

Optiken für die Röntgenmikroskopie

Neuartige Röntgenlinsen

SAŠA BAJT | MARGARITA ZAKHAROVA

Röntgenstrahlen werden dank ihrer großen Eindringtiefe und kurzen Wellenlänge vielfältig genutzt, von der medizinischen Diagnostik inklusive Bildgebung über die Röntgenbeugung bis zur Mikroskopie. Hier stellen wir eine neuartige, mehrschichtige Röntgenlinse vor. Mit solchen Linsen kann ein Röntgenmikroskop eine Auflösung von deutlich unter 5 nm erreichen. Mit sehr energiereichen Röntgenstrahlen erlauben sie eine hochauflösende Abbildung biologischer Proben bei minimaler Strahlenschädigung. In Kombination mit hochmodernen großen Röntgenanlagen eröffnen sich so interessante neue Möglichkeiten, beispielsweise die Abbildung von Strukturen im Inneren von Zellen oder Gehirngewebe.

Vor 130 Jahren, im Jahr 1895, entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen geheimnisvolle Strahlen, die er als X-Strahlen bezeichnete. Diese Entdeckung hatte einen unmittelbaren und tiefgreifenden Einfluss auf unser Wohlergehen, insbesondere dank der medizinischen Diagnostik und Therapie. Bald war klar, dass die Röntgenstrahlen elektromagnetische Strahlung von sehr kurzer Wellenlänge sind, fast eine Million Mal kürzer als die von sichtbarem Licht. Daher versprach man sich viel davon, sie auch für hochauflösende Bildgebung zu nutzen. Um allerdings ein Röntgenmikroskop zu bauen, braucht man auch eine passende Linse; denn ein Röntgenmikroskop sammelt wie jedes andere Mikroskop das Licht und recombiniert es mit Hilfe einer Linse, um ein Bild zu erhalten.

Vergleicht man die Auflösung eines Röntgenmikroskops mit der von Licht- und Elektronenmikroskopen, so liegt sie zwischen diesen beiden. In der Lichtmikroskopie werden Photonen mit sehr niedriger Energie verwendet, die die abzubildende Struktur nicht schädigen. Begrenzt durch die Wellenlänge sichtbaren Lichts können jedoch nur Strukturen aufgelöst werden, die etwa 0,2 μm oder größer sind.

Diese Beugungsgrenze wurde zwar durch die superauflösende Lichtmikroskopie überwunden, erfordert aber eine Markierung von Strukturen mit chemischen Molekülen. Diese Moleküle lagern sich an bestimmten Stellen in der Probe an und leuchten auf, wenn sie mit einem Laser einer bestimmten Wellenlänge beleuchtet



Abb. 1 Teil eines Strahlrohrs eines Mikroskops für weiche Röntgenstrahlung, das am Synchrotron BESSY in Berlin verwendet wurde und jetzt im Deutschen Röntgen-Museum in Remscheid zu sehen ist (Quelle: Archiv Deutsches Röntgen-Museum).

werden; damit kann man Bilder weit über die Beugungsgrenze hinaus erzeugen. Dieser Durchbruch brachte Eric Betzig, Stefan W. Hell und William E. Moerner 2014 den Nobelpreis für Chemie ein. Die Elektronenmikroskopie kann Bilder mit atomarer Auflösung liefern; aber da diese Bilder mit energiereichen Teilchen gewonnen werden, ist ihre Auflösung vor allem durch Strahlungsschäden begrenzt. Die Untersuchung biologischer Proben bei kryogenen Temperaturen trägt wesentlich dazu bei, diese Schäden zu verringern. Die Röntgenmikroskopie verwendet ebenfalls hochenergetische Photonen, die sogar noch mehr Energie in die Probe eintragen. Neben Strahlungsschäden hat diese Methode bislang den weiteren Nachteil, durch die Qualität der eingesetzten Linsen begrenzt zu sein.

Nichtsdestotrotz ist die Röntgenmikroskopie sehr attraktiv, da sie sich für die Abbildung relativ großer und komplexer Proben eignet, keine spezielle Probenvorbereitung erfordert und zur Beobachtung der lokalen Zusammensetzung, des chemischen Zustands und der chemischen Struktur verwendet werden kann. Die Wellenlängen der Röntgenstrahlen sind vergleichbar mit dem Abstand zwischen den Atomen in einem Kristall.

Tatsächlich konnte man mit Röntgenstrahlen schon bald nach ihrer Entdeckung die atomare und molekulare Struktur in Kristallen sichtbar machen. Dies geschah jedoch durch die Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen. In diesem Beitrag interessieren wir uns in erster Linie für Röntgenlinsen, die zur Abbildung nichtkristalliner Strukturen verwendet werden können.

Die Tatsache, dass Röntgenstrahlen Materialien leicht durchdringen können, liegt an ihrer schwachen Wechselwirkung mit Materie. Diese Eigenschaft ist auch der Grund, warum es so schwierig ist, sie durch Reflexion, Beugung oder Brechung zu steuern. Es ist daher nicht verwunderlich, dass es so lange gedauert hat, bis man herausgefunden hat, wie man Röntgenstrahlen fokussieren kann. Die grundlegenden Konzepte der Fokussierung von Röntgenstrahlen mit verschiedenartigen Optiken wurden in dieser Zeitschrift bereits detailliert beschrieben [1], wir werden sie daher hier nur kurz zusammenfassen.

