

# Metrologie für Röntgenlaser

Mathias Richter\*, Alexander Gottwald, Michael Krumrey

Seit den frühen Tagen der Forschung mit Synchrotronstrahlung [1] wurden die entsprechenden beschleunigerbasierten Strahlungsquellen stetig weiterentwickelt [2]. Bei der so genannten dritten Generation wird seit den 1990er-Jahren der Betrieb von *Insertion Devices* in den geraden Strecken von Speicherringen optimiert, insbesondere von Undulatoren, die hochbrillante Strahlung variabler Polarisierung emittieren [3–6]. Neueste Entwicklungen zielen darauf ab, durch optimierte Beschleunigerstrukturen Strahlungspulse mit weniger als 1 ps Dauer zu erzeugen, zum Beispiel mit Freie-Elektronen-Lasern (FELs) für zeitaufgelöste Experimente zu sehr schnellen chemischen Prozessen. Von den derzeit laufenden FEL-Anlagen, FLASH in Hamburg [7], FERMI in Trieste [8], LCLS in Stanford [9] sowie SCSS [10] und SACLA [11] in Japan, basieren alle außer FERMI auf dem Prinzip der *Self-Amplified Stimulated Emission* (SASE). Dabei werden zunächst sehr kurze Elektronenpakete mit relativistischen Energien in einem Linearbeschleuniger erzeugt, wo im Vergleich zu Ringbeschleunigern eine deutlich bessere Elektronenstrahlfokussierung möglich ist. Dadurch ist die in einem nachgeschalteten Undulator erzeugte Undulatorstrahlung so brillant, dass eine signifikante elektromagnetische Rückkopplung mit den Elektronen erfolgt. Dieses führt zu einer Mikrostrukturierung der Elektronenpakete mit der Periode der Strahlungswellenlänge und zu einer um viele Größenordnungen verstärkten, vollständig kohärenten Emission von FEL-Strahlung. Mittlerweile werden damit Photonenenergien zwischen 20 eV und 20 keV erreicht – bei Pulsenergien bis zu einigen mJ. Pulsdauern zwischen 10 fs und 500 fs führen dabei zu Strahlungsleistungen von mehr als 10 GW in einem Puls.

Da in einem FEL-Puls von weniger als 1 ps Dauer etwa so viele Röntgenphotonen zur Verfügung stehen wie bei Synchrotronstrahlung in einer

Sekunde, können FEL-Experimente pulsaufgelöst durchgeführt werden. Das SASE-Prinzip impliziert allerdings starke Puls-zu-Puls-Schwankungen, insbesondere der Intensität bzw. Pulsenergie, was eine Echtzeit-Photonendiagnostik erforderlich macht. Die Entwicklung und Charakterisierung entsprechender Detektionssysteme hat die PTB von Anfang an begleitet [12]. Für FLASH in Hamburg, der weltweit ersten SASE-FEL-Anlage mit einem Nutzerbetrieb, wurden in Kooperation mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg und dem Ioffe-Institut in St. Petersburg so genannte Gas-Monitor-Detektoren (GMDs) konzipiert und am Ausgang des Lasers vor dem Experimentierbereich fest installiert [13]. Diese basieren auf der Photoionisation von Gasen und dem Nachweis der erzeugten Photoionen und -elektronen. In Bild 1 ist ein entsprechendes System dargestellt. Bei typi-

\* Prof. Dr. Mathias Richter, Fachbereich „Radiometrie mit Synchrotronstrahlung“, E-Mail: mathias.richter@ptb.de

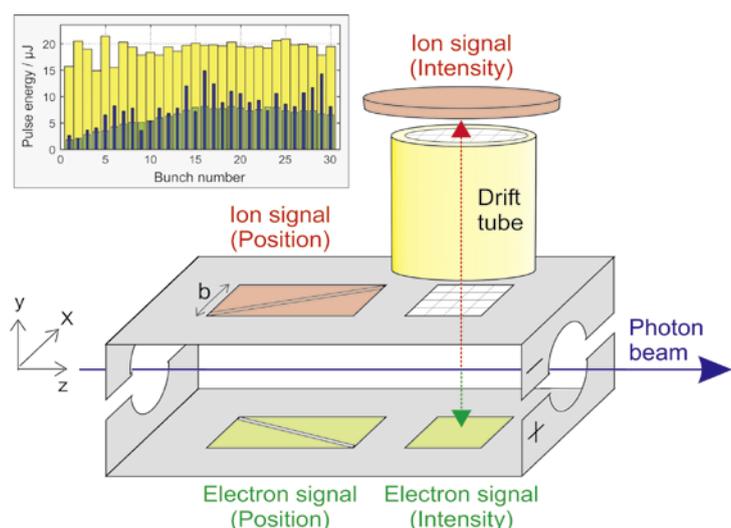


Bild 1:

