

Reflektometrie mit Synchrotronstrahlung

Michael Krumrey*, Levent Cibik, Andreas Fischer, Alexander Gottwald, Udo Kroth, Frank Scholze

Einleitung

Hochwertige Reflexionsmessungen zur Charakterisierung von optischen Komponenten, zur Schichtdickenbestimmung oder zur Bestimmung optischer Konstanten von Festkörpern und dünnen Schichten dienen einer Vielzahl von Anwendungen. Bei den zu messenden Objekten kann es sich um Spiegel oder andere reflektierende Objekte wie Beugungsgitter oder Kristalle handeln, aber auch um (Folien-)Filter, deren Transmissionsgrad oft mit der Wellenlänge um viele Größenordnungen variiert. Die Reflektometrie mit Synchrotronstrahlung hat in der PTB eine lange Tradition, erste Messungen wurden bereits 1986 bei BESSY I durchgeführt [1]. Derzeit werden an den Strahlrohren im PTB-Labor bei BESSY II und bei der MLS vier Reflektometer betrieben. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über diese Geräte und deren Eigenschaften, die Messverfahren und erreichbaren Messunsicherheiten sowie die verschiedenen Anwendungen der Reflektometrie im Röntgen-, EUV- und VUV-Bereich.

Messplätze für Reflektometrie

Reflektometrie kann an allen Strahlrohren für Empfängerkalibrierung durchgeführt werden. [2, 3]. An diesen Messplätzen steht Strahlung von hoher spektraler Reinheit zur Verfügung, räumlich gut definiert ohne Streulichthalo und mit hoher zeitlicher Stabilität. Außerdem haben die Monochromatoren eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Energie- bzw. Wellenlängeneinstellung. Da bei der Charakterisierung optischer Komponenten oft auch orts- und winkelabhängige Eigenschaften zu messen sind, können Strahlgröße und Divergenz wesentliche Bedeutung erlangen. Für Anwendungen im Röntgenbereich unter streifendem Strahlungseinfall ist dabei eine gute Winkelauflösung oft wichtiger als eine besonders gute Ortsauflösung auf den Proben. Dieses wurde bei der optischen Auslegung der Strahlrohre jeweils speziell berücksichtigt.

Für die Charakterisierung optischer Komponenten stehen vier Reflektometer zur Verfügung, mit denen die zu untersuchende Probe in allen Freiheitsgraden positioniert werden kann. Die wesentlichen Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

* Dr. Michael Krumrey, Arbeitsgruppe „Röntgenradiometrie“, E-Mail: michael.krumrey@ptb.de

Tabelle 1:
Zusammenstellung wesentlicher Eigenschaften der PTB-Reflektometer.

Gerät	Strahlrohr	Polarisation	Max. Probengröße und -masse	Sonstiges
VUV-Reflektometer [6]	NIM MLS	beliebig	(155 mm) ² 5 kg	Probenschleuse
EUV-Reflektometer [4]	EUVR MLS	S	550 mm Ø 50 kg	am EUVR-Strahlrohr fest installiert
EUV-Ellipso-Scatterometer	SX700 BESSY II	beliebig	(190 mm) ² 5 kg	Probenschleuse, Polarisationsanalysator
Röntgen-Reflektometer [5]	FCM (PGM) BESSY II	S	(150 mm) ² 5 kg	Probenschleuse, Röntgendetektor für Einzelphotonenzählung

Das EUV-Reflektometer [4] ist aufgrund seiner Größe fest am EUVR-Strahlrohr an der MLS installiert. Das Röntgenreflektometer [5] wird am FCM-Strahlrohr und am PGM-Monochromator des PTB-Undulators bei BESSY II eingesetzt. Das VUV-Reflektometer [6] kann um die optische Achse gedreht werden und erlaubt Messungen mit beliebigiger Polarisationsorientierung. Es wird an der NIM-Strahlführung der MLS verwendet. Auch am neuen EUV-Ellipso-Scatterometer, das am SX700-Strahlrohr eingesetzt wird, kann jede beliebige lineare Polarisationsrichtung gewählt werden.

Messverfahren und Unsicherheiten

Im Gegensatz zur Quellen- oder Empfängerkalibrierung werden für die Reflektometrie keine Normale benötigt, da es sich hier um Relativmessungen der Intensität des reflektierten (beziehungsweise bei Filtern oder teilreflektierenden Proben transmittierten) Strahls zu der des einfallenden Strahls handelt. Trotzdem sind auch hier zum Erreichen von geringeren Messunsicherheiten diverse Einflussgrößen zu beachten. Bei der einfallenden Strahlung ist dies, neben der auch für die Empfängerkalibrierung wichtigen Stabilität und spektralen Reinheit, die Strahldivergenz und die spektrale Bandbreite. Beim Reflektometer kommt es neben der Genauigkeit der Winkeleinstellung auch auf die Homogenität und Linearität der verwendeten Detektoren an (meist Halbleiter-Photodioden) sowie auf die Linearität der zugehörigen Amperemeter. Eine Übersicht über die an den verschiedenen Strahlrohren erreichbaren Messunsicherheiten zeigt Tabelle 2.