Das Fokussieren mit reflektierenden Spiegeln wurde zum ersten Mal etwa 50 Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung mit parabolischen Spiegeln unter streifendem Einfall demonstriert. Um einen 2D-Fokus zu erhalten, wurden zwei solcher Spiegel orthogonal zueinander angeordnet, da ein Spiegel die Röntgenstrahlen nur in einer Richtung fokussiert. Diese KB-Spiegel, benannt nach ihren Erfindern Paul Kirkpatrick und Albert Baez, werden heute routinemäßig an Synchrotronquellen eingesetzt. Moderne Reflexionsspiegel können Röntgenstrahlen auf eine Punktgröße von weniger als 10 nm fokussieren, doch für solche Spiegel sind extrem glatte und präzise geformte Substrate erforderlich, die mit einer hochpräzisen Beschichtung oder einer Multischicht versehen sind. Albert Baez ist übrigens der Vater der populären amerikanischen Folksängerin, Songwriterin und Aktivistin Joan Baez, die auch eine der ersten Musikerinnen war, die Songs von Bob Dylan aufnahm.

Fokussieroptiken, die sich Beugung zunutze machen (Fresnel-Zonenplatten), wurden erstmals 80 Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen vorgestellt. Bis vor kurzem wurden sie hauptsächlich zur Fokussierung weicher Röntgenstrahlen und zur Bildgebung im Bereich des „Wasserfensters“ verwendet. In diesem Energiebereich zwischen 290 und 540 eV profitiert man vom Absorptionskontrast von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, den wichtigsten Elementen in Zellen und anderen biologischen Strukturen, während der Signalhintergrund durch das Wasser gering und konstant bleibt.

Bis Brechungslinsen zur Anwendung kamen, dauerte es sogar noch länger, nämlich bis fast hundert Jahre nach Röntgens Entdeckung. Anders als bei sichtbarem Licht ist der Realteil des Brechungsindex für Röntgenlicht bei allen Materialien kleiner als 1. Daher müssen diese Linsen in der Mitte dünner sein als an ihren Rändern. Statt einer konvex geformten Linse, wie sie für sichtbares Licht verwendet wird, müssen wir umgekehrt einen konvex geformten Hohlraum verwenden.

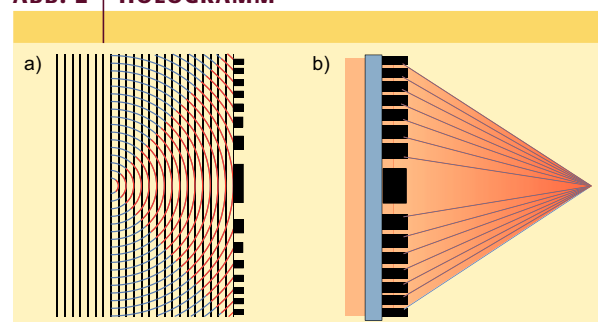
Die Fokussierung durch einen einzelnen Hohlraum ist sehr schwach und führt zu extrem langen Brennweiten. Eine Reihe solcher Hohlräume hintereinander verstärkt den Effekt und bringt den Fokus in einen angemessenen Abstand von der Linse. Um die Absorption im Material, die dem Imaginärteil des komplexen Brechungsindex entspricht, zu minimieren, werden in der Regel Materialien mit niedriger Ordnungszahl wie Beryllium, Diamant oder Aluminium verwendet. In diesem Beitrag wollen wir eine neue Art von Röntgenlinse vorstellen, die von uns am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY in Hamburg im letzten Jahrzehnt entwickelt wurde. Sie basiert auf Beugung, unterscheidet sich aber von der Fresnel-Zonenplatte.

Fresnel-Zonenplatte

Röntgens Geburtsort Remscheid ist eine kleine Stadt in Nordrhein-Westfalen. Wenn Sie durch das dort ansässige Deutsche Röntgen-Museum (siehe „Internet“ auf S. XY) streifen, können Sie viel über Röntgens Arbeit und Leben erfahren. Daneben gibt es eine bemerkenswerte Sammlung von Artefakten, die mit Röntgenstrahlen und ihren Anwendungen zu tun haben. Vielleicht stoßen Sie auch auf ein ungewöhnliches Gerät, das einst Endgerät einer Synchrotronstrahlführung war (Abbildung 1). Für Laien ist es schwer zu erkennen, dass man ein Röntgenmikroskop vor sich hat. Dieses Gerät wurde von Günter Schmahl von der Universität Göttingen gebaut und war viele Jahre am Synchrotron BESSY in Berlin im Einsatz.

Als Linse diente bei diesem Mikroskop eine winzige Fresnel-Zonenplatte, die bloßem Auge kaum zu erkennen war. Eine Fresnel-Zonenplatte sieht ganz anders aus als eine Linse, die sichtbares Licht bündelt. Eine solche Beugungsoptik besteht aus konzentrischen Ringen (Zonen), wobei die Zonen mit zunehmender Entfernung vom Zentrum immer dünner und enger werden. In Abbildung 2 sehen wir die schematische Darstellung einer Fresnel-Zonenplatte im Querschnitt (rechts). Je dünner eine Zone ist, desto größer ist der Winkel, in dem sich die Röntgenstrahlen an ihr beugen. Damit soll sichergestellt werden, dass sich alle Röntgenstrahlen, die auf diese Zonenplatte fallen, zu einem gemeinsamen Punkt – dem Brennpunkt – beugen. Die Breite der Zonen folgt der sogenannten Zonenplattengleichung. In

ABB. 2 | HOLOGRAMM



a) Hologramm eines Punktes mit konstruktiver Interferenz, b) die Zonenplatte im Querschnitt dargestellt.

INTERNET

Deutsches Röntgen-Museum
<https://roentgenmuseum.de>

Advanced Multilayer X-ray
Optics-Gruppe am CFEL
<https://ml.cfel.de>

Worten: Die Dicke der n -ten Zone ist proportional zur Quadratwurzel aus $n \times \lambda \times f$, wobei n eine ganze Zahl, λ die Wellenlänge und f die Brennweite ist.

