

Empfängergestützte Radiometrie mit Kryoradiometern und monochromatisierter Synchrotronstrahlung

Alexander Gottwald*, Udo Kroth, Michael Krumrey, Peter Müller, Frank Scholze

Einleitung

Empfängergestützte Radiometrie basiert auf der Verwendung primärer Empfängernormale für die Messung absoluter Strahlungsleistungen. In der optischen Radiometrie haben sich für diesen Zweck seit ihrer Einführung vor über 100 Jahren [1] elektrisch kalibrierte Substitutionsradiometer etabliert. Diese sind thermische Empfänger, die auf der Äquivalenz von elektrischer Heizung und Strahlungserwärmung eines Hohlraumabsorbers basieren. In den 1980er-Jahren wurde durch den Betrieb bei der Temperatur von flüssigem Helium (Kryoradiometer) und in Verbindung mit Lasern die Messunsicherheit deutlich reduziert [2–7]. Kryoradiometer werden von vielen metrologischen Staatsinstituten zur Darstellung der Skala der spektralen Empfindlichkeit von Photoempfängern (Detektoren) vom infraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich genutzt, wobei sich die kleinsten relativen Unsicherheiten im Bereich von 10^{-4} in der Kombination mit intensitätsstabilisierten Lasern als Strahlungsquellen erreichen lassen [8].

In den Spektralbereichen der Vakuum-Ultraviolett-(VUV), Extrem-Ultraviolett-(EUV), und Röntgen-Strahlung, wo keine Laser existieren, bietet monochromatisierte Synchrotronstrahlung aus Speicherringen sehr gute Voraussetzungen für die empfängergestützte Radiometrie, insbesondere wegen der breitbandigen Abstrahlung und der dadurch (in Kombination mit geeigneten Monochromatoren) kontinuierlichen Durchstimmbarkeit der Wellenlänge. Im Unterschied zur Laserstrahlung, bei der typischerweise Strahlungsleistungen von einigen Milliwatt genutzt werden können, beträgt die an Ablenk magnetstrahlrohren zur Verfügung stehende Leistung der monochromatisierten Strahlung jedoch höchstens $50 \mu\text{W}$, teilweise auch weniger als $1 \mu\text{W}$. Die Stabilität der Synchrotronstrahlung ist nicht durch stochastische Schwankun-

gen begrenzt, sondern durch den gleichmäßigen, annähernd exponentiellen Abfall des Elektronenstroms im Speicherring mit typischen Zeitkonstanten im Bereich einiger Stunden. Im Gegensatz zu diesem so genannten *decay mode* ist an vielen Speicherringen (so auch bei BESSY II) heutzutage ein Betrieb im *top-up mode* möglich, bei dem der Elektronenstrom annähernd (besser als 1 %) konstant gehalten wird. Für das Erreichen kleiner Unsicherheiten in der Strahlungsleistungsmessung ist es im *decay mode* nötig, die Messungen bei relativ niedrigen Strahlungsleistungen innerhalb weniger Minuten durchzuführen. Deshalb wurden hier lange Zeit Ionisationskammern als primäre Empfängernormale eingesetzt [9]. Diese erlauben Messungen der Strahlungsleistung jedoch lediglich mit relativen Unsicherheiten von einigen Prozent [10].

Konventionelle Kryoradiometer sind nur nach erheblichen Anpassungen für Messungen mit Synchrotronstrahlung geeignet. Die PTB hat in ihrem Laboratorium zuerst am Speicherring BESSY I [11], seit 1999 bei BESSY II [12], und seit 2008 auch an der *Metrology Light Source* (MLS) [13] die empfängergestützte Radiometrie mit Synchrotronstrahlung auf der Basis von speziell angepassten Kryoradiometern kontinuierlich entwickelt und verbessert. Inzwischen kann diese Technik als etabliert angesehen werden und wird mittlerweile auch von anderen Staatsinstituten wie NIST und NMIJ verwendet [14, 15]. Gestützt auf Kryoradiometer als primäre Empfängernormale und unter Nutzung monochromatisierter Synchrotronstrahlung verfügt die PTB über eine Skala der spektralen Empfindlichkeit vom UV- bis in den Röntgenbereich [16–19]. Die Weitergabe der Skala erfolgt durch gegen das Primärnormal kalibrierte Halbleiterphotodioden, wobei je nach Spektralbereich unterschiedliche Photodiodentypen als sekundäre Empfängernormale zum Einsatz kommen.