Anwendungen

Röntgenbereich

Im Röntgenbereich wird der Reflexionsgrad von Spiegeln zur Anwendung in der Astrophysik [7] oder der Plasmadiagnostik [8] untersucht. Außerdem werden optische Komponenten für die Nutzung an anderen Synchrotronstrahlungsquellen betrachtet [9]. Die derzeitige Hauptanwendung der Reflektometrie im Röntgenbereich ist jedoch die Dickenbestimmung von Nanoschichten, die z. B. in der Nanotechnologie, in der Halbleiterindustrie und in der optischen Industrie bei der Herstellung von Spiegeln und optischen Vergütungen eine wichtige Rolle spielen. Die Funktion der Schicht hängt dabei oft entscheidend von deren Dicke ab. Die Röntgenreflektometrie (*X-ray reflectometry*, XRR) ist für Schichtdickenbestimmungen ein etabliertes, zerstörungsfreies Verfahren [10]. Wie in Bild 1 dargestellt, tritt bei einem Schicht-Substrat-System Reflexion sowohl an der Oberfläche der Schicht als auch an der Grenzfläche Schicht-Substrat auf. Für die meist unter flachem Winkel zur Oberfläche einfallende Röntgenstrahlung kommt es gemäß der Braggschen Gleichung zu konstruktiver Interferenz, wenn der Weg der Strahlung in der Schicht mit der Dicke d ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ beträgt: $m \cdot \lambda = 2 \cdot n \cdot d \cdot \sin \Theta_2$. Dabei ist n der Brechungsindex der Schicht und Θ_2 der Winkel in der Schicht, der sich vom äußeren Einfallswinkel Θ_1 durch die Brechung unterscheidet. Deren Einfluss ist jedoch gering, da n im Röntgenbereich zwar kleiner als 1 ist, sich von 1 aber meist nur um Werte $< 10^{-4}$ unterscheidet.

Tabelle 2:
Zusammenstellung typischer Messunsicherheiten
für die Bestimmung des Reflexionsgrades.

Strahlrohr	NIM	EUVR	SX700	FCM
Speicherring	MLS	MLS	BESSY II	BESSY II
Typische Wellenlänge / nm	300	13,5	13,5	0,2
Beitrag	relativer Standardmessunsicherheitsbeitrag u / %			
Stabilität der Strahlungsleistung	0,14	0,01	0,03	0,01
Winkeleinstellung und Strahldivergenz	0,01	0,01	0,01	0,20
Homogenität des Detektors	0,06	0,06	0,06	0,20
Falschlicht (Höhere Harmonische des Monochromators und Streulicht)	0,12	0,12	0,12	< 0,01
relative Messunsicherheit für den Reflexionsgrad	0,20	0,14	0,14	0,30

Bei entsprechenden optischen Konstanten kann es an der Grenzfläche auch zu einer Phasensprung kommen, wobei sich die Bedingungen für Minima und Maxima umkehren.

In jedem Fall zeigt der Reflexionsgrad bei fester Wellenlänge als Funktion des Einfallswinkels charakteristische Oszillationen, aus deren Periode die Schichtdicke bestimmt wird. Die Rückführbarkeit der Schichtdickenbestimmung, also einer Längenmessung, ergibt sich aus der Wellenlängenkalibrierung des Monochromators, die wiederum über die Bragg-Rückreflexion an einem Silizium-Einkristall auf dessen Gitterkonstante rückgeführt werden kann [11], sowie der Kalibrierung des Goniometers im Reflektometer durch ein kalibriertes Spiegelpolygon unter Verwendung eines elektronischen Autokollimators.

Bild 2 zeigt die experimentelle Realisierung im Röntgen-Reflektometer mit einer ganz speziellen Probe: eine Kugel aus isotoopenreinem Silizium mit einem Durchmesser von 95 mm, die über die Bestimmung der Avogadro-Konstante der Neudefinition der Einheit Kilogramm dienen soll [12]. Mit XRR wird die Dicke der unvermeidlichen Siliziumoxidschicht auf der Kugeloberfläche bestimmt. Auf dem Oxid befindet sich darüber hinaus eine ebenfalls unvermeidliche, kohlenstoffhaltige Kontaminationsschicht. Um beide Schichtdicken voneinander trennen zu können, werden die Messungen mit fokussierter Undulatorstrahlung am PGM-Strahlrohr bei BESSY II bei verschiedenen Energien um die Sauerstoff-Absorptionskante im Bereich von 480 eV bis 560 eV durchgeführt [13]. In diesem Bereich ändern sich die optischen Eigenschaften des Oxides stark, während die für Silizium und für die Kontaminationsschicht weitgehend konstant sind. Für diese Energien kann außerdem mit Einfallswinkeln bis zu 40° gearbeitet werden, was die Messungen auf der stark gekrümmten Oberfläche erst ermöglicht. Der gemessene Reflexionsgrad ist in Bild 3 dargestellt. Die Oszillationen sind besonders nahe der Absorptionskante (529 eV) sehr ausgeprägt. Obwohl sich die Photonenenergie nur um etwa 20 % ändert, sind die Kurven sehr unterschiedlich. Aus dem ebenfalls dargestellten simultanen Fit [11] ergibt sich für das Oxid eine Dicke von 7,1 nm und für die Kontaminationsschicht eine Dicke von 0,3 nm. Die Unterscheidung der Schichten ist nur durch die Messung bei mehreren Photonenenergien möglich, bei einer einzigen Energie lässt sich nur die Gesamtschichtdicke bestimmen.