Schema eines Gas-Monitor-Detektors (GMD) bei FLASH für die Echtzeit-Messung von FEL-Intensität und -Strahlrichtung. Oben links ist die Anzeige im FLASH-Kontrollsystem für die mit einem GMD gemessenen Pulsenergien eines Pulszuges dargestellt (blau: Werte für den aktuellen Pulszug; gelb: maximale Werte der Pulszüge ab Start der Anzeige; grün: Mittelwerte der Pulszüge ab Start der Anzeige) [13].

schen Gasdrücken im Bereich zwischen  $10^{-2}$  Pa und  $10^{-3}$  Pa liegt die Detektortransmission von FEL-Strahlung für die Experimente bei über 99 %. Die Detektoren wurden vor dem Einbau im PTB-Laboratorium bei BESSY II [14] gegen kalibrierte Photodioden rückführbar auf ein Kryoradiometer als primäres Detektornormal kalibriert [15]. Sie liefern daher kontinuierlich absolute Information über Pulsenergien mit relativen Unsicherheiten im Bereich von  $\pm 15$  %. Darüber hinaus lässt sich über die Verwendung von geteilten Nachweiselektroden auch die FEL-Strahlung messen [13]. Weiterentwickelte Versionen des GMD eignen sich auch für den mobilen Einsatz, zum Beispiel um die Strahlung von *High-Harmonic-Generation* (HHG) quantitativ nachzuweisen [16] oder für Messungen an anderen FELs [17, 18]. Für den härteren Röntgenbereich bis hin zu Photonenenergien im Bereich von 20 keV wurde dabei eine Option der Signalverstärkung durch den Einsatz offener Multiplier entwickelt, um die dort um Größenordnungen geringeren Photoionisationsquerschnitte zu kompensieren.

Ein wichtiger Aspekt bei den Messungen mit DESY-PTB-GMDs an inzwischen sämtlichen sich in Betrieb befindlichen FELs bestand in der Validierung des Mess- und Kalibrierverfahrens. Sowohl bei niedrigen Photonenenergien im Bereich zwischen 20 eV und 25 eV [17] als auch im Röntgenbereich zwischen 4 keV und 14 keV [18] fanden dazu an den japanischen FEL-Anlagen SCSS und SACLA radiometrische Vergleiche mit einem Kryoradiometer des japanischen Metrologie-Instituts AIST/NMIJ statt, bei denen eine sehr gute Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten Messunsicherheiten erzielt wurde. Insbesondere nicht-lineare Prozesse wie Multiphotonen-Ionisation können die GMD-Messungen an einem FEL gegenüber der Kalibrierung mit Synchrotronstrahlung grundsätzlich beeinflussen, wo die Photonenanzahl eines einzigen FEL-Pulses auf  $10^8$  bis  $10^9$  Pulse verteilt ist. Daher wurden bei FLASH auch mit fokussierter FEL-Strahlung systematisch und quantitativ die nicht-linearen Einflüsse auf die Photoionisation untersucht [19–21], die sich dabei jedoch außerhalb von Fokalbereichen mit Bestrahlungsstärken unterhalb von  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> als vernachlässigbar erwiesen haben.

Bild 2: Schema eines Gasphasen-Photoionisationsexperimentes bei FLASH mit einem Ionen-Flugzeitspektrometer (Ion Time-of-Flight (TOF) Spectrometer) im Fokus eines sphärischen Multilayer-Spiegels.