Das Objektiv wirkt wie ein Interferometer, und die höchste Auflösung hängt letztlich vom größten Winkel ab, den das Objektiv zulässt. Dieser Winkel wird auch als numerische Apertur oder NA des Objektivs bezeichnet. Die Auflösung und die NA werden also durch die äußerste, dünnste Zone in einer solchen Linse bestimmt. Im Prinzip ist die minimal erreichbare Auflösung eines Mikroskops proportional zur Wellenlänge und umgekehrt proportional zur NA der Linse. Um das Potenzial eines hochauflösenden Röntgenmikroskops voll auszuschöpfen, benötigen wir daher eine Röntgenlinse mit hoher NA .

Kehren wir zu dem Röntgenmikroskop mit der Fresnel-Zonenplatte im Museum zurück. Diese Zonenplatte wurde mit Hilfe der Holographie hergestellt. Schmahl erkannte Ende der 1960er-Jahre [2]: Um ein Hologramm eines Punktes mit sichtbarem Licht zu erzeugen, musste er nur eine Zonenplatte auf Fotolack drucken, denn eine Zonenplatte ist nichts anderes als das Hologramm eines Punktes (s. „Hologramm“ auf S. XY); und die so erzeugte Zonenplatte konnte er dann zur Bündelung von Licht kürzerer Wellenlänge verwenden. Diese Methode funktionierte für weiche Röntgenstrahlung, jedoch war die Auflösung der Zonenplatte durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts begrenzt, das zum Drucken des Hologramms verwendet wurde.

Die Herstellung höher auflösender Zonenplatten gelang erstmals nach einer Idee von David Sayre, einem bei IBM arbeitenden Physiker, und Janos Kirz von der Stony Brook University (New York). Sie kombinierte computergenerierte Hologramme mit der Technologie der Mikrolithographie [3]. Auch heute noch werden Fresnel-Zonenplatten mit Hilfe der Elektronenlithographie hergestellt. Begrenzt wird diese Technologie durch das maximal mögliche Aspektverhältnis, also das Verhältnis von Dicke zu Breite der Zonen. „Breite“ soll hier die laterale Ausdehnung einer Struktur auf der Ebene der Zonenplatte definieren, während „Dicke“ im Folgenden ihre Höhe bezeichnet. Während Aspektverhältnisse von etwa 10 für die Fokussierung weicher Röntgenstrahlen ausreichen, verändern solch dünne Zonenplatten die Wellenfront (s. „Wellenfront“ auf S. YX) härterer Röntgenstrahlen kaum. Um ihre Effizienz zu erhöhen, müssen viel mehr Atome mit der Röntgenstrahlung wechselwirken, was bedeutet, dass viel, viel dickere Zonen erforderlich sind. Einer der Hauptunterschiede

zwischen dünnen und voluminösen Fresnel-Zonenplatten liegt in deren Herstellung.

Volumen-Fresnel-Zonen-Platte

Volumen-Fresnel-Zonen-Platten werden durch schichtweises Auftragen von zwei verschiedenen Materialien hergestellt. Frühe Versuche, Strukturen aus Querschnitten solcher Mehrschichtfolien zu erzeugen, haben gezeigt, dass sehr hohe Aspektverhältnisse hergestellt werden können, aber auch, dass viele Herausforderungen zu bewältigen sind. Dazu zählt insbesondere das Auftragen vieler Tausend Schichten bei gleichzeitigem Erreichen der erforderlichen Genauigkeit bei der Platzierung dieser Schichten, der Kontrolle ihrer Spannung und Rauheit und der Beibehaltung ihrer Struktur beim Schneiden.

Zur Herstellung dünner Fresnel-Zonenplatten verwendet man Elektronenstrahlolithographie. Warum soll nun die Methode des Beschichtens besser zur Herstellung von Volumen-Fresnel-Zonenplatten geeignet sein? Das liegt daran, dass durch das Auftragen auch Schichten mit einer Dicke von nur 1 nm herstellbar sind, und sich ihre Dicke viel besser steuern lässt als die Positionierung der Zonen in einem Lithographieverfahren. Eine Multischicht kann auf einen dünnen Draht abgeschieden und dann auf die gewünschte Dicke geschnitten werden. Auf diese Weise kann zumindest im Prinzip eine voluminöse Fresnel-Zonenplatte mit beliebigem Seitenverhältnis hergestellt werden.

Die Schichtabscheidung erfolgt in der Regel durch physikalisches Sputtern. Diese Technologie erlebte in den späten 1990er-Jahren einen großen Aufschwung. Die Halbleiterindustrie suchte nach Möglichkeiten, dem Mooreschen Gesetz weiter zu folgen und investierte beträchtliche Summen in die Entwicklung der Lithografie der nächsten Generation. Gordon Moore als einer der Mitbegründer von Intel stellte fest, dass sich die Anzahl der Transistoren in einem integrierten Schaltkreis im Durchschnitt alle zwei Jahre verdoppelte. Mehrere verschiedene Technologien wurden als Lithografie der nächsten Generation in Betracht gezogen, aber die Extrem-Ultraviolett-Lithografie (EUVL) ging als Sieger hervor (siehe auch Physik in unserer Zeit **2025**, 56(4), 236). Dies ist insofern erstaunlich, als diese Technologie als unmöglich galt, jetzt aber routinemäßig zur Herstellung von Chips, zum Beispiel für Smartphones, eingesetzt wird.

Ermöglicht wurde EUVL vor allem durch hochwertige Multischichten, die in Lithografiewerkzeugen verwendet werden, um EUV-Licht über mehrere reflektierende Spiegel zu leiten und so verkleinerte Abbildungen von Schaltkreisen auf Siliziumwafer zu drucken. Um den höchsten Durchsatz zu erreichen, müssen diese Substrate mit Multilayern beschichtet werden, die sie im Wellenlängenbereich um 13,5 nm (100 eV) hochreflektierend machen. Dies erforderte große Fortschritte in der Sputtertechnologie, die stabile, reproduzierbare und äußerst präzise Beschichtungen ermöglicht. Sie

wird ebenso zur Herstellung von Multischichten für die hier besprochenen Fresnel-Volumenplatten verwendet.