Ähnliche Vorteile durch die Wahl der Photonenenergie können sich z. B. bei Cu- und Ni-Doppelschichten auf einem Si-Substrat ergeben. Während mit der bei Laborröntgenquellen üblichen Cu-K α -Strahlung aus dem Verlauf des Reflexionsgrades nur die Gesamtdicke bestimmt werden kann

(Bild 4, oben), zeigt eine Messung bei 8400 eV, also bei einer Photonenenergie zwischen den K-Absorptionskanten von Ni (8333 eV) und Cu (8980 eV), die für Doppelschichten charakteristische Doppelstruktur (Bild 4, unten), aus der die einzelnen Schichtdicken gewonnen werden können [14].

Zur Schichtdickenbestimmung von organischen Schichten auf oxidierten Silizium-Wafern eignet sich, ebenso wie für SiO₂-Schichten auf planen Oberflächen, eine Photonenenergie von 1841 eV, also direkt oberhalb der Si-K-Absorptionskante, da hier durch die Verschiebung der Kante im Oxid der Kontrast der optischen Konstanten von Si und SiO₂ besonders groß ist [15, 16]. Für komplexe Systeme kann die Auswertung auch über eine Fou-

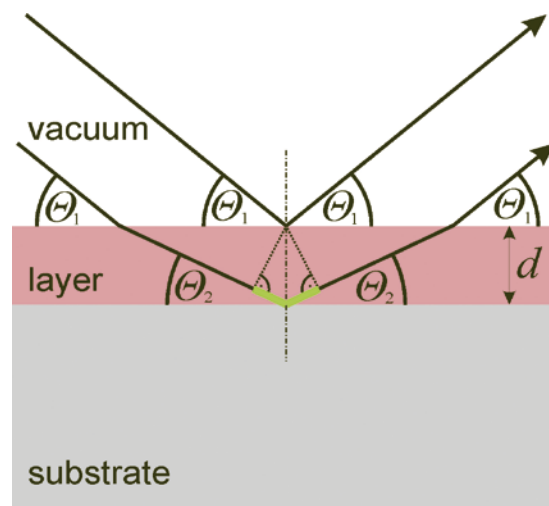


Bild 1: Prinzip der Röntgenreflektometrie zur Schichtdickenbestimmung: Durch die Wegdifferenz der an Ober- und Grenzfläche reflektierten Strahlung entstehen Interferenzen (Bild 3).

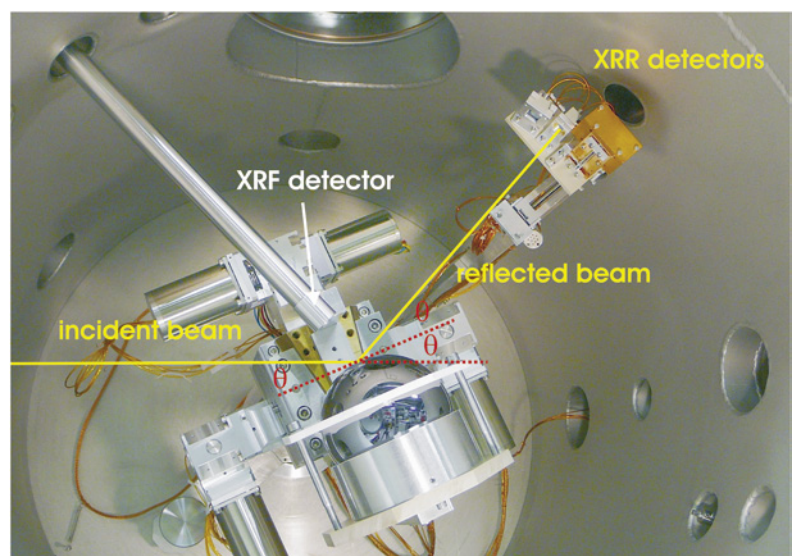


Bild 2: Blick in das Röntgenreflektometer mit einer Kugel, die für die Bestimmung der Avogadrokonstanten verwendet wird. Wenn die Probenoberfläche um den Winkel θ zum einfallenden Strahl gedreht wird, muss der Detektorarm um den Winkel 2θ gedreht werden, um den reflektierten Strahl zu erfassen. Auf dem Detektorarm sind die verschiedenen Detektoren (Photodioden mit und ohne Eingangsspalt und ein Silizium-Driftdetektor zum Zählen von Photonen) zu erkennen.

