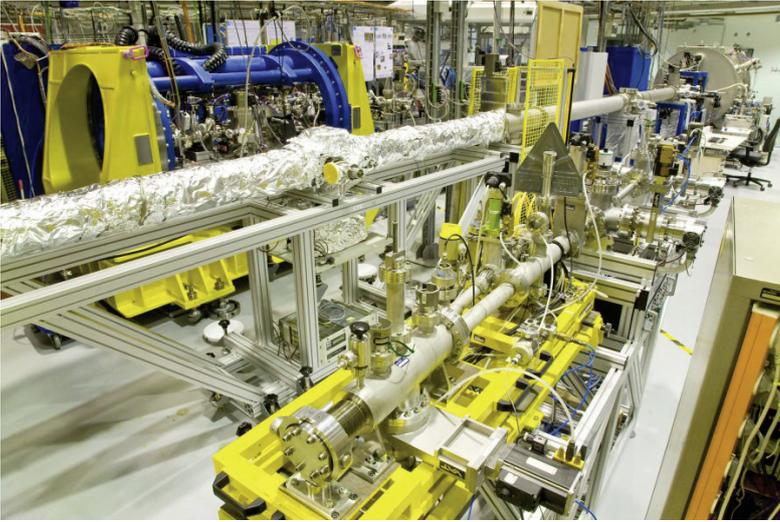


Bild 3: Blick aus Richtung der MLS in den zur quellengestützten Kalibrierung von Weltrauminstrumenten genutzten Bereich der MLS-Messhalle. Im Hintergrund oben rechts sieht man den großen Tank (Bild 2). Der Tank ist am Ende des Strahlrohrs zur Nutzung der direkten, berechenbaren Strahlung der MLS angeflanscht. Alternativ kann auch z. B. die SUMER-Transferquelle, im Bild unten rechts, in den Strahlengang gebracht werden. Diese Quelle kann am benachbarten Messplatz, im Bild links oben, rückführbar zur MLS kalibriert werden [1].

Spektrometern sind in Bild 1 aufgeführt. Dabei wurden die SUMER-Quelle, die CDS-Quelle oder kalibrierte Deuteriumlampen als Transferstrahler verwendet.

Die oben genannten SUMER- und CDS-Transferquellen basieren auf einer Hohlkathodenentladung. Die Hohlkathode muss nach einigen 10 Stunden Betriebsdauer gewartet werden, d. h. die Kathode getauscht und die Anode gereinigt werden. Eine Kalibrierung mithilfe von Transferquellen im PTB-Labor statt im Heimatlabor des Instrumentenentwicklers bietet die Möglichkeit der zeitnahen Rekalibrierung der Transferquelle nach der Wartung, wodurch sich die mit Transferquellen erreichbaren Kalibrierunsicherheiten substanziell verbessern lassen. Bild 3 gibt einen Eindruck von dem Bereich des Labors an der MLS mit den Strahlrohren bzw. Messplätzen M2a und M2b [7], der für quellengestützte Radiometrie genutzt wird.

Empfängergestützte Charakterisierung von Weltrauminstrumentierung

Neben der quellengestützten Radiometrie [1], bei der der Speicherring als berechenbares primäres Strahlernormal dient, wird auch die empfängergestützte Radiometrie mit Synchrotronstrahlung [2] an den verschiedenen entsprechenden Strahlrohren bei BESSY II und der MLS [7] zur Charakterisierung und Kalibrierung von Instrumenten und Komponenten für Weltraummissionen eingesetzt. Radiometrische Größen werden hierbei rückgeführt auf elektrisch kalibrierte Kryoradiometer als primäre

Empfängernormale zur Messung absoluter Strahlungsleistungen monochromatisierter Synchrotronstrahlung. Wie im optischen Spektralbereich haben sich mittlerweile auch im Bereich von UV-, VUV- und Röntgenstrahlung Halbleiterphotodioden als die entsprechenden Transferempfängernormale etabliert. Vorhandene, kommerziell erhältliche Halbleiterphotodioden vermögen jedoch den Ansprüchen für die eigentlichen Detektionssysteme in diesen kurzwelligen Spektralbereichen nicht in jeder Hinsicht gerecht zu werden. Allgemein werden an die Strahlungsempfänger hohe Anforderungen an die spektrale Empfindlichkeit und insbesondere an die Strahlungsbeständigkeit gestellt. Im Einsatzbereich der Weltrauminstrumentierung umfasst dies nicht nur die Beständigkeit gegen die Intensität der zu detektierenden Strahlung, sondern insbesondere auch gegen Partikelbestrahlung (z. B. Protonen), denen sie in ihrer Einsatzumgebung ausgesetzt sind [8]. Besondere Anforderungen ergeben sich darüber hinaus beispielsweise aus der Forderung, dass die Detektoren unempfindlich gegenüber sichtbarer und infraroter Strahlung sein sollten (*solar blind*) [9]. Hierzu werden anstelle von Silizium halbleitende Materialien mit einer großen energetischen Bandlücke verwendet (*wide band-gap materials*, zum Beispiel Aluminium-Gallium-Nitrid), sodass die Energie der Photonen im sichtbaren Spektralbereich nicht zur Erzeugung eines Photostromes ausreicht. Für Spektrographen und abbildende Teleskopsysteme werden bildgebende Detektoren entwickelt, die eine orts aufgelöste Charakterisierung erfordern. Neben zeilenbasierten Detektoren (*Charged Coupled Device, CCD*) finden zunehmend Bauteile Verwendung, bei denen jedes einzelne Pixel über eine nachgeschaltete *on-chip*-Elektronik separat ausgelesen werden kann (*Active Pixel Sensor, APS*) [10].

