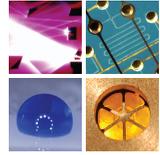


SCHRIFTEN DES INSTITUTS FÜR MIKROSTRUKTURTECHNIK
AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)



Band 41

ELISA KORNE MANN

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

Elisa Kornemann

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Band 41

Hrsg. Institut für Mikrostrukturtechnik

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

von
Elisa Kornemann

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Mikrostrukturtechnik

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Elisa Kornemann geboren in Suhl

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2018

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Lemmer

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Martin Müller

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-5183

ISBN 978-3-7315-0885-4

DOI 10.5445/KSP/1000089715

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der KIT-Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Elisa Kornemann

geb. in: Suhl

Tag der mündlichen Prüfung:	18. Dezember 2018
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Lemmer
Korreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Martin Müller

Kurzfassung

Röntgenstrahlung ermöglicht aufgrund seiner relativ hohen Energie die Durchleuchtung vieler Materialien. Es wird heute in medizinischen, naturwissenschaftlichen und technischen Anliegen wie beispielsweise der zerstörungsfreien Werkstoffanalyse eingesetzt. Abbildende Verfahren wie die Vollfeldmikroskopie werden genutzt, um eine hohe Auflösung unabhängig von den Quelleigenschaften zu erreichen. Die Mikroskopie benötigt dazu abbildende Optiken. Für Photonenenergien oberhalb von 10 keV sind brechende Röntgenlinsen eine effektive Lösung. Die Brechungseigenschaften hängen jedoch stark von der Photonenenergie der Röntgenstrahlung ab, daher weisen die Röntgenlinsen große chromatische Aberration auf. Demzufolge variiert die Brennweite einer Röntgenlinse stark mit der Photonenenergie. Damit solche Linsen universell mit konstanten optischen Eigenschaften über einen breiten Photonenenergiebereich einsetzbar sind, muss die Brennweite einer Röntgenlinse einstellbar gestaltet werden. Erste Umsetzungen einer Röntgenlinse mit variabler Brennweite sind die Transfokatoren und der sogenannte F-Switch, welche rotationssymmetrische Berylliumlinsen nutzen. Diese recht großen und langsam schaltenden Geräte werden hauptsächlich zum Vorfokussieren, Fokussieren und Kollimieren von Synchrotronstrahlung genutzt.

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine kleine und schnell schaltbare Röntgenlinse mit variabler Brennweite für den Einsatz als Objektivlinse in Mikroskopen entwickelt worden. Diese sogenannte Röntgenzoomlinse kann als Objektivlinse eingesetzt den Vergrößerungsmaßstab des Mikroskops verändern. Weitgreifender ist jedoch die Möglichkeit bei veränderlicher Photonenenergie die Brennweite konstant zu halten. Dies ebnet den Weg für schnelle Spektroskopiemessungen über einen weiten Wellenlängenbereich. Es wurden Röntgenlinsen aus dem Negativresist SU-8 genutzt, bei denen die Form und Größe der bikonkaven, parabelförmigen Linsenelemente durch die röntgentiefenlithografische Herstellung frei wählbar sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Aktorikkonzepte über Konstruktion, Montage, Entwicklung der Ansteuerungselektronik bis hin zu ersten Prototypen entwickelt. Nach erfolgreichem Funktionsnachweis der Röntgenzoomlinse und Prototypentests an verschiedenen Strahlrohren, erfolgte das Design anwendungsspezifischer Linsenlayouts. Eine erste Anwendung war der Einsatz einer solchen Zoomlinse als Mikroskopobjektiv mit positionsfestem Fokuspunkt für definierte Photonenenergieschritte um die Germanium K_{α} -Absorptionskante bei 11,103 keV. Dies ermöglicht eine neue Messmethode: einen resonanten Energiescan einer Probe in der Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FFDXM).

Abstract

Due to its short wavelength, X-ray light enables the investigation of the inner structure of many materials. Today it is used in medical, scientific and technical applications such as non-destructive material analysis. Imaging techniques such as full-field microscopy are used to achieve a high resolution independent of the source characteristics. Microscopy requires imaging optics for this purpose. For photon energies above 10 keV, refractive X-ray lenses are an effective solution. However, the refractive properties depend strongly on the wavelength of the X-rays, so the X-ray lenses exhibit strong chromatic aberration. As a consequence, the focal length of an X-ray lens varies greatly with the photon energy. For such lenses to be universally applicable with constant optical properties over a wide photon energy range, the focal length of an X-ray lens must be adjustable. The first implementations of an X-ray lens with variable focal length were transfocators and the so-called F-switch, which use rotationally symmetric beryllium lenses. These quite large and slow-switching devices are mainly used for pre-focusing, focusing and collimating synchrotron radiation.

Within the scope of this work, a small and fast switchable X-ray lens with variable focal length has been developed for use as an objective lens in microscopes. This so-called X-ray zoom lens can change the magnification factor of the microscope. More far-reaching, however, is the possibility of keeping the focal length constant at variable photon energy. This paves the way for fast spectroscopic measurements over a wide range of wavelengths. X-ray lenses from the negative resist SU-8 were used, in which the shape and size of the biconcave, parabolic lens elements are freely selectable due to the deep X-ray lithography process.

In this work, three actuator concepts were developed, from design, assembly, and development of the control electronics to the first prototypes. After successful functional verification of the X-ray zoom lens and prototype tests at various beamlines, the design of application-specific lens layouts was

carried out. A first application was the use of such a zoom lens as a microscope objective with a fixed focal point for defined photon energy steps around the germanium K_{α} -absorption-edge at 11.103 keV. This enables a new measuring method: a resonant scan of the sample in full-field diffraction microscopy (FFDXM).

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ulrich Lemmer für die Übernahme des Hauptreferates. Ich danke für die Unterstützung dieser Arbeit sowie die stets schnelle Hilfsbereitschaft. Herrn Prof. Dr. Martin Müller danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats.

Der größte Dank gilt meinem Betreuer und erstem Ansprechpartner Herrn Dr. Arndt Last für die hervorragende, konstruktive und motivierende Unterstützung in allen Physik-, Technik- und Publikationsfragen sowie die unzähligen Lebensweisheiten. Besonders durch seine Bastelkünste wurde so manche Strahlzeit erst zum Erfolg. Ich danke Herrn Dr. Jürgen Mohr für die große Unterstützung der Arbeit sowie die Korrektur und neuen Blickwinkel in meinen Publikationen und dieser Dissertation.

Der Karlsruhe Nano Micro Facility (KNMF) danke ich für die Finanzierung und Herstellung der essentiellen lithografischen Strukturen meiner Arbeit. Für mein Stipendium danke ich der Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP), insbesondere Stefanie Peer für die administrative Hilfe. Dadurch wurden mir zahlreiche interessante Zusatzqualifikationen ermöglicht.

Ein sehr großer Dank geht an Dr. Tao Zhou für die ermöglichten Strahlzeiten an ID01 an der ESRF, die viele Unterstützung beim Auswerten und Publizieren sowie seine Ideen und Begeisterung für Anwendungen der Zoomlinse. Ebenso danke ich Dr. Imke Greving und Dr. Malte Storm für die Unterstützung bei meiner Strahlzeit an P05 an DESY. Dr. Angelica Cecilia und Mathias Hurst danke ich für ihr großes Engagement bei den Strahlzeiten an IMAGE an ANKA. Auch Dr. Kawal Sawhney danke ich für die tolle Einführung und Unterstützung bei meiner Strahlzeit an B16 an DIAMOND und ich danke Dr. Hiroo Tajiri für die Strahlzeit Proposal No. 2017A1513 an SPring-8.

Danke auch an alle Mitarbeiter der Röntgenoptikgruppe, Danays Kunka, Pascal Meyer und Klaus Bade für die Beratung mit ihrer langjährigen Erfahrung und Martin Börner vor allem für die Einsätze und Hilfestellung bei Bestrahlungen am Strahlrohr Litho2. Peter Schöck vom IPE danke ich für die Zeit, Hilfe und Herstellung vieler Leiterplatten. Vielen anderen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die vielseitigen und kompetenten Beiträge zu meiner Arbeit, besonders Giuseppe Papagno für die Bereitschaft auch unübliche Strukturen zu sägen, Achim Voigt für die tatkräftige Unterstützung bei der Elektronikentwicklung, Alexandra Moritz und dem ganzen Werkstattteam für die Herstellung vieler Teile oft auch in letzter Minute, Ulrich Klein für den Kampf gegen PC-Krankheiten, Nina Giraud für die Hilfe immer den richtigen Fehler im Bestellsystem zu finden, Andreas Bacher und dem Reinraumteam für die Hilfe bei der Herstellung vieler Linsen.

Ein Dank geht an meine Studentin Yuhui Gan für ihre Arbeit. Meinem Mitstreiter bei den Röntgenlinsen Alex danke ich für die vielen Ideen aus Physikersicht und seine enthusiastische Arbeitsweise, die sehr motiviert. All den Mitdoktoranden vor allem aus der Röntgenoptik Sebastian, Frieder, Tobias, Abrar, Vitor, Talgat, Margarita und Andrey danke ich für die tolle Arbeits-atmosphäre, die sportlichen, unterhaltsamen und wissenschaftlichen Aktivitäten in, um und außerhalb des IMTs.

Für die schon immer dagewesene und nicht selbstverständliche Hilfe möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Eltern Marika und Erhard und Geschwistern Nicolette und Marcel, bedanken und dass sie mir so viel ermöglicht haben. Ein ganz herzlicher Dank geht an meinen Verlobten Ottó Márkus. Ihm möchte ich für die unendliche Geduld in (elektro)technischen Fragen, die viele Motivation, Hilfe, Begleitung und Freude bei Strahlzeiten und Konferenzen, und das Verständnis, gerade in stressigen Zeiten (also immer), danken. Ohne ihn gäbe es diese Promotion wohl nicht und ohne meine Promotion ihn nicht an meiner Seite ♥.

Karlsruhe, Dezember 2018

Elisa Kornemann

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Röntgenoptik	5
2.1 Refraktive Röntgenlinsen	6
2.2 Röntgentiefenlithografisch gefertigte Röntgenlinsen	12
2.3 Auflösung refraktiver Optiken.....	19
2.4 Mikroskopie mit CRLs	21
2.4.1 Vergrößernde Schattenwurfmikroskopie.....	22
2.4.2 Mikroskopie mit fokussierender Optik.....	24
3 Konzeption einer Röntgenzoomlinse	27
3.1 Stand der Technik.....	28
3.2 Mechanische Bewegungsprinzipien	31
3.3 Aktorik für Festkörpergelenke.....	36
4 Konstruktion und Montage der Röntgenzoomlinse	41
4.1 Herstellung der Zoomlinsenfingereinheit	41
4.1.1 Siliziumwafer als Zoomlinsensubstrat	43
4.1.2 Kamm aus Federstahl als Zoomlinsensubstrat	48
4.2 Mechanischer Aufbau der Piezozoomlinse.....	52
4.3 Montage einer Piezozoomlinse.....	59
4.4 Mechanischer Aufbau der Exzenterzoomlinse	62
4.5 Mechanischer Aufbau der Formgedächtniszoomlinse	67
4.6 Vergleich der Zoomlinsentypen	71

5	Aktorik und Ansteuerung der Röntgenzoomlinse	73
5.1	Ansteuerung für Piezobiegeaktoren.....	73
5.1.1	Entwicklung der Verstärkerschnittstelle vom Mikrokontroller zu den Piezoaktoren	77
5.1.2	Auslegung der Spannungsversorgung	79
5.1.3	Ansteuerung der Piezozoomlinse mittels Mikrokontroller	81
5.2	Ansteuerung für motorgeschaltete Exzenterseiben.....	86
5.2.1	Schaltungs- und Leiterplattendesign	87
5.2.2	Ansteuerung der Exzenterzoomlinse mittels Mikrokontroller	90
6	Auslegung anwendungsspezifischer Zoomlinsenlayouts	97
6.1	Berechnung eines Zoomlinsenlayouts	97
6.2	Design anwendungsspezifischer Zoomlinsen.....	106
6.2.1	Design einer Linse für einen resonanten Energiescan	107
6.2.2	Design einer Linse für einen Energiescan	111
7	Experimentelle Ergebnisse	113
7.1	Charakterisierung der Prototypen	113
7.2	Untersuchung einer anwendungsspezifischen Röntgenzoomlinse	120
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
Anhang		133
A	Dokumentation zur elektronischen Ansteuerung	135
B	Linsenlayout 1773_00_A0	139
C	Veröffentlichungen.....	147
Literaturverzeichnis.....		149

1 Einleitung

Seit der Entdeckung der von Wilhelm Conrad Röntgen so genannten X-Strahlen im Jahre 1895 [1] hat die Röntgenstrahlung viele Anwendungen gefunden. Röntgenstrahlen werden heute in vielen bedeutenden Feldern wie der Medizin, im speziellen in der Diagnostik und Therapie, aber auch in der Erforschung naturwissenschaftlicher und technischer Fragestellungen wie der zerstörungsfreien Werkstoffanalyse eingesetzt. Röntgenstrahlung überdeckt einen weiten Wellenlängenbereich von etwa 10 nm bis 1 pm. Diese kurzwellige Strahlung ermöglicht gegenüber sichtbarem Licht die Durchleuchtung vieler Materialien, wird dabei wenig absorbiert und kaum abgelenkt und ermöglicht so Schattenwurfabbildung. Die hohe Auflösung dieser Bilder kann mit dem Einsatz abbildender Optiken noch erhöht werden, denn dadurch wird die Bildqualität unabhängig von den Quelleigenschaften.

Ein Jahrhundert nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen wurden die ersten refraktiven Röntgenlinsen hergestellt. Nach dem ersten Patent „X-ray lens“ (deutsch: „Röntgenlinse“) von Toshihisa Tomie 1994 [2] wurden an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble die ersten technisch nutzbaren Röntgenlinsen realisiert. Dazu wurde eine Reihe von wenigen Millimeter großen Löchern in einen Aluminiumblock gebohrt [3]. Seitdem sind in Material und Form verschiedenartige Linsen entwickelt worden. Es gibt heute rotationssymmetrische refraktive Linsen mit Punktfokus („2D“) aus Aluminium oder Beryllium, welche durch Prägen von Metallfolien gefertigt werden [4], [5]. Auch aus Lithium wurden Linsen geprägt [6], [7]. Weiterhin gibt es planare Linsen mit Linienfokus („1D“) aus Silizium [8], [9] oder Diamant [10]. Siliziumlinsen werden mittels reaktivem Ionenätzen und Röntgenlinsen aus Diamant durch Abscheidung mikro- und nanokristallinem Diamants in Siliziumschablonen hergestellt. Auch aus dem Negativresist SU-8 werden Röntgenlinsen röntgentiefenlithographisch gefertigt [11], [12] oder für Nickellinsen anschließend galvanisiert [13], [14]. Die anfänglich sphärische Form der brechenden Oberflächen der Linsen wurde im Laufe der Zeit durch bikonkave, parabolische Linsenprofile

ersetzt [15]. Durch Wegfallen der sphärischen Aberration wurde die optische Qualität der Linsen entscheidend verbessert. Refraktive Röntgenlinsen weisen große chromatische Aberration auf, da der Brechungsindex des Linsenmaterials im Röntgenbereich stark wellenlängenabhängig ist. Zur Abbildung mit Röntgenlinsen ist es daher notwendig, den Röntgenstrahl zu monochromatisieren. Aus demselben Grund sind solche Linsen nicht universell mit konstanten optischen Eigenschaften über einen breiten Photonenenergiebereich einsetzbar. Eine erste Umsetzung einer refraktiven Linsenreihe (Englisch: „compound refractive lens“ (CRL)) mit variabler Brennweite ist der 2011 eingeführte Transfokator [16]. Diese Vorrichtung variiert mit pneumatischen Aktoren die Anzahl der Linsenelemente und damit die Brennweite über einen weiten Energiebereich. Basierend auf rotationssymmetrischen Berylliumlinsen wird der Transfokator hauptsächlich zum Vorfokussieren und Kollimieren von Synchrotronstrahlung genutzt.

Eine veränderbare Brennweite kann weitere Vorteile bringen und sogar neue Anwendungsfelder und Messmethoden hervorbringen. In der Bildgebung werden CRLs als Objektive in Mikroskopen genutzt. Hier kann durch Einsatz einer brennweitenanpassbaren CRL der Vergrößerungsmaßstab verändert werden. Weitgreifender ist die Möglichkeit bei veränderlicher Photonenenergie die Brennweite konstant zu halten und dadurch die Komponenten des Mikroskopaufbaus nicht verschieben zu müssen. Dies ebnet außerdem den Weg für schnelle Spektroskopiemessungen über einen weiten Photonenenergiebereich. Im Rahmen dieser Arbeit werden CRLs aus SU-8 genutzt, um solch ein Objektiv mit variabler Brennweite zu entwickeln und herzustellen. Die am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) röntgentiefenlithografisch hergestellten 1D-Röntgenlinsen können in einem großen Photonenenergiebereich von 8 keV bis 50 keV in monochromatischer Röntgenstrahlung eingesetzt werden. Durch die Herstellung über eine elektronenstrahlgeschriebene Maske sind Form und Größe der Linsenelemente frei wählbar. Diese Herstellungsmethode ist gegenüber dem Prägen von Folien wesentlich flexibler.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und der Wirksamkeitsnachweis der fortan so genannten Röntgenzoomlinse.

In der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 2 zunächst Grundlagen zu Röntgenoptiken hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Herstellung beschrieben, um daraufhin ihre Anwendungsfelder verständlich zu machen. Die Beschreibung des heutigen Entwicklungsstandes zu Beginn von Kapitel 3 dient als Ausgangspunkt, um die Anforderungen an eine Röntgenzoomlinse und die dafür entwickelten, verschiedenen Aktorikkonzepte zu verdeutlichen. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Ausarbeitung und Umsetzung der Aktorikkonzepte, welche in Kapitel 4 von der Konstruktion bis zur Montage beschrieben werden. Ein weiterer Hauptpunkt der Arbeit ist die Entwicklung der Ansteuerungselektronik über Konzeption, Ansteuerung über einen Mikrokontroller und Auslegung der Spannungsversorgung, was in Kapitel 5 dargestellt wird. Nach erfolgreichem Funktionsnachweis der Röntgenzoomlinse [17], [18] und Prototypentests folgte die Berechnung anwendungsspezifischer Linsenlayouts für Röntgenzoomlinsen, welche in Kapitel 6 näher dargestellt werden. Als Beispiel ist ein Mikroskopobjektiv mit positionsfestem Fokuspunkt für definierte Photonenenergieschritte um eine Germanium K_{α} -Absorptionskante bei 11,103 keV entwickelt worden. Dies ermöglicht eine neue Messmethode in der diffraktiven Vollfeldmikroskopie am Strahlrohr ID01, ESRF [19]. Alle experimentellen Ergebnisse zum einen über die Charakterisierung der verschiedenen Prototypen der Röntgenzoomlinse und zum anderen über erste wissenschaftliche Anwendungen werden in Kapitel 7 beschrieben. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und in einem Ausblick zukünftige Entwicklungsarbeiten und das Potential der Röntgenzoomlinse mit möglichen Forschungsfeldern erörtert.

2 Grundlagen der Röntgenoptik

In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl an Röntgenoptiken entwickelt worden. Auf verschiedene Arten beeinflussen sie die Richtung und das Spektrum von Röntgenstrahlung. Die optischen Elemente können dabei nach dem physikalischen Prinzip gruppiert werden, welches die Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung mit der Optik beschreibt: Absorption, Beugung, Reflektion und Brechung. Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge findet sich in der Fachliteratur [20], [21], [22]. Im Inneren von Materie werden Röntgenstrahlen entweder absorbiert, gebeugt oder gestreut. Absorbierende Optiken sind beispielsweise Filter, welche die Intensität reduzieren oder das Spektrum einer polychromatischen Quelle verändern [23]. Weiterhin gibt es Schlitze und Aperturen für vielerlei Zwecke. Eine andere Art von Optiken sind Absorptionsmasken, die in der Röntgentiefenlithografie eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.2).

Eine weitere Wechselwirkung ist die Beugung von Röntgenstrahlung [23]. Sie entsteht durch die Ablenkung von Lichtwellen an Hindernissen, was besonders an periodischen Strukturen deutlich wird. Zwei Arten von beugenden (diffraktiven) Optiken werden hauptsächlich genutzt. Röntgenabsorptions- und Phasengitter werden in der Phasenkontrastbildgebung eingesetzt [24], [25]. Zum anderen werden Fresnel-Zonen-Platten als fokussierende Optik verwendet [26]. Sie bestehen aus konzentrischen Kreisen, deren Radien von innen nach außen immer langsamer zunehmen. Mit diesen Optiken kann heute eine Auflösung von 7 nm erreicht werden [27]. Durch die fabrikationsbegrenzte Dicke der absorbierenden Strukturen sind diese Optiken jedoch für harte Röntgenstrahlung mit Photonenenergien über 12 keV kaum geeignet.

An einer Grenzfläche zweier Medien werden Röntgenstrahlen zudem reflektiert und gebrochen [21]. An Oberflächen können Röntgenstrahlen unter streifendem Einfall durch Totalreflexion mit beispielsweise einer Kirkpatrick-Baez-Optik [28], einer Wolter-Optik [29] oder Kapillaroptik [30] reflektiert werden. Sie nutzen gekrümmte Oberflächen, um Röntgenstrahlen

zu fokussieren. Weiterhin kann auch durch Bragg-Reflexion an Kristallflächen oder an Vielfachschichten die Strahlrichtung verändert werden [31]. Brechende oder refraktive Röntgenlinsen werden im folgenden Kapitel 2.1 näher beschrieben sowie deren Anwendung in der Mikroskopie in Kapitel 2.4 erläutert.

2.1 Refraktive Röntgenlinsen

Wenn Röntgenstrahlung Materie durchläuft, kommt es zu verschiedenen Wechselwirkungen der elektromagnetischen Strahlung mit der Materie und die Eigenschaften des Strahls ändern sich. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit die Wellenlänge λ wird verändert. Nach Austreten aus dem Medium hat sich die Phase gegenüber einer nicht durch Materie gelaufenen Welle verschoben. Weiterhin wird die Intensität I der Welle abgeschwächt. Diese Phänomene können mit der komplexen Brechzahl n^* beschrieben werden, welche von den Streufaktoren f' und f'' der im Material vorhandenen Atome abhängt [20]:

$$n^* = 1 - \delta + i\beta. \quad (2.1)$$

Die Größen δ und β sind reelle Zahlen und für Röntgenstrahlung positiv. Dabei bezeichnet δ das Brechzahldekrement und β den Extinktionskoeffizienten. Die Brechung an Oberflächen wird mit dem Snelliusschen Gesetz beschrieben, wobei der Realteil der Brechzahl $n = \Re(n^*) = 1 - \delta$ eingeht [22]:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t. \quad (2.2)$$

Der Winkel θ_i bezeichnet den Winkel zwischen einfallendem Strahl und der Oberflächennormalen und θ_t den Winkel zwischen transmittiertem Strahl und der Oberflächennormalen. Der lineare Schwächungskoeffizient $\mu = \frac{4\pi\beta}{\lambda}$ wird mit dem Imaginärteil der Brechzahl $\beta = \Im(n^*)$ bestimmt und zur Beschreibung der Absorption im Lambert-Beerschen Gesetz verwendet [20]:

$$I(z) = I_0 e^{-\mu z}. \quad (2.3)$$

Die Änderung der Intensität I durch Absorption wird in Abhängigkeit von der im Material durchlaufenen Wegstrecke z beschrieben. Die Größen δ und β ergeben sich aus den Streufaktoren f' und f'' mit

$$\delta = \frac{\lambda^2}{2\pi} r_0 N_A \frac{\rho}{A} (Z + f') \text{ und} \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{\lambda^2}{2\pi} r_0 N_A \frac{\rho}{A} f'', \quad (2.5)$$

wobei r_0 dem klassischen Elektronenradius, N_A der Avogadro-Konstanten, ρ der Dichte, A der Atommasse und Z der Ordnungszahl entspricht [32].

Röntgenstrahlung umfasst den Wellenlängenbereich von etwa 10 nm bis 1 pm, wodurch sich für die Größen δ und β gegenüber sichtbarem Licht Werte unter eins ergeben; das Brechzahldekrement liegt für übliche Linsenmaterialien und für Photonenenergien im Bereich von 10 keV bis 50 keV typischerweise im Bereich von $10^{-7} < \delta < 10^{-5}$ und β ist materialabhängig noch um etwa einen Faktor 100 kleiner als δ . Für eine effiziente Linse benötigt man eine möglichst große Differenz der Brechungsindizes, also gegenüber Luft ein großes δ , bei gleichzeitig möglichst niedriger Absorption durch ein kleines β . Ein Kriterium für ein gutes Röntgenlinsenmaterial ist daher das Verhältnis von δ/β . Je größer die Kennzahl, umso größere numerische Aperturen und damit bessere Bildauflösungen kann man erreichen (siehe Kapitel 2.3). Besonders leichte Metalle eignen sich demnach am besten für Röntgenlinsen. Die typischen heute verwendeten Linsenmaterialien haben alle niedrige Ordnungszahlen. Es werden Linsen aus Lithium [6], [7], Beryllium [4], [5], Silizium [8], [9], SU-8 [11], [12], Diamant [10], Aluminium [4], [5] und Nickel [13], [14] hergestellt; ihr δ/β Verhältnis wird in folgender Abbildung über einen typischen Photonenenergiebereich von $E = 5$ keV bis 30 keV dargestellt [33].