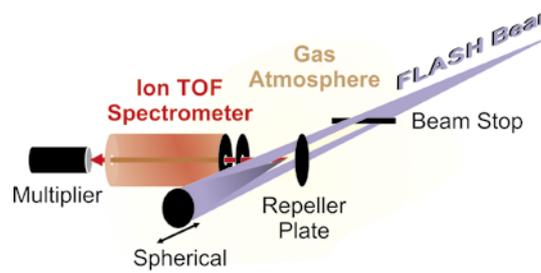
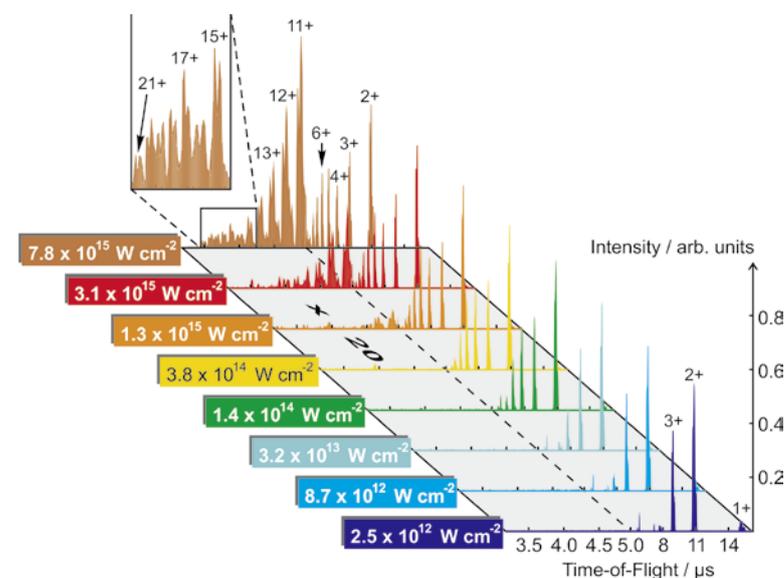


Bild 2 zeigt den experimentellen Aufbau eines solchen Photoionisationsexperimentes, bei dem ein sphärischer EUV-Multilayer-Spiegel [22] in Rückreflexionsgeometrie einen Mikrofokus erzeugt. In der Wechselwirkungszone eines Ionen-Flugzeitspektrometers lassen sich damit bei einer Photonenenergie von 93 eV Bestrahlungsstärken von bis zu  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> erzeugen, wobei die einfallende unfokussierte Strahlung für das Experiment ausgeblendet wird. Spiegel und Fokus können entlang der Strahlachse verschoben und damit Strahlquerschnitt und Bestrahlungsstärke für das Experiment in definierter Weise variiert werden. Bild 3 zeigt eine entsprechende Serie von Ionen-Flugzeitspektren für Xenon [21], aus denen sich die jeweilige Verteilung der bei der Photoionisation erzeugten Ladungszustände ablesen lässt. Während das bei  $2,5 \cdot 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> aufgenommene Spektrum mit den Ladungszuständen Xe<sup>1+</sup>, Xe<sup>2+</sup> und Xe<sup>3+</sup> im Wesentlichen der Einzelphotonen-Ionisation von Xenon aus der 5p- bzw. 4d-Schale mit anschließendem Auger-Zerfall entspricht, sind die höheren Ladungszustände bei höheren Bestrahlungsstärken das Ergebnis nicht-linearer Multiphotonen-Prozesse. Über die Ionisationsmechanismen insbesondere für die sehr hohen Ladungen bis hin zu Xe<sup>+21</sup> ist in den letzten Jahren eine heftige Debatte entbrannt [21, 23–28], und die Xenon-Arbeit wurde Ausgangspunkt zahlreicher weiterer Studien, auch eigener in Kooperation mit verschiedenen Arbeitsgruppen. Diese beziehen sich auf Vergleiche zwischen unterschiedlichen Edelgasen [24, 29] mit Elektrospektroskopie [30] sowie auf Messungen bei

Bild 3: Ionen-Flugzeitspektren von Xenon aufgenommen bei einer Photonenenergie von 93 eV und verschiedenen Bestrahlungsstärken [21].



unterschiedlichen FEL-Pulsdauern [28, 31].

Nicht-lineare Prozesse bei der Photoionisation von Gasen wurden auch für weitergehende FEL-Photonendiagnostik genutzt. Um zum Beispiel Information über die Größe von Mikrofokussen zu erhalten, wurde der Effekt ausgenutzt, dass ein einzelner FEL-Puls einen signifikanten Anteil der atomaren Targets im Fokusbereich durch Photoionisation entvölkern kann. Dadurch steigt das Ionisationssignal selbst für Einzelphotonen-Prozesse nicht mehr linear mit der Pulsintensität an, sondern geht in Sättigung, woraus sich der FEL-Strahlquerschnitt auswerten lässt [32]. Die Zweiphotonen-Doppelionisation von Helium ist dagegen zum Beispiel per se ein nicht-linearer Prozess, der quadratisch mit der Bestrahlungsstärke anwächst [20, 25], woraus die FEL-Pulsdauer bestimmt werden kann [33].

