

Quellengestützte Radiometrie mit Synchrotronstrahlung

Roman Klein*, Rolf Fliegau, Simone Kroth, Wolfgang Paustian, Mathias Richter, Reiner Thornagel

* Dr. Roman Klein, Arbeitsgruppe „Synchrotronstrahlungsquellen“, E-Mail: roman.m.klein@ptb.de

Einleitung

Quellengestützte Radiometrie bezeichnet das messtechnische Konzept einer Rückführung radio-metrischer Größen auf standardisierte Licht- oder Strahlungsquellen. Schon in der Anfangsphase der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) am Ende des 19. Jahrhunderts war die Entwicklung verlässlicher Lichtquellennormale ein Schwerpunkt der Arbeiten. Die Ableitung des Strahlungsgesetzes für Temperaturstrahler im Jahre 1900 durch Max Planck führte dabei mit dem Temperatur-Hohlraumstrahler zu der Realisierung des ersten primären Strahlernormals in der PTR.

Allerdings umfasst Hohlraumstrahlung auch bei hohen Temperaturen von bis zu 3000 K lediglich den optischen Bereich, d. h. den der Infrarot-(IR-), sichtbaren (VIS) und Ultraviolett-(UV-)Strahlung. In dem angrenzenden Vakuum-UV-(VUV-) und Röntgenbereich nutzt die PTB für quellengestützte Radiometrie daher seit 1982 die Strahlung von

Elektronenspeicherringen [1–3], deren spektrale Strahlstärke im Rahmen der klassischen Elektrodynamik mit der so genannten Schwinger-Gleichung [4] berechenbar ist. Derzeit nutzt die PTB die Elektronenspeicherringe BESSY II und MLS als berechenbare, primäre, nationale Normale. An beiden Speicherringen werden Messplätze betrieben, die die rückführbare Kalibrierung von Strahlungsquellen in den Einheiten von spektraler Strahlstärke und -dichte auf das jeweilige nationale Normal erlauben.

Kalibrierung von Strahlungsquellen

Ein Hauptarbeitsgebiet der quellengestützten Radiometrie in den PTB-Laboratorien bei BESSY II und an der MLS ist die Kalibrierung anderer Strahlungsquellen. Dieses geschieht durch Vergleich mit dem jeweiligen primären Normal. Da die Spektralverteilung der zu vergleichenden Quellen nicht monochromatisch ist, müssen

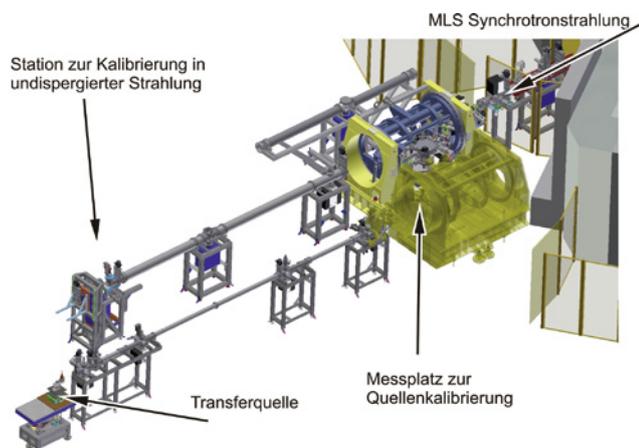


Bild 1. Messplatz für Quellenkalibrierung an der MLS. Links schematische Zeichnung: Der Messplatz kann entweder zur MLS oder zu der zu kalibrierenden Quelle hin ausgerichtet werden. Rechts: Foto mit dem Messplatz ausgerichtet zu der zu kalibrierenden Quelle (Deuteriumlampe), die im Bild unten links zu sehen ist.

wellenlängendispersive Transfersysteme als Strahlungskomparatoren verwendet werden. Bild 1 zeigt als Beispiel den Messplatz für Quellenkalibrierung im PTB-Laboratorium an der MLS, der im Wellenlängenbereich $400 \text{ nm} > \lambda > 7 \text{ nm}$ eingesetzt werden kann [5, 6]. Um diesen großen Spektralbereich abzudecken, stehen sechs Gitter, je drei in senkrechter (NI)- oder streifender (GI)-Geometrie zur Verfügung. Verschiedene optische Konfigurationen für spektrale Teilbereiche, d. h. verschiedene Materialien für Spiegel- und Gitterbeschichtungen sowie der optischen Filter, gewährleisten ein Höchstmaß an spektraler Reinheit bei der Monochromatisierung. Dieser Messplatz kann auf Luftkissen so transferiert werden, dass er entweder die berechenbare Strahlung der MLS sieht oder die Strahlung einer zu kalibrierenden Strahlungsquelle. In der Ausrichtung des Messplatzes befindet sich die jeweilige Strahlungsquelle im selben Abstand von ca. 10 m.