riertransformation des oszillatorischen Anteils des gemessenen Reflexionsgrads deutlich oberhalb des kritischen Winkels für die Totalreflexion erfolgen (Bild 5 oben). Die in Bild 5 (unten) sichtbaren Peaks entsprechen der Dicke von Einzelschichten oder Schichtgruppen, der Peak bei der größten Korrelationslänge entspricht der Gesamtschichtdi-

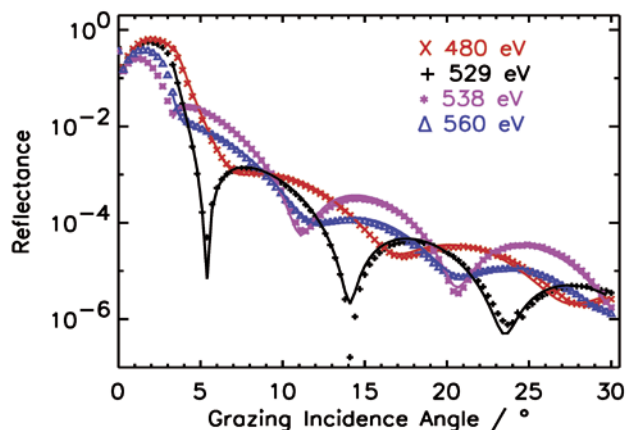


Bild 3: Gemessener Reflexionsgrad einer thermisch oxidierten Avogadro-Kugel bei verschiedenen Photonenenergien um die Sauerstoff-Absorptionskante und Ergebnis des simultanen Fits.

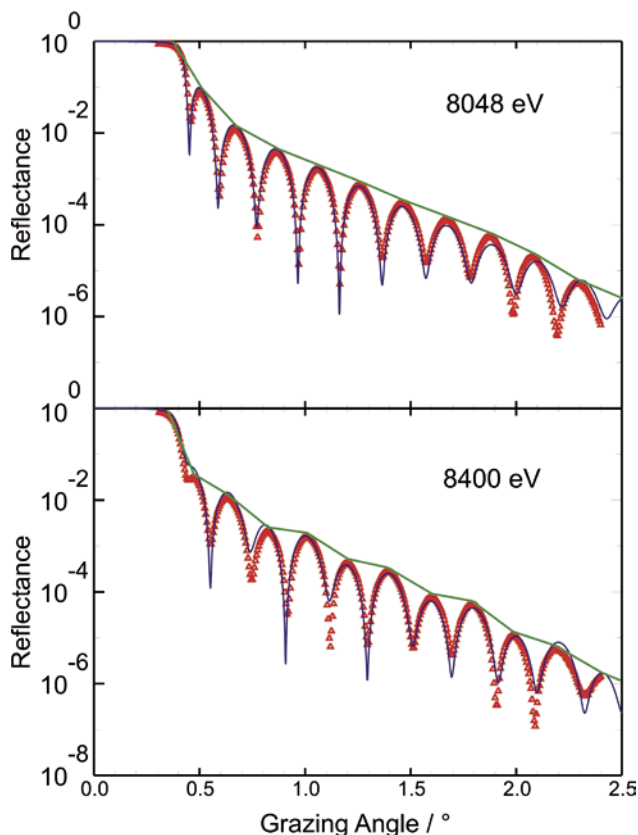


Bild 4: Gemessener und gefitteter Reflexionsgrad einer Cu-Ni-Doppelschicht auf Si. Bei 8048 eV (oben) unterscheiden sich die optischen Konstanten der beiden Elemente kaum, erst bei 8400 eV (unten) ist die charakteristische Doppelstruktur einer Doppelschicht zu erkennen.

cke. Aus der Kombination der Maxima lassen sich die einzelnen Schichtdicken bestimmen [17].

Insgesamt bietet die Röntgenreflektometrie die Möglichkeit, Schichtdicken im Nanometer-Bereich mit relativen Unsicherheiten bis hinunter zu etwa 1 % zu bestimmen. Durch die Verwendung monochromatisierter Synchrotronstrahlung ist dies auch für Schichtkombinationen möglich, für die mit konventioneller Röntgenstrahlung kein hinreichender Kontrast zu beobachten ist.