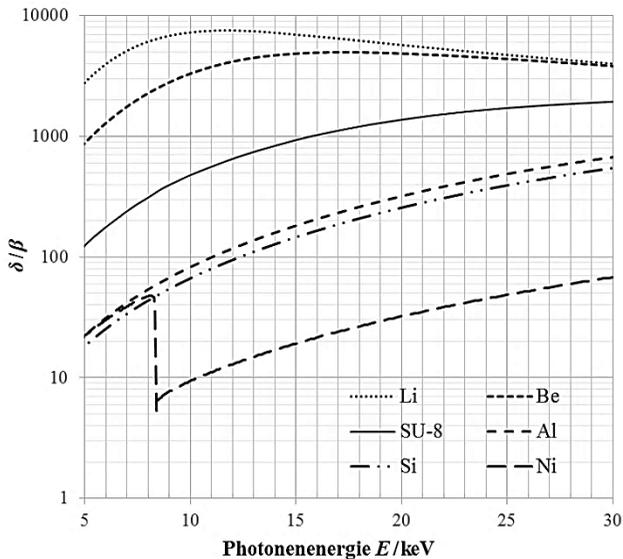


Abb. 2-1: Verhältnis von δ/β der typischen Röntgenlinsenmaterialien über einen Photonenenergiebereich von $E = 5 \text{ keV}$ bis 30 keV [33]

Lithium ist ein Alkalimetall und sehr reaktionsfreudig; es oxidiert sehr schnell an Luft und kann sich in Pulverform bereits bei Raumtemperatur spontan entzünden [34]. Beryllium ist giftig und karzinogen, was technische Schutzmaßnahmen bei der Fertigung erforderlich macht. Zudem ist es ein sehr harter und spröder Werkstoff, der sich nicht leicht verarbeiten lässt [35]. Mit Berylliumlinsen wurden bereits einige Konzepte für Linsen mit variabler Brennweite umgesetzt (siehe Kapitel 3.1). Im Rahmen dieser Arbeit werden Röntgenlinsen aus SU-8 eingesetzt, welche sehr kleine Strukturgrößen bei gleichzeitig sehr hoher Formtreue bieten und mittels Röntgentiefenlithographie (siehe Kapitel 2.2) hergestellt werden.

Generell sind Röntgensammellinsen aufgrund ihrer Brechzahl kleiner als konkav anstatt wie bei sichtbarem Licht konvex geformt. Aufgrund des sehr kleinen Brechzahldekrement δ besteht eine typische Röntgenlinse aus mehreren, je nach Photonenenergie teilweise hunderten, doppelparabolischen Linsenelementen (siehe Abb. 2-2). Solche brechenden Linsenreihen werden

deshalb als „Compound Refractive Lens“ (Englisch) und fortan in dieser Arbeit kurz als CRL bezeichnet.

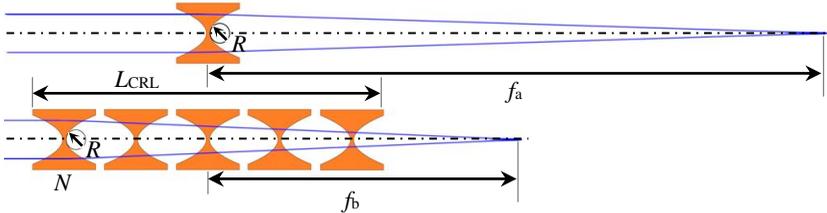


Abb. 2-2: Schematische Darstellung einer bikonkaven, parabelförmigen Linse mit einem Linsenelement und langer Brennweite f_a (oben), einer Linse mit N Linsenelementen und kurzer Brennweite f_b (unten) und ihren wichtigsten Parametern bei Strahleinfall parallel zur optischen Achse

Die Brennweite f einer Röntgenlinse mit identischen und äquidistanten Linsenelementen wird mit dem Krümmungsradius R im Scheitelpunkt der Parabel, der Anzahl der Linsenelemente N und dem Brechzahldekrement δ berechnet. Ist die Brennweite sehr groß (im Meterbereich) gegenüber der Linsenlänge L_{CRL} (im Zentimeterbereich), lässt sich die Brennweite in der „dünne Linse“-Näherung berechnen [20]:

$$f_{\text{dünn}} = \frac{R}{2\delta N}. \quad (2.6)$$

Bei der Verwendung sehr vieler Linsenelemente, wenn sich die Brennweite dem Bereich der Linsenlänge nähert, geht die Linsenlänge L_{CRL} in die Formel ein [36], [37]:

$$f_{\text{dick}} = \frac{R}{2\delta N} + \frac{L_{CRL}}{6}. \quad (2.7)$$

Nicht immer ist es sinnvoll identische und äquidistante Linsenelemente in einer CRL zu verwenden. Besonders bei SU-8-Linsen ist es möglich, verschiedene Krümmungsradien innerhalb einer Linsenreihe zu kombinieren (siehe Kapitel 2.2). Für eine Anwendung in einer Zoomlinse werden zudem verschiedene Positionen, teils mit Lücken zwischen den Linsenelementen, genutzt (siehe Kapitel 6). Für solche Linsensysteme gelten die Näherungs-

formeln (2.6) und (2.7) nicht mehr; die Linsenparameter müssen in diesem Fall mit einem Strahlverfolgungsprogramm berechnet werden. Dabei wird die effektive Brennweite f_{eff} eines Linsensystems über die Lage der Hauptebenen definiert (siehe Abb. 2-3).

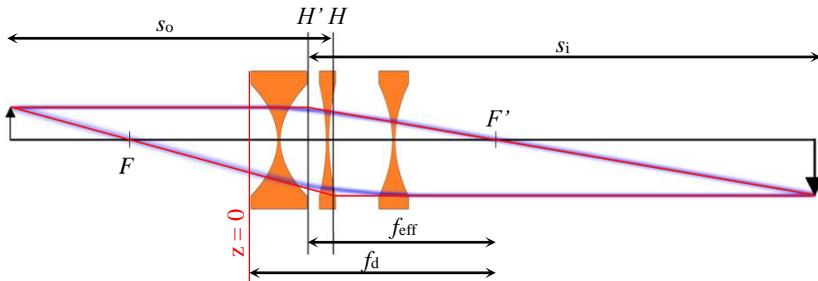


Abb. 2-3: Röntgenlinsensystem mit optischem Strahlengang zweier simulierter Strahlen (blau), über rote Strahlen konstruierte Hauptebenen H und H' , Lage der Brennpunkte F und F' und effektive Brennweite f_{eff} eines Linsensystems

Die eingangsseitige und ausgangsseitige Hauptebene H und H' werden jeweils über zwei Strahlen konstruiert. Die ausgangsseitige Hauptebene H' befindet sich an der Schnittstelle eines quellseitig parallel zur optischen Achse einfallenden Strahls mit dem dazugehörigen durch den ausgangsseitigen Brennpunkt F' verlaufenden Strahl. Der Abstand von Hauptebene H' zu Brennpunkt F' ist als ausgangsseitige Brennweite f_2 bezeichnet [38] und wird in dieser Arbeit als effektive Brennweite f_{eff} benannt (siehe Abb. 2-3). Die eingangsseitige Hauptebene H befindet sich entsprechend an der Schnittstelle eines ausgangsseitig parallel zur optischen Achse verlaufenden Strahls mit dem dazugehörigen durch den eingangsseitigen Brennpunkt F verlaufenden Strahl. Der Abstand von Hauptebene H und Brennpunkt F ist als eingangsseitige Brennweite f_1 bezeichnet [22], [38]. Eine in der praktischen Anwendung besser messbare Größe als die effektive Brennweite f_{eff} ist der Fokusabstand f_d , der hier als Distanz zwischen der Eingangsebene an Stelle $z = 0$ und dem ausgangsseitigen Brennpunkt F' definiert ist.

Refraktive Linsen können sowohl zum Beleuchten einer Probe als auch zur Abbildung dieser genutzt werden. In vielen Anwendungen reicht die Inten-

sität der Quelle nicht aus, um in annehmbarer Zeit die nötigen Informationen über die Probe aufzunehmen. Dann können Beleuchtungsoptiken helfen die Messzeit zu verkürzen, indem sie den Photonenfluss am Ort der Probe erhöhen. Bei Vollfeldmikroskopen kommt es zudem darauf an, jeden Probenpunkt aus möglichst vielen verschiedenen Winkeln zu beleuchten. Typische refraktive Beleuchtungsoptiken sind beispielsweise aus SU-8 gerollte Prismenröntgenlinsen [39], Fresnel-Linsen [40], Mosaiklinsen [41] und Prismenlinsen [42] oder geprägte CRLs aus Beryllium [5].

Eine Hauptanwendung für refraktive Linsen ist die Abbildung. Mit einer Sammellinse kann eine vergrößerte Abbildung erzeugt werden. Mit einer dünnen Linse mit der Brennweite f wird für ein Objekt mit Abstand s_o zur Linsenmitte, der sogenannten Gegenstandsweite, ein scharfes Bild im Abstand s_i zur Linsenmitte, der sogenannten Bildweite, erzeugt. Die Abbildungsgleichung beschreibt den Zusammenhang dieser Größen [22]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}. \quad (2.8)$$

Für eine einzelne dünne Linse liegen die beiden Hauptebenen in der Mitte der Linse. Bei einem Linsensystem verschieben sich diese und man unterscheidet eingangsseitige und ausgangsseitige Hauptebene. Dann wird die effektive Brennweite f_{eff} des Linsensystems für die Abbildungsgleichung (2.8) genutzt. Gegenstands- und Bildweite werden jeweils über ein- und ausgangsseitige Hauptebene definiert (siehe Abb. 2-3). Über das Verhältnis der Bildweite s_i zur Gegenstandsweite s_o lässt sich Vergrößerung M der Abbildung berechnen. Ein Objekt der Größe S_o wird dann mit der Größe S_i abgebildet:

$$\frac{s_i}{s_o} = M = \frac{S_i}{S_o}. \quad (2.9)$$

Eine wichtige Eigenschaft von Röntgenlinsen ist ihre chromatische Aberration. Das Brechzahldekrement hängt von der Photonenenergie mit $\delta \sim 1/E^2$ ab (vergleiche Formel (2.4)). Nach Formel (2.6) ist die Brennweite der Röntgenlinse somit auch abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Für Abbildungsanwendungen ist daher nur monochromatische Strahlung geeignet. Dies ist ein Nachteil gegenüber achromatischen Röntgenspiegeln. Jedoch benötigen Linsen wesentlich weniger Bauraum und haben

eine größere Toleranz gegenüber Winkelfehlern bei der Ausrichtung im Strahl und sind dadurch leichter im Strahl auszurichten. Zudem verändern sie die Strahlrichtung nicht, was die Anwendung vereinfacht. Röntgenlinsen benötigen Krümmungsradien im Mikrometerbereich und zugleich möglichst große Aperturen für ein großes Bildfeld bei gleichzeitig nutzbarer kurzer Brennweite. Es ist jedoch nicht sinnvoll die Apertur beliebig groß zu wählen, da bei kleinen Krümmungsradien aufgrund der Parabelform die Linsen sehr lang werden. Zum Rand hin wird die Absorption immer größer und damit die Transmission T der Linse immer geringer. Die Transmission berechnet sich aus der Eingangsintensität I_0 und aus der Intensität I_{CRL} nach der CRL:

$$T = \frac{I_{\text{CRL}}}{I_0}, \quad (2.10)$$

wobei die Intensität I_{CRL} über das Lambert-Beersche Gesetz (2.3) ermittelt wird. Durch die Absorption sind Röntgenlinsen in ihrer Apertur auf wenige hundert Mikrometer begrenzt. Jedoch nimmt die Absorption mit steigender Photonenenergie ab und die Linsen können daher gegenüber fokussierenden Fresnel-Zonen-Platten auch bei Photonenenergien über 15 keV effektiv eingesetzt werden. Diese Begrenzung der Apertur hat in der Literatur und in den Forschungsgruppen bis heute verschiedene Definitionen zur sogenannten effektiven Apertur A_{eff} , beispielsweise in [43], [44] und [45]. Die effektive Apertur A_{eff} der Linsen ist bei durch die Absorption meist kleiner als die physikalische Apertur A . In dieser Arbeit wird die effektive Apertur der Linse definiert als die Apertur, bei der die Randstrahlen durch die Linse noch mit mehr als 10 % der Eingangsintensität I_0 austreten. Die Bereiche mit I_{CRL} weniger als 10 % Transmission tragen nach dieser Definition nicht zur Bildgebung bei.

2.2 Röntgentiefenlithografisch gefertigte Röntgenlinsen

Die Fertigung refraktiver Röntgenlinsen erfordert eine hohe Genauigkeit bei Abmessungen im Mikrometerbereich. Daher sind besondere Fertigungsverfahren notwendig. In dieser Arbeit werden Röntgenlinsen aus dem

Negativfotolack SU-8 hergestellt. Ein geeignetes Verfahren ist die Röntgentiefenlithografie. Dabei wird mithilfe eines Elektronenstrahlschreibers und über Goldgalvanik eine Zwischenmaske, dann eine Arbeitsmaske hergestellt. Mit dieser Röntgenabsorbermaske kann dann die eigentliche Röntgenlinse aus dem SU-8-Resist mittels Röntgentiefenlithografie gefertigt werden (siehe Abb. 2-4) [46], [47].

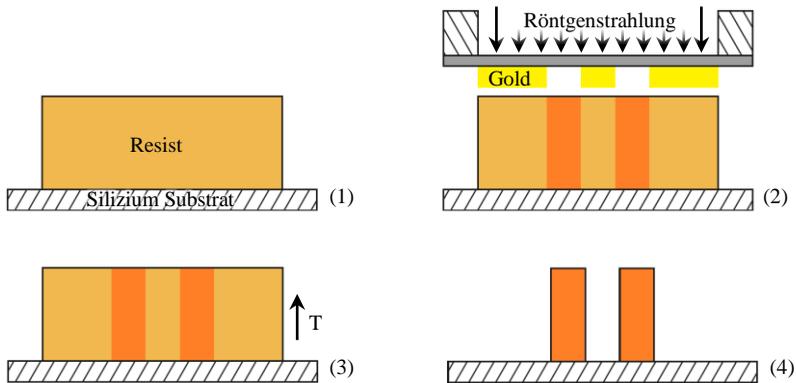


Abb. 2-4: Schematischer Überblick zur Herstellung einer CRL aus dem Negativresist SU-8 mit Röntgentiefenlithografie

Hierbei wird in einem ersten Schritt ein 525 μm starker 4⁺-Si-Wafer als Substrat genutzt und mit dem Epoxidharz-basierten Fotoresist SU-8 (Typ mr-X-50) in der typischen Schichtdicke 400 μm , 800 μm oder 2000 μm bei der Firma micro resist technology GmbH in Berlin beschichtet. Aus einem Wafer werden zwei rechteckige Si-Substrate mit Resist der Größe 65 mm x 25 mm hergestellt. Dazu wird der Resist auf einer Heizplatte auf 65° C erwärmt und nicht benötigte Randbereiche entlackt und anschließend mit einer Stahlnadel geritzt und gebrochen (siehe Abb. 2-5 links). Am Strahlrohr Litho2 der KIT Synchrotronquelle wird in Schritt 2 ein solch rechteckiges Substrat mittig auf einen großen Stahlhalter geklebt (siehe Abb. 2-5 links), der während der Röntgenbelichtung gekühlt wird.

Auf dem Gegenstück des Stahlhalters wird die Arbeitsmaske magnetisch fixiert (siehe Abb. 2-5 rechts). Sie besteht aus einer 2,3 μm dicken Titanfolie

mit einer 25 μm dicken Goldabsorberschicht, welche Löcher in Form der späteren Linsenelemente hat. Die Linsenelemente sind in Reihen von maximal 60 mm Länge positioniert und formen so CRLs. Pro Maske kann ein Layoutfeld von 60 mm x 20 mm genutzt werden, das heißt es können mehrere Linsenreihen nebeneinander stehen oder auch mehrere kurze CRLs hintereinander.

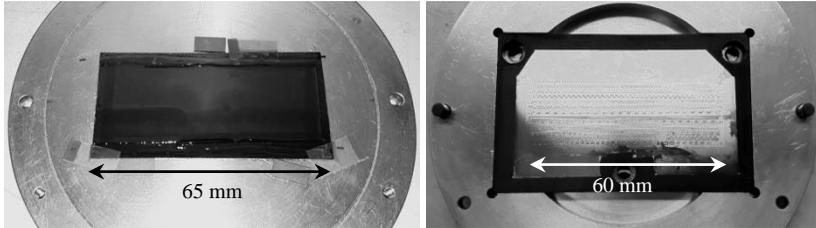


Abb. 2-5: Bilder zur Montage eines mit 400 μm SU-8-Resist beschichteten rechteckigen Si-Substrates mittig auf dem unteren Stahlhalter für das Strahlrohr Litho2 (links) und oberer Teil des Stahlhalters mit eingesetzter Arbeitsmaske für ein Bestrahlungsfeld von 60 mm x 20 mm (rechts)

Für eine typische 400 μm hohe CRL wird eine 50 μm Polyimidfolie (Kapton® HN – CMC 70050, CMC Klebtechnik GmbH, Frankenthal) und zwei 17,5 μm starke Aluminiumfolien zum Filtern des Röntgenspektrums auf den Resist gelegt, bevor die Arbeitsmaske ausgerichtet und mit dem Gegenstück des Stahlhalters verbunden wird. Der fertig montierte Stahlhalter mit Substrat und Arbeitsmaske wird in das Strahlrohr LIGA II eingebaut. Strahlaufwärts werden eine 5 mm dicke und in Strahlrichtung 7 cm lange Kupferplatte als „Beamstop“ und eine 70 μm starke Aluminiumfolie als Vorfilter positioniert. Der „Beamstop“ blockt den zentralen Strahlbereich und damit kurzwellige Anteile des Spektrums. Die Aluminiumfolie filtert langwellige Strahlung heraus. Zusammen sorgen diese Komponenten dafür, dass das Röntgenspektrum der zu bestrahlenden Resistdicke angepasst wird. Die Probe wird anschließend mit 1560 mA·min/cm bestrahlt. Für andere Resistdicken ändern sich die Bestrahlungs- und Filterparameter. Nach der Bestrahlung (siehe Abb. 2-6 oben) muss die Probe möglichst bald in einem Temperprozess (siehe Abb. 2-4 (3)) auf einer Heizplatte über ca. 20 h auf 66 °C erhitzt und

wieder auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Dabei vernetzen die belichteten Bereiche. In einem letzten Schritt werden die nicht vernetzten und unbelichteten Bereiche nasschemisch entfernt. Nach zwei Propylenglykolmonomethyletheracetat (PGMEA)-Bädern über jeweils 60 min und einem Isopropanol-Bad für 20 min sind alle Resistreste auf dem Substrat entfernt und die fertige, freistehende Röntgenlinse bleibt auf dem Siliziumsubstrat zurück (siehe Abb. 2-6 unten).

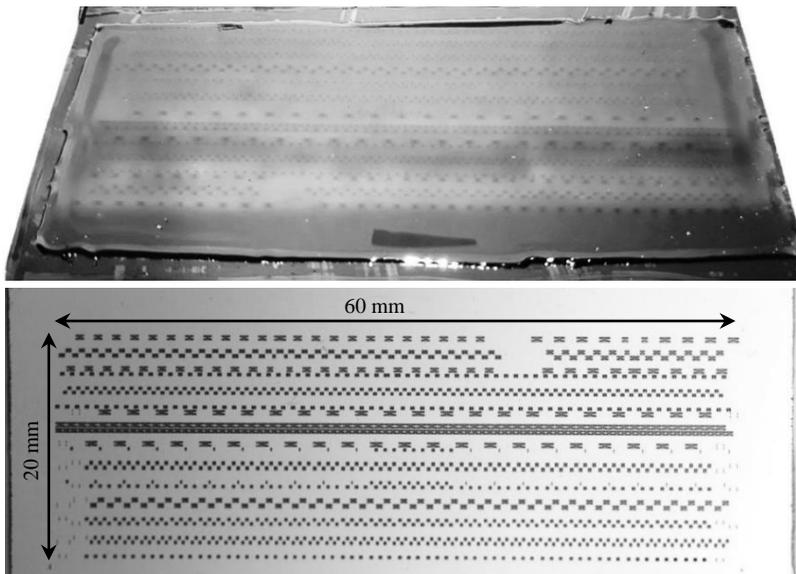


Abb. 2-6: Bilder eines bestrahlten 400 μm Resist auf Si-Substrat (oben) und fertige, freistehende CRLs nach den Entwicklungsbädern (unten) des Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 (siehe Kapitel 6)

Die röntgentiefenlithografisch hergestellten Röntgenlinsen zeichnen sich durch sehr kleine und präzise Strukturen bei sehr hohem Aspektverhältnis und insbesondere sehr geringer Seitenwandrauigkeit aus [48]. Es können Krümmungsradien ab $R = 5 \mu\text{m}$ hergestellt werden (siehe Abb. 2-7) Zum Vergleich: Geprägte CRLs aus Beryllium erreichen minimal $R = 50 \mu\text{m}$ [49]. Dabei können verschiedene Radien in einer Linsenreihe kombiniert werden.

Sie sind bis in den Nanometerbereich genau realisierbar [19]. Die Apertur A der CRL ist dabei über die gesamte Länge konstant. Ausnahmen bilden hier Taille-Linsen [50], welche jedoch für die Anwendung in einer Zoomlinse nicht geeignet sind. Typische Aperturen für SU-8-Linsen liegen im Bereich von $A = 50 \mu\text{m}$ bis $250 \mu\text{m}$ und für Fresnel-Linsen von $A = 600 \mu\text{m}$ bis $1500 \mu\text{m}$.

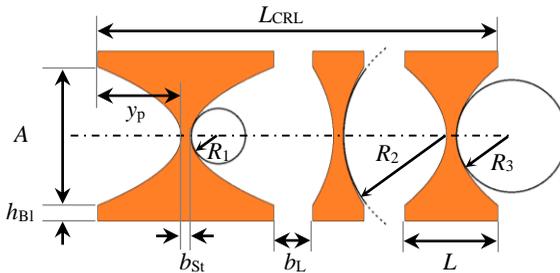


Abb. 2-7: Darstellung einer typischen mit Röntgentiefenlithografie gefertigten CRL und Bezeichnung der wichtigsten Linsenparameter

Jede Doppelparabel benötigt einen Verbindungssteg, der möglichst dünn gehalten wird, um unnötiges absorbierendes Material zu sparen. Aktuell werden minimale Stegbreiten von $b_{St} = 7 \mu\text{m}$ genutzt, wobei für sehr niedrige Energien auch Stege von $b_{St} = 5 \mu\text{m}$ herstellbar wären. An den beiden Außenseiten stabilisieren Stützblöcke die Doppelparabeln. Die Stützblöcke haben eine typische Höhe von $h_{BI} = 50 \mu\text{m}$. Die Länge eines einzelnen Linsenelementes L berechnet sich über die Summe der doppelten Höhe der Parabel y_p und der Stegbreite b_{St} . Die Parabelhöhe y_p als Ordinate wird über den Krümmungsradius R und die halbe Apertur A als Abszisse mit der Parabelgleichung [51]:

$$y_p = \frac{1}{2R} \left(\frac{A}{2} \right)^2 \quad (2.11)$$

bestimmt. Die Gesamtlänge einer CRL L_{CRL} ist durch das Layoutfeld auf 60 mm begrenzt und ergibt sich aus der Summe der einzelnen Längen der Linsenelemente L und den jeweiligen Abständen zwischen zwei Linsen-

elementen b_L (siehe Abb. 2-7). Der minimale Abstand zweier Linsenelemente ist $b_L = 20 \mu\text{m}$. Bei kleinerem Abstand würde das Material in den Spalten aufgrund von Sekundärstrahlung vernetzen und die Entwicklung liefere nicht richtig ab [52]. Die Trennung in Einzellinsenelemente ist notwendig, um Verzüge durch die Unterschiede im thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und SU-8 zu vermeiden. Mit der Röntgentiefenlithografie werden planare 1D-Linsenelemente hergestellt. Die Parabelform fokussiert den Strahl nur in einer Richtung und erzeugt damit einen Linienfokus. Bei einem Linsenlayout für Linienfokuslinsen werden die einzelnen Elemente direkt hintereinander mit dem nötigen Mindestabstand von $b_L = 20 \mu\text{m}$ positioniert (siehe Abb. 2-8 (b)). Für abbildende Linsen wird jedoch ein Punktfokus benötigt. Geprägte Berylliumlinsen sind aufgrund des Herstellungsverfahrens bereits rotationssymmetrisch und liefern daher einen Punktfokus (siehe Abb. 2-8 (a)). Die SU-8-Linsen können unter $+45^\circ$ und -45° bestrahlt werden (siehe Abb. 2-8 (c)) [53]. Aktuell üblich ist es am IMT, zwei senkrecht zum Substrat belichtete CRLs unter 90° um die optische Achse gekippt zu einer Punktfokuslinse zu montieren (siehe Abb. 2-8 (d)). Die Bestrahlung unter 90° ist einfacher und liefert qualitativ bessere Linsen. Nachteilig ist der zusätzliche Schritt der Vereinzelung der Linsenreihen mit der Wafersäge in circa 2 mm breite Si-Substratstreifen (siehe Kapitel 4.1) und die anschließende Montage der beiden Linsenreihen (siehe Abb. 2-9 und Kapitel 4.3).

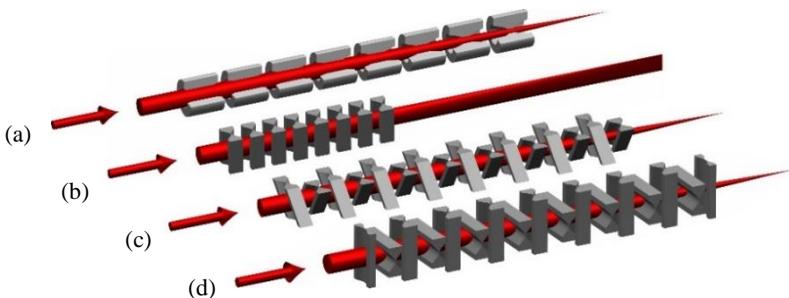


Abb. 2-8: Darstellung einer rotationssymmetrischen Röntgenlinse mit Punktfokus (a), einer planaren Linienfokuslinse (b), einer mit alternierenden unter $+45^\circ$ und -45° bestrahlten, planaren Linsenelementen zu einer Punktfokuslinse (c) und eine Punktfokuslinse mit alternierenden unter 90° bestrahlten und anschließend montierten Linsenelementen (d)

Für die Röntgenzoomlinsen wurden ausschließlich unter 90° belichtete CRLs verwendet, da so die Brennweite in horizontaler und vertikaler Richtung unabhängig voneinander eingestellt werden kann. Die Zoomlinse kann dadurch als Linienfokuslinse in horizontaler und vertikaler Richtung genutzt werden. Ebenso kann in beiden Raumrichtungen unterschiedlich stark fokussiert werden, was beispielweise an typischerweise sehr breiten aber flachen Synchrotronquellpunkten zu einer gleichförmigeren Beleuchtung einer Probe genutzt werden kann.