Im Falle der Messung und Kalibrierung des Messplatzes mit Synchrotronstrahlung (SR) wird der Quellpunkt mit einer Ausdehnung von etwa 1 mm über einen ellipsoiden Vorspiegel im Verhältnis 10:1 verkleinert in die Ebene der Eintrittsblende des Monochromators in etwa 10 m Entfernung abgebildet. Eine Apertur vor dem Vorspiegel definiert den akzeptierten Raumwinkel $\Delta\Omega_{SR}$, sodass sich die Messplatzempfindlichkeit $s(\lambda)$ aus dem Signalstrom $i_{SR}(\lambda)$ des Detektors und der über die Schwinger-Gleichung berechenbaren spektralen Strahlstärke $I_{\lambda}^{SR}(\lambda)$ der Synchrotronstrahlung ergibt zu:

$$s(\lambda) = \frac{i_{SR}(\lambda)}{I_{\lambda}^{SR}(\lambda) \Delta\Omega_{SR}}. \quad (1)$$

Die Intensität der Synchrotronstrahlung wird dabei über den gespeicherten Elektronenstrom im Sonderbetrieb des Speicherringes an das Niveau der zu kalibrierenden Strahlungsquellen angepasst. Zur Korrektur von Polarisationsseffekten werden die Messungen darüber hinaus in zwei zueinander orthogonalen Orientierungen der Messplatzebene zur Speicherringebene durchgeführt. Die auf diese Art und Weise mit berechenbarer Synchrotronstrahlung bestimmte Messplatzempfindlichkeit in einer festen optischen Konfiguration ist in der Folge über Monate hinweg stabil und kann für die Kalibrierung von Transferstrahlernormale verwendet werden.

Unter Verwendung einer Eintrittsblende, die so groß ist, dass sie das Abbild der zu kalibrierenden Transferquelle (TS) vollständig erfasst, lassen sich Kalibrierungen bzgl. spektraler Strahlstärke durchführen über:

$$I_{\lambda}^{TS}(\lambda) = \frac{i_{TS}(\lambda)}{s(\lambda) \Delta\Omega_{TS}}. \quad (2)$$

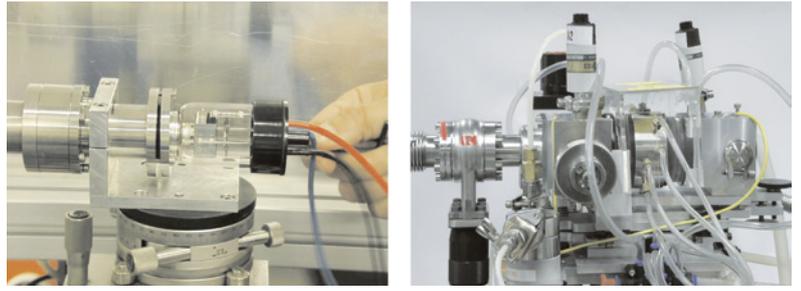


Bild 2:
Deuteriumlampe (links) und Hohlkathodenentladungsquelle (rechts) als Transferstrahlernormale für UV- und VUV-Strahlung.