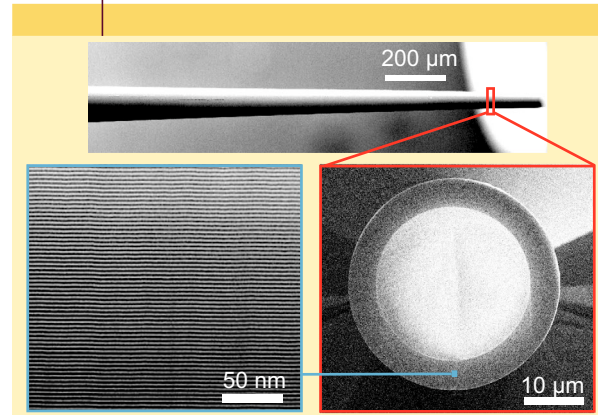
Das Magnetronspütern ist eine der am häufigsten verwendeten Technologien zur Deposition von Multischichten, da der Prozess schnell, stabil und reproduzierbar ist. Zur Herstellung einer Volumen-Fresnel-Zonenplatte muss jedoch eine Multischicht auf einem sehr dünnen Zylinder mit einem Durchmesser vergleichbar dem eines Haars geschichtet und dann auf eine gewünschte Dicke geschnitten werden. Diese Dicke wird durch die Mehrschicht-Materialien und die zu fokussierende Röntgenwellenlänge bestimmt. Materialien geringerer Dichte und kürzer Röntgenwellenlängen, also höhere Röntgenenergien, erfordern dickere Zonenplatten. So einfach es auch klingen mag, die Deposition einer qualitativ hochwertigen Multilayerschicht auf einen dünnen Zylinder unterliegt nach wie vor einer intensiven Entwicklungsarbeit (Abbildung 3). Die Haupthindernisse sind die Rauheit der Grenzflächen und Spannungen, die jeweils mit der Anzahl der abgeschiedenen Schichten zunehmen. Hinzu kommt, dass die Dicke und die Position der einzelnen Schichten perfekt auf das Design der Mehrschichtlinse abgestimmt sein müssen. Aus diesem Grund wurden noch keine Volumen-Fresnel-Zonenplattenlinsen mit hoher NA hergestellt.

Glücklicherweise kann man eine eindimensionale Linse herstellen, indem man eine ähnliche Mehrschichtstruktur auf ein flaches Substrat aufträgt. Dies wird auch als Mehrschicht-Laue-Linse (MLL) bezeichnet (Abbildung 4). Max von Laue war der erste, der 1912 die Röntgenbeugung nachwies. Die Beugung an Kristallen in einer Transmissionsgeometrie – im Gegensatz zu einer Reflexionsgeometrie – wird bis heute als Laue-Geometrie bezeichnet. Im Vergleich zu einer Volumen-Fresnel-Zonenplatte, die im Grunde ein Volumenhologramm eines Punktes ist, ist eine 1D-MLL ein Volumenhologramm einer Linie. Da eine MLL das Röntgenlicht nur in einer Richtung fokussiert, benötigt man zwei davon, um einen 2D-Fokus zu erhalten. Zum Beispiel eine, die Röntgenstrahlen in horizontaler, und eine, die in vertikaler Richtung fokussiert. Das bedeutet, dass zwei solche Linsen orthogonal zueinander angeordnet werden müssen (Abbildung 5).

Herstellung von mehrschichtigen Laue-Linsen

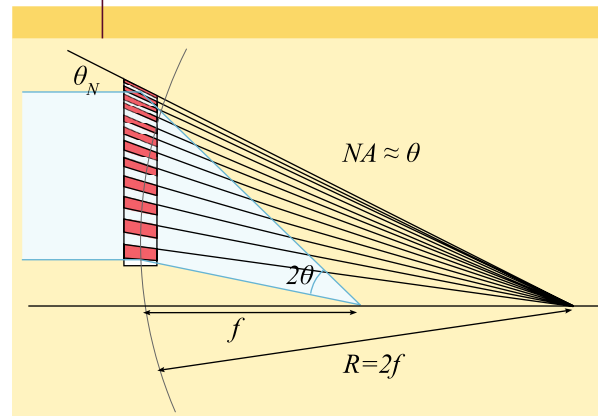
Bei der Herstellung einer MLL wird die Multischicht, aus der sie geschnitten wird, auf einen hochglanzpolierten Si-Wafer abgeschieden. Der ganze Prozess des Magnetronspüterns geschieht im Hochvakuum. In einer Kammer befinden sich zwei Magnetrons mit unterschiedlichen Targetmaterialien A und B sowie ein Substrat, das zwischen beiden Targets hin und her bewegt werden kann (Abbildung 6). Auf diese Weise kann man einen Multilayer aus beiden Materialien aufbauen, mit sich abwechselnden Schichten (A/B/A/B...). Die einzelnen Schichtdicken können im gesamten Stapel konstant sein („periodische Multilayer“) oder wie bei MLLs in vorgegebener Weise variieren.

ABB. 3 | VOLUMEN-FRESNEL-ZONENPLATTE



Herstellung einer Volumen-Fresnel-Zonenplatte. Im Idealfall wird die Multischicht auf einem dünnen Draht abgeschieden (oberes Bild), der dann auf die gewünschte Dicke geschnitten werden kann. Der Querschnitt zeigt den Substratdraht (unten rechts, heller innerer Kreis), der mit den Multilayerschichten (dunklerer Ring) beschichtet ist. Eine Nahaufnahme (unten links) zeigt ein repräsentatives Multischichtsystem.