In einem Linsenslayout für Punktfokuslinsen werden zwischen den in einer Raumrichtung fokussierenden Elementen so große Lücken gelassen, dass die Elemente der anderen Raumrichtung eingefügt werden können. Für statische CRL ist diese Lücke die Summe aus der Länge L des Linsenelementes der anderen Raumrichtung und dem doppelten Luftspalt b_L benachbarter Elemente der fertigen CRL von $2 \times 20 \mu\text{m}$. Die Montage der zwei Linsenhälften muss also innerhalb der Toleranz dieses Luftspaltes erfolgen (siehe Abb. 2-9). Bei langen CRL von $L_{\text{CRL}} = 60 \text{ mm}$ ist dieses Spiel bereits sehr knapp, wenn die dünnen Si-Substratstreifen minimal verbogen sind und die Linsenelemente beispielsweise 2 mm hoch sind. Für eine Zoomlinse wird an dieser Stelle ein Mindestabstand von $50 \mu\text{m}$ gewählt, damit sich die Biegefingern (siehe Kapitel 3.3) der beiden montierten Linsenhälften später mit Sicherheit frei bewegen können. Diese größere Toleranz ist im Zoomlinsenlayout berücksichtigt worden (siehe Kapitel 6).

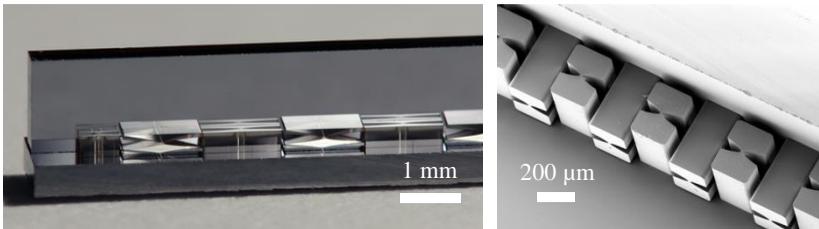


Abb. 2-9: Detailaufnahme einer montierten Punktfokuslinse [17] (links) und Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer anderen CRL mit Punktfokus [53] (rechts)

2.3 Auflösung refraktiver Optiken

Aufgrund von technologisch bedingten Limitierungen des Fertigungsprozesses erreicht keine reale Optik in der Bildgebung die beugungsbedingte optische Auflösungsgrenze. In diesem Abschnitt wird auf die physikalischen und prozessbedingten Grenzen der Auflösung refraktiver und insbesondere röntgentiefenlithografisch gefertigter Linsen eingegangen.

Auch bei einer fehlerfreien Optik ist die Auflösung begrenzt. Eine abbildende Optik fängt aufgrund ihrer endlichen Apertur nur einen Teil des abgestrahlten Lichtes einer Quelle ein und bildet es auf die Bildebene ab. Somit wird die Ausbreitung der Wellenfront eines jeden selbstleuchtenden oder beleuchteten Objektpunktes gestört und die Wellen werden gebeugt. Ein Objektpunkt wird als Streufleck anstatt idealerweise als exakter Bildpunkt abgebildet. Die Auflösung der Optik in der Bildebene ist damit beugungsbegrenzt [22]. Entscheidend für die beugungsbegrenzte Auflösung ist die numerische Apertur der Röntgenlinse:

$$N_A = n_i \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (2.12)$$

Sie wird aus dem Öffnungswinkel α der Linse und dem Brechungsindex n_i des Mediums zwischen Probe und Linse berechnet. Da SU-8-Linsen meist in Luft eingesetzt werden, ist für Röntgenstrahlung $n_i = 1$. Der Öffnungswinkel α wird für mikroskopische Anwendungen über die Brennweite f , welche meist in etwa der Gegenstandsweite s_o entspricht, und der effektiven Apertur A_{eff} berechnet:

$$\tan \alpha = \frac{A_{\text{eff}}}{f}. \quad (2.13)$$

Die beugungsbegrenzte Auflösung wird in dieser Arbeit über den kleinsten Abstand $\sigma_{\text{min.diff}}$ zweier Objektpunkte beschrieben, die in der Abbildung für achsparallele Beleuchtung noch unterscheidbar sind [54]:

$$\sigma_{\text{min.diff}} = \frac{\lambda}{N_A}. \quad (2.14)$$

An dieser Stelle wird nicht das für Mikroskopie typische Abbe-Limit mit der doppelten numerischen Apertur angenommen, da die Zoomlinse stets ohne Kondensator verwendet wurde und damit von einem nahezu parallelen Strahleinfall ausgegangen werden kann. Die Wellenlänge λ der verwendeten Röntgenstrahlung geht ebenfalls ein. Mit höherer Photonenenergie sinkt nicht nur die Absorption der CRL, auch die Auflösungsgrenze wird über die kürzere Wellenlänge λ und größere effektive Apertur A_{eff} verringert. Gleichzeitig vergrößert sich die Brennweite f jedoch durch das geringer werdende Brechzahldekrement δ und verringert damit auch wieder die numerische Apertur. Nichtsdestotrotz haben refraktive Röntgenlinsen eine verbesserte Auflösung bei höheren Photonenenergien.

Röntgenstrahlung realer Quellen ist niemals monochromatische Strahlung exakt einer Wellenlänge. Je nach Bauart des verwendeten Monochromators erhält man Monochromatizitäten im Bereich von $\Delta E/E = 10^{-2} \dots 10^{-7}$ [55], [56]. Da die Brennweite f der CRL über das Brechzahldekrement energieabhängig ist, wird polychromatische Strahlung nicht auf exakt einen Punkt fokussiert. Dadurch wird der Strahl aufgeweitet und man erhält chromatische Aberration als Abbildungsfehler [22]. Aus der effektiven Apertur A_{eff} und dem Photonenenergiebereich $\Delta E/E$ der nicht absolut monochromatischen Strahlung kann die Strahlaufweitung $\sigma_{\Delta E}$ berechnet werden [57]:

$$\sigma_{\Delta E} = 2A_{\text{eff}} \frac{\Delta E}{E}. \quad (2.15)$$

Ein weiterer, auflösungsbegrenzender Faktor ist die nicht ideale Quelle mit der Quellgröße h_o . Über den Abstand der Quelle zur Linse s_o und die Bildweite s_i bestimmt sie die Größe der minimalen, abgebildeten Quellgröße $\sigma_{\text{min.phys}}$ (FWHM):

$$\sigma_{\text{min.phys}} = \frac{s_i h_o}{s_o}. \quad (2.16)$$

Die Quellgröße muss für die meisten Synchrotronquellen für horizontale und vertikale Richtung differenziert werden. Die Bildweite s_i kann für große Quellabstände durch die Brennweite f ersetzt werden.

Der Herstellungsprozess führt für CRL aus gleichen Elementen zu Astigmatismus. Da die Linsen aus zwei planaren Linsenreihen zusammengesetzt sind, können keine identischen Linsenelemente an gleicher Position verwendet werden. Die Linsenelemente können nur abwechselnd angeordnet sein (siehe Abb. 2-8 (c) und (d)). Identische und äquidistante Linsenelemente in einer Linsenreihe ergeben zwar die gleiche Linsenlänge L_{CRL} , jedoch ist der Brennpunkt F' für horizontale und vertikale Richtung um genau ein Linsenelementlänge L und einen Linsenabstand b_L mit $\Delta f = L + b_L$ distanziert. In der Mitte dieser beiden Brennpunkte berechnet sich der Durchmesser des fokussierten Strahls $\sigma_{\text{min.ast}}$ (FWHM) über:

$$\sigma_{\text{min.ast}} = \frac{A_{\text{eff}} \Delta f}{2f}. \quad (2.17)$$

Für sehr kurze Brennweiten fällt dieser Fehler stärker ins Gewicht. In dem in dieser Arbeit entwickelten Linsenlayout 1773_00_A0 (siehe Kapitel 6 und Anhang B) wurde der Abstand der Brennpunkte für horizontale und vertikale Richtung über Anpassung der Radien der einzelnen Linsenelemente für eine bestimmte Energie auf null gesetzt. Auch über einen weiten Energiebereich ist eine so optimierte CRL nahezu astigmatismusfrei.

2.4 Mikroskopie mit CRLs

Eine Hauptanwendung von CRLs in der Bildgebung ist die Mikroskopie. Dabei wird ein Objekt vergrößert abgebildet. Ziel ist es, eine hohe Auflösung zu erzielen und möglichst kleine Details bis in den Submikrometerbereich sichtbar zu machen. Da die Auflösung von Detektoren über ihre Pixelgröße meist bestenfalls im Mikrometerbereich liegt, ist dazu eine vergrößerte Abbildung der Probe notwendig. Man unterscheidet grundlegend zwei Typen der Mikroskopie: Zum einen die rasternde Mikroskopie und zum anderen die abbildende Vollfeldmikroskopie. Im ersten Fall wird die Probe mithilfe eines Positioniertisches mäandrierförmig durch den fokussierten Strahl gefahren. Dabei wird das Bildfeld Linie für Linie mit einer Schrittweite in etwa des halben Brennfleckdurchmessers abgerastert und die lokal transmittierten Intensitäten mit einer pin-Diode (Englisch: „positive intrinsic negative

diode“) oder einem Szintillationsdetektor gemessen. Das Bild wird anschließend rekonstruiert. Diese Methode ist wesentlich langsamer als die abbildende Vollfeldmikroskopie, bei der mit einer Aufnahme das gesamte Bildfeld abgebildet wird. Jedoch wird in der Vollfeldmikroskopie ein ortsauflösender, rauscharmer und damit teurer Detektor benötigt. CRLs zeichnen sich durch ihre große Apertur und damit verbundenes großes Bildfeld aus, welches sich hervorragend zur Vollfeldmikroskopie eignet. In dieser Arbeit wird die Röntgenzoomlinse ausschließlich für abbildende Vollfeldmikroskope verwendet.

2.4.1 Vergrößernde Schattenwurfmikroskopie

Für abbildende Mikroskope gibt es zwei verschiedene Methoden. Zum einen gibt es die vergrößernde Schattenwurfmikroskopie und zum anderen die Mikroskopie mit fokussierenden optischen Elementen. Den einfacheren Aufbau hat ein Schattenwurfmikroskop (siehe Abb. 2-10).

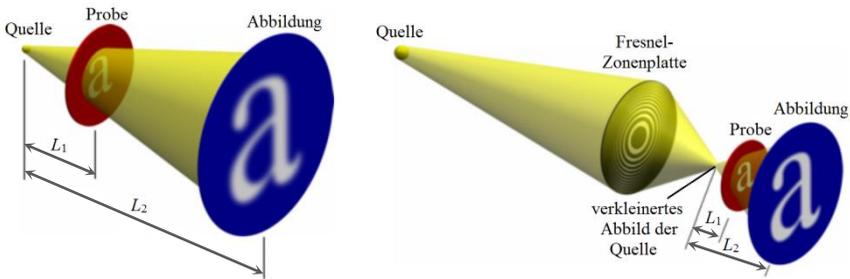


Abb. 2-10: Aufbau eines Schattenwurf-Mikroskops einer Probe, welche direkt mit einer Quelle (links) oder mithilfe einer fokussierenden Optik über das verkleinerte Abbild einer Quelle (rechts) beleuchtet und auf einem Detektor vergrößert abgebildet wird [58].

Dabei beleuchtet eine Quelle eine Probe und ein Abbild dieser wird auf dem Detektor aufgenommen. Die Probe sollte möglichst nahe mit Abstand L_1 zur Quelle stehen und der Detektor mit Abstand L_2 zur Quelle weit weg, da die Vergrößerung M dem Verhältnis L_2/L_1 entspricht. Im einfachsten Aufbau

(siehe Abb. 2-10 links) benötigt man keine Optik, jedoch hängt die Auflösung maßgeblich von der Größe der Quelle h_o ab. Ist die Quelle keine ideale Punktquelle, sind die Strahlen nicht in einem Punkt vereint, sondern verlassen die Quelle über eine bestimmte Fläche. Dadurch entstehen neben dem Schattenwurf der Probe auch Halbschatten, welche zu unscharfen Bildern führen. Die Auflösung ist daher auf die Größe der Quelle begrenzt: $\sigma_{\min, \text{phys}} \sim h_o$. Eine Verbesserung kann durch den Einsatz einer fokussierenden Optik erzielt werden (siehe Abb. 2-10 rechts). Die Größe der Quelle kann über ihr Abbild verkleinert und damit eine virtuelle Quelle erzeugt werden. In diesem Mikroskop wird die Auflösung zumeist durch die Beugung und die optische Qualität der fokussierenden Optik begrenzt (siehe Formeln (2.14) und (2.15)).

Anstelle der als Beispiel gezeigten Fresnel-Zonenplatte kann nun eine Zoomlinse, eine CRL mit veränderlicher Brennweite, als fokussierende Optik eingesetzt werden. So kann bei gleichbleibendem, also statischem, Schattenwurfmikroskopaufbau die Brennweite verändert werden und damit der Brennpunkt F' als virtuelle Quelle verschoben werden (siehe Abb. 2-11). Der Abstand L_1 verändert sich und die Vergrößerung M kann somit angepasst werden. Gleichzeitig verändert sich jedoch auch das Bildfeld (Englisch: „Field of View“ (FoV)). Mit steigender Vergrößerung M verkleinert sich das Bildfeld der Probe, welches auf dem Detektor abgebildet wird.

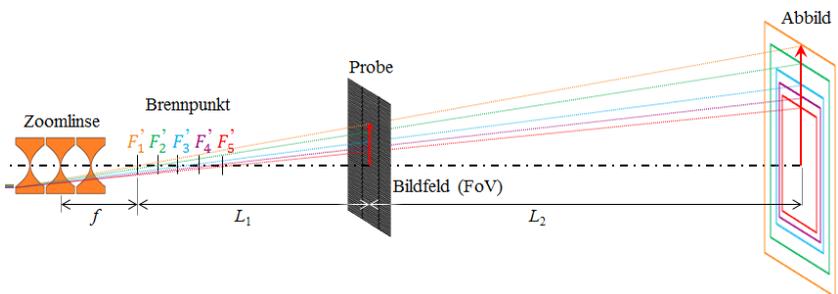


Abb. 2-11: Aufbau eines Schattenwurfmikroskops mit einer Probe, welche mithilfe einer fokussierenden Zoomlinse über das verkleinerte Abbild einer Quelle beleuchtet und auf einem Detektor bei Änderung der Brennweite verschieden stark vergrößert abgebildet wird

Mit einer Zoomlinse in diesem Aufbau kann eine größere Probe insgesamt mit großem Bildfeld und interessante Details können vergrößert in einem Ausschnitt mit kleinerem Bildfeld aufgenommen werden.

Neben dieser Zoomoption kann in diesem Schattenwurfmikroskopaufbau auch eine Probe mit verschiedenen Energien untersucht werden. Mit einer refraktiven Optik würde bei sich ändernder Energie die Brennweite mit der Abhängigkeit $f \sim E^2$ ändern und damit die Vergrößerung M und das Bildfeld. Soll die Probe aber unter gleichen Bedingungen und verschiedenen Energien aufgenommen werden, muss die Brennweite angepasst werden, sodass sich die Position des Brennpunkts F' nicht ändert.

2.4.2 Mikroskopie mit fokussierender Optik

Eine weitere Art abbildender Mikroskopie nutzt fokussierende Optiken zwischen Probe und Detektor (siehe Abb. 2-12). Weiterhin nutzt ein Vollfeldmikroskop häufig noch eine zusätzliche Beleuchtungsoptik vor der Probe. Diese Methode ist komplexer im Aufbau als die Schattenwurfmikroskopie, da eine scharfe Abbildung nur zustande kommt, wenn Probe, fokussierende Optik als Objektiv des Mikroskops und Detektor im richtigen Abstand zueinander stehen (siehe Abb. 2-3). Dies ist der Fall, wenn die Abbildungsgleichung (2.8) erfüllt ist. Für eine vergrößerte Abbildung wird die Probe mit Abstand zwischen einfacher und doppelter eingangsseitiger Brennweite der Linse positioniert. Für eine verkleinerte Abbildung muss die Probe mit größeren Abstand als der doppelten Brennweite platziert werden. Die Auflösung dieses Mikroskops ist durch die Beugung nach Formel (2.14) und (2.15) begrenzt. Nutzt man eine geeignete Beleuchtungsoptik, kann die Auflösung nach dem Abbe-Kriterium auf

$$\sigma_{\text{min.diff}} = \frac{\lambda}{2N_A} \quad (2.18)$$

erhöht werden [54]. Die numerische Apertur von Objektivlinse und Kondensor werden dafür addiert. Da sie sich meist nur geringfügig unterscheiden, wird die numerische Apertur hier verdoppelt. In dieser Arbeit wurde jedoch ohne Kondensor, mit parallelem Strahleinfall von einer Synchrotronquelle

gearbeitet. Damit ist das Bildfeld, welches von der CRL abgebildet werden kann, auf ihre Apertur beschränkt. Mit einer passenden Beleuchtungsoptik kann das Bildfeld je nach Akzeptanzwinkel der CRL größer als deren Apertur gewählt werden [50].

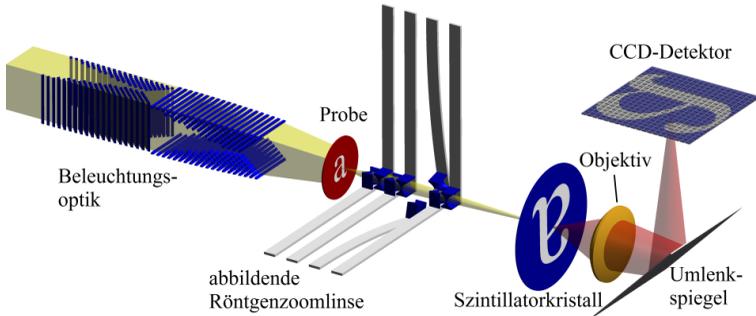


Abb. 2-12: Aufbau eines Röntgenvollfeldmikroskops mit Beleuchtungsoptik, Probe und abbildender Röntgenoptik bis zum Szintillator im röntgenoptischen Teil und Objektiv, 45°-Umlenkspiegel und CCD-Detektor im Teil des Mikroskops mit sichtbarem Licht [58]

Auch in diesem Mikroskopaufbau kann eine Zoomlinse als Objektiv eingesetzt werden. Die Vergrößerung M kann über eine wählbare und beispielsweise kleinere Brennweite f vergrößert werden. Dazu muss anschließend die Detektorposition über die Abbildungsgleichung (2.8) angepasst werden. Weder Probe noch Objektiv müssen jedoch verschoben oder neu im Strahl ausgerichtet werden. Für verschiedene Vergrößerungen kann die gleiche Objektivlinse im Mikroskopaufbau verwendet werden.

Wie auch beim Schattenwurfmikroskopaufbau kann neben dieser Zoomoption eine Probe mit verschiedenen Energien untersucht werden. Soll die Probe unter gleichen Bedingungen in einem statischen Mikroskopaufbau mit verschiedenen Energien aufgenommen werden, muss auch hier die Brennweite angepasst werden, sodass der Brennpunkt F' immer ortsfest bleibt. Diese Möglichkeit bietet neue Anwendungsfelder in spektroskopischen Aufnahmen und ermöglicht Energiescans in der Diffraktionsmikroskopie (siehe Kapitel 6 und 7.2).

3 Konzeption einer Röntgenzoomlinse

Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Umsetzung einer Röntgenzoomlinse aus am IMT gefertigten Röntgenlinsen. Das heißt, die Röntgenlinsen sollen keine feste, sondern eine variable und einstellbare Brennweite haben. Die CRLs aus SU-8 werden röntgentiefenlithographisch hergestellt (siehe Kapitel 2.2). Dabei haben sie mit der Anzahl der Linsenelemente N , Apertur A und Krümmungsradius R ein festes und vorbestimmtes Linsenlayout. Damit kann man für eine bestimmte Photonenenergie E ein Linsenlayout mit gewünschter Brennweite f berechnen und die CRLs danach herstellen.

Eine Röntgenzoomlinse soll vor allem eine von der Photonenenergie unabhängige Brennweite ermöglichen. Damit kann zum einen ein experimenteller Aufbau unabhängig von der Energie geplant beziehungsweise mit verschiedenen Energien genutzt werden. Zum anderen kann diese Eigenschaft direkt genutzt werden, um in eine Probe gezielt über einen bestimmten Energiebereich zu untersuchen. Dabei soll der experimentelle Aufbau unverändert bleiben und für alle Energien die Brennweite so angepasst werden, dass der ausgangsseitige Brennpunkt F' sich nicht verschiebt (siehe Abb. 3-1). Bei höheren Photonenenergien vergrößert sich die Brennweite der CRL. Um nun den ausgangsseitigen Brennpunkt F' beizubehalten, ist es die einfachste Lösung, die Anzahl der Linsenelemente N anzupassen. Weitere Parameter, die die Brennweite beeinflussen, sind nur der Krümmungsradius R und das Brechzahldekrement δ , welche beide mit einmal hergestellten CRLs über das verwendete Material und das festgelegte Linsenlayout unveränderlich sind.

In diesem Kapitel werden bereits existierende Röntgenlinsen mit veränderlicher Brennweite gezeigt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert (Kapitel 3.1). Anschließend werden verschiedene Konzepte zur Bewegung einzelner Linsenelemente aufgezeigt und verglichen (Kapitel 3.2) und abschließend das für diese Arbeit ausgewählte mechanische Prinzip mit drei konzipierten Umsetzungsmöglichkeiten in Kapitel 3.3 beschrieben.

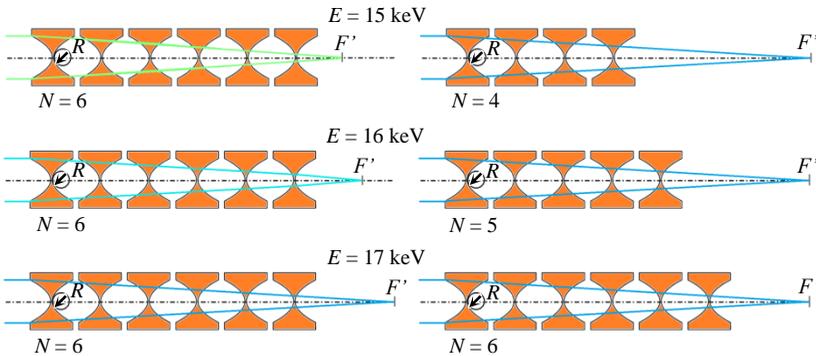


Abb. 3-1: Funktionsprinzip der Röntgenzoomlinse zur Anpassung der Brennweite f für einen unveränderlichen ausgangsseitigen Brennpunkt F' bei verschiedenen Photonenergien E über die Anpassung der Anzahl der Linsenelemente N

3.1 Stand der Technik

Das erste Gerät zur Brennweitenanpassung einer Röntgenlinse war der sogenannte Transfokator, der bereits 2009 vorgestellt und an der ESRF aufgebaut und getestet wurde. Dieser nutzt rotationssymmetrische, geprägte Aluminiumlinsen, die in sieben zylindrischen Einsätzen mit jeweils 2, 4, 8, 16, 32, 64 und 128 Linsenelementen aufgereiht sind. Mit pneumatischen Aktoren werden diese Einsätze unabhängig voneinander in und aus dem Strahl bewegt. Durch die gewählte Linsenaufteilung können nach Vorbild des Dualsystems mit diesen sieben Einsätzen alle Linsenanzahlen N von 2 bis 254 in 2er Schritten ausgewählt werden. Die Aktoren haben einen Hub von 20 mm und werden über bistabile Magnetventilen angesteuert [59]. Eine Weiterentwicklung des Transfokators vom in-Luft auch zum in-Vakuum Einsatz nutzt neben Einsätzen mit 32 und 64 Aluminiumlinsen auch geprägte Beryllium Linsen (1, 2, 4, 8, 16, 32), die ein wesentlich günstigeres δ/β -Verhältnis haben (siehe Abb. 2-1). Der Transfokator hat eine Apertur von $A = 1$ mm. Er wird sowohl zum Fokussieren mit Fokusgrößen $\sigma < 5$ μm , als auch zum Vorfokussieren in Kombination mit strahlabwärts positionierten mikro- oder nanofokussierenden Optiken genutzt. Weiterhin kann er zum

Kollimieren in einem Mikroskopaufbau als Kondensator eingesetzt werden, um beispielsweise Proben mit möglichst hoher Photonenflussdichte zu beleuchten. Durch die chromatische Eigenschaft kann der Transfokator auch als Monochromator mit einer Bandbreite von $\sim 1\%$ eingesetzt werden, wobei die Wellenlängenänderung entlang der optischen Achse erfolgt [60]. Insgesamt ist der Aufbau mit ca. 2 m entlang der optischen Achse sehr groß und muss fest an einem Strahlrohr eingebaut werden.

Seit 2012 können auch Beryllium-Linsenelemente mit Linienfokus im Transfokator kombiniert werden. In diesem Transfokator werden sowohl 1D Linsenelemente mit einem Radius von $500\ \mu\text{m}$ als auch 2D Linsenelemente mit Radien von $50\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ und $1000\ \mu\text{m}$ in zwölf Einsätzen zusammengesetzt. Damit kann der Strahlengang unabhängig in horizontaler und vertikaler Richtung beeinflusst werden, was gerade an Synchrotronquellen mit einer sehr breiten aber flachen Quellausdehnung von Vorteil ist. Dieser Transfokator ist mit 70 cm Länge entlang der optischen Achse schon etwas mobiler und einfacher in einer Experimentierhütte zu integrieren [61].