Da sich am MLS-Messplatz Transferquelle und SR-Quelle im selben Abstand befinden, ist $\Delta\Omega_{TS} = \Delta\Omega_{SR}$. Dabei werden sowohl der Speicherring als auch die Transferquelle als Punktquelle angenommen, was bei den verwendeten Messgeometrien gerechtfertigt ist. Unter derselben Voraussetzung lässt sich aus der gemessenen spektralen Strahlstärke auch die für viele technische Anwendungen wichtige Größe der spektralen Bestrahlungsstärke in einem definierten Abstand r zum Quellpunkt berechnen:

$$E_{\lambda}^{TS}(\lambda) = \frac{I_{\lambda}^{TS}(\lambda)}{r^2}. \quad (3)$$

Betrachtet man dagegen durch Wahl einer kleinen Monochromator-Eintrittsblende nur einen Teilbereich des Quellflecks mit der Fläche ΔA , lassen sich Kalibrierungen bzgl. der über diesen Teilbereich gemittelten spektralen Strahlstärke realisieren, eine Messgröße von eher grundlegender und quellenspezifischer Bedeutung:

$$L_{\lambda}^{TS}(\lambda) = \frac{i_{TS}(\lambda)}{s(\lambda) \Delta\Omega_{TS} \Delta A}. \quad (4)$$

Für den Spektralbereich von UV-Strahlung und den unmittelbar angrenzenden VUV-Bereich haben sich in Industrie und Forschung Deuteriumlampen als geeignete Transferstrahlernormale etabliert (Bild 2). Mit Strahlungsaustrittsfenstern aus Quarz bzw. MgF_2 emittieren diese gekapselten Gasentladungslampen Strahlung mit Wellenlängen bis hinab zu etwa 160 nm bzw. 120 nm. Bild 3 zeigt die gemessene spektrale Strahlstärke einer Deuteriumlampe im Vergleich zu der berechneten spektralen Strahlstärke der MLS. Routinemäßig werden diese Lampen derzeit noch am Messplatz bei BESSY II [7], der den Spektralbereich von 40 nm bis 400 nm abdeckt, im Rahmen von Dienstleistungen kalibriert. Tabelle 1 fasst das entsprechende Unsicherheitsbudget zusammen.

Dass die Spektralverteilung von Synchrotronstrahlung und Deuteriumlampen im UV ähnlich ist in Bezug auf den Anstieg zu

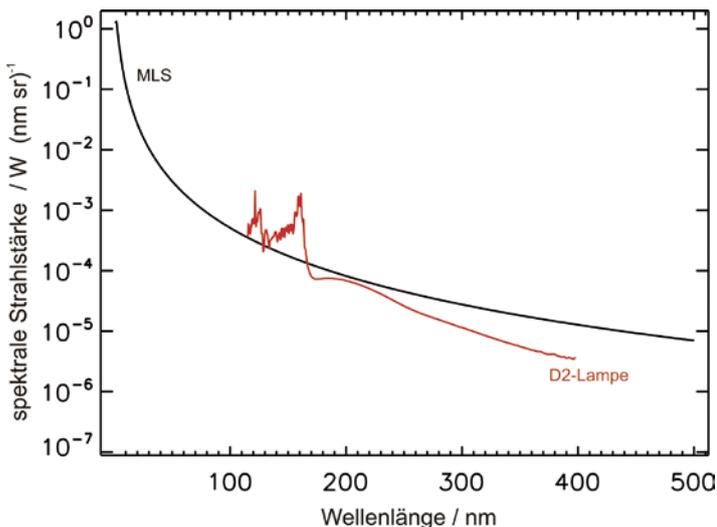


Bild 3: Strahlstärke der MLS (schwarz) und einer Deuteriumlampe (rot). Die MLS wurde bei einem Elektronenstrom von 15 µA betrieben, um eine ähnliche Strahlstärke wie die Deuteriumlampe zur Verfügung zu stellen.

kleinen Wellenlängen hin, erleichtert die Kalibrierung, weil dadurch Probleme durch nicht-lineares Verhalten beim Strahlungsnachweis minimiert werden. Dieses ist nicht der Fall bei der Kalibrierung von Deuteriumlampen gegen berechenbare Temperatur-Hohlraumstrahlung, deren Strahlungsleistung im UV zu kleinen Wellenlängen hin stark abnimmt.