Neben der Charakterisierung und Kalibrierung der Strahlungsempfänger werden durch die PTB auch optische Einzelkomponenten (Spiegel, Filter, Beugungsgitter) für Raumfahrtinstrumente vermessen, hinsichtlich ihrer spektralen Reflexion bzw. Transmission oder Beugungseffizienz unter Nutzung der in den PTB-Laboratorien vorhandenen Reflektometer [11]. Ebenso wie für die Strahlungsempfänger ist auch bei den optischen Komponenten die Bestrahlungsbeständigkeit ein wesentlicher Aspekt in der Anwendung. Durch die Möglichkeit zur Messung spektraler Eigenschaften mit kleinen relativen Unsicherheiten (1 % oder besser) kann die Bestrahlungsstabilität verschiedener reflektierender Beschichtungen bzw. von Dünnschichtfiltern durch Messungen vor und nach Bestrahlungen untersucht werden.

Komplette Spektrometersysteme können ebenfalls empfängergestützt radiometrisch kalibriert werden (Bild 1), indem monochromatisierte Strahlung verwendet wird. Ob ein Instrument sich eher

für eine quellengestützte oder eine empfangergestützte Kalibrierung eignet, kann dabei nicht grundsätzlich beantwortet werden, sondern hängt individuell von den Eigenschaften des Spektrometers (wie z. B. Eingangsapertur, Winkelakzeptanz, Wellenlängenbereich, etc.) ab.

Röntgenastronomie

Gewöhnliche Materie liegt im Universum größtenteils als heißes Gas vor. Bei Temperaturen von mehr als 10^7 K emittiert das Gas besonders intensiv im Röntgenbereich. Da diese Strahlung die Erdatmosphäre nicht durchdringen kann, wird für die Untersuchungen ein Röntgenobservatorium im Weltraum mit hoher Empfindlichkeit, guter spektraler Auflösung und einem großen Sichtfeld benötigt. Durch die Beobachtung der Emissionslinien verschiedener chemischer Elemente lassen sich Aussagen über Entstehung und Entwicklung von Schwarzen Löchern und weit entfernten Galaxien unter dem Einfluss von dunkler Materie und dunkler Energie gewinnen.

Zur Kalibrierung der Instrumente der beiden existierenden Röntgensatelliten XMM-Newton der ESA und Chandra der NASA hatte die PTB bereits durch Messungen in ihrem früheren Labor bei BESSY I beigetragen [12, 13]. Derzeit werden im PTB-Labor bei BESSY II Komponenten für zukünftige Röntgenmissionen der ESA untersucht. Eine der nächsten Großmissionen, die voraussichtlich 2028 gestartet wird, hat das Thema „Das heiße und energetische Universum“. Dazu wurde bereits als Missionskonzept das *Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics* (ATHENA) entwickelt [14], das auf den Konzepten für die nicht realisierten Missionen IXO (*International X-ray Observatory*) und XEUS (*X-ray Evolving Universe Spectroscopy*) basiert. Die angestrebte effektive Spiegelfläche von ca. 2 m^2 entspricht bei streifendem Einfall für z. B. 1-keV-Strahlung einer echten Spiegelfläche von 600 m^2 , die mit kleinen Formabweichungen und hoher Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Masse realisiert werden muss. Die Lösung besteht im Stapeln vieler kleiner Spiegelflächen. Mit Si-Wafern, an deren Unterseiten sich Rippen befinden, lassen sich Silizium-Poren-Optiken (SPO) mit vielen Spiegelkanälen realisieren, die eine Eintrittsöffnung von typisch 1 mm^2 und eine Länge von 70 mm haben (Bild 4, oben) [15].