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

Die PTB-Kryoradiometer für Synchrotronstrahlung

Die PTB verfügt über zwei speziell für die Nutzung mit monochromatischer Synchrotronstrahlung entwickelte Kryoradiometer [20–22]. Diese SYRES I bzw. II (*SYnchrotron Radiation Electrical Substitution Radiometer*) genannten thermischen Empfänger auf der Basis eines Hohlraumabsorbers werden bei Temperaturen geringfügig oberhalb des Siedepunktes von flüssigem Helium betrieben. Beide Systeme sind fensterlos und somit direkt mit den Strahlrohren für Synchrotronstrahlung [23, 24] unter Ultra-Hochvakuumbedingungen verbunden. Durch die Verwendung eines metallischen Hohlraumabsorbers erreicht man gegenüber anderen Absorbertypen (z. B. Scheibenabsorbern)

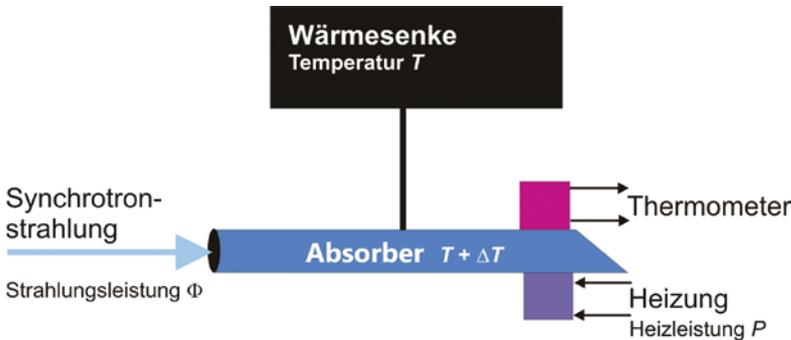


Bild 1: Schematische Darstellung eines elektrischen Substitutions-Kryoradiometers mit dem Hohlraumabsorber-Modul

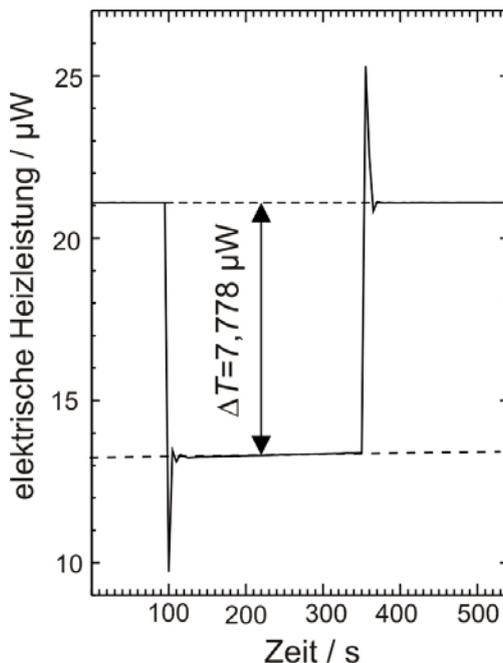


Bild 2: Beispiel einer Strahlungsleistungsmessung mit dem Kryoradiometer SYRES II im Substitutionsmodus: 100 s nach Beginn der Messung fällt für 240 s die zum messende Strahlungsleistung auf den Absorber, wodurch die ursprünglich angewandte elektrische Heizleistung von der Regelelektronik um den Betrag der absorbierten Strahlungsleistung (hier: 7,778 μW) reduziert wird.

einen hohen Absorptionsgrad bei gleichzeitiger effektiver Unterdrückung von Sekundäreffekten wie Photoemission oder Fluoreszenz. Die metallischen Absorber haben zwar wegen des Beitrags der Leitungselektronen eine höhere Wärmekapazität als Isolatoren, verhindern aber nicht-thermische Energieverluste wie zum Beispiel die Bildung von Farbzentren in isolierenden Absorberrn wie Saphir.