EUV-Bereich

Das Hauptarbeitsgebiet im EUV-Bereich ist seit vielen Jahren die Charakterisierung von optischen Komponenten und Detektoren für die EUV-Lithographie. Diese Arbeiten sind in einem eigenen Artikel dargestellt [18]. Ganz allgemein bietet die kurzwellige Strahlung aber auch vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bei der Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen, auch diese Anwendung wird an anderer Stelle in diesem Heft eingehend dargestellt [19]. Prinzipiell sind im EUV-Spektralbereich die gleichen Messungen möglich wie mit härterer Röntgenstrahlung, die kritischen Winkel für die Reflexion sind aber größer und man kann somit bei steileren Einfallswinkeln messen. Dies ist von Vorteil etwa bei gekrümmten Oberflächen, wie im Falle der oben erwähnten Siliziumkugel, oder kleinen Proben. Eine weitere Besonderheit des Spektralbereichs von EUV und weicher Röntgenstrahlung ist, dass zwar der Reflexionsgrad für alle Materialien unter senkrechtem Einfall praktisch verschwindend klein ist, durch den Aufbau von Multi-Schicht-Bragg-Reflektoren der Reflexionsgrad im Maximum der Resonanz jedoch deutlich über 50 % liegen kann, was den Aufbau spiegeloptischer Systeme mit großer numerischer Apertur und großem Gesichtsfeld erlaubt, ähnlich wie etwa im UV- oder VUV-Bereich. Die wichtigste Anwendung dafür ist die EUV-Lithographie für die Halbleiterindustrie bei einer Wellenlänge von 13,5 nm [18]. Es gibt aber auch Multi-Schicht-Systeme optimiert für Reflexion bei kürzeren Wellenlängen, zum Beispiel bei 3 nm im sogenannten „Wasserfenster“ zwischen den Absorptionskanten von Kohlenstoff und Sauerstoff. In diesem Spektralbereich lassen sich sehr gut organische Substanzen in wässriger Umgebung untersuchen und zum Beispiel mikroskopisch hochauflösend abbilden. Für eine Optimierung der entsprechenden auf Schichtsystemen basierenden Optiken ist es notwendig, deren optische Materialeigenschaften zu untersuchen. Dies kann durch die Messung des winkelabhängigen Reflexionsgrades unter Nutzung der Fresnel-Gleichungen geschehen. Mit dem Brechungsindex in seiner komplexen Form $n = 1 - \delta + i\beta$ lassen sich die Formeln auch für den Fall absorbierender Medien einheitlich

darstellen, durch rekursive Anwendung auch für Mehrschichten. Der Reflexionsgrad R einer dicken Schicht lässt sich für S- bzw. P-polarisierte Strahlung, die aus dem Vakuum unter dem hier auch für komplexe Werte definierten Winkel Θ_1 zur Oberfläche auftritt, berechnen nach:

$$R_s = \left| \frac{\sin\Theta_1 - (1 - \delta + i\beta)\sin\Theta_2}{\sin\Theta_1 + (1 - \delta + i\beta)\sin\Theta_2} \right|^2 \quad (1)$$

$$R_p = \left| \frac{(1 - \delta + i\beta)\sin\Theta_1 - \sin\Theta_2}{\sin\Theta_1 + (1 - \delta + i\beta)\sin\Theta_2} \right|^2 \quad (2)$$

Dabei ist Θ_2 der Winkel in der Schicht, der sich mit dem Brechungsgesetz in seiner komplexen Form berechnen lässt gemäß [20]:

$$\cos\Theta_2 = \frac{\cos\Theta_1}{1 - \delta + i\beta} \quad (3)$$

Ein Beispiel für die Bestimmung der optischen Konstanten aus winkelabhängigen Reflexionsmessungen ist in Bild 6 für eine dicke SiO_2 -Schicht gezeigt. Man beachte die deutlichen Abweichungen der gemessenen optischen Konstanten im Spektralbereich von 7 nm bis 16 nm von den allgemein genutzten tabellierten Werten [21].

Eine andere Anwendung der Reflektometrie im EUV-Bereich zeigt Bild 7. Hier wurde die spekulare Reflexion an einer Gitterstruktur mit rechteckigem Linienprofil gemessen [22]. Die

Interferenz der an den Oberflächen der Linien und auf den Grundflächen der Gräben reflektierten Teilwellen führt, wie oben für die Reflexion von einer homogenen Schicht beschrieben, zu einem Interferenzeffekt, der in diesem Falle die Bestimmung der Linienhöhe erlaubt.