2015 wurde an der Synchrotronquelle Diamond Light Source ein F-Switch genanntes Gerät zur Manipulation eines großen Linsenarrays von 2D Berylliumlinsen gebaut und 2016 vorgestellt. Hierbei können 120 Linsenelemente einzeln und unabhängig ausgewählt werden. Dies hat den Vorteil gegenüber dem Transfokator, dass die Lage der Hauptebenen der Linse zur präziseren Einstellung des Brennpunktes gewählt werden kann [62]. Die Transfokatoren nutzen dazu große Lineartische, welche den gesamten Aufbau entlang der optischen Achse verschieben. Diese vergrößern den benötigten Platz zusätzlich [61]. Der F-Switch wird zur Fokussierung des Strahls genutzt und kann Fokusgrößen zwischen $5\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ in einem Photonenenergiebereich von 6 keV bis 18 keV erzeugen. Die Abmessungen des F-Switch liegen auch im Bereich von einem Meter [62]. 2018 wurde auch an der Synchrotronquelle DESY ein sogenannter Linsenwechsler vorgestellt, der an drei neuen Strahlrohren eingebaut wurde. Dieser kann in zwölf mit pneumatischen Linearaktoren bewegten Einsätzen bis zu je acht Berylliumlinsen aufnehmen und operiert im Ultrahochvakuum. Zu optischen Eigenschaften gibt es bisher keine Angaben [63].

Die bis zu Beginn dieser Arbeit vorgestellten Röntgenlinsen mit variabler Brennweite weisen alle große Abmessungen im Meterbereich auf und sind dadurch nur fest an einem Strahlrohr integrierbar. Einige experimentelle Anwendungen benötigen jedoch mobile und kompakte Optiken mit kurzer Brennweite und entsprechender Linsenvariation. Beispielsweise können so Mikroskope aufgebaut und der Energie angepasst werden, um die inneren Strukturen und auch dynamische Veränderungen von Proben zu untersuchen. Dazu muss eine Linse als Objektiv in einen Mikroskopaufbau integriert werden können. Ein entsprechende Apparatur sollte daher Abmessungen eines Würfels mit einer Kantenlänge von ~ 15 cm nicht überschreiten. Zudem muss auch die Masse auf maximal 2 kg begrenzt werden, um eine mobile Integration über kleinere Linear- und Rotationstische oder Hexapoden zu ermöglichen.

Nach Veröffentlichung der hier vorgestellten Röntgenzoomlinse mit Abmessungen von 100 mm x 115 mm x 145 mm und einer Masse von 0,8 kg, wurde kürzlich auch eine Version des Transfokator mit Abmessungen dieser Größenordnung als „Mini-Transfokator“ veröffentlicht [64]. Dieser ist auf 50 Linsenelemente beschränkt und bewegt diese wie beim F-Switch einzeln und unabhängig voneinander. Der „Mini-Transfokator“ ist dabei wesentlich langsamer als eine Zoomlinse und nutzt Berylliumlinsen. Diese haben gegenüber SU-8-Linsen den Vorteil eines günstigeren δ/β -Verhältnisses. Durch die geringere Absorption bei gleicher Brechkraft kann eine Berylliumlinse eine größere effektive Apertur erreichen. Zudem können diese Linsen durch ihre gute Wärmeleitfähigkeit aktiv gekühlt werden und sind somit auch im weißen Strahl einsetzbar. Ein großer Nachteil der Berylliumlinsen ist die sehr beschränkte Auswahl an Krümmungsradien von 50 μm , 100 μm , 200 μm , 300 μm , 500 μm und größer [49], was eine geringe Flexibilität mit sich bringt. Bei den SU-8-Linsen sind beliebige Radien größer 5 μm präzise herstellbar [19]. Weiterhin sind sie mit mehreren Tausend Linsenelementen und verschiedenen Radien pro Bestrahlung um ein vielfaches günstiger, schneller und flexibler produzierbar. Die amorphe Struktur des Resists erzeugt keine störenden Beugungsmuster wie Röntgenpulverbeugungsringe oder zufällige Bragg-Reflexionen wie sie bei den einzel- und polykristallinen Linsenmaterialien Be, Li, Si, Al, Ni oder Diamant auftreten [65].

Ein weiteres Kriterium für eine Röntgenzoomlinse ist die Schaltzeit für verschiedene Linsenordnungen, das heißt, wie schnell die Brennweite angepasst werden kann. Da der F-Switch und auch der Mini-Transfokator über Motoren jedes Linsenelement einzeln anfahren und bewegen müssen, liegen die Schaltzeiten hier im Minutenbereich. Der Transfokator nutzt pneumatische Aktoren für jeden Linseneinsatz, kann diese gleichzeitig ansteuern und erzielt damit geschätzte Schaltzeiten im Sekundenbereich. Soll eine Probe mit vielen verschiedenen Energien untersucht werden oder sogar dynamische Prozesse untersucht werden, sind jedoch Schaltzeiten bis in den Millisekundenbereich notwendig. Dies ist mit der hier entwickelten Zoomlinse möglich und stellt somit einen weiteren Vorteil dar.

3.2 Mechanische Bewegungsprinzipien

Die in der Literatur vorgestellten Geräte zur Brennweitereinstellung bei CRLs nutzen bisher hauptsächlich rotationssymmetrische Linsenelemente, die einen Punktfokus erzeugen. Diese Linsenscheiben können prinzipiell in jede beliebige Richtung senkrecht zur optischen Achse aus dem Strahl bewegt werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich planare Linsenelemente genutzt. Diese werden zur Erzeugung eines Punktfokus mit einer zweiten CRL in einem 90° -Winkel gekreuzt (siehe Abb. 2-9). Möchte man nun einzelne Linsenelemente aus dem Strahlengang nehmen, so muss dies für zwei verschiedene Richtungen erfolgen, um eine Kollision mit der CRL der anderen Richtung zu vermeiden (siehe Abb. 3-2). Ein geeignetes Bewegungsprinzip benötigt eine Führung, einen Anschlag und einen Antrieb. Mögliche Führungen werden zuerst betrachtet.

In einer Punktfokuslinse sind zwei planare SU-8-CRLs gekreuzt, sodass deren Aperturen sich gerade vollständig überschneiden (siehe Abb. 3-2 rotes Quadrat). Für die horizontal fokussierende CRL sind mögliche Bewegungsrichtung in Translation (Abb. 3-2 (a)) und Rotation (Abb. 3-2 (b)) eingezeichnet, die ohne eine Kollision mit der vertikal fokussierenden CRL möglich sind. Eine Translationsbewegung in x- oder y-Richtung kann beispielsweise mit Geradführungen umgesetzt werden. Dazu kommen

Gleitlager, Wälzlager, Rollenführungen oder Federführungen in Frage. Die gezeigten Rotationen um die z-Richtung können entweder über ein Gelenk mit beispielsweise einem Wälzlager oder über ein Festkörpergelenk erreicht werden [66]. Dazu wird eine feste Einspannung durch eine entfernt einwirkende Kraft über einen Hebel mit einem Biegemoment belastet. Mögliche Dreh- und Einspannpunkte sind hier aufgezeigt an P_1 , P_3 nahe dem Substrat mit größerem, benötigtem Auslenkwinkel α , γ und an P_2 mit größerem Abstand zum Substrat und kleinerem, benötigtem Auslenkwinkel β . Ein Rotation um x oder y und auch eine Translation in z-Richtung sind aufgrund der sehr engstehenden Linsenelemente nicht möglich.

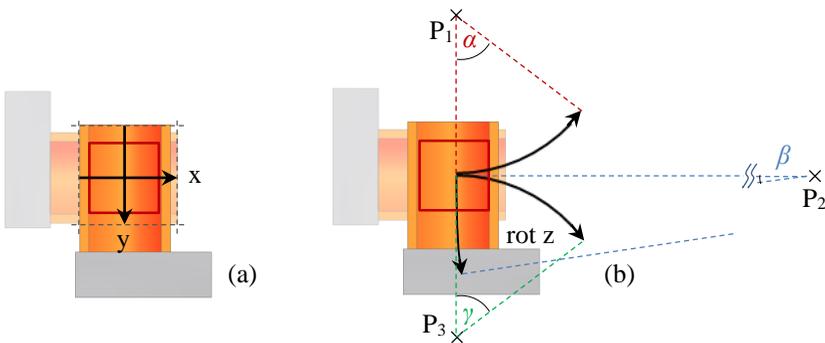


Abb. 3-2: Mögliche Bewegungsrichtungen in Translation (a) und Rotation (b), um Linsenelemente der horizontal fokussierenden CRL ohne Kollision aus dem Feld der im Strahl stehenden Apertur (rotes Quadrat) zu nehmen

Bei der Auswahl einer geeigneten Führung ist zu beachten, dass die Bewegung ausreichen muss, um das Linsenelement vollständig aus dem Strahlengang zu entfernen. Die größte Herausforderung bei der Gestaltung einer Röntgenzoomlinse ist jedoch die notwendige präzise Bewegung einzelner, nur wenige hundert Mikrometer großer Linsenelemente zurück in den Strahlengang. Eine geeignete Führung ist daher mit möglichst wenigen Freiheitsgraden bei sehr geringen zulässigen Abweichungen zu gestalten (siehe Tabelle 3-1). Für planare Linsenelemente gibt es gegenüber rotations-symmetrischen Linsenelementen eine weniger kritische Bewegungsrichtung.

Bewegt man die horizontal fokussierenden Linsenelemente in y -Richtung, so hat man einen Toleranzbereich so groß wie die Strukturhöhe abzüglich der Apertur A und der Stützblockbreite h_{BI} (siehe Abb. 2-7). In diesem Bereich ist es egal, welcher Teil der horizontal fokussierenden Linsenapertur genutzt wird. Ein typisches Linsenelement mit Apertur $A = 100 \mu\text{m}$ in einem $400 \mu\text{m}$ hohen Resist und einer Stützblockbreite von $h_{BI} = 50 \mu\text{m}$ hat somit einen maximalen Toleranzbereich von $250 \mu\text{m}$, in dem das Linsenelement die Linse der anderen Richtung vollständig kreuzt und noch nicht mit dem Substrat kollidiert (siehe Abb. 3-2). Die Abweichung sollte jedoch kleiner gehalten werden, da die Resistdicke variiert und die Linse vorzugsweise im substratfernen Teil genutzt werden soll (siehe Kapitel 7). Alle anderen Translations- oder Rotationsrichtungen sind ungeeignet und zu vermeiden, da hier kleinste Abweichungen bereits zur Verschlechterung der optischen Eigenschaften führen (siehe Tabelle 3-1). Verschiebungen in x -Richtung verringern zunehmend die Transmission [67] und es kommt zu einer Versetzung des Fokuspunktes in x -Richtung. Weiterhin kann es zur Kollision mit dem vertikalen Substrat der CRL kommen. Ein Versatz in z -Richtung verändert die Brennpunktlage der CRL und führt dadurch zu Astigmatismus. Bei einem Versatz größer als der vorgesehene Luftspalt b_L kommt es zur Kollision mit einem vertikalen Linsenelement. Die Rotation eines Linsenelements hat ebenfalls direkte Auswirkungen auf die Eigenschaften der Linse. Eine Rotation um die x -Achse ändert den Projektionswinkel der von der Röntgenstrahlung durchlaufenen Parabel. Die Parabel wird gestreckt, der effektive Krümmungsradius verringert sich und damit verkürzt sich die Brennweite, was zu Astigmatismus führt. Eine Rotation eines Linsenelements um die y -Achse verringert die Apertur der Linse und verschiebt den Fokuspunkt in x -Richtung. Eine Rotation der CRL um z führt zu Astigmatismus. Das zuvor ausschließlich in horizontaler Richtung fokussierende Linsenelement verliert einen Teil seiner horizontalen Brechkraft und fokussiert dafür auch in vertikaler Richtung. Der entstehende Astigmatismus der Linse bestimmt direkt die Fokusgröße und Auflösung der Linse (siehe Formel (2.17)).

Tabelle 3-1: Beschreibung der Auswirkung bei Fehlpositionierung eines einzelnen horizontalen Linsenelements aus einer CRL für sechs mögliche Freiheitsgrade (siehe Abb. 3-2)

Richtung	Beschreibung für zunehmende Abweichung aus Idealposition
x	verringerte Transmission der CRL [67], Verschiebung des Fokuspunktes in x, Kollision
y	Toleranzbereich (Strukturhöhe – Apertur – Stützblockbreite), verringerte Apertur der CRL, prozessbedingte Qualitätsunterschiede in Strukturhöhe [52], [68], Kollision
z	Versatz der Brennweite → Astigmatismus, Kollision
rot x	Versatz der Brennweite durch veränderte Projektion der Parabel → Astigmatismus, Kollision
rot y	verringerte Apertur, Verbreiterung des Fokuspunktes in x, Kollision
rot z	Astigmatismus

Neben der Auswahl einer geeigneten, präzisen und ausreichend Bewegungsspielraum gebenden Mechanik sind die initiale Ausrichtung der einzelnen Linsenelemente auf dieser und die Einhaltung des zur Verfügung stehenden Bauraums zu beachten. Die Linsenelemente einer CRL stehen zunächst Mikrometer genau ausgerichtet in einer Reihe auf einem circa 2 mm breiten Si-Substratstreifen. Um bei einer Gesamtlänge von $L_{CRL} = 60$ mm noch 20-30 Einzellinsen kombinieren zu können, muss das Substrat alle 2-3 mm getrennt werden. Damit steht eine Fläche unterhalb des Substrates der Linsenelemente von circa 2 mm x 2 mm mit einem Abstand von 1 mm entlang der optischen Achse zur nächsten Fläche zur Verfügung, an der eine Führung jeglicher Art befestigt werden kann. Die Trennung der Einzellinsen beziehungsweise Linsengruppen erfolgt typischerweise mit einer Wafersäge, welche mikrometergenau und mit Schnittbreiten bis maximal 150 μ m arbeitet. Zu bevorzugen ist an dieser Stelle die feste Verbindung der CRL auf den Führungen vor der Trennung des Substrates. Eine präzise Ausrichtung der einzelnen Linsenelemente unter einem Lichtmikroskop oder direkt im Röntgenstrahl wäre bei 20-30 Einzelausrichtungen zu aufwändig.

In dieser Arbeit ist daher das Prinzip der Festkörpergelenke gewählt worden. Dazu wird die CRL auf ein flaches Substrat geklebt, welches anschließend in einzelne, unabhängig biegbare Streifen getrennt und einseitig eingespannt wird (siehe Abb. 3-3 und Abb. 3-4).

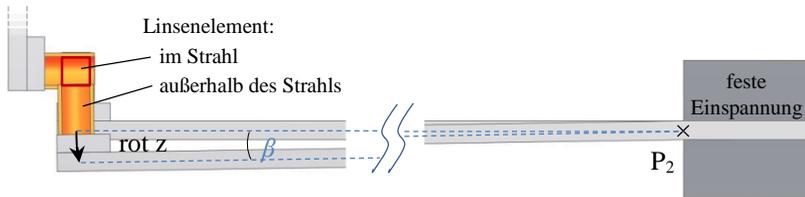


Abb. 3-3: Auslenkung eines horizontal fokussierenden Linsenelements aus dem Feld der im Strahl stehenden Apertur (rotes Quadrat) über ein Festkörpergelenk

Wirkt eine Kraft quer zum Substratstreifen in Auslenkrichtung, so erzeugt sie durch die feste Einspannung im Punkt P_2 ein Drehmoment. Der Substratstreifen wird gebogen und das Linsenelement aus dem Strahl bewegt. Der Winkel β vergrößert sich durch die Biegung zum freien Ende hin. Das Linsenelement beschreibt für kleine Winkel β in etwa ein Kreisbogensegment bei einer Rotation in z-Richtung um Punkt P_2 beziehungsweise durch eine gegenüber der Auslenkung in y-Richtung groß gewählte Substratlänge nahezu eine translatorische Bewegung in der unkritischen y-Richtung. Eine genaue Berechnung der Auslenkung und des notwendigen Substratdesigns wird in Kapitel 4.1 durchgeführt.

Die Festkörpergelenklösung benötigt kein nachträgliches Ausrichten einzelner Linsenelemente aktiv im Strahl. Alle Translationen werden durch die feste Einspannung verhindert. Die Rotationen um die x- und y-Richtung können durch geeignete Wahl der Geometrie der Biegestreifen minimiert werden. Trotzdem muss eine möglichst senkrechte und mittige Krafteinwirkung realisiert werden, um eine Torsion der Biegestreifen zu vermeiden.

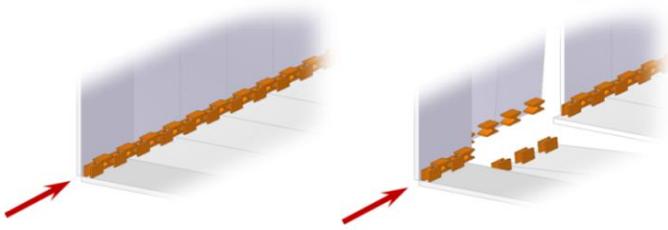


Abb. 3-4: Prinzip der Röntgenzoomlinse mit einzelnen Linsenelementen auf senkrecht zur optischen Achse angeordneten Biegegliedern, die eine Auslenkung der Linsenelemente und damit eine Anpassung der Anzahl der Linsenelemente N erlaubt, der Pfeil gibt die Strahlrichtung an [17]

3.3 Aktorik für Festkörpergelenke

Für die Bewegung der einzelnen Linsenelemente muss eine entsprechende Aktorik mit Endanschlag konzipiert werden. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Prinzipien zur Auslenkung von Festkörpergelenken betrachtet.

Es gibt eine ganze Reihe an Linearantrieben, welche eine Kraft auf den Biegebalken bringen und eine Auslenkung von etwa 1 mm erzielen können. Wichtigstes Ausschlusskriterium sind die Maße eines möglichen Aktors. Besonders kritisch ist die Richtung entlang der optischen Achse, in der möglichst viele Aktoren nebeneinander platziert werden müssen. Damit ist die Breite auf $b_A \sim 2-3$ mm beschränkt. Insgesamt soll der Bauraum der gesamten Zoomlinse 15 cm in keiner Richtung überschreiten, das heißt Höhe und Länge eines Aktors mit Anschluss sollten $h_A, l_A \sim 10$ cm nicht übersteigen. Die Aktoren dürfen sich nicht gegenseitig beeinflussen; dies ist insbesondere bei elektrischen oder magnetischen Feldern zu beachten. Eine Schaltzeit von wenigen Sekunden, besser Millisekunden sollte bevorzugt werden.

Eine Möglichkeit, um die Bewegung der Linsen in der Röntgenzoomlinse zu realisieren, stellt die Verwendung von Piezo-Biegeaktoren dar. Gegenüber linearen Aktoren haben Biegeaktoren auf sehr engem Bauraum einen ausreichend großen Stellweg. Die Konstruktion mit den ausgewählten Aktoren wird in Kapitel 4.2 und deren Ansteuerung in Kapitel 5.1 näher beschrieben.

Die Piezo-Biegeaktoren werden oberhalb des Substrats fest eingespannt (siehe Abb. 3-5). Für die vertikal fokussierende CRL ist der Aufbau entsprechend um 90° gedreht. Die Piezo-Biegeaktoren sind oberhalb der Biegestreifen angeordnet und drücken bei angelegter Spannung auf diese. Sie lenken die Biegestreifen aus bis die Linsenelemente nicht mehr im Strahlengang stehen. Ein ausgeschalteter Piezoaktor hingegen hat keinen Kontakt zum Substratstreifen.

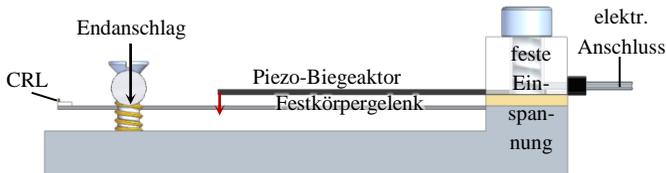


Abb. 3-5: Funktionsprinzip der Röntgenzoomlinse mit Auslenkung eines CRL tragenden Substratstreifens als Festkörpergelenk, Auslenkung mit einem Piezo-Biegeaktor und Sicherung der CRL in Strahlposition mit einer vorgespannten Stange als mechanischem Endanschlag

Nahe dem freien Ende, auf dem die Linsenelemente befestigt sind, gibt es einen Endanschlag. Diese definiert über eine mit einer Feder vorgespannte Stange die Ausgangsposition aller Substratstreifen und damit die Position aller Linsenelemente im Strahl. Über diesen Endanschlag ist die Ausgangsposition wiederholbar und dauerhaft gegeben. Diese Aktorikvariante kann Linsenelemente bis $400\ \mu\text{m}$ Strukturhöhe und mit 24 Biegefingern pro Halblinse in $\sim 10\ \text{ms}$ schalten.

Eine zweite Variante der Röntgenzoomlinse ist mit Exzentrisscheiben umgesetzt. Diese Scheiben können sehr schmal gestaltet und damit sehr eng entlang der optischen Achse gestapelt werden. Weiterhin ist je nach Abstand der beiden Schaltflächen zum Drehmittelpunkt ein beliebiger Hub möglich (siehe Abb. 3-6). Die gesamte Konstruktion wird in Kapitel 4.3 näher beschrieben. Alle Exzentrisscheiben werden nacheinander mit einem Schalthebel über einen Linearmotor und eine Schaukel bewegenden Servo geschaltet (siehe Kapitel 5.2). Prinzipiell ist diese Variante auch manuell bedienbar. Mit Motorisierung können CRLs mit Strukturhöhen bis $2\ \text{mm}$ und 40 Biegefingern pro Halblinse in $65\ \text{s}$ geschaltet werden.

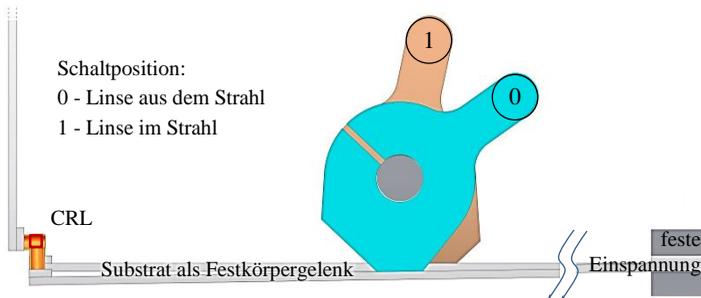


Abb. 3-6: Funktionsprinzip der Röntgenzoomlinse mit Auslenkung eines CRL tragenden Substratstreifens mit Festkörpergelenk mittels Exzentescheibe mit zwei Schaltpositionen

Die dritte Variante einer Röntgenzoomlinse nutzt Formgedächtnisdrähte als Aktoren. Die Auslenkung des Substrates wird erreicht, indem ein Abstandshalter zwischen Endanschlagsstange und Biegefingerring geschoben wird (siehe Abb. 3-7).

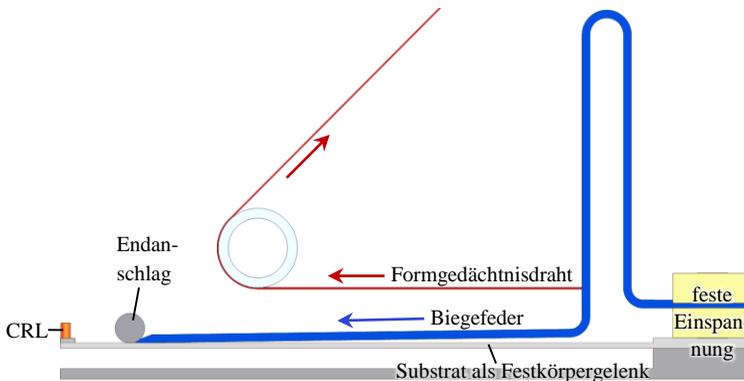


Abb. 3-7: Funktionsprinzip der Röntgenzoomlinse mit Auslenkung eines CRL tragenden Substratstreifens als Festkörpergelenk durch eine Biegefeder, die als Abstandsdraht von einem Formgedächtnisdraht unter die Endanschlagsstange gezogen wird

Der Durchmesser des eingeschobenen Drahtes bestimmt die Auslenkung. Wird der Formgedächtnisdraht von einem Strom durchflossen, erhitzt er sich

auf etwa 70 °C und verkürzt sich dabei um 4-5 % seiner Länge. Dadurch wird der Abstandsdraht unter den Endanschlag gezogen und drückt das Linsenelement aus dem Strahlengang. Im stromlosen Zustand kühlt der Formgedächtnisdraht ab, verlängert sich und der Abstandsdraht wird durch die Federwirkung seiner gebogenen Geometrie in U-Form unter der Endanschlagsstange herausgezogen. Das Linsenelement federt wieder an den Endanschlag und steht damit wieder im Strahlengang. Eine erste Konstruktion dieser Variante wird in Kapitel 4.5 vorgestellt. Mit einer Ansteuerung können CRLs mit Strukturhöhen bis 2 mm und 40 Biegegliedern pro Halblinse in circa 2 s geschaltet werden.

4 Konstruktion und Montage der Röntgenzoomlinse

Das Herzstück einer Röntgenzoomlinse sind am IMT röntgentiefenlithografisch gefertigte, brechende Linsen (CRLs). Diese Linsenreihen müssen für die Verwendung in einer Röntgenzoomlinse zunächst auf einem flexiblen Substrat, welches als Festkörpergelenk dient, befestigt werden. In diesem Kapitel werden die notwendigen und angepassten Prozessschritte zur Bearbeitung der CRLs für eine Röntgenzoomlinse beschrieben. Anschließend werden die Konstruktion und der Aufbau der drei Prototypen zu den in Kapitel 3.3 vorgestellten Aktorprinzipien dargestellt.

4.1 Herstellung der Zoomlinsenfingerereinheit

Herkömmliche CRLs mit fester Brennweite bestehen aus zwei Linsenreihen mit Linienfokus, welche unter 90° montiert werden (siehe Kapitel 4.3), um einen Punktfokus zu erhalten. Für die Zoomlinse müssen die einzelnen Linsenelemente der Linsenreihen beweglich gelagert werden. Dazu wird ein Substrat genutzt, welches über Festkörpergelenke eine Biegebewegung ausführen kann und damit die Linsenelemente reversibel aus dem Strahlengang bewegt.