Bild 1 zeigt schematisch die wesentlichen Komponenten des Kryoradiometers: Bei einem elektrischen Substitutionsradiometer wird ein Strahlungsabsorber der Wärmekapazität C über einen Wärmewiderstand R an eine Wärmesenke der Temperatur T angekoppelt, welche mittels einer elektronischen Regelung konstant gehalten wird. Die Wärmesenke ist in thermischem Kontakt mit einem Heliumbad-Kryostaten. Bei Bestrahlung mit der Strahlungsleistung Φ erhöht sich die Temperatur des Absorbers gegenüber der ursprünglichen Temperatur um ΔT . Die Zeitkonstante $\tau = R \times C$ der Temperaturänderung ist durch die Wärmekapazität C des Absorbers und den Wärmewiderstand R der Ankopplung gegeben, die absolute Temperaturänderung (Sensitivität) jedoch nur durch den Wärmewiderstand $R = \Delta T / \Phi$. Die gleiche Temperaturerhöhung kann durch elektrische Heizung herbeigeführt werden, d. h. die Strahlungsleistung Φ kann durch elektrische Heizleistung P substituiert werden. Diese Substitution basiert auf der Annahme der Äquivalenz von elektrischer und Strahlungsheizung. Grundsätzlich werden die Radiometer im so genannten dynamischen Substitutionsmodus betrieben: Die Temperatur des Absorbers wird bereits vor der Bestrahlung durch Zuführung elektrischer Heizleistung P vom Widerstandsheizelement auf einen Wert $(T + \Delta T)$ konstant eingeregelt. Wird nun die zu bestimmende Strahlungsleistung Φ absorbiert, muss die elektrische Heizleistung um genau den Betrag der Strahlungsleistung vermindert werden, um die Temperatur konstant zu halten (Bild 2). Die Messung der Strahlungsleistung ist damit rückgeführt auf eine Differenzmessung der elektrischen Heizleistung bzw. der damit verbundenen elektrischen Größen.

Für die Anpassung an die Bedingungen speziell bei der Nutzung von Synchrotronstrahlung sind gegenüber herkömmlichen Kryoradiometern mit Hohlraumabsorberrn einige wesentliche Modifikationen notwendig, insbesondere im Hinblick auf die Empfindlichkeit und zur Unterdrückung des thermischen Strahlungsuntergrundes. Wegen der relativ geringen verfügbaren Strahlungsleistungen, muss der Wärmewiderstand R hoch sein, um eine hinreichende Empfindlichkeit im Bereich einiger zehn $\text{mK}/\mu\text{W}$ zu erreichen. Gleichzeitig muss die Wärmekapazität klein sein, um eine vertretbar kleine Zeitkonstante τ im Bereich von weniger als einer Minute zu erreichen. Die Anpassungszeit

muss hinreichend kurz sein, um die Änderung der Strahlintensität durch den monoton abfallenden Ringstrom im Speicherring geringer als die angestrebte Messunsicherheit zu halten. Zur Umsetzung dieser Anforderungen sind die Hohlraumabsorber der Kryoradiometer aus elektrolytisch geformtem Kupfer mit einer Wandstärke von etwa 100 μm gefertigt. Um einen hohen Wert für den Wärmewiderstand in der Ankopplung an die Wärmesenke zu erreichen, ist der Absorber an dünnen Nylonfäden aufgehängt. Die definierte Wärmeankopplung ist durch einen Kupfer- bzw. Konstantandraht realisiert, wobei durch Anpassen der Länge der Wärmewiderstand in gewissem Rahmen variiert werden kann.

Die erreichbare Unsicherheit in der Bestimmung der Strahlungsleistung ist durch das Vermögen des Absorbers begrenzt, die auf ihn treffende Strahlung vollständig zu absorbieren (d. h. eine Emissivität nahe 1 zu besitzen), und verlustfrei in Wärme umzuwandeln. Während im UV- und VUV-Spektralbereich die Reflexion der Strahlung an der Oberfläche des Absorbers den wesentlichen zu berücksichtigen Verlustfaktor darstellt, treten im Röntgenbereich die Transmissionsverluste (durch eine nicht ausreichende Wandstärke) sowie Fluoreszenz- und Streuprozesse in den Vordergrund. Um im Bereich der Röntgenstrahlung Messungen bei Photonenenergien von bis zu 60 keV zu ermöglichen, wurde der 40 mm lange, zylinderförmige Hohlraumabsorber, dessen Wand aus 90 μm dickem Kupfer mit einer ca. 1 μm dicken Goldschicht besteht, mit einer 730 μm dicken massiven Goldplatte als Rückwand abgeschlossen, welche um 30° zur Senkrechten geneigt ist (Bild 3a) [23]. Dieser Absorber wird im SYRES-I-Instrument eingesetzt und ermöglicht die radiometrische Rückführung von empfangergestützten Kalibrierungen im Photonenenergiebereich zwischen 30 eV und 60 keV. Das SYRES-II-Radiometer hingegen ist dediziert für den Photonenenergiebereich zwischen 3 eV und 30 eV (entsprechend Wellenlängen von 400 nm bis 40 nm) entwickelt worden. Rückplatte und zylindrische Wände des Hohlraumabsorbers haben hierbei eine annähernd gleiche Wandstärke; das Kupfer ist ebenfalls mit einer ca. 1 μm dicken Goldschicht überzogen. Diese soll eine möglichst hohe gerichtete (spekulare) Reflexion erzeugen. Mit einer Länge von 80 mm ist der Hohlraumabsorber doppelt so lang wie der im Röntgenbereich verwendete. Zusätzlich ist am Eintritt ein sogenannter Retro-Reflektor installiert, der aus zwei mit der Basis gegeneinandergesetzten Kegelstümpfen mit 30° Schräge und insgesamt 9 mm Länge besteht (Bild 3b) [16]. Durch diese Geometrie wird ein an der Rückwand des Absorbers gänzlich gerichtet reflektierter Strahl wieder in den Hohlraum reflektiert. Ein Verlassen des Hohlraums