Die verschiedenen quellengestützten UV-Skalen innerhalb der PTB stimmen sehr gut überein, wie in Bild 4 demonstriert. Die hierzu in den letzten Jahren durchgeführten PTB-internen Vergleiche [8] beziehen sich nicht nur auf verschiedene Primärnormale (BESSY I, BESSY II, Hohlraumstrahler) sondern auch auf verschiedene Transfornormale (Deuteriumlampen, Wolfram-Bandlampen) und sogar auf verschiedene radiometrische Messgrößen (Strahlstärke, Strahldichte, Bestrahlungsstärke). Ein bilateraler Vergleich mit dem NIST, wo der Elektronenspei-

Wellenlängenbereich	Spektrale Bandbreite	Relative Messunsicherheit (k = 1)	
		Spektrale Strahldichte	Spektrale Strahlstärke
115,0 nm–120,4 nm	0,8 nm	5 %	5 %
120,5 nm–122,5 nm	0,8 nm	18 %	18 %
122,6 nm–165 nm	0,8 nm	5 %	5 %
165 nm–175 nm	1,6 nm	3,5 %	3,5 %
176 nm–400 nm	1,6 nm	2,5 %	2 %

Tabelle 1: Unsicherheitsbudgets für die Kalibrierung von Deuteriumlampen im PTB-Laboratorium bei BESSY II.

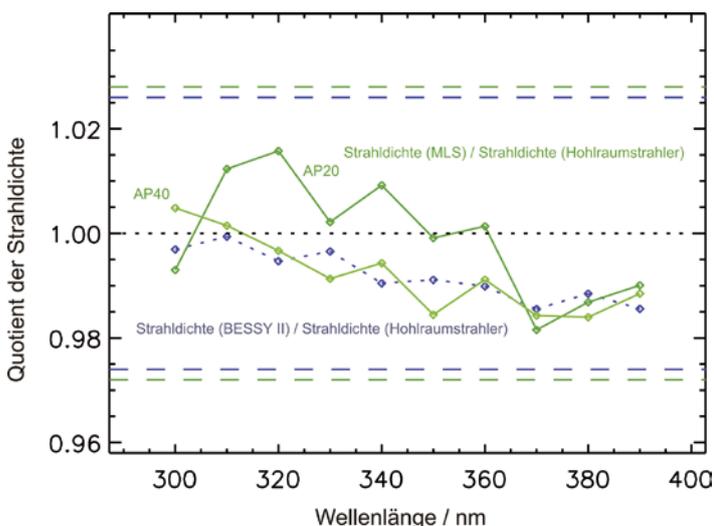


Bild 4: Strahldichtevergleich einer Wolfram-Bandlampe: Aufgetragen ist der Quotient der Kalibrierung jeweils an den Elektronenspeicherringen BESSY II und MLS zu der Kalibrierung gegen einen Hohlraumstrahler. Die waagerechten Linien verdeutlichen die kombinierte relative Standardmessunsicherheit des jeweiligen Vergleichs. An der MLS wurde die Strahldichte mit zwei verschiedenen Eingangsaperturen (AP20 und AP40) gemessen.

cherring SURF III als primäres Strahlernormal genutzt wird, ergab eine gute Übereinstimmung der Skalen [9]. Bild 5 zeigt den Vergleich einer Deuteriumlampenkalibrierung am Messplatz bei BESSY II und dem neuen Messplatz an der MLS [6]. Mit dem stark erweiterten Spektralbereich dieses neuen Messplatzes und der Rückführung auf die MLS als nationales Normal, wird die hohe Kompetenz der PTB auf dem Gebiet der Kalibrierung von Strahlungsquellen im UV und VUV weiter ausgebaut. Die hohe Flexibilität in der Wahl der Betriebsparameter der MLS erlaubt die Schaffung optimierter Messbedingungen für die jeweilige Kalibrieraufgabe. Durch die freie Wahl der Elektronenenergie bei der MLS zwischen 105 MeV und 630 MeV lässt sich das Synchrotronstrahlungsspektrum an das jeweilige Messproblem anpassen, sodass die Kalibrierung von Strahlungsquellen frei von Anteilen höherer Monochromator-Ordnungen und Falschlicht auch unterhalb von 40 nm möglich ist.

Für den kürzerwelligen Spektralbereich als den von Deuteriumlampen abgedeckten stehen der PTB im Wesentlichen Transferquellen, die auf Edelgasemissionslinien einer offenen Hohlkathodenentladungsquelle (Bild 2) basieren, zur Verfügung, die insbesondere im Rahmen wissenschaftlicher Kooperationen für die Kalibrierung von Sonnenteleskopen eingesetzt werden [10–15]. Im Rahmen von Forschungsk Kooperationen werden auch neuartige Quellen kalibriert. Bild 6 zeigt z. B. die im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gemessene Strahlstärke eine Gasjet-Quelle [16]. Bei dieser Quelle wird ein Jet aus Edelgas durch Elektronenstoß angeregt. Sie wird in einem VUV-Sonnensimulator eingesetzt, der den erdbasierten Test von Weltrauminstrumentierung erlaubt.