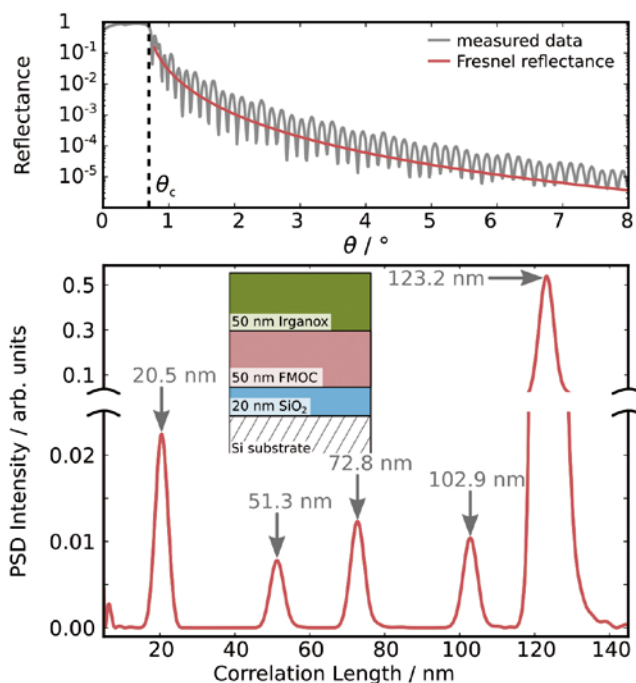


Bild 5: Si-Wafer mit SiO_2 -Schicht und organischer Doppelschicht: Gemessener Reflexionsgrad (oben) und Fouriertransformation des oszillatorischen Anteils (unten). Die Peaks entsprechen einzelnen Schichten und Schichtgruppen, als Einzeldicken ergeben sich 20,5 nm (SiO_2), 52,3 nm (FMOC) und 50,5 nm (Irganox 1010).

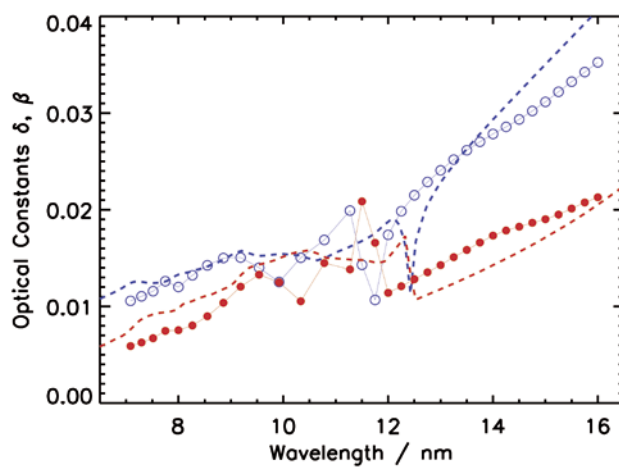
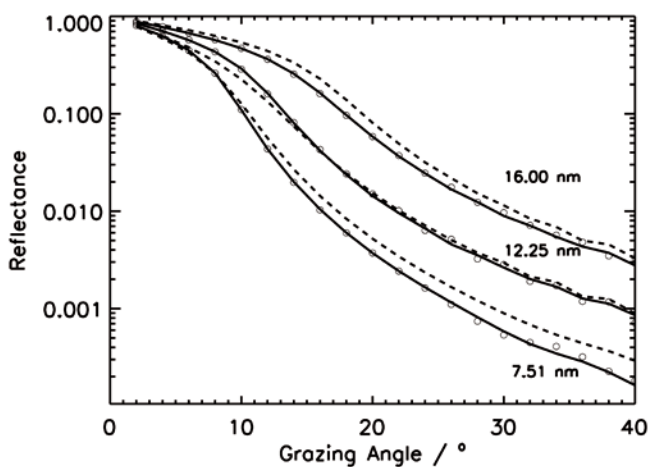


Bild 6: Bestimmung der optischen Konstanten δ und β von SiO_2 (Brechungsindex $n = 1 - \delta + i\beta$) im Spektralbereich von 7 nm bis 16 nm aus dem Reflexionsgrad R_s in Abhängigkeit vom Einfallswinkel Θ_1 zur Oberfläche. Links sind einige der Messkurven bei verschiedenen Wellenlängen gezeigt, aus denen für jede einzelne Wellenlänge die rechts gezeigten Werte für δ (blaue Kreise) und β (rote Punkte) ermittelt wurden. Zum Vergleich sind tabellierte Daten aus der Literatur [19] gezeigt. Die gestrichelten und durchgezogenen Linien links stellen die Anpassung der Messpunkte mit den alten und den neuen optischen Daten dar.

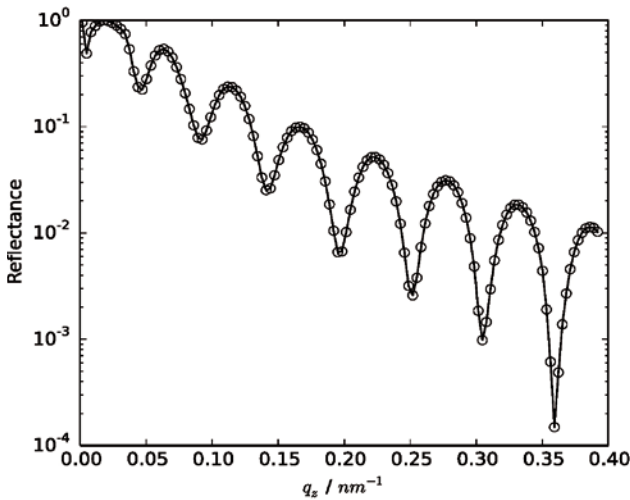


Bild 7: Reflexionsgrad eines geätzten Silizium-Liniengitters als Funktion des Einfallswinkels bei 13,5 nm. Aus den Oszillationen lässt sich eine Linienhöhe von 114 nm bestimmen.