ist erst nach mehr als 15 Reflexionen an der Oberfläche möglich. Bei einem angenommenen Reflexionsgrad von 0,4 sind somit die Reflexionsverluste kleiner als 10^{-6} . Bei beiden verwendeten Absorbern sind der elektrische Heizer und ein Germanium-Widerstandsthermometer auf der abgeschrägten Rückwand von außen angebracht. Um die Äquivalenz von elektrischer Heizung und Heizung durch Strahlung möglichst gut zu gewährleisten, müssen unkontrollierte Wärme-flüsse unterdrückt werden. Der Strahlungsabsorber (Hohlraumabsorber) befindet sich im Hochvakuum, um Wärmeableitung durch Konvektion auszuschließen. Wärmestrahlung spielt in diesen Temperaturbereichen ebenfalls keine Rolle für den Wärmetransport. Die Zuleitungen für Heizer und Widerstandsthermometer bestehen aus supra-leitenden Materialien, sodass darin im Bereich der Arbeitstemperaturen kaum Joule'sche Wärme erzeugt wird. Darüber hinaus ist eine inhomogene Temperaturverteilung durch die bei diesen tiefen Temperaturen hohe Wärmeleitfähigkeit des Absorbentmaterials minimiert.

Da sich die Strahlrohre auf Umgebungstemperatur befinden, fällt aus dem Halbraum eine Infrarot-Strahlungsleistung von einigen Milliwatt auf den Absorber. Das gesamte Absorbermodul muss daher von einem gekühlten Kryokollimator umgeben sein, um den Raumwinkel für die einfallende Infrarotstrahlung annähernd auf den der Synchrotronstrahlung zu reduzieren. Bei SYRES II kann darüber hinaus das Absorbermodul mit dem zugehörigen Kryostaten unter Vakuum vertikal aus dem Strahlengang gehoben werden, um Messungen mit dem Absorber und dem zu kalibrierenden Detektor an exakt der gleichen Strahlposition durchzuführen. Dadurch wird sichergestellt, dass auf das primäre Empfängernormal und den zu kalibrierenden Detektor auch exakt die gleiche Strahlungsleistung einfällt, unabhängig von Divergenz und Streulichthalo des Strahls.

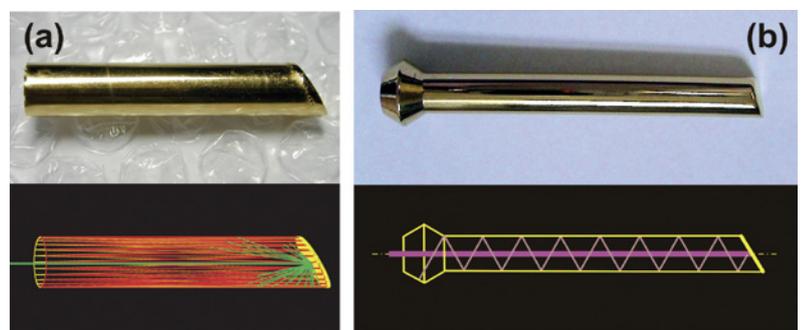


Bild 3:

Hohlraumabsorber der beiden SYRES-Kryoradiometer.

(a) SYRES-I-Absorber, Länge $l = 40$ mm, Durchmesser $d = 8$ mm; oben: Foto, unten: simulierte Röntgenstreuung- und Fluoreszenz [23].

(b) SYRES-II-Absorber $l = 80$ mm, $d = 8$ mm; oben: Foto, unten: geometrischer Strahlengang für direkte (spekulare) Reflexion des einfallenden Strahls [16].