Jedes Linsenelement steht auf dem freien Ende eines einseitig eingespannten Biegebalkens der einem einzelnen Zoomlinsenfinger entspricht. Dieser wird idealerweise mit einer reinen Querkraft F im Abstand l zur Einspannung belastet (siehe Abb. 4-1). Ein Linsenelement steht im Abstand a vom Punkt der Biegebelastung. Jeder Biegebalken hat einen rechteckigen Querschnitt der Breite b und Dicke h . Für einen rechteckigen Querschnitt eines solchen Biegebalkens ergibt sich ein Trägheitsmoment I von [66]

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (4.1)$$

Die Durchbiegung w am freien Ende des Biegebalkens entspricht der Auslenkung des Linsenelements aus dem Strahlengang und berechnet sich durch [69]

$$w = \frac{Fl^2}{EI} \left(\frac{a}{2} + \frac{l}{3} \right) \quad (4.2)$$

mit dem materialspezifischen Elastizitätsmodul E .

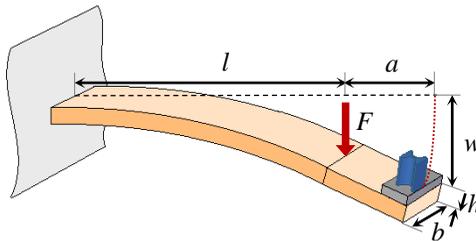


Abb. 4-1: Festkörpergelenkprinzip und Bemaßung eines einzelnen Zoomlinsenfingers bestehend aus einem Substratstreifen der Länge l , Breite b und Dicke h , welcher mit einer Kraft F auf Biegung belastet wird. Die resultierende Durchbiegung w an Position eines Linsenelements entspricht der Auslenkung aus dem Strahlengang.

Die geforderte Auslenkung für eine Zoomlinse ist abhängig von der physikalischen Apertur der Linsenelemente. Diese ist maximal so groß wie die Höhe des Resists, in welchem die Linse gefertigt wurde, abzüglich der Höhe der Stützblöcke (vgl. Kapitel 2.2). Die physikalische Apertur des Linsenelements plus 25 % Reserve für schwankende Resisthöhe muss komplett aus dem Strahlengang genommen werden. Je nach Resisthöhe bedeutet dies, Stellwege für typische Linsenelemente von $400 \mu\text{m}$ oder für sehr große Aperturen z. B. bei Fresnel-Linsen bis zu $2000 \mu\text{m}$.

Limitierende Größe bei der Dimensionierung der Zoomlinsenfinger ist u. a. die Kraft, welche ein Aktor maximal ausüben kann. Bei den ausgewählten Piezoaktoren (Typ BA4902, PiezoDrive Pty Ltd, Callaghan, NSW, Australien) liegt die Maximalkraft beispielsweise bei $F = 0,1 \text{ N}$. Innerhalb dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Materialien als Zoomlinsenfingersubstrat getestet: gesägte Siliziumwafer und drahterodierte Federstahlkämme.

4.1.1 Siliziumwafer als Zoomlinsensubstrat

Eine röntgentiefenlithografisch hergestellte CRL hat typischerweise bereits einen Siliziumwafer als Substrat. Um das maximale Bestrahlungsfeld von circa 60 mm x 20 mm auszunutzen, werden in einem Röntgenlinsenlayout mehrere Linsen parallel zueinander angeordnet (siehe Abb. 4-2). Würde man eine dieser Linsenreihen für eine Zoomlinse nutzen wollen, müssten alle anderen Linsenreihen vom Substrat entfernt werden. Daher scheidet diese Möglichkeit aus ökonomischer Sicht aus.

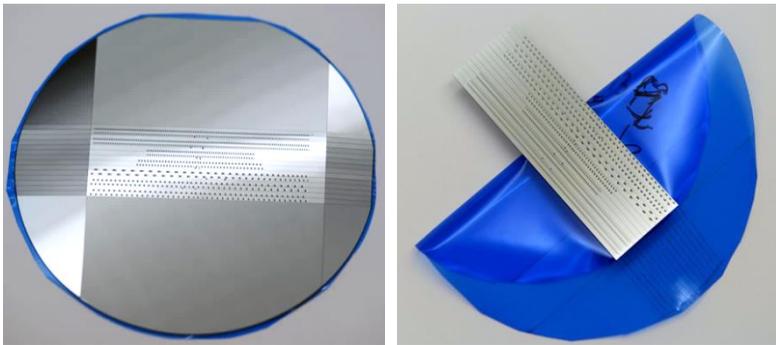


Abb. 4-2: Typisches 4"-Siliziumsubstrat mit verschiedenen CRLs in einem Bestrahlungsfeld von 60 mm x 20 mm. Der Siliziumwafer wird auf eine Trägerfolie geklebt und mit einer Wafersäge in separate CRLs vereinzelt (links). Anschließend können die CRLs von der Trägerfolie abgezogen werden (rechts).

Um dennoch einen Siliziumwafer als Substrat zu nutzen, wird die zuvor vereinzelt CRL, auf einen neuen 4"-Siliziumwafer geklebt (siehe Abb. 4-3). Zum Verkleben der CRL auf einen Si-Wafer wird ein Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus sofortfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) genutzt. Silizium bietet den Vorteil, dass die Klebeverbindung keinen Spannungen durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten der Materialien ausgesetzt ist. Zudem ist die Bearbeitung von Siliziumwafern mit hoher Präzision im Mikrometerbereich ein etablierter Prozess am IMT. Es werden n-dotierte 4"-Si-Wafer (\varnothing 100 mm) mit einer (100)-Ebene entlang der Oberfläche verwendet. Das E-Modul in der $\langle 100 \rangle$ Kristallrichtung

beträgt $E_{Si} = 130 \text{ GPa}$, welches zur Berechnung des Biegeverhaltens genutzt wird [70].

Zur Herstellung der Si-Biegefingerr wird ein Wafer mit einer Wafersäge (Model DAD 3430, Disco Corporation, Japan) in einzelne Streifen, die entlang des gesamten Wafers verlaufen (siehe Abb. 4-3), getrennt. Die Trägerfolie, auf die der Wafer aufgebracht ist, stellt sicher, dass die Positionen der einzelnen Siliziumstreifen und damit die Positionen der Linsenelemente stabil zueinander bleiben.

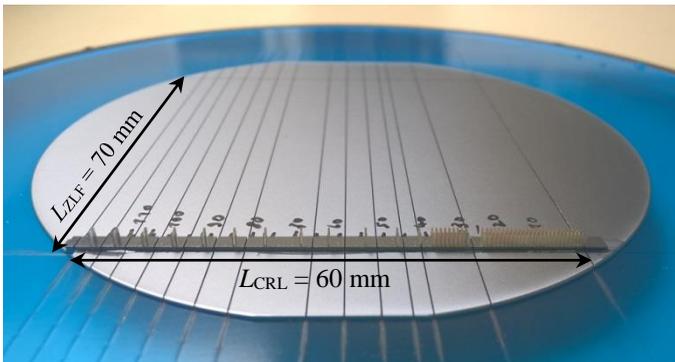


Abb. 4-3: CRL aus 2 mm hohem Resist auf 4⁺-Si-Wafer geklebt und für den Sägeprozess auf Trägerfolie (blau) geklebt und in einem Spanrahmen gelagert. Die Sägeschnitte werden über den gesamten Wafer geführt. Hier ist die maximale Länge der Zoomlinsenfingerr von $L_{ZLF} = 70 \text{ mm}$ bei einer Länge der CRL von $L_{CRL} = 60 \text{ mm}$ gesägt worden.

Um diesen Zustand zu stabilisieren, ist es besonders wichtig, möglichst schnell einen Verbindungsstreifen, ebenfalls aus Silizium, am den Linsenelementen gegenüberliegenden Ende des Wafers quer über alle Biegefingerr aufzukleben. Dies muss noch direkt auf der zwischen zwei Klemmrings eingespannten Trägerfolie geschehen, da sonst wegfallende Zugkräfte der entspannten Folie zu einem Verschieben der Positionen der vereinzelter Streifen zueinander führen würde. Für die Verklebung des Verbindungsstreifens mit den gesägten Streifen wird ein Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus schnellfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) verwendet. Nach

mindestens einer Stunde Aushärtezeit des Klebers kann die fertige Zoomlinsenfingereinheit von der Trägerfolie abgezogen werden (siehe Abb. 4-4).

Die Abmessungen einer solchen Zoomlinsenfingereinheit sind vom Linsenlayout abhängig. Die maximale Länge von ca. $L_{CRL} = 60$ mm bestimmt die Breite b der Zoomlinsenfinger sowohl durch die gewünschte Zoomlinsenfingeranzahl Z_N als auch durch die Limitierungen durch die minimale Sägeschnittbreite und die Aktorengöße (siehe Kapitel 4.2).

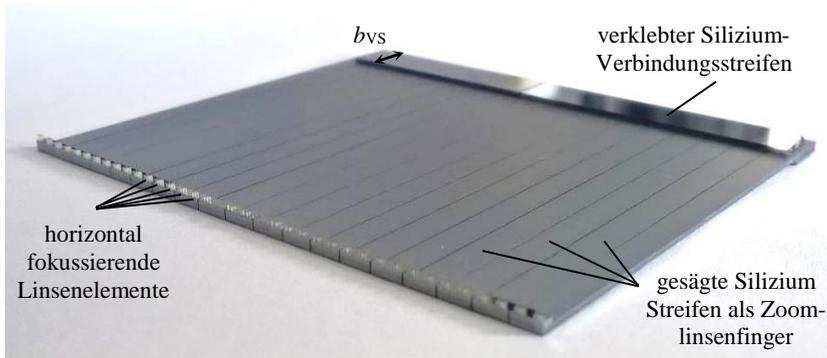


Abb. 4-4: Fertige Zoomlinsenfingereinheit bestehend aus einer auf einen 4"-Si-Wafer geklebten CRL (hier Linsenlayout 1405 #10) und verklebtem Si-Verbindungsstreifen am gegenüberliegende Ende [17]

Für den Wafersägeprozess wurde eine minimale Zoomlinsenfingerbreite von $b_{\min} = 1,5$ mm ermittelt. Bei schmalen Streifen zerbrechen die einzelnen Finger meist schon beim Sägeprozess oder beim Abziehen von der Trägerfolie. Bei hohen Linsenstrukturen muss ein Wafersägeblatt mit größerer Schnitttiefe genutzt werden, da das rotierende Diamantsägeblatt von der Strukturseite in den Wafer schneidet. Für maximale Strukturhöhen von 2 mm auf einem 525 μm starken Si-Substrat und dem 525 μm dicken Zoomlinsen-substrat (insgesamt 3,05 mm) wurde ein neues Sägeblatt (Model ZHDG-SD1000-N1-60-R150, Disco Corporation, Japan) getestet, das eine maximale Sägeschnitttiefe von 3,2 mm ermöglicht. Dieses hat eine Schnittbreite von 150 μm und eine rauere Oberfläche als die üblichen Sägeblätter. Das Sägen von minimal 1,5 mm schmalen Si-Streifen ist damit auch möglich. Aufgrund

der größeren einwirkenden Kräfte muss dazu erst die halbe Materialdicke eingesägt und erst in einem zweiten Schnitt das Material komplett durchtrennt werden. Die Gesamtlänge der Zoomlinsenfinger kann maximal $L_{ZLF} = 70$ mm sein, solange ein Standard 4“-Si-Wafer als Substrat genutzt wird. Die freie Länge des Biegebalkens ergibt sich anschließend aus der Gesamtlänge L_{ZLF} abzüglich der Breite des aufgeklebten Verbindungsstreifens von typischerweise $b_{VS} = 10$ mm (siehe Abb. 4-4). Die Dicke des Si-Substrates ist standardmäßig $h_{Si} = 525$ μm . Dieses Substrat wird auch für die Exzentrerscheibenzoomlinse genutzt. Für die Piezoaktorenzoomlinse wurden zu Gunsten einer größeren Auslenkung auch Substrate mit $h_{Si} = 200$ μm und $h_{Si} = 380$ μm getestet. Eine Dicke von $h_{Si} = 200$ μm ist jedoch nicht ausreichend, da hier schon beim Sägeprozess einzelne Zoomlinsenfinger brechen. Die Dicke von $h_{Si} = 380$ μm hat sich für die Piezoaktorenzoomlinse als bester Kompromiss zwischen geringer Auslenkkraft und Stabilität bewährt. Dünnere Wafer brechen zu oft in der Wafersäge.

Große Achtsamkeit muss der Klebstoffmenge zukommen. Beim Klebevorgang der CRL auf das Substrat muss die ganze Unterseite des CRL Streifens mit Kleber bedeckt werden, damit nach dem Sägen auch alle kleinen Klebeflächen sicher halten. Gleichzeitig darf nicht zu viel Kleber aufgetragen werden, da sonst durch Kapillarkräfte Kleber bis zu den Linsenelementen auf der Oberseite laufen kann und dadurch die Linsen zerstört werden können. Gleiches gilt für den Klebevorgang des Verbindungsstreifens auf die gesägten Zoomlinsenfinger. Hier muss die gesamte Länge des Verbindungsstreifens mit Kleber bedeckt sein, um alle einzelnen Zoomlinsenfinger zu fixieren. Außerdem darf nur etwa $2/3$ der Breite des Streifens mit Kleber bedeckt werden, um ein Auslaufen des Klebers in die Spalte zwischen den Zoomlinsenfingern außerhalb des Verbindungsbalkens zu verhindern (siehe Negativbeispiel in Abb. 4-5). Wenn Klebstoff in die Spalte zwischen den Zoomlinsenfingern gelangt, kommt es zur Beeinflussung benachbarter Finger bei der späteren Biegebewegung. Die Zoomlinsenfinger können dann nicht mehr sauber unabhängig voneinander aus dem Strahl bewegt werden.

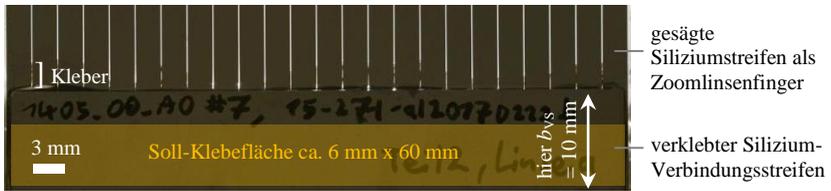


Abb. 4-5: Zoomlinsenfingereinheit mit 24 Zoomlinsenfingern mit 10 mm breitem Verbindungsbalken verklebt; hier wurde zu viel Klebstoff benutzt, der durch Kapillarkräfte entlang der Spalte zwischen den einzelnen Zoomlinsenfingern floss. Bis zu teilweise 3 mm ab Kante des Verbindungsstreifens sind hier die Zoomlinsenfinger ungewollt verbunden.

Ein Zoomlinsensubstrat aus Silizium hat zwei Nachteile. Zum einen die genannte Schwierigkeit die richtige Klebstoffmenge aufzubringen, zum anderen können durch das komplette Trennen der einzelnen Zoomlinsenfinger kleinste Fehler durch beispielsweise Verschmutzung der Trägerfolie (siehe Abb. 4-6 links) zu Verdrehungen und Fehlpositionierung der Biegefingern führen (siehe Abb. 4-6 rechts). Der Versatz in der Spiegelung auf dem gesägten Si-Wafer zeigt eine Verdrehung des Zoomlinsenfingers um seine Längsachse an (gut sichtbar an dem markierten Zoomlinsenfinger). Diese Verdrehung führte später zur Verklemmung dieses Zoomlinsenfingers mit den benachbarten.

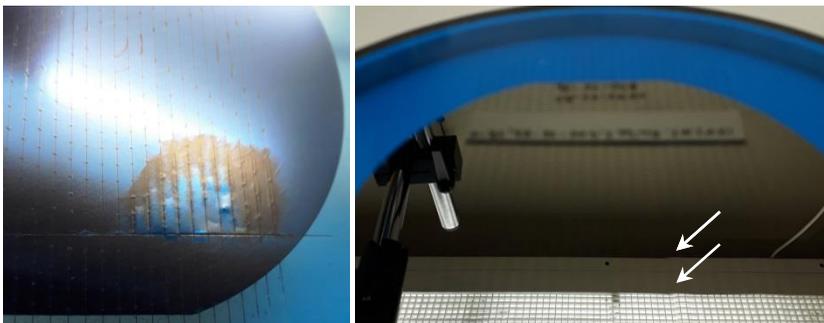


Abb. 4-6: Verschmutzung der Trägerfolie unter dem Silizium-Zoomlinsensubstrat (links) und resultierende Verdrehung der Biegefinger um ihre Längsachse (rechts: Versatz in der Spiegelung markiert)

4.1.2 Kamm aus Federstahl als Zoomlinsensubstrat

Die Nachteile des Siliziumsubstrates sollen mit einem neuen Zoomlinsen-substrat in Kammform vermieden werden. Dadurch bleiben die einzelnen Zoomlinsenfinger über die gesamte Fertigung hinweg fest miteinander verbunden. Das Material muss elastisch sein und eine hohe Steifigkeit besitzen, um verlässlich über viele Schaltprozesse hinweg stets die gleiche Position zu halten. Besonders gut geeignet für diese Anwendung ist daher Federstahl. Es wurde Federstahl mit der Werkstoffnummer 1.4310 gewählt, der durch die Legierung mit 17 % Chrom und 7 % Nickel zudem eine gute Korrosionsbeständigkeit aufweist. Die hohe Festigkeit wird bei diesem Werkstoff durch Kaltwalzen erzielt [71]. Der thermische Ausdehnungs-koeffizient unterscheidet sich mit $15,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für Federstahl stark von Silizium mit $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Für die kleinen Klebeflächen von circa $2 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ (Breite des CRL Substrates \times Breite des Zoomlinsenfingers) führt eine im Laborbetrieb mögliche Temperaturänderung von maximal $30 \text{ }^\circ\text{C}$ zu einer unkritischen Längenänderung von knapp $1 \text{ }\mu\text{m}$. Zwischen dem Aufkleben einer 60 mm langen CRL auf die Federbalken und dem Wafersägen parallel zu den Biegefingern sollte allerdings auf eine konstante Temperatur geachtet werden.

Der Elastizitätsmodul für diesen Federstahl ist mit $E_{FS} = 185 \text{ GPa}$ höher als bei Silizium. Das Federstahlsubstrat wird im Gegensatz zum Silizium bereits vor dem Verkleben mit der CRL in seine Kammform mit den einzelnen Festkörpergelenken als Zoomlinsenfinger gebracht. Dazu wird aus einem Federstahlblech ein Rechteck der Größe $61 \text{ mm} \times 71,5 \text{ mm}$ geschnitten. Anschließend werden die 24 einzelnen Zoomlinsenfinger mit $2,3 \text{ mm}$ Breite mittels Drahterodieren (Drahtdurchmesser $200 \text{ }\mu\text{m}$) geschnitten (siehe Abb. 4-7). Diese Abmessungen sind für das erarbeitete Zoomlinsenlayout 1773_00_A0 angepasst (siehe Kapitel 6), können jedoch beliebig an andere Layouts angepasst werden. Der Mindestabstand zwischen zwei Zoomlinsen-fingern ist durch die Breite der Erodierspur von etwa $250 \text{ }\mu\text{m}$ vorgegeben. Das Federstahlsubstrat wurde mit verschiedenen Stärken getestet. Ein Substrat mit $h_{FS} = 500 \text{ }\mu\text{m}$ ist sehr steif und kann problemlos drahterodiert werden. Für die Piezoaktoren-Zoomlinse ist diese Dicke nicht geeignet, da

die Mindestauslenkung der Biegefingern von $400\ \mu\text{m}$ nicht erreicht wird. Für die Exzentrerscheiben-Zoomlinse ist diese Dicke sehr gut geeignet, da sie sehr stabile Biegefingern ergibt und dennoch von den Exzentrerscheiben geschaltet werden kann. Weiterhin wurden noch Substrate der Dicke $h_{\text{FS}} = 250\ \mu\text{m}$ und $h_{\text{FS}} = 350\ \mu\text{m}$ getestet. Im Gegensatz zu dem spröden Silizium können diese dünnen Substrate in Stahl problemlos hergestellt werden. Bei der Dicke von $h_{\text{FS}} = 250\ \mu\text{m}$ kann es jedoch bei unachtsamer Handhabung schnell zu plastischen Verformungen der Zoomlinsenfinger kommen. Bereits eine kleine Verformung zerstört die spätere Positionsgenauigkeit der Linsenelemente. Mit der Dicke von $h_{\text{FS}} = 250\ \mu\text{m}$ konnten erfolgreich Zoomlinsen-substrate hergestellt und in einer Zoomlinse getestet werden. Es können Durchbiegungen am freien Fingernende bis zu $w = 1\ \text{mm}$ mit den Piezoaktoren erreicht werden. Für zukünftige Zoomlinsen sollte jedoch die Dicke von $h_{\text{FS}} = 350\ \mu\text{m}$ bevorzugt werden, um die Ausbeute im Herstellungsprozess zu erhöhen. Die Auslenkung ist mit $w \sim 600\ \mu\text{m}$ immer noch absolut ausreichend für die Piezoaktoren-Zoomlinsen bei einer typischen Strukturhöhe der Linsenelemente von $400\ \mu\text{m}$.

Eine Schwierigkeit gegenüber dem Siliziumsubstrat gibt es beim Aufkleben der CRL auf das Substrat. Beim Zoomlinsen-substrat aus Silizium wird die CRL möglichst nahe am Rand eines $4''$ -Si-Wafer aufgeklebt, um später die $70\ \text{mm}$ Länge für die Zoomlinsenfinger zu erhalten. Eine genaue Ausrichtung zum Wafer ist nicht notwendig. Auf dem Federstahlsubstrat muss die CRL möglichst bündig mit der Kante der freien Zoomlinsenfingerenden abschließen, um beim Zusammenbau zu einer Punktfokuslinse nicht zu kollidieren. Weiterhin müssen die Elemente entlang der optischen Achse so genau positioniert werden, dass jedes Element seinen Platz auf dem zugeordneten Zoomlinsenfinger einhält und nicht schlimmstenfalls zwischen zwei Zoomlinsenfingern steht (siehe Abb. 4-7 oben). Die geforderte Genauigkeit der CRL-Positionierung entlang der optischen Achse liegt je nach Linsenlayout in Größenordnung eines Linsenelements, was beispielsweise in Zoomlinsenlayout 1773_00_A0 etwa $300\ \mu\text{m}$ entspricht. Bei hohen Linsenstrukturen, insbesondere bei Resisthöhen von $2\ \text{mm}$, ist darauf zu achten, dass die CRLs senkrecht zum Biegefingernsubstrat stehen, da sonst die oberen Enden der Linsenelemente beim Wafersägen beschädigt werden können oder

sogar Linsenelemente abbrechen. Zur Sicherheit sollte ein kleiner Abstand zur Kante der Zoomlinsenfingerenden von max. 0,5 mm vorgesehen werden.

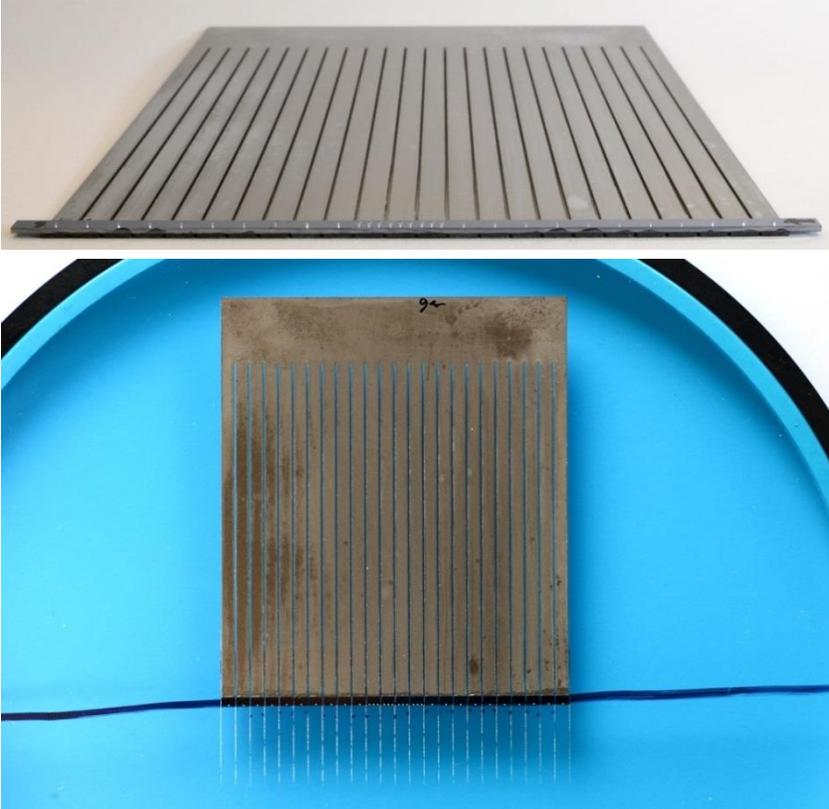


Abb. 4-7: Zoomlinsenhälfte vor (oben) und nach (unten) dem Wafersägen bestehend aus einem 350 μm dicken Federstahlsubstrat in Kammform und der aufgeklebten CRL (hier Linsenslayout 1773_00_A0 #3) an den freien, unverbundenen Enden der Zoomlinsenfinger

Nachdem die CRL auf den zugeschnittenen Federstahlkamm geklebt wurden, muss die CRL wie beim Siliziumsubstrat zwischen den einzelnen Zoomlinsenfinger zersägt werden. Bei Verwendung eines Federstahlkamms muss jedoch lediglich der circa 2 mm breite Siliziumstreifen der CRL mit der

Wafersäge durchtrennt werden. Das Wafersägeblatt würde beim Schneiden des Federstahlsubstrats zerstört werden. Daher ist zum einen auf eine möglichst mittige Platzierung der CRL im Einspannrahmen der Trägerfolie zu achten (siehe Abb. 4-7 unten: schwarz markierte Mittellinie). Die Wafersäge durchtrennt immer vom Mittelpunkt aus eine Strecke in beide Richtungen. Durch die mittige Platzierung der CRL kann diese Sägestrecke klein gehalten werden. Zum anderen muss auf eine Schnittführung exakt parallel und mittig zu den Zoomlinsenfingerlücken geachtet werden, um nicht mit dem Federstahl zu kollidieren (siehe Abb. 4-7 unten). Für ein sicheres Trennen der CRL und des Klebers, der auch in die Spalte des Federstahlsubstrats geflossen ist, muss bis auf die Trägerfolie durchgesägt werden. Das zu verwendende Wafersägeblatt hat dabei je nach Strukturhöhe meist 90 μm (bei 400 μm Strukturhöhe) beziehungsweise 150 μm (bei 2 mm Strukturhöhe) Blattbreite und muss in den 250 μm breiten Spalten zwischen den Fingern im Federstahlblech geführt werden.