UV-/VUV-Bereich

Im Bereich der UV- und Vakuum-UV-(VUV-) Strahlung, d. h. im Wellenlängenintervall zwischen 40 nm und 400 nm, werden an dem *Normal-Incidence-Monochromator-Messplatz* (NIM) für Empfängerkalibrierung [2, 3] routinemäßig auch optische Komponenten (z. B. Spiegel, Filter, Dispersionsgitter) mit Reflexions- und Transmissionsmessungen untersucht. Die reflektierende Schicht ist dabei meist metallisch, aber auch Metallkarbide oder dielektrische Schichten für wellenlängen-selektive Reflexion bzw. Anti-Reflexionsbeschichtungen (AR-Beschichtungen) finden Verwendung. Insbesondere im VUV-Spektralbereich, d. h. für Wellenlängen kleiner als 200 nm, ist die Eindring-

tiefe der Strahlung sehr gering, je nach Wellenlänge und Material nur einige 10 Nanometer oder geringer, sodass die optischen Eigenschaften überwiegend von der Qualität der unmittelbaren Oberfläche bestimmt sind. Tiefenprofile und Multi-Schichtsysteme haben dagegen, anders als in den kurzwelligeren Spektralbereichen, eine nachrangige Bedeutung. Neben der direkten Bestimmung des Reflexionsgrades für Anwendungen oder für Referenzspiegel liefert der Verlauf des spektralen Reflexions- bzw. und Transmissionsgrads auch hier Daten zur Bestimmung der optischen Konstanten von Festkörpern bzw. dünnen Schichten [23]. Auch grundlegende Untersuchungen der elektronischen Zustände (Bandlücken) eines Festkörpers sind möglich, wobei die Variation der Temperatur während der Messung beispielsweise Aufschluss über unterschiedliche physikalische Ursachen von Absorptions- und Reflexionsprozessen zulässt [24, 25]. Die Möglichkeit zur Messung des polarisationsabhängigen Reflexionsgrads als Funktion des Einfallswinkels erlaubt die gezielte Untersuchung und Entwicklung polarisierender optischer Elemente. Ein Beispiel hierzu sind Polarisationspiegel für die Wasserstoff-Lyman- α -Wellenlänge bei 121,6 nm, die in der stellaren Astrophysik eine herausragende Bedeutung besitzt (Bild 8) [26].

Das Polarisationsvermögen P wird dabei berechnet als:

$$P = \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \tag{4}$$

Die Messung erfordert eine vorangehende Bestimmung des Polarisationsgrades der monochroma-

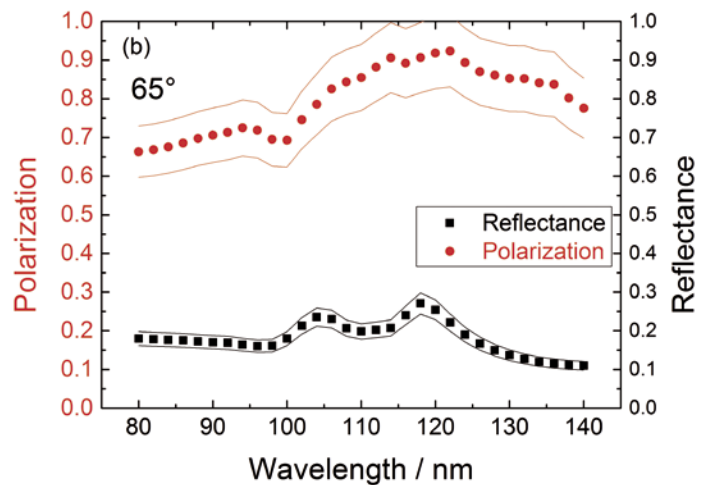
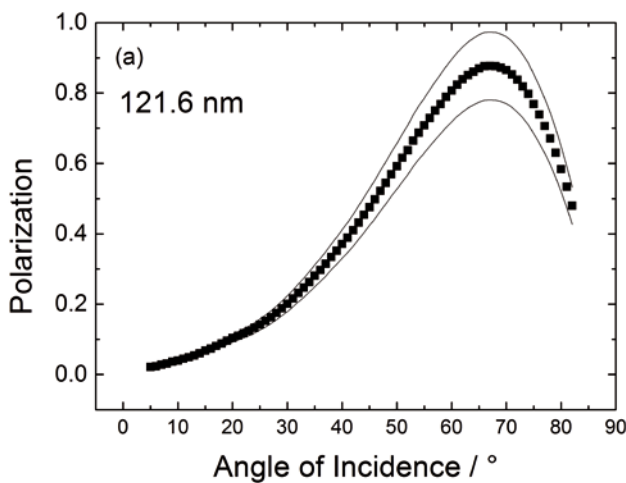