Kalibrierung von Transferempfängernormalen

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Kryoradiometer werden in den Laboratorien der PTB bei BESSY II und an der MLS als primäre Empfängernormale zur Messung der spektralen Empfindlichkeit von Transferempfängernormalen eingesetzt [16–19, 25–32]. Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich des gemessenen Photostromes des Transferempfängers mit der einfallenden Strahlungsleistung, die mit dem Kryoradiometer gemessen wird. Durch Einsatz monochromatisierter Synchrotronstrahlung wird von der PTB eine Skala der spektralen Empfindlichkeit vom ultravioletten Spektralbereich bis in das Röntgengebiet dargestellt (Bild 4, oben). Sie ist auf je nach Spektralbereich unterschiedlichen Empfängertypen (Halbleiterphotodioden) abgelegt. Die hier verwendeten Detektoren sind fensterlose Halbleiterphotodioden, einerseits vom Schottky-Typ (PtSi-nSi-Photodioden) [31], andererseits vom nSi-pSi-Typ oder *Passivated-Implanted-Planar-Silicon*-Detektoren [23]. Für die Wahl der Detektoren ausschlaggebend sind Aspekte wie Bestrahlungsstabilität, Linearität und Homogenität über die Detektorfläche [30, 31]. Abhängig vom Detektortyp und noch wesentlich vom Wellenlängenbereich und der daraus resultierenden Instrumentierung ergeben sich unterschiedliche Unsicherheiten für die Skala bzw. für die Kalibrierung von Transferempfängernormalen (Tabelle 1). Im UV-, VUV- und weichen Röntgenbereich rührt der größte Beitrag zur Gesamtunsicherheit von den Falschlichtanteilen der monochromatisierten Synchrotronstrahlung her. Diese Anteile unterscheiden sich stark je nach der optischen Konfiguration der Strahlrohre in den Unterspektralbereichen (Filter, Gitter, etc.), sodass die erreichbare Messunsicherheit unterschiedlich ist und sich an den jeweiligen Bereichsgrenzen auch sprunghaft

ändert (Bild 4 unten und Tabelle 1).

Die so dargestellte Skala der spektralen Empfindlichkeit ist durch interne und externe Vergleiche validiert worden. So wurde SYRES II als primäres Empfängernormal direkt gegen den Speicherring MLS als primäres Strahlernormal verglichen [33, 34], während für SYRES I im weichen Röntgenbereich hierzu der Weg über einen energiedispersiven Si(Li)-Detektor als Transferstandard gegangen wurde [35]. Weitere empfangergestützte Vergleiche wurden durchgeführt gegen ein anderes primäres Detektornormal, eine Freiluft-Ionisationskammer [23] sowie mit Halbleiter-Photodioden gegen die radiometrischen Skalen anderer Staatsinstitute [36–38].

Bei der Weitergabe der Skala tragen auch die Eigenschaften der Detektoren, insbesondere die Homogenität der Empfindlichkeit über die Detektorfläche, wesentlich zur Unsicherheitsbilanz bei. Die Bestrahlungsstabilität und allgemeine Alterung der Transferdetektoren stellt ein prinzipielles Problem bei der Weitergabe der Skala dar und hängt dabei nicht nur vom Detektortyp, sondern auch von der Wellenlänge und Leistung der einfallenden Strahlung ab. Die Alterung eines Detektors betrifft dabei sowohl die Homogenität als auch die spektrale Empfindlichkeit [39, 40]. Als besonders relevant zeigt sich hierbei die Alterung von Halbleiter-Photodioden im Wellenlängenbereich des VUV, speziell bei Wellenlängen zwischen etwa 50 nm und 150 nm [41, 42]. Die Ursache dafür liegt in der hohen Strahlungsabsorption aller Materialien in diesem Wellenlängenbereich, sodass die Eindringtiefe der Strahlung nur wenige Nanometer beträgt. Die gesamte Energie der auftreffenden Photonen wird somit in der dünnen Deckschicht des Empfängers absorbiert. Dies bedeutet einerseits, dass die Qualität der Deckschicht (Gleichförmigkeit, Fehlen von Strukturfehlern) wesentlich die Eigenschaften des Detektors bestimmt, andererseits, dass diese Deckschicht

Tabelle 1: Zusammenstellung wesentlicher Unsicherheitsbeiträge für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit einer Photodiode gegen ein Kryoradiometer bei vier ausgesuchten Photonenergien an den benannten Strahlrohren [24]. Angegeben ist jeweils die Standard-Messunsicherheit.