Kalibrierung mit direkter, undispergierter Strahlung

Wellenlängendispersive Spektrometer aber auch energiedispersive Röntgendetektoren wie Halbleiterdetektoren aus mit Lithium gedriftetem Silizium (Si(Li)-Detektoren) oder High-Purity-Germanium (HPGe-Detektoren) erlauben Synchrotronstrahlung spektral aufgelöst nachzuweisen. Daher lassen sie sich, in Analogie zu den oben beschriebenen Messplätzen für Quellenkalibrierung, im direkten Strahl berechenbarer Synchrotronstrahlung kalibrieren. Die relative Unsicherheit in der Berechnung der spektralen Strahlungsleistung ist dabei im Bereich weniger 10^{-3} oder darunter [1]. Durch die Nutzung von BESSY II und MLS als

berechenbare Quellen über einen breiten Spektralbereich hat die PTB auf dem Gebiet der Kalibrierung wellenlängendispersiver Systeme oder energiedispersiver Röntgendetektoren mit ihren Messmöglichkeiten eine weltweit führende Stellung und liefert Kalibrierungen höchster Präzision für internationale Kunden [17].

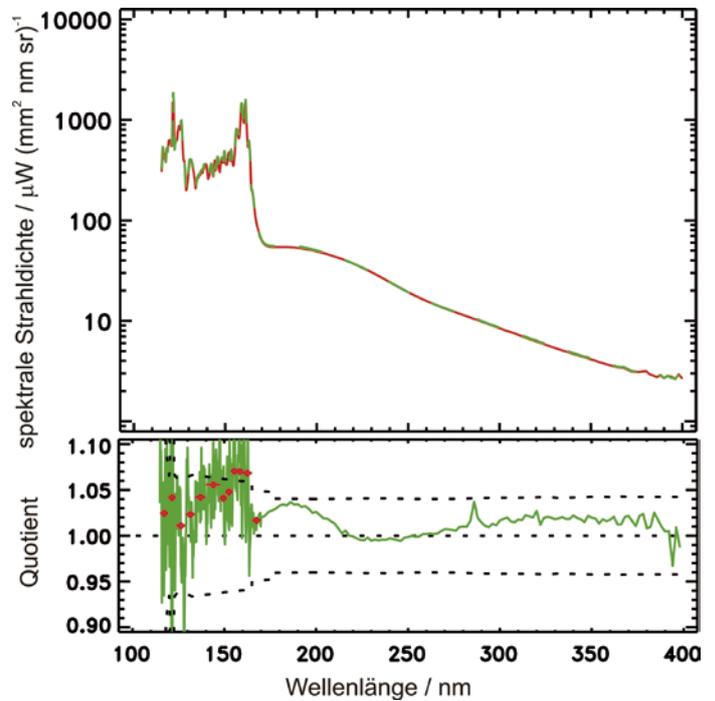


Bild 5: Spektrale Strahlstärke einer Deuteriumlampe gemessen am Quellenmessplatz bei BESSY II (rot) und an der MLS (grün). Unten: Quotient der beiden Kalibrierungen. Die gestrichelte Linie verdeutlicht die kombinierte relative Standardmessunsicherheit. Die roten Punkte sind über Liniengruppen gemittelte Werte.