## Literaturverzeichnis

- [1] D. H. Tomboularian, P. L. Hartman: Phys. Rev. **102**, 1423 (1956)
- [2] <http://www.lightsources.org/> (letzter Aufruf: 29.09.2014)
- [3] P. J. Duke: Synchrotron Radiation: Production and Properties, Oxford University Press, Oxford (2000)
- [4] H. Wiedemann: Synchrotron Radiation, Springer, Berlin (2002)
- [5] A. Hofmann: The Physics of Synchrotron Radiation, Cambridge University Press, Cambridge (2004)
- [6] T. Möller, J. Falta (Hrsg.): Forschung mit Synchrotronstrahlung, Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010)
- [7] W. Ackermann et al.: Nat. Photonics **1**, 336 (2007)
- [8] S. Di Mitri et al.: Proc. IPAC **2011**, 918 (2011)
- [9] P. Emma et al.: Nat. Photonics **4**, 641 (2010)
- [10] T. Shintake et al.: Nat. Photonics **2**, 555 (2008)
- [11] P. David et al.: Nat. Photonics **5**, 456 (2011)
- [12] M. Richter et al.: Appl. Phys. Lett. **83**, 2970 (2003)
- [13] K. Tiedtke et al.: J. Appl. Phys. **103**, 094511 (2008)
- [14] M. Richter, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [15] A. Gottwald, U. Kroth, M. Krumrey, P. Müller, F. Scholze: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 21 (2014)
- [16] T. Leitner, A. A. Sorokin, J. Gaudin, H. Kaser, U. Kroth, K. Tiedtke, M. Richter, Ph. Wernet: New J. Phys. **13**, 093003 (2011)
- [17] N. Saito et al.: Metrologia **47**, 21 (2010)
- [18] M. Kato et al.: Appl. Phys. Lett. **101**, 023503 (2012)
- [19] A. A. Sorokin, S. V. Bobashev, K. Tiedtke, M. Richter: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, L299 (2006)
- [20] A. A. Sorokin, S. V. Bobashev, K. Tiedtke, M. Wellhöfer, M. Richter: Phys. Rev. A **75**, 051402(R) (2007)
- [21] A. A. Sorokin, S. V. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz, M. Richter: Phys. Rev. Lett. **99**, 213002 (2007)
- [22] F. Scholze, A. Barboutis, M. Biel, Ch. Buchholtz, B. Dubrau, A. Fischer, A. Hesse, Ch. Laubis, J. Puls, Ch. Stadelhoff: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 4 i. Vb., (2014)
- [23] M. G. Makris, P. Lambropoulos, A. Mihelić: Phys. Rev. Lett. **102**, 033002 (2009)
- [24] M. Richter, M. Ya. Amusia, S. V. Bobashev, T. Feigl, P. Juranic, M. Martins, A. A. Sorokin, K. Tiedtke: Phys. Rev. Lett. **102**, 163002 (2009)
- [25] M. Richter, S. V. Bobashev, A. A. Sorokin, K. Tiedtke: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43**, 194005 (2010)
- [26] M. Richter: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 075601 (2011)
- [27] P. Lambropoulos, K. G. Papamihail, P. Decleva: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 175402 (2011)
- [28] M. Richter, A. A. Sorokin, K. Tiedtke: Proc. SPIE **8778**, 877808 (2013)
- [29] R. Guichard, M. Richter, J.-M. Rost, U. Saalmann, A. A. Sorokin, K. Tiedtke: J. Phys. B **46**, 164025 (2013)
- [30] V. Richardson et al.: Phys. Rev. Lett. **105**, 013001 (2010)
- [31] N. Gerken, S. Klumpp, A. A. Sorokin, K. Tiedtke, M. Richter, V. Bürk, K. Mertens, P. Juranić, M. Martins: Phys. Rev. Lett. **112**, 213002 (2014)
- [32] A. A. Sorokin et al.: Appl. Phys. Lett. **89**, 221114 (2006)
- [33] R. Mitzner et al.: Phys. Rev. A **80**, 025402 (2009)

# ATEMBERAUBEND.

## Ultrapräzise Positioniersysteme

auch für den Einsatz in Vakuum und Tieftemperatur.



# PI

## MOTION CONTROL

[www.pimicos.com](http://www.pimicos.com)