Der große Vorteil eines Federstahlsubstrats ist, dass die Positionierung der einzelnen Linsenelemente auch nach dem Sägen erhalten bleibt, da diese bereits über das Substrat fest miteinander verbunden sind. Weiterhin gibt es keine Beeinflussung benachbarter Zoomlinsenfinger durch Kleber in den Zoomlinsenfingerspalten, da der zusätzliche Verbindungsbalken entfällt. Nachteilig ist, dass für jedes Linsenlayout das passende Federstahlblech schon vor dem Aufkleben der CRL erodiert werden muss. Außerdem sind die Bleche nicht völlig plan. Beim Anbringen des Anschlagbalkens werden die Biegefingern an dieser Position alle in eine Höhe gedrückt. Wenn das Blech leicht verzogen ist, führt dies dazu, dass die Enden der Biegefingern nun nicht mehr in einer Ebene liegen. Damit stehen dann auch die Linsenelemente nicht mehr in einer Reihe. Bisher überwiegen die genannten Nachteile die Vorteile dieses Konzepts. Durch weitere Optimierung sollten sich die Nachteile vermeiden lassen.

4.2 Mechanischer Aufbau der Piezozoomlinse

Eine Röntgenzoomlinse benötigt neben dem flexiblen Substrat, welches die Linsenelemente trägt, für Punktfokuslinsen eine Konstruktion, die zunächst zwei solcher Zoomlinsenfingerereinheiten unter einem 90° -Winkel anordnet. Für einige Anwendungen reicht auch eine einzelne Zoomlinsenfingerereinheit mit Linienfokus. Weiterhin müssen die Aktoren an entsprechender Stelle zu den Zoomlinsenfingern platziert und gehalten werden. Der elektrische Anschluss muss in die Konstruktion integriert werden und abschließend muss die Zoomlinse ein Gehäuse erhalten, welches möglichst gegen mechanische Einflüsse bei Transport und Einbau schützt sowie eine Verschmutzung mit beispielsweise Staub verhindert.

Die Trennbarkeit von Linse und Aktorik wurde als wichtige Anforderung an eine Röntgenzoomlinse erkannt. Nur so kann zum einen die Aktorik leicht und unabhängig von anderen Baugruppen ausgebaut und beispielsweise repariert werden. Zum anderen ist die Aktorik dadurch mit anderen Zoomlinsen substraten wiederverwendbar. Dieses Konzept einer Zoomlinse mit getrennter Linseneinheit und zwei Aktoreinheiten für Punktfokus-Zoomlinsen in einem Gehäuse wird im Folgenden vorgestellt.

Bei der Realisierung der Aktoreinheit wird die abmessungsbedingt maximal mögliche Anzahl von 24 Aktoren pro Zoomlinsen substrat genutzt. Die Breite eines Piezoaktors ist $b_{\text{Piezo}} = 2,1 \text{ mm}$. Ein für Leiterplatten typisches Rastermaß ist $100 \text{ mil} = 2,54 \text{ mm}$. Werden die Aktoren in diesem Raster angeordnet, bleibt ein ausreichend großer Abstand von $0,44 \text{ mm}$ zwischen den einzelnen Aktoren. Die Verwendung einer FR4-Leiterplatte mit großem GND-Pad (siehe Abb. 4-8 (a)) ermöglicht den elektrischen Anschluss der 25 einzelnen Pins einer verbundenen Stiftleiste mit den 24 Anschlüssen an den oberen Pads der Piezoaktoren (Abb. 4-8 (c)) und einem an das GND-Pad (Abb. 4-8 (a)). Diese jeweils 25 Anschlüsse pro Linsenhälfte werden über zwei Kabelbänder an zwei 25-Pol Stecker am Gehäuse der Zoomlinse verbunden, welche dann über zwei 25-polige Kabel an die Elektronik angeschlossen werden (siehe Kapitel 5.1).

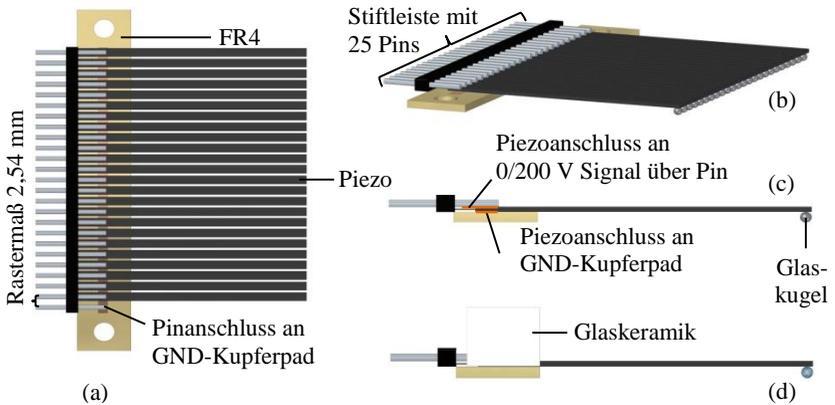


Abb. 4-8: Anordnung von 24 Piezoaktoren über eine Stiftleiste im Rastermaß von 2,54 mm auf einer FR4-Leiterplatte mit GND-Kupferpad (a), (b). Anschluss an die Signalleitungen und Verklebung von 24 Glaskugeln am jeweiligen Ende der Piezoaktoren (c). Komplettierte Aktoreinheit der Zoomlinse mit verklebter Glaskeramik Andruckplatte zur späteren biegesteifen Verbindung mit der Linsenhalterung (d).

Zur genauen Positionierung der einzelnen Piezoaktoren wurde eine Schablone aus Teflon gefertigt (siehe Abb. 4-9), die mit gefrästen Nuten von 30 mm Länge sowohl Abstände in y-Richtung, Höhen in z-Richtung als auch Winkellagen vorgibt. Die Rotation um die x- und y-Richtung wird durch die Toleranz in der Tiefe der Fräs-Nut bestimmt, während die Rotation um die z-Richtung von der Toleranz in der Breite der Nut bestimmt wird. Damit liegt die Verdrehung deutlich unter der maximal zulässigen Verdrehung von 0,1 mm auf 30 mm (Winkeltoleranz $0,19^\circ$). Auf der Teflonschablone wird als erstes der FR4-Leiterplattenstreifen der Standarddicke 1,5 mm mit 2 mm breitem und $35 \mu\text{m}$ dickem Kupferpad positioniert und mit Klebeband fixiert. Auf das Kupferpad wird mit einer dünnen Spritze eine geringe Menge bleihaltiger Lötpaste verteilt, welche aufgrund ihres geringeren Schmelzpunktes genutzt werden muss (siehe Abb. 4-9 links). Die Piezos werden anschließend in den Nuten platziert, diese haben eine Breite von 2,2 mm und damit 0,1 mm Toleranz. Mit grünem Klebeband (3MTM Polyester-Klebeband 851, Nr. 060285119, tewipack Uhl GmbH, Althengstett) werden diese noch fest angedrückt und gegen Verrutschen gesichert.



Abb. 4-9: Teflonschablone zur Positionierung von 24 Piezoaktoren im Rastermaß von 2,54 mm. Leiterplatte mit GND-Pad und dosierter Lötpaste auf Teflonschablone positioniert und mit grünem Klebeband fixiert (links). 24 Piezoaktoren in Teflonschablone positioniert, in Lötpaste gedrückt und mit grünem Klebeband gegen Verrutschen fixiert (recht).

Mit circa 400 °C heißer Luft aus einem Heißluftgebläse wird die Lötpaste geschmolzen bis alle GND-Pads der 24 Piezoaktoren fest mit dem GND-Pad der Leiterplatte verlötet sind. Die bleihaltige Lötpaste hilft in diesem Prozess, da diese einen niedrigeren Schmelzpunkt hat. Schmilzt die Lötpaste nicht vollständig, kann es zu späteren Ausfällen der Piezoaktoren durch unzureichende Verbindung zum GND-Pad kommen. Dabei hilft die geringe Wärmeleitung der Teflonschablone, die dazu führt, dass die ausschließlich von oben zugeführte Wärme in Piezos und Leiterplatte bleibt, anstatt schnell abtransportiert zu werden. Die beiden oberen Pads werden anschließend mit den Pins einer Stiftleiste verlötet (siehe Abb. 4-10 links). Der 25. Pin der Stiftleiste wird leicht verbogen, damit er mit dem GND-Pad der Leiterplatte verlötet werden kann. Die so positionierten und fixierten Piezoaktoren können über einen 25-poligen Stecker reversibel elektrisch verbunden werden. Die Aktoreinheit wird durch eine isolierende und biegesteife Andruckplatte vervollständigt. Hierzu wird eine 8 mm starke Glaskeramik (Macor® von Corning Incorporated, Wiesbaden) genutzt (siehe Abb. 4-13). Diese wird mit einer gefrästen Aussparung passend auf die Leiterplatte mit den Piezoaktoren geklebt. Dazu wird ein Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus endfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) verwendet, welcher bis zu 90 min verarbeitbar bleibt und anschließend mindestens 12 h aushärten muss. Dazu werden alle Lücken zwischen den Piezos und Pins vollständig mit dem Klebstoff ausgefüllt (siehe Abb. 4-10 rechts) und die Glaskeramik

fixiert. Die Piezos werden über die 12 h Aushärtungszeit auf einer planen Unterlage in einer Ebene gehalten. Der Kleber konnte an diesen Stellen nicht alle eventuell beim Lötén eingebrachten Spannungen oder Unebenheiten in der Andruckplatte ausgleichen. Daher haben einzelne Aktoren ihre Ausgangslage außerhalb dieser Ebene.

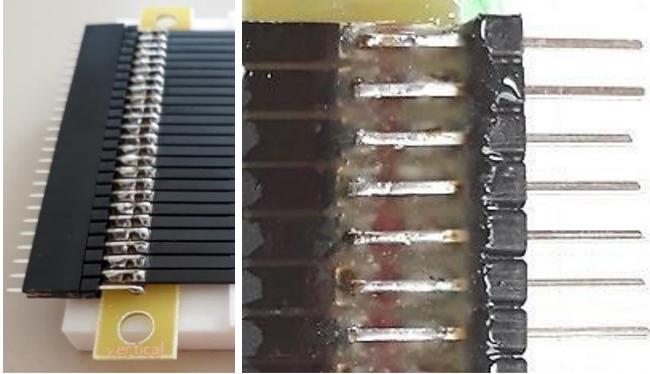


Abb. 4-10: Lötverbindung der 25 Pins einer Stiftleiste an obere Pads der 24 Piezoaktoren und vorderster Pin an GND-Pad der Leiterplatte (links). Isolierende und biegesteife Verbindung der gesamten Aktoreinheit mit Zweikomponenten-Epoxidharzkleber, welcher alle Lücken zwischen Piezoaktoren und Pins ausfüllen muss (rechts).

Durch die 1,5 mm starke FR4-Platte gibt es eine etwa ebenso große Lücke zwischen Piezoaktoren und darunterliegendem Zoomlinsenssubstrat. Die Lücke wird mit Glaskugeln (SiLibeads® Typ P – Kalknatronglas der Firma Sigmund Lindner GmbH, Warmensteinach) mit einer Rundheit von $\pm 0,02$ mm und verschiedenen Durchmessern mit Durchmessertoleranz von $\pm 0,02$ mm ausgeglichen (siehe Abb. 4-11). Die Lücke zu nicht in der gewünschten Ebene liegender Piezoaktoren kann mit Glaskugeln entsprechender verschiedener Größe bestmöglich ausgeglichen werden. Der Abstand und damit nötige Durchmesser der Kugeln wird mit einem Messschieber zwischen parallel ausgerichteter Aktoreinheit und einem ebenen Untergrund vermessen. Die Glaskugeln werden mit dem Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus endfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) an die Enden der Piezoaktoren geklebt und härten dann für mindestens 12 h aus. Die

begrenzte Auswahl an Kugeldurchmessern kann noch durch leichtes Ausrichten der Kugeln entlang der Piezolängsrichtung ausgeglichen werden. So wird die Lücke zwischen Piezoaktor und Zoomlinsen substrat möglichst klein gehalten, um die größtmögliche Auslenkung mit den Piezoaktoren zu erzielen. Zudem garantiert die Glaskugel eine mittige und punktförmige Kräfteinwirkung auf den Zoomlinsenfinger. Eine nicht mittige Kräfteinleitung über die Kante eines Piezoaktors beispielsweise könnte zu einer Torsion des Zoomlinsenfingers führen. Die fertige und fest verbundene Aktoreinheit wird später über die zwei seitlichen Bohrungen (siehe Abb. 4-10) mit 5 mm Durchmesser mit M4-Schrauben mit der folgend beschriebenen Linseneinheit verschraubt.



Abb. 4-11: 24 Piezoaktoren einer Aktoreinheit kopfüber gelagert. Es werden 24 Glaskugeln, wenn nötig verschiedener Durchmesser, zum Ausgleich der Lücke zwischen Aktor und Zoomlinsen substrat verklebt. Die höchsten Punkte der Glaskugeln sollen in einer Ebene liegen.

Die Konstruktion der Linseneinheit für die Zoomlinse besteht aus zwei Hälften. Horizontale und vertikale Linsenhalterung unterscheiden sich leicht, da beide Hälften später ineinander montiert werden und nur die horizontale Hälfte genutzt wird, um die gesamte Zoomlinse am Gehäuse zu befestigen. Sie haben je nach Zoomlinsen substrat eine 0,3 mm oder 0,5 mm tiefe und 62 mm breite Tasche ohne jegliche Grate eingefräst (siehe Abb. 4-12 links). Die Linsenhalterungen werden aus einer leichten und dennoch steifen sowie hochfesten Aluminiumlegierung AlZnMgCu0,5 (EN AW 7022 [72]) hergestellt mit 72 g für die horizontale und 54 g für die vertikale Hälfte. Denn der Positionierroboter zur Montage (siehe Kapitel 4.3) darf nur mit maximal 2,5 N horizontal belastet werden [73]. Die fertigen Zoomlinsen substrate werden in den vorgefrästen Taschen mit Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus sofortfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) eingeklebt.

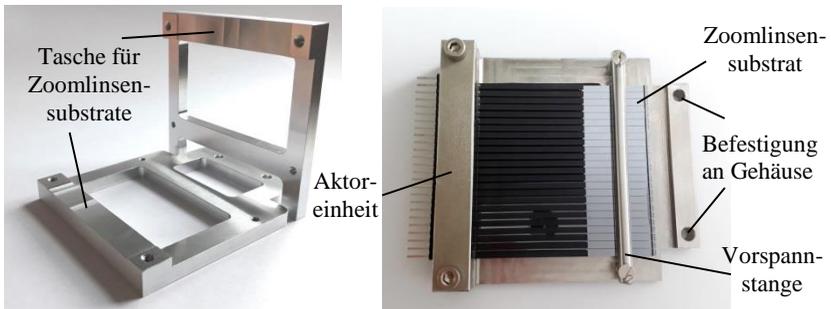


Abb. 4-12: Horizontale und vertikale Linsenhalterungen der Linseneinheit aus hochfestem Aluminium (links) und vollständig montierte horizontale Zoomlinse mit Aktoreinheit und vorgespannter Linseneinheit (rechts).

Eine Stange dient als Anschlag für die Biegefingern und bestimmt damit die Position der Linsenelemente im Strahl. Dafür werden in einen runden Vollhartmetallstab (K10F geschliffen h6, WeBo.Tools Präzisionswerkzeuge, Lollar-Salzböden) mit 5 mm Durchmesser zwei 3,2 mm Löcher für M3 Schrauben erodiert. Für den Vollhartmetallstab wurde eine Linearität von $4,6 \pm 0,5 \mu\text{m}$ maximaler Abweichung auf 60 mm Länge gemessen. Die Linearität und Oberflächenrauigkeit der Vorspanneinrichtung wirkt sich direkt auf die Positionspräzision der Linsenelemente im Strahl aus.



Abb. 4-13: Fertig montierte und vorgespannte Piezozoomlinse mit Linienfokus bestehend aus Linseneinheit mit einem Federstahlsubstrat und der Aktoreinheit mit Glaskeramik Andruckplatte.

Das eingeklebte Zoomlinsensubstrat kann nun bereits leicht vorgespannt werden. Die endgültige Einstellung der Vorspannstange wird unter dem Lichtmikroskop eingestellt, nachdem die Aktoreinheit auf die Linseneinheit geschraubt wurde (siehe Abb. 4-12 rechts und Abb. 4-13). Dabei werden die Piezoaktoren geschaltet und die Vorspannung so eingestellt, dass die Aktoren in ausgeschalteter Lage das Zoomlinsensubstrat gerade noch nicht berühren. So ist die genaue Positionierung der Linsenelemente im Strahl sichergestellt.

Die aus vertikaler und horizontaler Zoomlinse zusammengesetzte Punkt-fokuslinse (siehe Kapitel 4.3) wird in einem Gehäuse aus Grundplatte, Aluminiumrahmen und PMMA-Wänden gelagert (siehe Abb. 4-14).

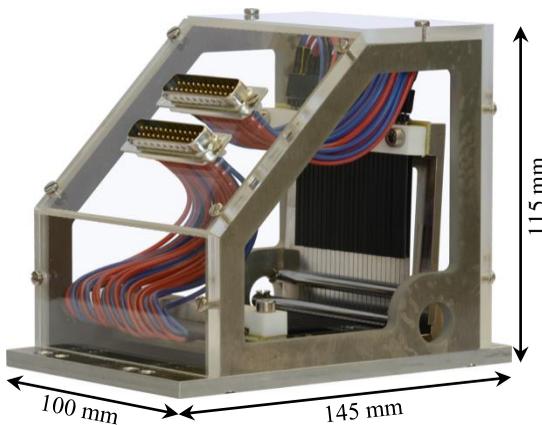


Abb. 4-14: Piezozoomlinse mit Punktfokus in Gehäuse aus Aluminiumrahmen und PMMA-Wänden montiert, elektrisch angeschlossen

Dort sind auch zwei 25-polige D-Sub-Steckverbinder integriert, über die die Ansteuerungselektronik verbunden wird. Für die elektrische Anbindung der Piezoaktoren wurden jeweils 25 Kabel von 10 cm Länge zwischen eine 25-polige Buchsenleiste und einen D-Sub-Steckverbinder gelötet und isoliert. Die Kabel sind mit Silikon isoliert, um die erforderliche Flexibilität zu gewährleisten. Die Piezozoomlinse erfüllt mit ihrer Baugröße von 100 mm x 145 mm x 115 mm und einer Masse von nur 0,8 kg das geforderte Hauptkriterium.

4.3 Montage einer Piezozoomlinse

Die Montage einer Röntgenlinse aus 1D SU-8-Linsenelementen für eine Punktfokussierung erfordert die Kreuzung zweier CRLs in einem 90° Winkel. Für die Piezozoomlinse wurde zunächst jeweils eine Zoomlinse für horizontal und für vertikal fokussierende Linsen vollständig mit Aktoren und Endanschlag montiert. Die horizontale Zoomlinsenhälfte wird nun auf einem Lineartisch befestigt, der die Zoomlinse in Richtung der anderen Hälfte bewegen kann, das heißt waagrecht und senkrecht zur optischen Achse. Dies ist für eine grobe Vorpositionierung von Vorteil (siehe Abb. 4-15).

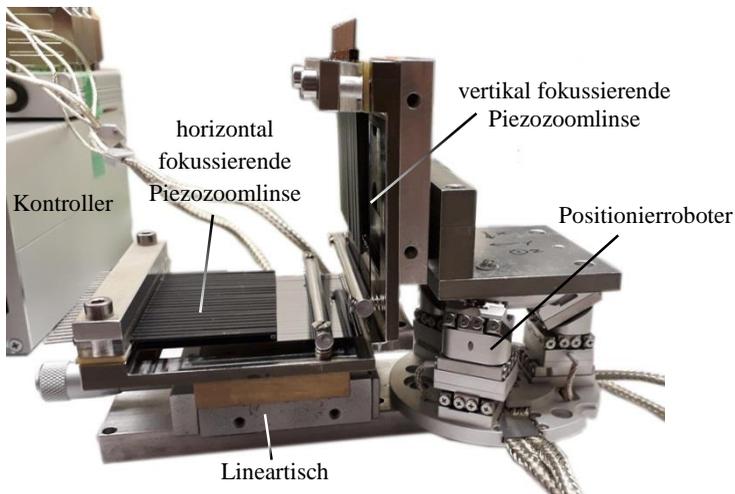


Abb. 4-15: Zwei unter 90° um die optische Achse gedrehte Linienfokuszoomlinsen werden mithilfe eines Positionierroboters zu einer Punktfokuszoomlinse ausgerichtet und montiert.

Die zweite Zoomlinsenhälfte für die vertikale Fokussierung wird auf einem Winkel mit doppelseitigem Klebeband fixiert. Der Winkel ist auf einem Positionierroboter (Typ SmarPod 70.42, Firma SmarAct GmbH, Oldenburg) verschraubt.

Für die exakte Ausrichtung der Punktfokuslinse wird die horizontale CRL mit dem Lineartisch entlang der x-Richtung unter die vertikale CRL

geschoben, sodass sie sich in gewünschter Höhe überschneiden (siehe Abb. 4-16 (1)). Anschließend wird die vertikale CRL entlang der z-Richtung so verschoben, dass die Linsenelemente in die Lücken der horizontalen CRL passen (siehe Abb. 4-16 (2) und (3)).

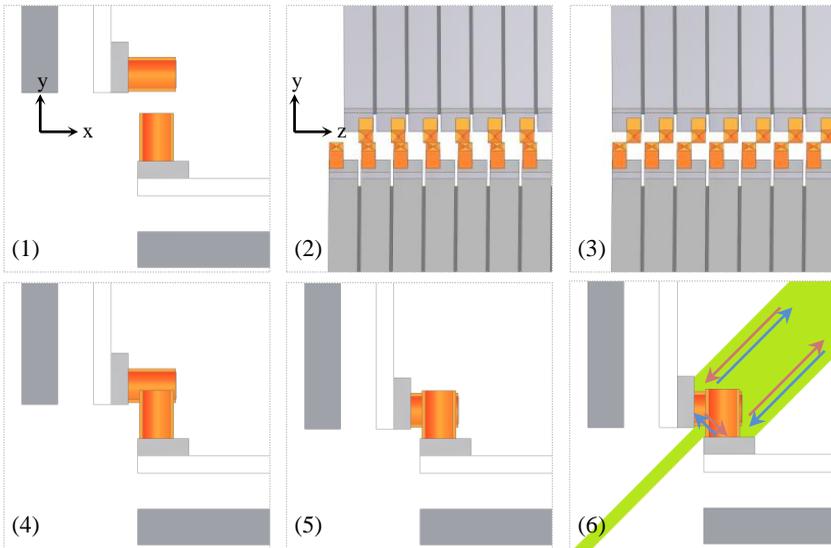


Abb. 4-16: Schritte zur Montage einer Röntgenzoomlinse mit Punktfokus mit Reihenfolge ihrer Durchführung: (1) Vorpositionierung, (2)+(3) Ausrichtung entlang der optischen Achse, (4)+(5) CRL-Elemente ineinander schieben, (6) 90°-Winkel zwischen den Halblinsen mittels Laserreflexion einstellen.

An dieser Stelle wird bereits kontrolliert, ob die Halblinsen um die x- oder y-Achse verdreht sind und ob die CRLs parallel zueinander und damit zur optischen Achse ausgerichtet sind. In dieser Position kann die vertikale CRL nun in y-Richtung in die Lücken der horizontalen CRL verfahren werden bis sie sich in gewünschter Position überschneiden (siehe Abb. 4-16 (4) und (5)). Eine Verdrehung um die x- oder y-Richtung wird kontrolliert, indem geprüft wird, ob an beiden Enden die CRLs unterschiedlich gekreuzt sind.

Abschließend wird der 90°-Winkel der CRLs zueinander über eine Laserreflexion eingestellt. Die CRLs stehen auf je einem spiegelnden

Si-Substratstreifen, dadurch wird ein unter etwa 45° einfallender Laserstrahl an den beiden in 0° und 90° stehenden Flächen gespiegelt und zurückgeworfen (siehe Abb. 4-16 (6)). In etwa 3 m Entfernung wird dieser zurückgeworfene Strahl detektiert. Stehen die Flächen genau unter einem 90° -Winkel zueinander, wird nur ein Punkt detektiert. Weicht der Winkel von 90° ab, laufen beide Teilstrahlen nicht mehr parallel und zwei Punkte werden detektiert. Dieser Schritt ist wichtig, da die CRL astigmatisch wird, wenn die Halblinsen nicht senkrecht zueinander stehen. In diesem Aufbau kann mithilfe des Laserstrahls der 90° -Winkel auf $\alpha = 0,01^\circ$ exakt eingestellt werden. Zur Berechnung des entstehenden Astigmatismus können die Anteile der Brennweite vektoriell summiert werden. Wird die horizontale CRL mit einer Brennweite f_H um den Winkel α abweichend von 90° montiert, so verringert sich die Brechkraft in horizontaler Richtung und die effektive horizontale Brennweite ergibt sich zu:

$$f_{H\alpha} = \frac{f_H}{\cos(\alpha)}. \quad (4.3)$$

Gleichzeitig verstärkt das die Brechkraft in vertikaler Richtung und die effektive vertikale Brennweite ergibt sich zu:

$$f_{V\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{f_V} + \frac{\sin(\alpha)}{f_H}}. \quad (4.4)$$

Nimmt man die gleiche Brennweite für horizontale und vertikale Richtung $f_H = f_V$ an, so ändert sich die horizontale Brennweite mit einem maximalen Verdrehwinkel von $\alpha = 0,01^\circ$ vernachlässigbar um maximal:

$$\Delta f_{H\alpha} = \frac{1}{\cos(\alpha)} - 1 = 0,0000015 \%. \quad (4.5)$$

Ausschlaggebend ist hier die Änderung der vertikalen Brennweite mit einem maximalen Verdrehwinkel von $\alpha = 0,01^\circ$ um:

$$\Delta f_{V\alpha} = \frac{1}{1 + \sin(\alpha)} - 1 = -0,01745 \%. \quad (4.6)$$

Bei einer Brennweite von $f = 100$ mm ergibt sich ein Versatz der horizontalen und vertikalen Brennweiten um $\Delta f = 17,5$ μm . Nach Formel (2.17) ergibt sich auch bei einer großen effektiven Apertur von beispielsweise $A_{\text{eff}} = 200$ μm damit eine Fokusvergrößerung von nur $\sigma_{\text{min.ast}} = 17,5$ nm.