Größe	Relative Standardmessunsicherheit der spektralen Empfindlichkeit ($k = 1$) / %			
	4 eV (NIM)	95 eV (SX700)	5 keV (FCM)	15 keV (BAMline)
Strahlungsleistung	0,14	0,11	0,13	0,13
Messsignal (Photostrom)	0,10	0,10	0,10	0,20
Kalibrierfaktor des Elektrometers	0,03	0,06	0,01	0,01
Wellenlängen	0,02	0,01	0,01	0,02
Spektrale Bandbreite	0,008	0,001	0,001	0,001
Streulicht, Falschlicht	0,15	0,2	<0,001	<0,001
Spektrale Empfindlichkeit	0,25	0,26	0,17	0,25

starken Alterungsprozessen durch Bestrahlungsschäden ausgesetzt ist. Von den Alterungsprozessen zu unterscheiden sind Veränderungen der spektralen Empfindlichkeit durch Verunreinigung der Detektoroberflächen. Insbesondere werden bei einer genügend hohen Energie der Photonen (größer als ca. 10 eV, entsprechend Wellenlängen kleiner als 120 nm) Sekundärelektronen aus der Detektoroberfläche ausgelöst, deren kinetische Energie ausreicht, um oberflächenabsorbierte Kohlenwasserstoffe chemisch aufzubrechen und so eine stetig aufwachsende, stark absorbierende Kohlenstoffschicht zu erzeugen.

Silizium-Photodioden finden weite Anwendung als radiometrische Sekundärnormale. Aufgrund der fortgeschrittenen Herstellungstechniken können diese Photodioden in ihrer spektralen Empfindlichkeit den theoretisch maximalen Wert erreichen. Ein natürliches Oxidwachstum ist bei Silizium allerdings unvermeidbar, daher wird grundsätzlich ein technisch erzeugtes, ggf. nitridiertes Oxid als Deckschicht zur Passivierung aufgebracht. Photodioden für den sichtbaren und nahen UV-Spektralbereich können dabei sogar dicke (einige 10 nm bis 100 nm) Oxidschichten mit Antireflexionseigenschaften haben. Für die noch kürzerwelligen Bereiche sind allerdings nur Diodentypen mit ultradünnen (wenige nm) Passivierungsschichten geeignet, damit überhaupt noch genügend Elektron-Loch-Paare in der Verarmungszone erzeugt werden, welche dann zu einem messbaren Signal führen. Die Oxid-Passivierungsschicht selbst ist elektrisch nicht-leitend. Die Strahlung führt durch den (äußeren) Photoeffekt zu einer elektrischen (positiven) Aufladung der Deckschicht im Bereich der Bestrahlung, wodurch die Empfindlichkeit der Photodiode verändert wird. Die Verwendung einer Metallsilizid-Deckschicht anstelle des Oxids zur Passivierung schafft hier zwar Abhilfe [43], reduziert aber die spektrale Empfindlichkeit im relevanten Spektralbereich um beinahe eine Größenordnung wegen der höheren Absorption in der Deckschicht. Schottky-Photodioden (mit Platinsilizid als metallischem Kontakt) [31] erweisen sich zwar gegenüber Bestrahlung als sehr unempfindlich, ihre elektrischen Eigenschaften (niedriger Innenwiderstand) machen sie jedoch nur eingeschränkt geeignet zur Messung kleiner Photoströme. Dioden mit unterschiedlichen Implantat-Ionen (z. B. Phosphor, Arsen oder Bor) und -Profilen sind zwar im Prinzip schon seit Langem bekannt [44], allerdings erzeugen herkömmliche Implantierungstechniken keine genügend schmalen Verarmungszonen. Erst seit einigen Jahren können entsprechende Techniken in Halbleiterlaboratorien beherrscht werden, sodass Photodioden für den VUV-Spektralbereich mit hoher Empfindlichkeit bei gleichzeitig hoher Bestrahlungsbeständigkeit verfügbar werden [45].

Neben den auch intern als Transferstandards verwendeten Halbleiter-Photodioden werden auch andere Strahlungsempfängertypen kalibriert, so zum Beispiel Vakuum-Photokathoden, Photomultiplier und Bolometer [46]. Auch ortsaufgelöste Kalibrierungen von bildgebenden Detektoren, wie zum Beispiel *Charged Coupled Devices* (CCD) [47] oder Sensoren mit einzeln auslesbaren Pixeln (*Active Pixel Sensors*, APS [48]) sind möglich. Für die Messung von hochintensiver, gepulster Strahlung von Freie-Elektronen-Lasern wurden auch speziell entwickelte, auf der atomaren Photoionisation von (Edel-)Gasen beruhende Detektoren rückführbar auf ein Kryoradiometer kalibriert [49, 50].