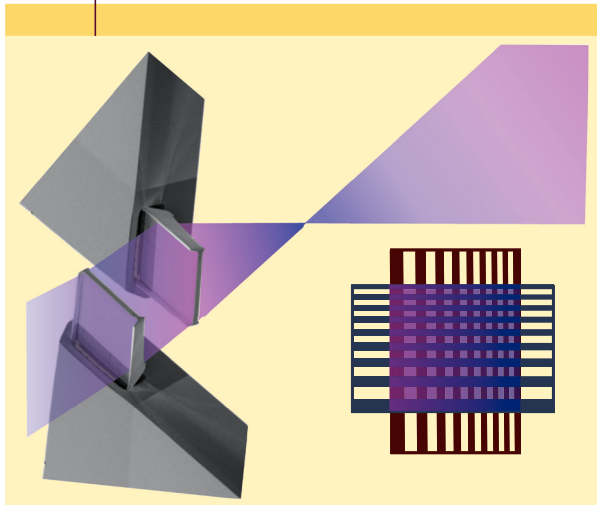
ABB. 4 | MEHRSCHEIT-LAUE-LINSE I



Die Geometrie einer Mehrschicht-Laue-Linse (MLL) mit großen NA im Querschnitt. Alle Schichten in einer solchen Linse mit der Brennweite f müssen so gekippt werden, dass sie der Krümmung eines Radius R entsprechen, der gleich $2f$ ist. Das Schema zeigt nur sehr wenige Schichten in einer solchen Linse. In Wirklichkeit besteht jede Linse aus Zehntausenden von Schichten.

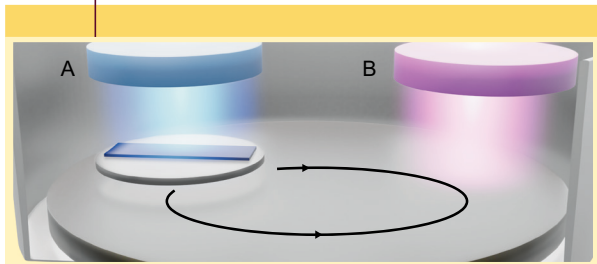
Vor Beginn des Sputterns wird die Luft aus der Kammer abgepumpt, um ein Ultrahochvakuum zu erzeugen, ein Druck zehn Milliarden Mal niedriger als Normaldruck. Noch während des Abpumpens wird eine kleine Menge Inertgas – in der Regel Argon oder Krypton – eingeleitet. Die Kammer befindet sich immer noch unter Vakuum, aber der Druck ist „nur“ noch etwa zehn Millionen Mal niedriger als Atmosphärendruck. Unter diesen Bedingungen schalten wir die Magnetrons ein, indem wir eine Hochspannung zwischen der Kathode, die sich direkt hinter dem Target befindet, und der Anode anlegen. Dadurch wird ein Plasma gezündet, das aufgrund der starken Magnetfelder des Magnetrons

ABB. 5 | MEHRSCICHT-LAUE-LINSE II



Eine Mehrschicht-Laue-Linse (MLL) fokussiert Röntgenstrahlen nur in eine Richtung. Zwei solcher Linsen müssen deswegen orthogonal zueinander angeordnet werden, um einen 2D-Fokus zu erhalten. Das Schema zeigt nur sehr wenige Schichten in einer solchen Linse.

ABB. 6 | HERSTELLUNG MITTELS SPUTTERN



Eine Multischicht aus Material A (blau) und Material B (rosa) wird auf einem Substrat abgeschieden, das sich zwischen Plasmen dieser beiden Materialien bewegt.

dicht über der Oberfläche des Targets eingeschlossen ist. Während dieses Vorgangs beschießen die Plasmaionen das Target. Atome oder Moleküle werden aus dem Target herausgeschlagen und auf dem Substrat abgelagert. Das Substrat bewegt sich zwischen den Plasmen der beiden Targets, und die im Plasma verbrachte Zeit ist proportional zur Schichtdicke, die auf dem Substrat abgeschieden wird. Um Schichten mit der gewünschten Dicke abscheiden zu können, müssen die Sputterraten kalibriert werden. Sobald diese bekannt sind, ist es ein Leichtes, Multischichten nach einem beliebigen Muster abzuschneiden.

Die einzige Annahme dabei ist, dass die Sputterraten konstant sind. Aber stimmt das auch? Wenn die Abscheidung nur ein oder zwei Stunden dauert, wie es bei der Herstellung von Reflexionsschichten für EUVL-Spiegel der Fall ist, ist dies eine gültige Annahme. Für die Herstellung einer MLL mit Tausenden von Schichten dauert die Abscheidung jedoch in der Regel mehrere Tage oder sogar eine Woche. Während dieser Zeit

wird das Targetmaterial langsam weggesputtert, und da sich die Targetdicke ändert, ändert sich auch die Sputterraten. Wäre diese Änderung der Sputterraten bekannt, was aktuell noch nicht der Fall ist, könnten wir eine perfekte Linse herstellen. Noch weichen die Schichten in ihrer Dicke und Position im Mehrschichtstapel leicht voneinander ab, was die Hauptursache für mangelhafte Linsen darstellt.

Außerdem erfordert eine hohe MLL-Qualität perfekte Kontrolle nicht nur in vertikaler, sondern auch in lateraler Richtung. Die Dicke jeder einzelnen Schicht muss mit der Design-Dicke übereinstimmen, und jede Schicht muss auch korrekt zum einfallenden Röntgenstrahl geneigt sein. Alle Schichten in einer Linse mit Brennweite f müssen so gekippt und geformt sein, dass sie eine Krümmung mit Radius R aufweisen, der gleich $2f$ ist. Dadurch wird sichergestellt, dass jede Schicht das Röntgenlicht beugt und auf einen gemeinsamen Punkt („Fokus“) lenkt (Abbildung 4). Abweichungen führen zu einer Vergrößerung des Fokuspunktes, und damit weniger intensiver Strahlung pro Fläche.