Nach dem Ausrichten der beiden Zoomlinsenhälften werden die Halterungen mit zwei Verbindungsblöcken des gleichen Materials verklebt (Uhu Plus schnellfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl). Nach mindestens 2 h Aushärtezeit kann die fertige Piezozoomlinse mit Punktfokus ausgebaut und genutzt werden.

4.4 Mechanischer Aufbau der Exzenterzoomlinse

Die Exzenterzoomlinse benötigt ebenso wie die Piezozoomlinse zwei Zoomlinsenfinger-einheiten für eine Punktfokuslinse. Hier wird 525 μm starkes Silizium als Zoomlinsen-substrat verwendet. Je nach gewünschter Auslenkung werden bis zu fünf 60 mm x 10 mm Streifen aus einem 525 μm starken Si-Substrat mit Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus schnellfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) gestapelt und als Abstandshalter unter das Zoomlinsen-substrat geklebt (siehe Abb. 4-17). Anschließend wird die Linseneinheit auf eine 62 mm x 72 mm große und 1 mm starke Keramikplatte geklebt, welche als stabile Grundplatte zur Verbindung mit der zweiten Linseneinheit und der Gesamt-konstruktion der Zoomlinse genutzt wird. Unter das linsennahe Ende der Keramikplatte werden zwei Anschlaghalter aus Invar (Stahl mit geringem thermischen Ausdehnungs-koeffizienten) geklebt. Diese haben eine U-förmige Aussparung, in welche ein Vollhartmetallstab (K10F geschliffen h6, WeBo.Tools Präzisions-werkzeuge, Lollar-Salzböden) mit 3 mm Durchmesser zur Vorspannung der Zoomlinsenfinger platziert wird. Zum Aufbau wird eine etwa 1 N schwere Metallplatte waagerecht zum Beschweren auf die Stange gelegt, um die Zoomlinsenfinger vorzuspannen. Die Stange wird mit Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus schnellfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) an beiden Seiten verklebt. Nach dem Aufbau zweier Exzenterlinseneinheiten

werden diese mit einem Positionierroboter wie in Kapitel 4.3 beschrieben zu einer Punktfokuslinse in einem 90° -Winkel zusammgebaut. Mit diesem letzten Schritt ist die Linseneinheit der Exzenterzoomlinse komplett.

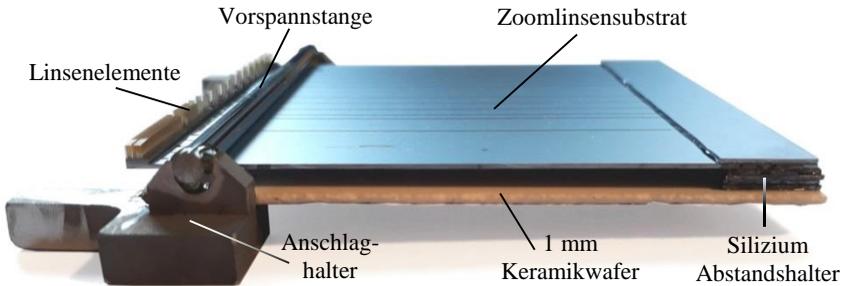


Abb. 4-17: Fertig montierte und vorgespannte Exzenterlinseneinheit mit Linienfokus bestehend aus Zoomlinseneinheit mit einem Siliziumsubstrat, Keramikwafer als Grundplatte und Silizium Abstandshalter und Invar-Anschlaghalter mit verklebter 3 mm Endanschlagsstange.

Für die Exzenterzoomlinse ist ebenso wie für die Piezozoomlinse wichtig Linseneinheit (siehe Abb. 4-18 (a)) und Aktoreinheit (siehe Abb. 4-18 (d)) getrennt voneinander zu gestalten. Damit können die einzelnen Teile unabhängig von den anderen Baugruppen ausgebaut, repariert oder ausgetauscht werden. Die Linseneinheit wird zuerst in einen Aluminiumrahmen montiert (siehe Abb. 4-18 (b)), welcher als Gehäuse und Verbindung zwischen Linseneinheit und Aktoreinheit dient. Dazu wird die Linseneinheit mit der Keramikplatte auf der horizontalen Aluminiumplatte platziert, welche zwei M4-Gewindebohrungen hat (siehe Abb. 4-18 (c)). Zwei M4-Schrauben klemmen die Linseneinheit anschließend mit einem Streifen Moosgummi als Puffer und darauf einem 78 mm x 8 mm x 3 mm Edelstahlstreifen auf die Aluminiumplatte.

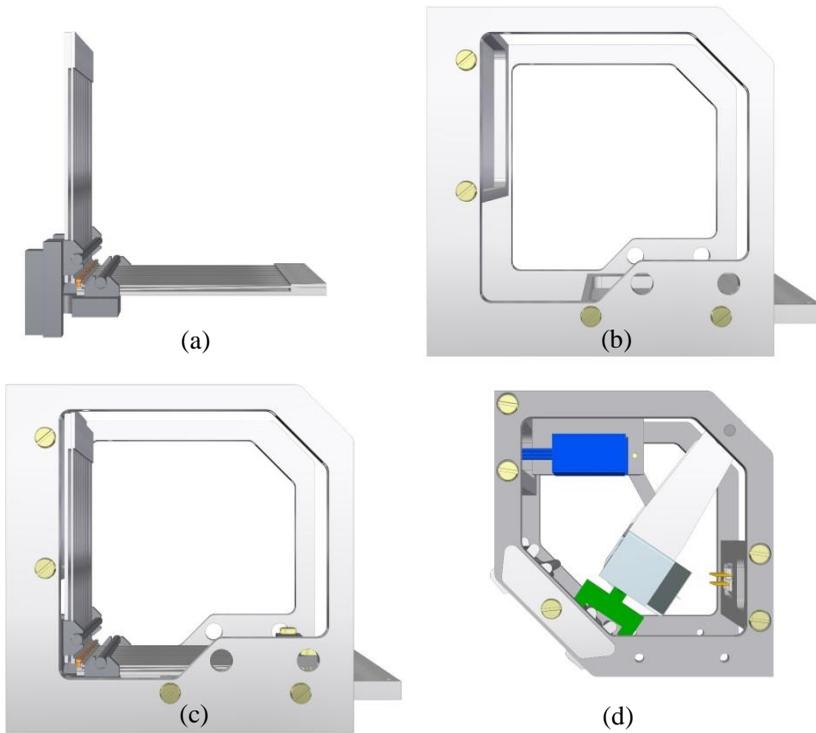


Abb. 4-18: CAD-Model der Gesamtkonstruktion der Exzenterzoomlinse bestehend aus Linseneinheit (a), Aluminiumrahmen (b) und Aktoreinheit (d). Zuerst wird die Linseneinheit im Rahmen montiert (c) und abschließend die Aktoreinheit.

Die Hauptkomponente der Aktoreinheit sind 1 mm dicke Aluminium Exzenteranschaltbleche. Die Schaltbleche haben ein Loch von 3,1 mm Durchmesser und sind auf eine Vollhartmetallstab mit einem Durchmesser von 3 mm aufgefädelt (siehe Abb. 4-19). Die Schaltbleche werden mittig zu den Zoomlinsenfingern positioniert. Dazu wird der Abstand mit 0,5 mm dicken Unterlegscheiben aus Stahl oder Kunststoff angepasst. Im Fall des Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 #1 bis #5 (siehe Anhang B) mit 2,54 mm breiten Zoomlinsenfingern werden jeweils drei Unterlegscheiben zwischen zwei Schaltblechen aufgefädelt. Zwei weitere Vollhartmetallstäbe bilden die beiden Endanschläge für die Schaltbleche. Sechs dieser Stäbe (je drei für

horizontale und vertikale Exzenter) werden an einer Seite des Aktorrahmens verklebt, alle Exzenter und Abstandshalter aufgefädelt und abschließend die zweite Rahmehälfte über zwei Verbindungsbleche aus Aluminium aufgesteckt und verschraubt.

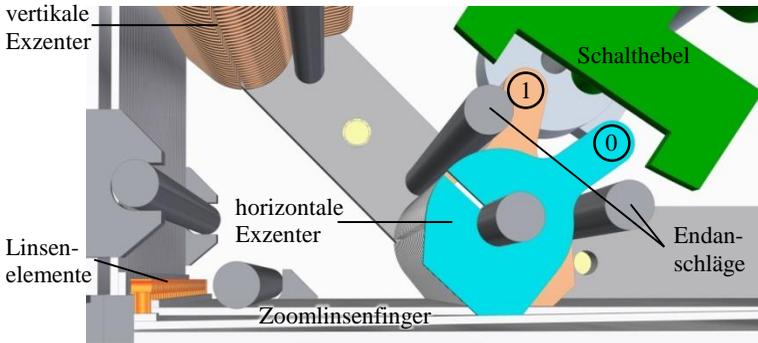


Abb. 4-19: CAD-Modell Ausschnitt der Exzenterzoomlinse mit erstem horizontalem Exzenter in „0“-Stellung (blau), welche das Linselement auf dem Zoomlinsenfinger aus dem Strahlengang biegt. Alle anderen horizontalen und vertikalen Exzenter (braun) sind in „1“-Stellung und damit die Linselemente im Strahlengang.

Die Konstruktion der Schaltbleche ist so ausgelegt, dass bis zu 2,5 mm hohe Linselemente aus dem Strahlengang bewegt werden können. Diese Eigenschaft ist der entscheidende Vorteil gegenüber der Piezozoomlinse, welche Linselemente bis maximal 400 μm Strukturhöhe ausreichend bewegen kann. Die drahterodierten Exzenter scheiben haben einen äußeren Durchmesser von 10 mm. An den beiden Schaltpositionen beträgt der Abstand zur Drehachse $R_1 = 5,5 \text{ mm}$ für die Stellung 1 „Linse im Strahl“ beziehungsweise $R_0 = 6,6 \text{ mm}$ für die Stellung 0 „Linse aus dem Strahl“ (siehe Abb. 4-19 und Abb. 4-20). Die Aktoreinheit wird so eingebaut, dass alle Exzenter im Zustand 1 0,1 mm oberhalb der Biegefingern stehen. So wird im Zustand 0 eine Auslenkung der Biegefingern an der Stelle der Querkrafteinwirkung von $w(l) = 1,0 \text{ mm}$ erreicht. Stellt man die in Kapitel 4.1 beschriebene Formel (4.2) zur Berechnung der Durchbiegung w nach F um und setzt $a = 0$, so erhält man zunächst die Querkraft F , die der Exzenter auf den

Zoomlinsenfinger ausübt, um ihn 1,0 mm auszulenken (siehe Abb. 4-20). Damit kann anschließend die Durchbiegung $w(a)$ an der Position der Linsenelemente berechnet werden.

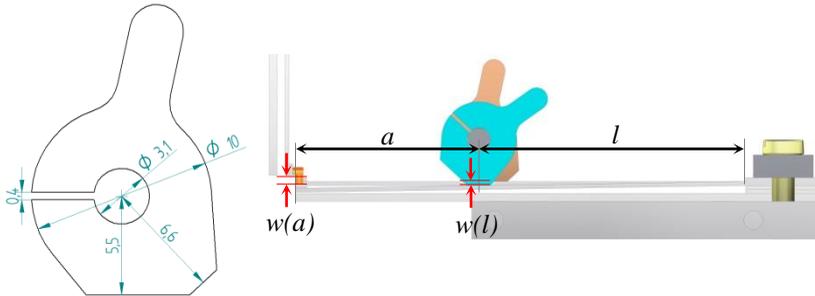


Abb. 4-20: Abmessungen eines Schaltblechs der Exzenterzoomlinse (links) und Bemaßung der Abstände und Durchbiegungen w am Zoomlinsenfinger (rechts).

Mit den Abständen $l = 35$ mm und $a = 25$ mm und Zoomlinsenfinger der Breite $b = 2,54$ mm und Dicke $h = 525$ μ m ergibt sich eine Durchbiegung von $w(a) = 2,54$ mm.

In diesem Zustand ist die Exzenterzoomlinse manuell schaltbar. Für eine fernsteuerbare Zoomlinse wird die Aktoreinheit eingebaut. Diese enthält eine Schaukel, welche einen Linearschrittmotor trägt. Dieser bewegt über eine Spindel einen Reiter mit Schalthebel (grün in Abb. 4-18 (d) und Abb. 4-19). Mithilfe eines Servos, der die Schaukel bewegt, kann dieser Schalthebel die Exzenter zwischen den Zuständen 1 und 0 schalten (Beschreibung der elektrischen Ansteuerung in Kapitel 5.2). Der Servo (blau in Abb. 4-18 (d)), welcher an der oberen Seite der Aktoreinheit befestigt ist, bewegt die Schaukel über einen Plastikhebel und einen Aluminiumarm. Die Verbindungen wurden mit Kugellagern versehen, um die Stabilität zu erhöhen und das Spiel zu verkleinern. Das Gesamtspiel der Schaukel wird dadurch fast ausschließlich durch das Spiel des Getriebes des Servo hervorgerufen.

Die fertige Aktoreinheit wird zur Fertigstellung der Exzenterzoomlinse an einer Seite mit zwei Schrauben und Unterlegscheiben in den Aluminium-

rahmen eingebaut (siehe Abb. 4-21). Sie wird wie oben beschrieben so positioniert, dass möglichst alle Exzenter mittig die Zoomlinsenfinger treffen und im Zustand 1 0,1 mm oberhalb der Biegefingern stehen. Die Exzenterzoomlinse erfüllt ebenfalls das Hauptkriterium einer Röntgenzoomlinse mit einer Baugröße von 110 mm x 105 mm x 95 mm und einer Masse von 0,6 kg.

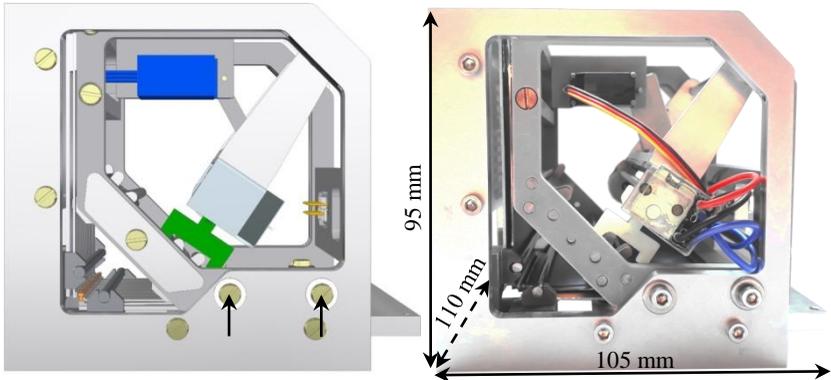


Abb. 4-21: CAD-Modell (links) und Foto (rechts) der fertig montierten und fernsteuerbaren Exzenterzoomlinse mit Linseneinheit, Aktoreinheit und Aluminiumrahmen.

4.5 Mechanischer Aufbau der Formgedächtniszoomlinse

Die dritte realisierte Variante einer Röntgenzoomlinse nutzt Formgedächtnisdrähte als Aktoren. Dabei wird zunächst wie bei der Exzenterzoomlinse eine Linseneinheit aufgebaut (siehe Kapitel 4.4) und für eine Punktfokuslinse wie in Kapitel 4.3 beschrieben zwei solcher Linseneinheiten unter 90° ausgerichtet und montiert.

Der Hauptbestandteil der Formgedächtniszoomlinse sind die Biegefedern, die als Abstand zwischen Endanschlagsstange und Zoomlinsensubstrat geschoben werden, um die einzelnen Zoomlinsenfinger auszulenken. Dazu wird eine Biegefedereinheit mit 30 Biegefedern hergestellt. Ein Federstahldraht

(Johannes Gerstäcker Verlag GmbH, Eitorf) mit 0,5 mm Durchmesser wird mithilfe einer Biegeschablone in Form gebogen und anschließend auf entsprechende Länge zugeschnitten. Die Biegeschablone hat senkrechte Stifte mit entsprechenden Durchmessern für die benötigten Biegeradien auf einer Grundplatte befestigt und mehrere Hilfsstifte an den Außenseiten der Biegeradien, um den Draht besser zu führen und ein Auffedern zu vermeiden. Mit einer Papierschablone werden die einzelnen Biegefeder im richtigen Abstand und parallel zueinander in Position gebracht (siehe Abb. 4-22 links).

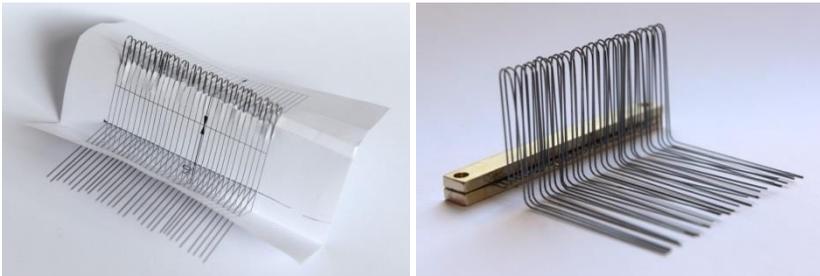


Abb. 4-22: Papierschablone für 30 Biegefeder (links) und parallel und im richtigen Abstand zwischen zwei Verbindungsbalken eingeklebte Biegefeder (rechts)

Die ausgerichteten Biegefeder werden anschließend zwischen zwei 78 mm x 8 mm x 3 mm Verbindungsbalken aus Messing mit dem Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (Uhu Plus endfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) geklebt (siehe Abb. 4-22 rechts). Die freien Enden der Biegefeder werden mit einer Diamantschleifscheibe (Dremel, S545 Diamantscheibe, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen) unter etwa 30° angeschliffen. Dadurch lassen sich die Biegefeder leichter unter den Endanschlag schieben.

Die Biegefeder werden mithilfe von Formgedächtnisdrähten bewegt. Es werden Formgedächtnisaktordrähte (Flexinol 075, Dynalloy Incorporated, Irvine, USA) mit 75 µm Durchmesser auf eine Länge von 214 mm zugeschnitten. Der Draht wird mit einem Strom von maximal $I = 150$ mA auf 70° C geheizt und verkürzt sich dabei um 4-5 % seiner Länge. Diese Steckle von etwa 9 mm reicht aus, um die Biegefeder unter die Endanschlagsstange zu ziehen (siehe Abb. 4-23). Ein einzelner Draht kann dabei eine Zugkraft

von etwa 0,8 N aufbringen. Ohne Strom kühlen die Drähte innerhalb von 0,8 s auf eine Temperatur $<45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab und nehmen dabei ihre ursprüngliche Länge ein [74].

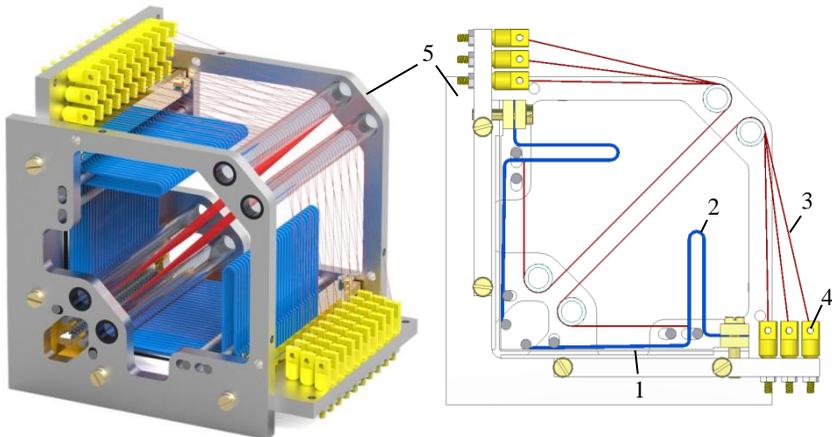


Abb. 4-23: CAD-Modell (links) und Schnitt (rechts) der montierten Formgedächtniszoomlinse mit Zoomlinsensubstrat 1 mit CRL, Biegefeder 2, Formgedächtnisdraht 3, Einstellschrauben 4 zur Drahtbefestigung, Gehäuse 5

An beiden Enden der Formgedächtnisdrähte werden Schlaufen gebildet und mit Quetschhülsen fixiert. So können diese einfach auf die Biegefedern gefädelt werden. Der elektrische Anschluss dieser Drahtseite an die gemeinsame Masse ist über die Verbindung aller Biegefedern zwischen den zwei Messingverbindungsblöcken gegeben.

Das zweite Formgedächtnisdrahtende wird erst am Ende der Zoomlinsenmontage verbunden. Zunächst wird die Linseneinheit im Gehäuserahmen platziert und mit einem Moosgummi als Zwischenschicht unter dem Biegefederverbindungsblock der horizontalen Zoomlinsenhälfte mit zwei M3-Schrauben eingeklemmt (siehe Abb. 4-23). Die Biegefedereinheit der vertikalen Zoomlinsenhälfte wird mit Abstandshaltern am Gehäuse befestigt ohne die Linseneinheit zu berühren. Anschließend werden je eine Führungstange nahe dem freien Ende der Biegefedern montiert, welche erodierte Einkerbungen haben. Die Biegefedern werden in diesen Einkerbungen paral-

lel und mittig zu den Biegefedern geführt. Je zwei weitere Stangen werden als Endanschläge für die Biegefedern eingebaut. Besonders der Endanschlag nahe der CRL ist wichtig, damit die Biegefeder nicht bis zum Linsenelement gezogen werden kann und dieses vom Substrat abbricht. Der CRL-ferne Endanschlag wird so befestigt, dass alle Biegefedern leicht vorgespannt sind und das Drahtende sich kurz vor dem Endanschlag der CRL befindet. Als letztes wird das zweite Ende der Formgedächtnisdrähte am Gehäuserahmen in für jeden Draht eingefügten Augenschrauben mit Polystyrol-Isolierhülsen befestigt. Die Drähte werden jeweils über zwei Glasrohre mit Durchmesser 8 mm und 1 mm Wandstärke umgelenkt. Zwischen Endschlaufe des Formgedächtnisdrahtes und Augenschraube wird ein 0,2 mm dicker Kupferdraht gefädelt und die Enden umeinander verdreht. An dieses Kupferende kann anschließend der zweite Stromanschluss gelötet werden. Mit der Augenschraube kann die Spannung der kalten Formgedächtnisdrähte feinjustiert werden, sodass sie ganz leicht vorgespannt sind.

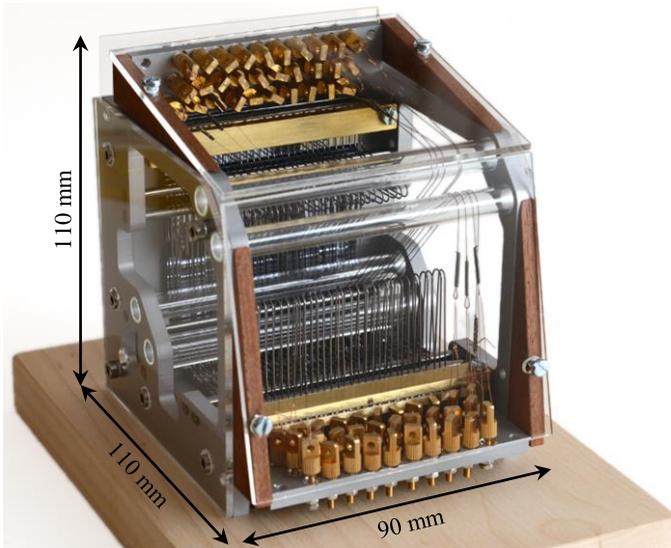


Abb. 4-24: Fertig montierte Formgedächtniszoomlinse in Gehäuse mit einigen Aktordrähten je Zoomlinsehälfte

Abschließend erhält der Gehäuserahmen noch PMMA-Wände, um die Zoomlinse vor Verschmutzungen und Nutzer vor Berührung mit den teils heißen Drähten zu schützen (siehe Abb. 4-24). Dieser Zoomlinsenprototyp wurde zu Demonstrationszwecken, aber wegen hohem Montageaufwand mit nur jeweils einigen Formgedächtnisdrähten bestückt. Das Funktionsprinzip konnte damit nachgewiesen werden. Mit einer Baugröße von 90 mm x 110 mm x 110 mm und einer Masse von 0,65 kg erfüllt die Formgedächtnis-zoomlinse das vorgegebene Hauptkriterium.

4.6 Vergleich der Zoomlinsentypen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Ansätze einer Röntgen-zoomlinse verfolgt, deren Konstruktionen in diesem Kapitel vorgestellt wurden. Die verschiedenen Eigenschaften werden in Tabelle 4-1 verglichen. Alle Varianten erfüllen das Hauptkriterium mit ihrer Baugröße und Gewicht, sodass sie als Objektivlinse flexibel in Mikroskopaufbauten eingesetzt werden können. Hauptunterscheidungskriterien sind vor allem die Schaltzeit und die maximale Apertur, die die einzelnen Varianten für bestimmte Anwendungen attraktiver machen oder ausschließen.