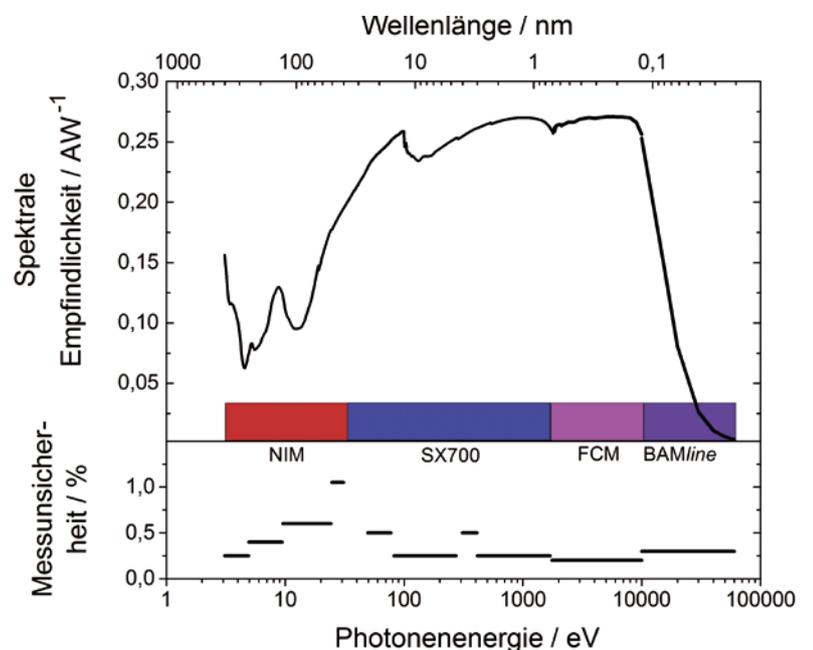


Bild 4: Die PTB-Skala der spektralen Empfindlichkeit, wie sie durch den Einsatz monochromatisierter Synchrotronstrahlung und elektrischer Substitutions-Kryoradiometer dargestellt wird, und auf je nach Photonenergiebereich verschiedenen (hier nicht einzeln hervorgehobenen) Silizium-Halbleiterphotodioden abgelegt ist (oben), sowie die zugehörigen relativen Standard-Messunsicherheiten in der Weitergabe (Kalibrierung von Transfernormalen). Die Abkürzungen bezeichnen die Spektralbereiche der verschiedenen verwendeten Strahlrohre [24], vgl. Tabelle 1.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Kurlbaum: *Ann. Phys.* **287**, 591 (1894)
- [2] T. J. Quinn, J. E. Martin: *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **316**, 85 (1985)
- [3] J. E. Martin, N. P. Fox, P. G. Key: *Metrologia* **21**, 147 (1985)
- [4] N. P. Fox: *Metrologia* **32**, 535 (1995-1996)
- [5] T. J. Quinn, J. E. Martin: *Metrologia* **28**, 155 (1991)
- [6] T. R. Gentile, J. M. Houston, J. E. Hardis, C. L. Cromer, A. C. Parr: *Appl. Opt.* **35**, 1056 (1996)
- [7] N. P. Fox, J. E. Martin: *Appl. Opt.* **29**, 4686 (1990)
- [8] I. Müller *et al.*: *Metrologia* **50**, 395 (2013)
- [9] J. A. R. Samson: *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 6 (1964)
- [10] L. R. Canfield, N. Swanson: *J. Res. NBS* **92**, 97 (1987)
- [11] G. Ulm, B. Wende: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2244 (1995)
- [12] R. Klein, M. Krumrey, M. Richter, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: *Synchrotron Radiation News* **15**, No.1, 23 (2002)
- [13] A. Gottwald, R. Klein, R. Müller, M. Richter, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: *Metrologia* **49**, S146 (2012)
- [14] P. S. Shaw, K. R. Lykke, R. Gupta, T. R. O'Brian, U. Arp, H. H. White, T. B. Lucatorto, J. L. Dehmer, A. C. Parr: *Appl. Opt.* **38**, 18 (1999)
- [15] Y. Morishita, N. Saito, I. H. Suzuki: *J. Electr. Spectr. Rel. Phen.* **144–147**, 1071 (2005)
- [16] A. Gottwald, U. Kroth, M. Krumrey, M. Richter, F. Scholze, G. Ulm: *Metrologia* **43**, S125 (2006)
- [17] A. Gottwald, U. Kroth, M. Richter, H. Schöppe, G. Ulm: *Meas. Sci. Technol.* **21**, 125101 (2010)
- [18] F. Scholze, J. Tümmler, G. Ulm: *Metrologia* **40**, 224 (2003)
- [19] M. Krumrey, G. Ulm: *Nucl. Instr. and Meth. A* **467–468**, 1175 (2001)
- [20] A. Lau-Främbis, U. Kroth, H. Rabus, E. Tegeler, G. Ulm: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2324 (1995)
- [21] A. Lau-Främbis, U. Kroth, H. Rabus, E. Tegeler, G. Ulm, B. Wende: *Metrologia* **32**, 571 (1995/96)
- [22] H. Rabus, V. Persch, G. Ulm: *Appl. Opt.* **36**, 5421 (1997)
- [23] M. Gerlach, M. Krumrey, L. Cibik, P. Müller, H. Rabus, G. Ulm: *Metrologia* **45**, 577 (2008)
- [24] M. Richter, G. Ulm: *PTB-Mitteilungen* **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [25] H. Rabus, E. Tegeler, G. Ulm, B. Wende: *PTB-Mitteilungen* **104**, 343 (1994)