Wir haben eine Methode entwickelt, um das Kippen der Schichten mit Hilfe einer geraden Metallmaske zu erreichen, die in einem bestimmten Abstand d über dem Substrat angebracht wird. Das Substrat wird dann zusammen mit der Maske zwischen den Plasmen der beiden Targets bewegt. Um das Konzept zu veranschaulichen, stellen wir uns eine Hängelampe über einem Tisch vor. Wenn Sie einen flachen, undurchsichtigen Gegenstand zwischen die Lampe und den Tisch halten, wirft dieser Gegenstand einen Schatten auf den Tisch. Je näher man den Gegenstand an den Tisch bewegt, desto schärfer werden die Kanten seines Schattens. Der Abstand zwischen Objekt und Tisch bestimmt, wie schnell sich der Übergang zwischen voll ausgeleuchtetem und komplett abgeschattetem Bereich ändert. Dasselbe geschieht, wenn eine Maske in einem Abstand d über das Substrat gehalten wird. Dadurch entsteht im Halbschatten eine stark ansteigende Dickenänderung jeder abgeschiedenen Schicht, die präzise kontrolliert werden kann. Genau in diesem Bereich werden die Schichten entsprechend dem Design geformt – natürlich über eine sehr kurze Strecke – und die MLL später ausgeschnitten (Abbildung 4).

Der Dickengradient muss gemessen werden, um herauszufinden, wo genau die Schichtdicke und die Neigung mit dem Design der gewünschten MLL übereinstimmen. Diese Nachbearbeitung erfolgt mit einem Instrument, bei dem ein fokussierter Ionenstrahl zum Schneiden der Multilayer verwendet wird, während der Prozess gleichzeitig mit einem Rasterelektronenmikroskop abgebildet wird. Auf diese Weise kann das Material um den gewünschten Bereich herum sanft abgetragen und entfernt werden. Die herausgeschnittene Linse, die in der Regel nicht größer als $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ im Querschnitt und 10 bis $30\ \mu\text{m}$ dick ist, wird dann an der

Kante eines Substrats befestigt und ist bereit für die Charakterisierung, so wie in Abbildung 5 gezeichnet.

Charakterisierung einer mehrschichtigen Laue-Linse

Um die Linse vollständig charakterisieren zu können, muss die Energie der Linse – also die Wellenlänge, für die sie designt ist – der Energie der Röntgenquelle entsprechen, mit der diese Messungen durchgeführt werden. Röntgenstrahlen, die von einer perfekten Linse fokussiert werden, bilden eine kugelförmige Wellenfront. Die Einzelheiten der Methode zur Messung dieser Wellenfront würden den Rahmen dieses Artikels sprengen. Wichtig ist, dass mit ihr Abweichungen von der kugelförmigen Wellenfront bis hin zum Radius eines Atoms festgestellt werden können. Denn selbst solche kleinen Unvollkommenheiten beeinträchtigen die Leistung der Linse und verbreitern den Fokus. Obwohl es schneller ist, Messungen an einer Synchrotronquelle durchzuführen, haben wir gezeigt, dass unsere Methode ebenso gut mit einer Röntgenquelle im Labor funktioniert. Die Messungen liefern ein wichtiges Feedback für die Herstellung weiterer Linsen.

Während wir in der Lage sind, stetig höhere Linsen mit größerer NA herzustellen, wird es auch immer schwieriger, Abbildungsfehler zu vermeiden. Die gute Nachricht ist, dass kleinere Fehler mit Phasenkorrektoren ausgeglichen werden können. Das Grundprinzip eines Phasenkorrektors ist vergleichbar mit der Korrektur des Sehvermögens durch eine Brille. Zur Korrektur von Wellenfrontfehlern in der MLL können wir Strukturen verwenden, welche die Wellenfront durch Brechung verändern. Glücklicherweise erfordert ihre Herstellung eine deutlich geringere Präzision im Bereich von Mikrometern, als sie die Herstellung von MLLs erfordert. Bisher drucken wir sie aus Polymeren in einem hochpräzisen 3D-Drucker. Durch all diese Entwicklungen ist es uns gelungen, harte Röntgenstrahlen auf eine Fläche von $4 \text{ nm} \times 4 \text{ nm}$ zu fokussieren, in etwa die Größe einiger Makromoleküle oder großer Viren. Mit Phasenkorrektoren konnten wir den Fokuspunkt weiter auf unter 3 nm reduzieren [4], ein Weltrekord für Röntgenstrahlung, ja sogar für alle Arten elektromagnetischer Strahlung.

Um feine Details zu sehen, müssen Röntgenstrahlen auf einen sehr kleinen Punkt fokussiert werden. Bei gleicher Größe und Intensität des einfallenden Strahls ist die Intensität umso höher, je kleiner der fokussierte Punkt ist. Folglich erhält die Probe eine höhere Strahlendosis, was insbesondere bei der Abbildung strahlenempfindlicher Materialien problematisch ist (siehe „Strahlendosis“ auf S. YX). Um die Dosis zu verringern, können wir Röntgenstrahlen sehr kurzer Wellenlängen, also hoher Photonenenergien, verwenden, bei denen die Probe im Grunde transparent wird. Glücklicherweise steigt die Effizienz von MLLs mit zunehmender Röntgenenergie.

HOLOGRAMM

Ein Hologramm ist eine Aufzeichnung der Interferenz zwischen einer Welle, die von einem Objekt gestreut wird, und einer Referenzwelle. Man kann die

Objektwelle wiederherstellen, indem man das Hologramm mit einer Referenzwelle beleuchtet.