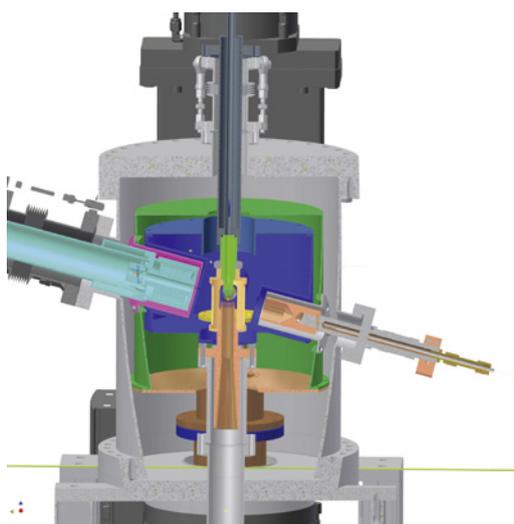
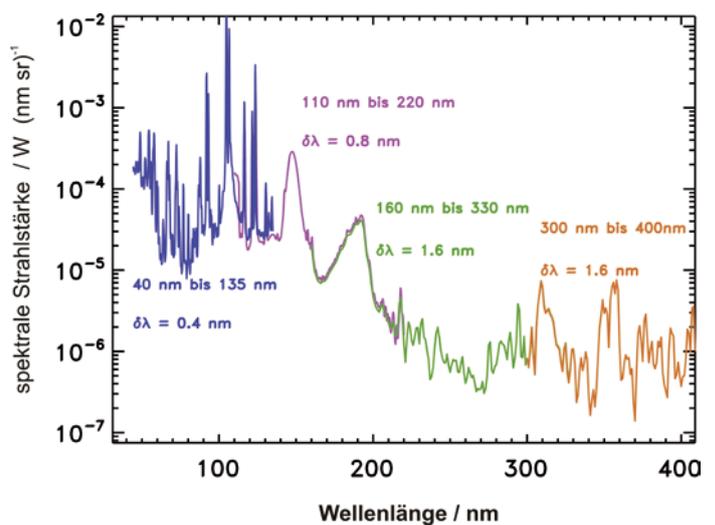


Bild 6: Links: Gasjet-VUV-Quelle, bei der ein Edelgasjet (von oben nach unten) durch Elektronenstoß (von links nach rechts) angeregt wird. Rechts: Strahlstärke der Gasjet-VUV-Quelle, gemessen am Quellenmessplatz bei BESSY II. Die verschiedenen Farben kennzeichnen die verschiedenen Messplatzkonfigurationen für den jeweiligen Wellenlängenbereich und spektrale Auflösung ($\delta\lambda$) [16].



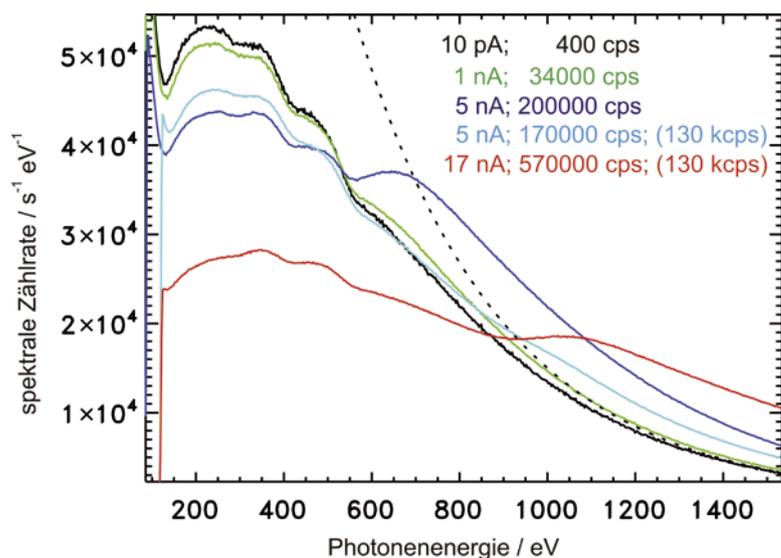


Bild 7:
Charakterisierung eines Silizium-Drift-Detektors an der MLS: Die gestrichelte Linie zeigt den berechneten, einfallenden Photonfluss der primären Quelle MLS, die farbigen Kurven zeigen die gemessenen Spektren bei verschiedenen einfallenden Photonennraten, die sich über den gespeicherten Elektronenstrom variieren lassen. Alle Spektren sind auf den Elektronenstrom von $1\mu\text{A}$ normiert. Die hellblau und rot gezeichneten Kurven sind mit einer geänderten Einstellung der Detektorelektronik (130 kcps) gemessen, die für hohe Zählraten optimiert ist.