Die Qualität der einzelnen Spiegelkanäle lässt sich nur mit einem Nadelstrahl unter streifendem Einfall zur reflektierenden Oberfläche untersuchen. Dazu wurde im PTB-Labor bei BESSY II die *X-ray Pencil Beam Facility* (XPBF) aufgebaut [7, 15]. Dort steht seit 2005 ein kollimierter Röntgenstrahl (Durchmesser $100 \mu\text{m}$, Divergenz $< 5 \mu\text{rad}$) mit einer festen Photonenenergie von 2,8 keV zur Verfügung. Für spezielle

Untersuchungen können auch 1 keV oder 7,6 keV eingestellt werden. Das zu untersuchende Spiegelement kann mithilfe eines im Vakuum befindlichen Hexapods (Bild 4, unten), dessen Bewegung mit zwei optischen Autokollimatoren überprüft wird, mit Reproduzierbarkeiten von $2 \mu\text{m}$ und $< 5 \mu\text{rad}$ positioniert werden. Im Abstand von 5 m von der Optik befindet sich eine röntgenempfindliche CCD-Kamera, mit der sowohl der direkte als auch der reflektierte Strahl registriert werden kann. Aus Position und Form des reflektierten Strahls können Aussagen über die lokale Qualität der reflektierenden Oberfläche und insbesondere über Formabweichungen gewonnen werden.

Da für die IXO-Mission eine Fokallänge von 20 m vorgesehen war, wurde 2010 eine weitere Positioniermöglichkeit der CCD-Kamera in



Bild 4.
Oben: Silizium-Poren-Optik (SPO), die aus gestapelten Wafern mit Rippen auf der Unterseite besteht.
Unten: SPO auf dem Hexapod der *X-ray Pencil Beam Facility* (XPBF).

diesem Abstand realisiert. Für die als Wolter-Teleskop ausgelegten Spiegelsysteme, die zwei Reflexionen beinhalten, bedingt dieser Abstand bei einem Einfallswinkel von bis zu $1,4^\circ$ eine vertikale Translation der Kamera um 2 m bei gleichzeitiger Neigung um $5,6^\circ$. Auch wenn gezeigt werden konnte, dass aus den Messungen im kurzen Abstand von 5 m unter bestimmten Bedingungen auf größere Abstände extrapoliert werden kann [16], ist für die ATHENA-Mission ein weiteres Strahlrohr mit einem Kameraabstand von ca. 13 m geplant.

Neben diesen Messungen an der XPBF werden auch im Röntgenbereich einerseits Spiegel und Spiegelbeschichtungen untersucht [17], andererseits Detektoren wie z. B. DEPFET-Detektoren für die Merkur-Mission MIXS [18], pnCCDs für eROSITA [19] oder Szintillationsdetektoren für das Fermi-Gamma-Teleskop [20] kalibriert.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Klein, S. Kroth, W. Paustian, M. Richter, R. Thornagel: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 16 (2014)
- [2] A. Gottwald, U. Kroth, M. Krumrey, P. Müller, F. Scholze: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 21 (2014)
- [3] J. Hollandt, U. Schühle, W. Paustian, W. Curdt, M. Kühne, B. Wende, K. Wilhelm: Appl. Opt. **35**, 5125 (1996)
- [4] A. Fludra et al.: Proc. SPIE **8862**, 88620F (2013)
- [5] J. Hollandt, M. C. E. Huber, M. Kühne: Metrologia **30**, 381 (1993)
- [6] K. Wilhelm, P. Lemaire, U. Feldmann, J. Hollandt, U. Schühle, W. Curdt: Appl. Opt. **36**, 6416 (1997)
- [7] M. Richter, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [8] A. BenMoussa et al.: IEEE Trans. Nucl. Sci. **60**, 3907 (2013)
- [9] A. BenMoussa et al.: Diamond & Related Materials **18**, 860 (2009)
- [10] A. BenMoussa et al.: IEEE Trans. Electron Devices **60**, 1701 (2013)
- [11] M. Krumrey, L. Cibik, A. Fischer, A. Gottwald, U. Kroth, F. Scholze: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 35 (2014)
- [12] S. Serej, E. Kellogg, R. Edgar, F. Scholze, G. Ulm: Proc. SPIE **3765**, 777 (1999)
- [13] L. Strüder et al.: A&A **365**, L18 (2001)
- [14] D. D. M. Ferreira, A. C. Jakobsen, F. E. Christensen, B. Shortt, M. Krumrey, J. Garnæs, R. B. Simons: Proc. SPIE **8443**, 84435E (2012)
- [15] M. Krumrey, L. Cibik, P. Müller, M. Bavdaz, E. Wille, M. Ackermann, M. J. Collon: Proc. SPIE **7732**, 77324O (2010)
- [16] G. Vacanti, M. Ackermann, M. Vervest, M. Collon, R. Gunther, C. Kelly, E. Wille, L. Cibik, M. Krumrey, P. Müller: Proc. SPIE **8861**, 88611K (2013)
- [17] D. H. Lumb, F. E. Christensen, C. P. Jensen, M. Krumrey: Opt. Commun. **279**, 101 (2007)
- [18] P. Majewski et al.: Exp. Astron., (2014)
- [19] S. Granato, R. Andritschke, J. Elbs, N. Meidinger, L. Strüder, G. Weidenspointner, M. Krumrey, F. Scholze: IEEE Trans. Nucl. Sci. **60**, 3150 (2013)
- [20] E. Bissaldi et al.: Exp. Astron. **24**, 47 (2009)