WELLENFRONT

Wenn man einen Stein ins Wasser wirft, entstehen kreisförmige Wellen. Was passiert, wenn man möchte, dass die Wellen in einem Punkt zusammen-

laufen – also in der Zeit rückwärts laufen? Dann entsteht ein Brennpunkt. Wir wollen diese Art von Wellenfront, rückwärts in der Zeit.

STRAHLENDOSIS

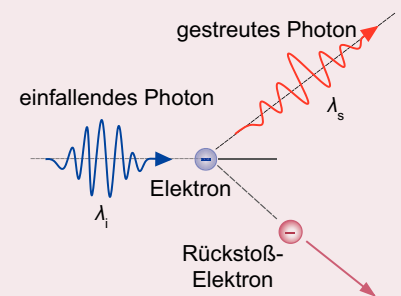
Die Strahlendosis ist die Energie, die von einer (biologischen) Probe absorbiert wird, die Röntgenstrahlung ausgesetzt ist. Je höher die Intensität der Quelle und je länger die Probe dieser

Strahlung ausgesetzt ist, desto höher ist die Dosis. Die Dosis wird in der Regel in der Einheit Gray (Gy) angegeben. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule Energie, die in 1 Kilogramm Material deponiert wird.}$

COMPTON-EFFEKT

Der Compton-Effekt: Die Wellenlänge des gestreuten Photons ist größer als bei Ankunft, also $\lambda_s > \lambda_i$, bei der Energie ist es umgekehrt.

Zur Erklärung des Compton-Effekts betrachten wir die Kollision eines Photons mit einem Elektron, wobei wir die Energie- und Impulserhaltung anwenden müssen. Nach der Wechselwirkung hat das gestreute Photon eine geringere Energie, wie hier schematisch dargestellt.



Ein anderer Ansatz besteht darin, die Belichtungszeit zu verkürzen, was durch die Verwendung intensiver Femtosekunden-Röntgenpulse möglich ist, die von Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs) bereitgestellt werden. Dies erfordert jedoch Kristalle, wenn auch kleine, die in den Röntgenstrahl eingebracht und zerstört werden, sobald sie mit ihm wechselwirken. Die Bestimmung von Proteinstrukturen und deren Dynamik kann mit der seriellen Femtosekunden-Kristallographie, wie zuvor beschrieben, beobachtet werden [5]. Wir werden später darauf zurückkommen, aber jetzt

betrachten wir MLLs mit hoher NA , die Röntgenstrahlen mit sehr hoher Energie fokussieren können.

Mikroskopie

Kürzlich haben wir die hochauflösende Abbildung biologischer Proben bei einer Wellenlänge von 0,02 nm (60 keV) mit MLLs nachgewiesen. Bei solch kurzen Wellenlängen durchdringen Röntgenstrahlen die Probe praktisch ungehindert. Da Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind, können sie mit ihrer Amplitude und Phase beschrieben werden. Bei diesen kurzen Wellenlängen – hohen Energien – werden ihre Amplitude und Phase beim Durchgang durch die Probe nicht verändert. Eine Wechselwirkung, die normalerweise vernachlässigbar klein ist und als Compton-Effekt (siehe „Compton-Effekt“ auf S. XX) bekannt ist, wird jedoch dominant.

Um ein Bild mit 60 keV-Röntgenstrahlen zu erzeugen, fokussierten wir den Strahl mit unseren MLLs und platzierten die Probe in der Fokusebene. Die Probe wurde dann durch den fokussierten Strahl bewegt, um die gesamte Probe abzutasten, und in jeder Position wurden Compton-Röntgenphotonen gesammelt. Auf diese Weise konnten wir Bilder, wie das in Abbildung 7 gezeigte, erzeugen [7]. Das Bild zeigt eine Projektion der Elektronendichte eines Baumpollens mit einem Durchmesser von etwa 40 μm . Man kann deutlich eine Schaumstruktur in den Wänden dieses Baumpollens erkennen. Die Strahlendosis, die in den Baumpollen eingebracht wurde, war etwa 2000-mal niedriger als die Dosis, die erforderlich wäre, um ein Bild mit ähnlicher Auflösung bei niedrigerer Röntgenenergie zu erhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wir hohe Röntgenenergien und Compton-Streuung verwendet haben, anstatt uns auf Absorptions- oder Phasenkontrast zu verlassen. Selbst bei diesen sehr hohen Röntgenenergien lag die Auflösung der verwendeten MLLs unter 10 nm. Die Auflösung des in Abbildung 7 gezeigten Bildes ist jedoch viel schlechter. Wie ist diese Diskrepanz zu erklären?

Der Fokus ist eigentlich das Bild der Quelle. Aus der geometrischen Optik wissen wir, dass die Quelle kleiner erscheint, wenn wir sie weiter weg platzieren, aber dann breitet sich das Licht auch über eine größere Fläche aus. Natürlich kann man auch einen sehr kleinen Lichtfleck herstellen, jedoch mit geringerer Photonenzahl. Wenn die Quelle also nicht vollständig kohärent ist wie bei einem Laser, muss man einen Kompromiss zwischen der Größe der Quelle und dem Lichtstrom eingehen – also wie viele Photonen sich in dem Bereich befinden, den man fokussiert. Genau das mussten wir bei der Fokussierung des PETRA-III-Synchrotronlichtstrahls mit

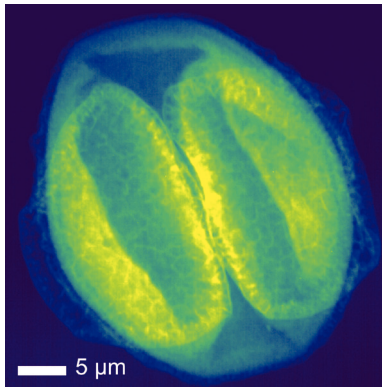


Abb. 7 Eine Projektion der Elektronendichte eines Baumpollens mit einem Durchmesser von etwa 40 μm , die durch Compton-Streuung ermittelt wurde. In den Wänden dieses Baumpollens ist eine Schaumstruktur zu sehen.