Bild 7 zeigt die Charakterisierung eines Silizium-Drift-Detektors (SDD) an der MLS, die bei verschiedenen Elektronenströmen betrieben wurde. Auch hier lassen sich, neben der Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit, wichtige Eigenschaften, wie z. B. Pile-up-Verhalten durch Variation des einfallenden Photonennflusses untersuchen. Beispiele für die Kalibrierung weiterer Röntgendetektoren bei BESSY II sind in [18] gegeben. Im höherenergetischen Spektralbereich können darüber hinaus Messungen an einem Wellenlängenschieber (WLS) [19] durchgeführt werden, der gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) genutzt wird. Hier ist die primäre Strahlungsverteilung deutlich härter und man erhält entsprechend höhere Zählraten bei hoher Energie. Anwendung finden die so kalibrierten energiedispersiven Detektoren z. B. in der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse [20].

Durch die Inbetriebnahme eines großen Vakuumtanks lassen sich an der MLS auch große Spektrographen direkt mit der berechenbaren Synchrotronstrahlung charakterisieren. Dies geschieht z. B. im Rahmen von Kooperationen für Weltraummissionen wie in [15] aufgeführt. Für die Unterdrückung oder Abschätzung des Einflusses höherer Beugungsordnungen ist dazu, wie oben beschrieben, die Flexibilität in der Wahl der Elektronenenergie sehr wichtig. Darüber hinaus erlaubt die große Dynamik in der Variation der Strahlstärke die Untersuchung der Linearität der

verwendeten Detektionssysteme. Oft messen Spektrographen für Sonnenmissionen Emissionslinien hoch geladener Ionen, die sehr unterschiedliche Intensitäten haben. Das Intensitätsverhältnis wiederum erlaubt Rückschlüsse auf sonnenphysikalische Eigenschaften. Die Kalibrierung des SPICE-Spektrographen der Solar-Orbiter-Mission wird auf diese Weise mit der direkten, berechenbaren Strahlung der MLS erfolgen [21].

Literaturverzeichnis

- [1] R. Klein, R. Thornagel, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 7 (2014)
- [2] R. Thornagel, R. Klein, G. Ulm: Metrologia **38**, 385 (2001)
- [3] R. Klein et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams **11**, 110701 (2008)
- [4] J. Schwinger: Phys. Rev. **75**, 1912 (1949)
- [5] M. Richter, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [6] R. Thornagel, R. Klein, S. Kroth, W. Paustian, M. Richter: **51** Metrologia, 528 (2014)
- [7] M. Richter, J. Hollandt, U. Kroth, W. Paustian, H. Rabus, R. Thornagel, G. Ulm: Nucl. Instr. and Meth. **467–468**, 605 (2001)
- [8] M. Richter, J. Hollandt, U. Kroth, W. Paustian, H. Rabus, R. Thornagel, G. Ulm: Metrologia **40**, 107 (2003)
- [9] U. Arp et al.: Metrologia **48**, 261 (2011)
- [10] K. Danzmann, M. Günther, J. Fischer, M. Kock, M. Kühne: Appl. Opt. **27**, 4947 (1988)
- [11] J. Hollandt, M. C. E. Huber, M. Kühne: Metrologia **30**, 381 (1993)
- [12] J. Hollandt, M. Kühne, B. Wende: Appl. Opt. **33**, 68 (1994)
- [13] M. Richter, A. Gottwald, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: Advances in Space Research **37**, 265 (2006)
- [14] M. Richter, A. Gottwald, M. Krumrey, W. Paustian, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **115**, 218 (2005)
- [15] A. Gottwald, R. Klein, M. Krumrey, P. Müller, W. Paustian, T. Reichel, F. Scholze, R. Thornagel: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 30 (2014)
- [16] M. Sznajder, T. Renger, A. Witzke, U. Geppert, R. Thornagel: Advances in Space Research **52**, 1993 (2013)
- [17] M. Krumrey, F. Scholze, G. Ulm: Proc. SPIE **5501**, 277 (2004)
- [18] W. Paustian, M. Richter, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **115**, 181 (2005)
- [19] R. Klein, G. Brandt, L. Cibik, M. Gerlach, M. Krumrey, P. Müller, G. Ulm, M. Scheer: Nucl. Instr. Meth. **A580**, 1536 (2007)
- [20] M. Müller et al.: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 4 i. Vb., (2014)
- [21] A. Fludra et al.: Proc. SPIE **8862**, 88620F (2013)