Bild 8: Gemessene Eigenschaften eines MgF_2 -Reflexionspolarisators.
 a) Polarisationsvermögen für die Wasserstoff-Lyman-Alpha-Wellenlänge von 121,6 nm als Funktion des Einfallswinkels.
 b) Reflexionsgrad und Polarisationsvermögen im Wellenlängenbereich zwischen 80 nm und 140 nm. Die Linien geben jeweils den Bereich der Standardmessunsicherheit an.

tisierten Synchrotronstrahlung. Diese Techniken bilden auch die Basis für die VUV-Ellipsometrie [27], bei der die Änderung der Polarisation bei der Reflexion gemessen wird, um daraus Schichtdicken und Materialeigenschaften zu bestimmen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Kühne, K. Danzmann, P. Müller, B. Wende: Proc. SPIE **688**, 76 (1986)
- [2] M. Richter, G. Ulm: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 3, 3 (2014)
- [3] B. Beckhoff, A. Gottwald, R. Klein, M. Krumrey, R. Müller, M. Richter, F. Scholze, R. Thornagel, G. Ulm: Phys. Status Solidi B **246**, 1415 (2009)
- [4] J. Tümmler, F. Scholze, G. Brandt, B. Meyer, F. Scholz, K. Vogel, G. Ulm, M. Poier, U. Klein, W. Diete: Proc. SPIE **4688**, 338 (2002)
- [5] D. Fuchs, M. Krumrey, P. Müller, F. Scholze, G. Ulm: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2248 (1995)
- [6] M. Krumrey, M. Kühne, P. Müller, F. Scholze: Proc. SPIE **1547**, 136 (1991)
- [7] D. H. Lumb, F. E. Christensen, C. P. Jensen, M. Krumrey: Opt. Commun. **279**, 101 (2007)
- [8] P. Troussel, B. Villette, B. Emprin, G. Oudot, F. Bridou, F. Delmotte, M. Krumrey: Rev. Sci. Instrum. **85**, 013503 (2014)
- [9] F. Choueikani, B. Lagarde, F. Delmotte, M. Krumrey, F. Bridou, M. Thomasset, E. Meltchakov, F. Polack: Opt. Lett. **39**, 2141 (2014)
- [10] P. Colombi et al.: J. Appl. Cryst. **41**, 143 (2008)
- [11] M. Krumrey, G. Gleber, F. Scholze, J. Wernecke: Meas. Sci. Technol. **22**, 094032 (2011)
- [12] B. Andreas et al.: Phys. Rev. Lett. **106**, 030801 (2011)
- [13] I. Busch, Y. Azuma, H. Bettin, L. Cibik, P. Fuchs, K. Fujii, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, S. Mizushima: Metrologia **48**, S62 (2011)
- [14] M. Kolbe, B. Beckhoff, M. Krumrey, G. Ulm: Spectrochim. Acta B. **60**, 505 (2005)
- [15] M. Krumrey, M. Hoffmann, G. Ulm, K. Hasche, P. Thomsen-Schmidt: Thin Solid Films **459**, 241 (2004)
- [16] M. P. Seah et al.: Surf. Interface Anal. **36**, 1269 (2004)
- [17] J. Wernecke, A. G. Shard, M. Krumrey: Surf. Interface Anal. **46**, 911 (2014)
- [18] F. Scholze, C. Laubis, A. Barboutis, C. Buchholz, A. Fischer, J. Puls, C. Stadelhoff: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 4 i. Vb., (2014)
- [19] F. Scholze, A. Haase, M. Krumrey, V. Soltwisch, J. Wernecke: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 4 i. Vb., (2014)
- [20] E. D. Palik (Hrsg.): Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando (1985)
- [21] B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis: Atomic Data and Nuclear Data Tables **54**, 181 (1993)
- [22] V. Soltwisch, J. Wernecke, A. Haase, J. Probst, M. Schoengen, M. Krumrey, F. Scholze: Proc. SPIE **9050**, 905012 (2014)
- [23] F. Bridou, M. Cuniot-Ponsard, J.-M. Desvignes, A. Gottwald, U. Kroth, M. Richter: Appl. Phys. A **102**, 641 (2011)
- [24] M. Letz, A. Gottwald, M. Richter, V. Libermann, L. Parthier: Phys. Rev. B **81**, 155109 (2010)
- [25] M. Letz, A. Gottwald, M. Richter, L. Parthier: Phys. Rev. B **79**, 195112 (2009)
- [26] F. Bridou, M. Cuniot-Ponsard, J.-M. Desvignes, M. Richter, U. Kroth, A. Gottwald: Opt. Commun. **283**, 1351 (2010)
- [27] M. Kolbe, E. Darlatt, A. Gottwald, H. Kaser, M. Richter: PTB-Mitteilungen **124**, Heft 4 i. Vb., (2014)