60-keV-Photonen tun. Die Quellengröße dieser Synchrotronstrahlenquelle der dritten Generation ist in vertikaler Richtung klein, in horizontaler Richtung jedoch relativ groß. Um die Leistung dieser neuartigen Linsen voll auszunutzen, sollte die Synchrotronquelle in beiden Richtungen klein sein, was mit Synchrotronquellen der vierten Generation möglich wird. Dies ist nur eine von vielen Techniken, die von der Synchrotronstrahlenquelle PETRA IV enorm profitieren würden [6].

Schlussfolgerungen

Wie kann man von den kürzeren Belichtungszeiten profitieren, die durch XFELs ermöglicht werden?

Diese Quellen stellen enorme Anforderungen an die Röntgenoptiken. Wir haben gezeigt, dass MLLs auch zur Fokussierung von XFEL-Pulsen verwendet werden können [8]. Dies eröffnet eine Fülle von Experimenten zur Untersuchung extrem schneller Prozesse, extrem kleiner Proben oder von Prozessen, die unter extremen Bedingungen ablaufen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass MLLs als Linsen für die Abbildung in verschiedenen Arten von Röntgenmikroskopen, aber auch als Fokussierungselemente in Beugungsexperimenten verwendet werden können. Daher können sie in Kombination mit Röntgenstrahlen aus Synchrotronstrahlungsquellen, XFELs und hellen Labor-Röntgenquellen verwendet werden.

Eine provokante Frage ist, ob ein Röntgenmikroskop mit atomarer Auflösung gebaut werden könnte: Die rasante Entwicklung von Röntgenquellen und Optiken bringt uns diesem Ziel definitiv näher.

Zusammenfassung

Röntgenstrahlen haben eine kurze Wellenlänge und können tief in Materialien eindringen. Seit ihrer Entdeckung wurde ihre Durchdringungskraft genutzt, um in das Innere von Objekten zu schauen, ohne sie zu zerschneiden. Aus der medizinischen Diagnostik ist bekannt, dass man sehr hohe Röntgenenergien, also kurze Wellenlängen, benötigt, um die Strahlenexposition und die Schädigung des untersuchten Objekts zu minimieren. Die hochauflösende Bildgebung nutzt die Vorteile der kurzen Wellenlänge. Abgesehen von der Gewinnung molekularer Strukturen durch Kristallbeugung ist die Bildauflösung jedoch durch die Möglichkeiten von Röntgenlinsen begrenzt. Hier stellen wir eine neuartige Röntgenlinse vor, die durch die Anordnung von zwei Materialien in einer mehrschichtigen Struktur hergestellt wird. Wir haben gezeigt, dass ein Röntgenmikroskop, das diese Art von Linsen verwendet, eine Auflösung von deutlich unter 5 nm erreichen kann. Wir haben diese Linsen auch mit sehr energiereichen Röntgenstrahlen

kombiniert und konnten eine hochauflösende Abbildung biologischer Proben mit minimaler Strahlenschädigung erzielen. In Kombination mit hochmodernen großen Röntgenanlagen eröffnen sich so interessante neue Möglichkeiten, beispielsweise die Abbildung von Strukturen im Inneren von Zellen und Gehirngewebe.

Stichwörter

Röntgenoptiken, Fresnel-Zonenplatte, Beugung, Magnetronspütern, Multilayer, mehrschichtige Laue-Linsen, Mikroskopie, Compton-Mikroskopie.

Danksagung

Wir möchten uns bei Thomas Zoufal, Holger Fleckenstein und Katarina Chapman für die Hilfe bei der Übersetzung bedanken.

Literatur

- [1] A. Last, V. Nazmov, E. Reznikova, *Physik in unserer Zeit* **2007**, 38(4), 176.
- [2] G. Schmahl, D. Rudolph, *Optik* **1969**, 29, 577.en
- [3] J. Kirz, *J. Opt. Soc. Am.* **1974**, 64, 301.
- [4] J. L. Dresselhaus et al., *Opt. Express* **2024**, 32, 16004.
- [5] Schmidt M., *Phys. Unserer Zeit* **2022**, 53(5), 228.
- [6] R. Röhlberger et al., *Physik in unserer Zeit* **2019**, 50(2), 82.
- [7] T. Li et al., *Light: Science & Applications* **2023**, 12, 130.
- [8] M. Zakharova et al., *Opt. Express* **2025**, 33(15), 31884.

Die Autorinnen



Saša Bajt promovierte an der Universität Heidelberg, danach ging sie in die USA und arbeitete an der University of Chicago. Zwischen 1996 und 2008 entwickelte sie hochreflektierenden Multischichten am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) für die Halbleiterindustrie (Extreme Ultraviolet Lithography). Seit 2008 leitet sie eine Gruppe am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY. Ihre jetzige Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung neuartiger Röntgenoptiken. Seit 2024 ist sie Leitende Wissenschaftlerin bei DESY.



Margarita Zakharova promovierte am Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Während ihrer Promotion entwickelte sie Hartmann-Masken mittels UV-Lithografie und Galvanik für die Wellenfrontmetrologie und multikontrastbasierte Röntgenbildgebung. Derzeit arbeitet sie als Postdoktorandin am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY. Ihre aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung und Anwendung mehrschichtiger Laue-Linsen.

Anschrift

Dr. Saša Bajt, DESY Photon Science, Notkestr. 85, Geb. 99, 22607 Hamburg. sasa.bajt@desy.de, margarita.zakharova@desy.de