- [26] H. Rabus, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: *Nucl. Instr. and Meth. A* **377**, 209 (1996)
- [27] F. Scholze, H. Henneken, P. Kuschnerus, H. Rabus, M. Richter, G. Ulm: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 866 (1998)
- [28] H. Rabus, R. Klein, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: *Metrologia* **39**, 381 (2002)
- [29] B. Beckhoff, R. Klein, M. Krumrey, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: *Nucl. Instr. and Meth. A* **444**, 480 (2000)
- [30] M. Richter, J. Hollandt, U. Kroth, W. Paustian, H. Rabus, R. Thornagel, G. Ulm: *Metrologia* **40**, 107 (2003)
- [31] K. Solt, H. Melchior, U. Kroth, P. Kuschnerus, V. Persch, H. Rabus, M. Richter, G. Ulm: *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3662 (1996)
- [32] P. Kuschnerus, H. Rabus, M. Richter, F. Scholze, L. Werner, G. Ulm: *Metrologia* **35**, 355 (1998)
- [33] R. Klein, A. Gottwald, G. Brandt, R. Fliegau, A. Hoehl, U. Kroth, H. Kaser, M. Richter, R. Thornagel, G. Ulm: *Metrologia* **48**, 219 (2011)
- [34] R. Klein, R. Thornagel, G. Ulm: *PTB-Mitteilungen* **124**, Heft 3, 7 (2014)
- [35] F. Scholze: *M. Procop, X-Ray Spectrom.* **30**, 69 (2001)
- [36] F. Scholze, R. Vest, T. Saito: *Metrologia* **47**, 02001 (2010)
- [37] A. Gottwald, M. Richter, P.-S. Shaw, Z. Li, U. Arp: *Metrologia* **48**, 02001 (2011)
- [38] T. Tanaka, M. Kato, T. Kurosawa, Y. Morishita, N. Saito, I. H. Suzuki, M. Krumrey, F. Scholze: *Metrologia* **49**, 501 (2012)
- [39] F. Scholze, R. Klein, R. Müller: *Proc. SPIE* **5374**, 926 (2004)
- [40] F. Scholze, R. Klein, T. Bock: *Appl. Opt.* **42**, 5621 (2003)
- [41] M. Richter, U. Kroth, A. Gottwald, Ch. Gerth, K. Tiedtke, T. Saito, I. Tassy, K. Vogler: *Appl. Opt.* **41**, 7167 (2002)
- [42] L. Shi, S. Nihitani, S. Xia, L. K. Nanver, A. Gottwald, F. Scholze: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **61**, 1268 (2012)
- [43] R. Korde, C. Prince, D. Cunningham, R. Vest, E. Gullikson: *Metrologia*, **40**, S145 (2003)
- [44] R. Korde, J. Geist: *Solid State Electron.* **30**, 89 (1987)
- [45] P. N. Aruev, Yu M. Kolokolnikov, N. V. Kovalenko, A. A. Legkodymov, V. V. Lyakh, A. D. Nikolenko, V. F. Pindyurin, V. L. Sukhanov, V. V. Zabrodsky: *Nucl. Instrum. Meth. A* **603**, 58 (2009)
- [46] H. Meister, M. Willmeroth, D. Zhang, A. Gottwald, M. Krumrey, F. Scholze: *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 123501 (2013)
- [47] S. Granato, R. Andritschke, J. Elbs, N. Meidinger, L. Strüder, G. Weidenspointner, M. Krumrey, F. Scholze: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60**, 3150 (2013)
- [48] A. BenMoussa *et al.*: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60**, 3907 (2013)
- [49] K. Tiedtke *et al.*: *J. Appl. Phys.* **103**, 094511 (2008)
- [50] M. Richter, A. Gottwald, M. Krumrey: *PTB-Mitteilungen* **124**, Heft 3, 27 (2014)