Tabelle 4-1: Vergleich der unterschiedlichen Zoomlinsentypen

Eigenschaft	Piezo- Biege- aktoren	Schrittmotor/ Servo mit Exzenter- scheiben	Form- gedächtnis- Aktoren
Baugröße*	10 cm x 15 cm x 12 cm	11 cm x 11 cm x 10 cm	9 cm x 11 cm x 11 cm
Masse mit Gehäuse*	0,8 kg	0,6 kg	0,65 kg
Max. CRL-Apertur	400 µm	2 mm	2 mm
Schaltzeit aller Finger	10 ms	65 s*	2 s
Max. Fingeranzahl*	24	40	40
Montageaufwand	hoch	moderat	sehr hoch
Preis des Kontrollers	hoch	gering	hoch
Max. Spannung	200 V	12 V	7,5 V
Elektrische Leistung [†]	Piezo: 0,7 W		Draht: ~1,13 W
Standby:	7,0 W	3,6 W	~5 W
Betrieb (max.):	33,5 W	3,9 W	~60 W
Stromloser Schaltzustand	alle Linsen im Strahl	unverändert	alle Linsen im Strahl
Besonderheiten	Fingerbreite konstant	manueller Betrieb möglich; Fingerbreiten variabel	wegen Abwärme nicht vakuumfähig; Fingerbreiten variabel

* bei 60 mm Linsenlänge; † wenn 24 Biegefingern genutzt werden

5 Aktorik und Ansteuerung der Röntgenzoomlinse

Die Hauptaufgabe einer Röntgenzoomlinse ist es einzelne Linsenelemente reversibel aus dem Strahlengang zu nehmen. Dazu sind in jedem Fall eine geeignete Aktorik und deren Ansteuerung notwendig. Für die in Kapitel 4.2 vorgestellte Piezozoomlinse wurde in dieser Arbeit als erste eine Ansteuerungselektronik entwickelt, getestet und verbessert, da diese die schnellste Variante ist und nur mit Ansteuerung nutzbar ist. Weiterhin wurde auch für die Exzenterzoomlinse eine erste Ansteuerungselektronik getestet. Für die Formgedächtniszoomlinse wurde im Rahmen dieser Arbeit keine Ansteuerungselektronik mehr entwickelt. In diesem Kapitel werden die erstellten Ansteuerungskonzepte vorgestellt, sowie die Auslegung der einzelnen Komponenten erläutert. Weiterhin wird die Programmierung und Kommunikation mit der Röntgenzoomlinse dargelegt.

5.1 Ansteuerung für Piezobiegeaktoren

Die Ansteuerungselektronik für einen ersten Prototypen der Piezozoomlinse soll möglichst einfach, flexibel und kostengünstig umgesetzt werden, da zunächst weder genaue Anforderungen an Aktorenanzahl sowie deren Schaltverhalten festgelegt waren, noch die generelle Funktion einer Röntgenzoomlinse nachgewiesen war. Die ausgewählten Piezobiegeaktoren erfüllen das feste Kriterium einer ausreichenden Auslenkung von minimal $400\ \mu\text{m}$ und sind nur $2,1\ \text{mm}$ breit (siehe Tabelle 5-1). Damit ist dieser Aktor für die Anordnung einer größtmöglichen Anzahl an Aktoren nebeneinander am besten geeignet. Ein weiteres für den Entwicklungsprozess wichtiges Kriterium ist der Einkaufspreis von $8\ \text{€}$ (Angebot vom September 2015), der um ein Vielfaches unter dem vergleichbarer Aktoren liegt.

Tabelle 5-1: Vergleich möglicher Piezoaktoren und deren entscheidungsrelevanter Eigenschaften [75], [76], [77]

Typ	Max. Auslenkung / mm	Kraft / N	Dimensionen Länge×Breite / mm	Dicke / mm	freie Länge / mm	Preis / €
¹ PiezoDrive						
² PI Ceramics						
³ Piezo Systems						
BA3502 ¹	± 0,35	0,07	35 × 2,1	0,60	28	*6,13
BA4902 ¹	± 0,65	0,10	49 × 2,1	0,75	38	*6,13
BA6020 ¹	± 1,30	0,50	60 × 20	0,80	53	*33,13
PL127.11 ²	± 0,45	0,55	31 × 9,6	0,67	27	83,00
PL128.11 ²	± 0,45	1,10	36 × 6,2	0,67	28	86,00
T434-A4-201 ³	± 0,26	0,36	45 × 5,1	0,86	29	*189,14
T434-A4-302 ³	± 1,00	0,18	71 × 5,1	0,86	56	*236,65

*Umrechnungskurs AUD - € und \$ - € vom 12.09.2018

Der Piezobiegeaktor kann in zwei verschiedenen Verdrahtungen betrieben werden [75]. Hier wurde die Dreidrahtverbindung gewählt, da mit der Zweidrahtverbindung die maximale Auslenkung und Kraft des Aktors um 30 % reduziert ist. Die unipolare Dreidrahtverbindung sieht einen 200 V Anschluss, einen Masseanschluss (GND) und einen Signalanschluss vor, der zwischen 0 V und 200 V beliebig, je nach gewünschter Auslenkung, gewählt werden kann (siehe Abb. 5-1 links).

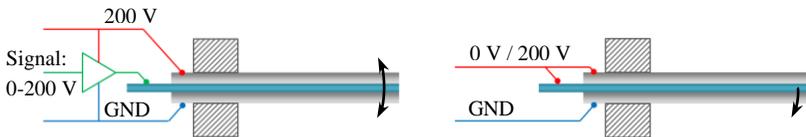


Abb. 5-1: Unipolare Dreidrahtverbindung eines Piezobiegeaktors laut Hersteller (links) und abgeänderte Zweidrahtverbindung für ausschließlich digitales Schaltverhalten in der Röntgenzoomlinse (rechts)

Der Aktor wird in der Zoomlinse immer mit vollem Ausschlag in einer Richtung betrieben, um die Linsenelemente mit maximaler Auslenkung aus dem Strahl zu bewegen. Die Dreidrahtverbindung wurde daher reduziert auf zwei Anschlüsse (siehe Abb. 5-1 rechts). Der Signalanschluss wird mit dem

200 V Anschluss zusammengelegt. Der Piezoaktor kann sich dadurch in zwei Zuständen befinden. Entweder sind alle Anschlüsse auf Masse (GND) und der Piezoaktor damit in neutraler Stellung (keine Biegung) oder der Signalanschluss wird mit 200 V gespeist und der Piezoaktor biegt sich mit vollem Ausschlag in Richtung des Masseanschlusses.

Um mehrere Piezoaktoren unabhängig voneinander ansteuern zu können, ist mehr als nur eine 200 V Spannungsquelle nötig. Für zwei zu schaltende Zustände sind digitale Ein-/Ausgänge eines Mikrokontrollers eine einfache und gute Lösung. Hier wurde der Arduino Due (freie Hardware) mit 54 digitalen Ein-/Ausgängen gewählt, welche mit 3,3 V betrieben werden [78]. Der Arduino kann mit einem Micro-USB Anschluss an einen Personal Computer (PC) zum Programmieren und Kommunizieren angeschlossen werden (Details zur Programmierung in Kapitel 5.1.3). Für die Piezoaktoren müssen die digitalen 3,3 V-Signale noch auf 200 V verstärkt werden. Dazu wurde eine Verstärkerschnittstelle entwickelt, welche in Kapitel 5.1.1 im Detail beschrieben wird. Abschließend ist für die gesamte Ansteuerung noch ein Schaltnetzteil entwickelt worden, welches sowohl die 200 V für maximale Auslenkung der Piezoaktoren liefert, als auch 5 V für die Verstärkerschnittstelle und 12 V für einen Lüfter (siehe Abb. 5-2, Details zum Schaltnetzteil in Kapitel 5.1.2).

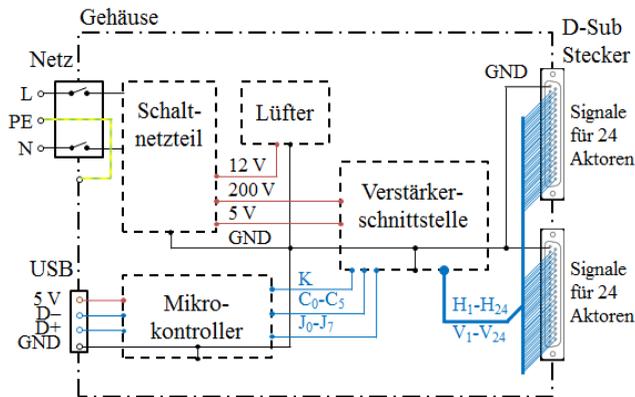


Abb. 5-2: Gesamtplan des Aufbaus der elektronischen Ansteuerungsbox der Piezozoomlinse für bis zu 48 Piezoaktoren

Alle Komponenten der elektronischen Ansteuerung müssen kompakt an einem Strahlrohr in der Nähe der Zoomlinse positioniert werden können. Daher sind alle Komponenten in einem Metallgehäuse verbaut (siehe Abb. 5-3), in dem alle Seitenwände über Kabel und Kabelschuhe an den Erdungsanschluss (PE) des Kaltgerätesteckers verbunden sind (Schutzklasse I).

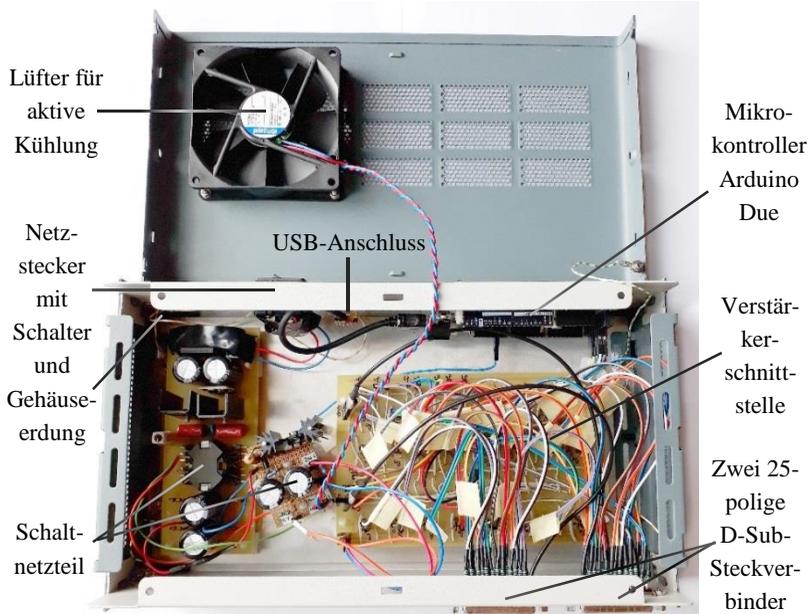


Abb. 5-3: Elektronikbox für die Piezozoomlinse in geerdetem Metallgehäuse mit USB- und Netzanschluss an einer Seite und zwei 25-poligen D-Sub-Steckverbindern an der anderen Seite für bis zu 48 unabhängig steuerbare Piezoaktoren.

An einer Seite dieser Elektronikbox befinden sich der USB-Anschluss und ein Netzstecker mit Schalter für einen 230 V Anschluss an das 50/60 Hz-Stromnetz. Auf der anderen Seite sind zwei 25-polige D-Sub-Steckverbinder, über welche die Ausgangssignale für die Aktoren an die Zoomlinse übertragen werden. Innerhalb der Elektronikbox sorgt ein Lüfter (Typ 3412N/2GLE-454, ebm-papst UK Ltd, Essex, RS-Components Webshop) für eine aktive Kühlung, welche hauptsächlich für das Schaltnetzteil benötigt wird.

5.1.1 Entwicklung der Verstärkerschnittstelle vom Mikrokontroller zu den Piezoaktoren

Die ausgewählten Piezoaktoren sollen in einer unipolaren Zweidraht-Verbindung betrieben werden. Dazu benötigt jeder Piezoaktor einen Masseanschluss (GND) sowie eine potentialwechselnde Verbindung zwischen 0 V und 200 V (Vergleich Abb. 5-1). Der Potentialwechsel wird über Schalten der digitalen Ein-/Ausgänge des Mikrokontroller Arduino Due gesteuert, welche eine maximale Spannung von 3,3 V ausgeben. Diese niedrige Spannung wird genutzt, um einen Bipolartransistor (npn-Typ PBHV8540T) zu schalten (siehe Abb. 5-4 links). Der Transistor wird in einer Emitterschaltung betrieben, in der der Kollektor über zwei 51 k Ω Widerstände an eine 200 V Spannungsquelle angeschlossen ist. Die 102 k Ω begrenzen den Kollektorstrom auf $I_C = 2$ mA. Es wurden zwei 51 k Ω Widerstände anstatt eines 100 k Ω Widerstandes gewählt, um die Belastung durch die Verlustleistung an den Widerständen zu halbieren. Der Basisstrom I_B wird vom Ausgang eines J-K Flip-Flops (MC14027BDG) über einen 1 k Ω Widerstand reguliert.

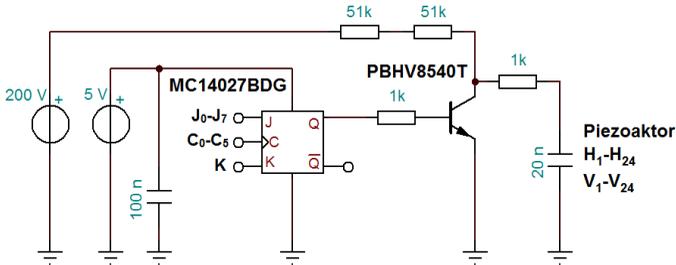


Abb. 5-4: Schaltplan einer Ansteuerungseinheit für einen Piezoaktor auf der Verstärkerschnittstelle

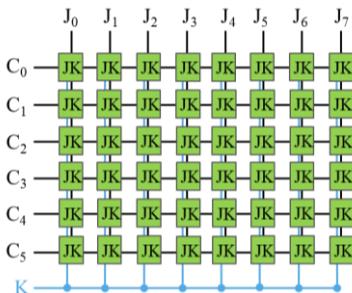
Liegt ein LOW-Signal am Ausgang des J-K Flip-Flops an, so ist der Transistor nicht leitend und am Kollektor liegen 200 V an. Der Piezoaktor, welcher einem 20 nF Kondensator entspricht, wird damit geladen und zur maximalen Auslenkung gebogen (Einschaltvorgang). Wird der J-K-Ausgang auf HIGH geschaltet, so schaltet der Transistor durch und der Kollektor wird auf das 0 V Potential gezogen. Damit entlädt sich der Piezo und geht in seine

neutrale, ungebogene Ausgangsposition zurück (Ausschaltvorgang). Für einen Einschaltvorgang benötigt ein Piezo in diesem Aufbau circa 10 ms bei einer angenommenen Ladung von 99 % und einer Ladezeit eines Kondensators von 5τ [79]. Die Zeitkonstante τ (in Sekunden) berechnet sich durch

$$\tau = RC, \tag{5.1}$$

wobei R dem Widerstand ($51\text{ k}\Omega + 51\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega$) und C der Kapazität des Piezoaktors von $C_{\text{Piezo}} = 20\text{ nF}$ entspricht. Ein Ausschaltvorgang, welcher die Linsenelemente zurück in den Strahl positioniert, benötigt hingegen nur circa 2,3 ms. An dieser Stelle erfolgt die schnellstmögliche Auslenkung eines Piezoaktors in $1/3$ der Periode seiner Resonanzfrequenz ($f_R = 140\text{ Hz}$ [75]), da die Trägheit des Aktors größer ist als die Entladung über $R = 1\text{ k}\Omega$ [80].

Der Basisstrom eines Transistors wird vom Ausgang eines J-K Flip-Flops gesteuert und nicht vom Ausgang des Arduino Due direkt. Da zu Beginn der Entwicklung der elektronischen Ansteuerung noch keine Aktorenanzahl spezifiziert war, wurde ein Matrixaufbau aus J-K Flip-Flops entworfen (siehe Abb. 5-5 links). Durch den Matrixaufbau ist die Anzahl schaltbarer Aktoren nicht durch die Anzahl der digitalen Ein-/Ausgänge des Mikrokontrollers begrenzt. Mit der verwendeten 8×6 Matrix können mit 15 Eingangssignalen vom Mikrokontroller bis zu 48 Ausgangssignale für die Steuerung der Piezoaktoren erzeugt werden.



C	J	K	Q_n	Q_{n+1}
	1	X	0	1
	X	0	1	1
	0	X	0	0
	X	1	1	0
	1	1	Q_0	$\overline{Q_0}$

1 - HIGH; 0 - LOW; X - egal

Abb. 5-5: Konzept des Matrixaufbaus der Verstärkerschnittstelle mit einer Matrix aus 8×6 J-K-Flipflops zum Schalten von bis zu 48 Ausgängen (Piezoaktoren) mit 15 gesteuerten Eingangssignalen des Arduino Due (links) und Funktionstabelle der J-K Flip-Flops MC14027BDG (rechts)

Die J-K Flip-Flops der ersten Matrixzeile werden auf HIGH gesetzt, indem die J-Eingänge der gewünschten Spalte (0-7) auf HIGH gesetzt werden. Anschließend wird das entsprechende Clock-Signal C_0 , welches einer positiven Flanke entspricht, gegeben (siehe Abb. 5-5 rechts). Dieser Vorgang wird für jede Matrixzeile mit entsprechendem Clock-Signal C_0 - C_5 durchgeführt, bis alle Flip-Flops der Matrix ihren gewünschten Zustand haben. Die Flip-Flops halten diesen Zustand am Ausgang Q solange bis sie durch den auf HIGH gesetzten K-Eingang und einem Clock-Signal wieder auf LOW gesetzt werden. Für den Matrixaufbau wurden taktflankengesteuerte Flip-Flops gewählt, da diese nur während einer festgelegten Taktflanke ihren Zustand ändern und sonst ihren Zustand speichern, auch wenn sich die Eingangssignale ändern [79]. Die Flip-Flops werden mit 5 V gespeist (Vergleich Abb. 5-4) und die Stromleitung mit parallelgeschalteten 100 nF Kondensator gefiltert. In Abbildung A-2 (Anhang A) ist das vollständige Leiterplattendesign der Verstärkerschnittstelle zu sehen. Einzig die 1k-Widerstände am Kollektorausgang der Bipolartransistoren sind nicht im Leiterplattendesign enthalten, sondern direkt in der Zuleitung zu den Piezoaktoren an den D-Sub-Steckern verlötet (siehe Abb. 5-3).

5.1.2 Auslegung der Spannungsversorgung

Für die Spannungsversorgung der elektronischen Ansteuerung wurde ein Schaltnetzteil entwickelt, welches drei verschiedene Gleichstromspannungen liefert. Hier wurden keine fertigen Netzteile gekauft, um die Spannungsversorgung möglichst flexibel, kompakt und kostengünstig zu halten. Im Laufe der Entwicklung konnten so die Spannungslevel und die Leistung des Netzteils angepasst werden.

In der im Folgenden beschriebenen und aktuellsten Version des Schaltnetzteils werden 200 V für die Piezoaktoren und 5 V für die J-K Flip-Flops auf der Verstärkerschnittstelle erzeugt, sowie 12 V für den eingebauten Lüfter. Die Hauptplatine des Schaltnetzteils nutzt einen selbstschwingenden Halbbrückentreiber (IR2153, siehe Abb. 5-6). Über den Widerstand $R_T = 36 \text{ k}\Omega$ und den Kondensator $C_T = 470 \text{ pF}$ wird die Schwingfrequenz des Transformators bestimmt [81]:

$$f = \frac{1}{1,4(R_T + 75\Omega)C_T} = 42 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

Dieses Design stellt einen guten Kompromiss aus Einfachheit und Effizienz dar. Der Transformator dient zum einen als Schutztrennung durch seine sichere galvanische Trennung der Stromkreise, zum anderen kann er über das Verhältnis der Wicklungen die gewünschten Ausgangsspannungen erzeugen. Der Transformator nutzt einen spaltlosen Ferritkern (RM10, Material N97, Typ B65814, TDK Electronics AG, München) und hat drei Sekundärkreise Sek1, Sek2 und Sek3 (siehe Abb. 5-6). Der erste Sekundärkreis dient der effizienteren Versorgung des Schaltkreises. Der zweite Sekundärkreis erzeugt 12 V für den Lüfter und der dritte Sekundärkreis erzeugt 200 V für die Versorgung der Piezoaktoren.

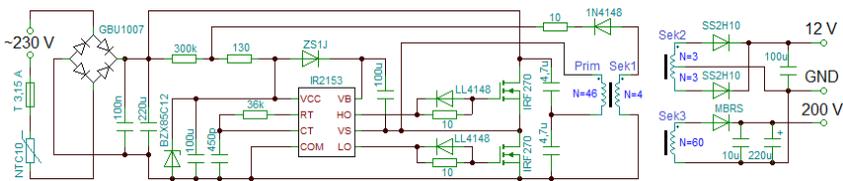


Abb. 5-6: Schaltplan des Schaltnetzteils der Piezozoomlinse mit unregulierten 12 V und 200 V

Da dieses Schaltnetzteil keinen Regelkreis enthält, wurde eine weitere Platine mit zwei Reglern hinzugefügt. Über einen Längsregler mit Zenerdiode (1N5388) wird die Ausgangsspannung auf ~200 V begrenzt, um die Piezoaktoren zu schützen. Ein Transistor (BD159) arbeitet als Emitterfolger (siehe Abb. 5-7).

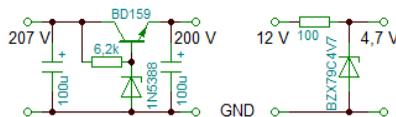


Abb. 5-7: Schaltplan des Reglers mit Längsregler für eine Ausgangsspannung von 200 V und einem Querregler für eine Ausgangsspannung von 5 V

Weiterhin werden die 12 V aus dem zweiten Sekundärkreis einmal direkt für den Lüfter genutzt und über einen Querregler mit Zenerdiode (BZX79C4V7) auf 5 V für die J-K Flip-Flops der Verstärkerschnittstelle begrenzt.

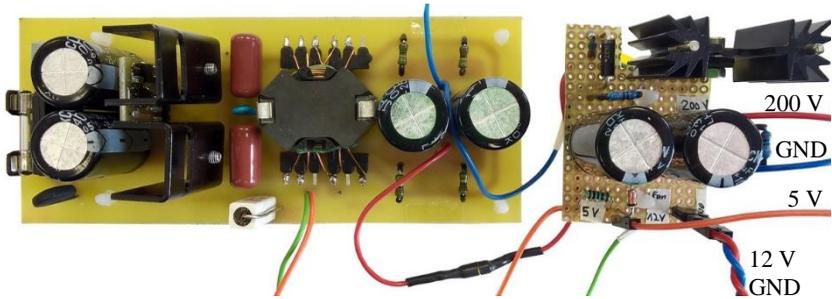


Abb. 5-8: Schaltnetzteil der Piezozoomlinse für 200 V, 12 V und 5 V mit Hauptplatine mit Transformator (links) und Extraplatine mit Reglern (rechts)

5.1.3 Ansteuerung der Piezozoomlinse mittels Mikrokontroller

Die Ansteuerung der einzelnen Piezoaktoren benötigt zunächst eine Namensdefinition und eine anschließende Zuordnung der 48 Ausgangssignale der Verstärkerschnittstelle zu den bis zu 48 Piezoaktoren. Die Piezoaktoren werden dazu nach ihren zu schaltenden Zoomlinsenfingern bezeichnet. Diese sind entweder vertikal „v“ oder horizontal „h“ orientiert und von links „01“ bis rechts „24“ angeordnet (siehe Abb. 5-9 rechts). Die Sichtweise ist über die Frontalansicht der Röntgenzoomlinse definiert (siehe Abb. 5-9 links).

Die Grundstellung der Piezoaktoren ist im ausgelenkten Zustand definiert. Dieser wird mit gleichzeitigem Rücksetzen aller Signalausgänge mit den Steuersignalen K und C₀-C₅ erreicht. In diesem Zustand fließt kein Strom durch den Transistor; die winzig kleinen dielektrischen sowie Isolationsverluste an den geladenen Piezoaktoren sind vernachlässigbar. Jeder Piezoaktor kann mithilfe von zwei Steuersignalen unabhängig von den anderen in den Strahl gestellt werden (Vergleich Kapitel 5.1.1). In Tabelle A-1

(Anhang A) werden die Piezoaktoren (V_{01} - V_{24} , H_{01} - H_{24}) zu D-Sub-Stecker Pins ($H1$ - $H25$, $V1$ - $V25$), Signalausgängen an der Verstärkerschnittstelle ($P0$ - $P47$) und den zugehörigen Steuersignalen (J_0 - J_7 , C_0 - C_5) zugeordnet.

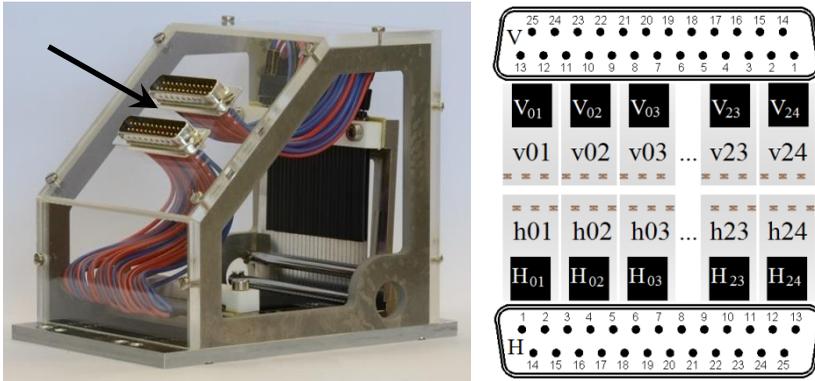


Abb. 5-9: Foto der Zoomlinse mit eingezeichneter Sichtrichtung der Frontalansicht (links) und Namensdefinition der Zoomlinsenfinger und zugehöriger Piezoaktoren sowie die D-Sub-Stecker Pin Verteilung (rechts)

Der verwendete Mikrokontroller Arduino Due wird über die USB-Verbindung mit dem PC versorgt. Da der Mikrokontroller keine vorgegebene Routine durchlaufen soll, sondern stetig eine Kommunikation mit dem Anwender möglich sein soll, ist diese USB-Verbindung zwingend notwendig. Auf eine weitere Versorgung des Arduino Due durch beispielsweise das Schaltnetzteil (empfohlene Versorgungsspannung: 7-12 V) wurde daher verzichtet.

Der Arduino Due wird mit der integrierten Entwicklungsumgebung Arduino Software (IDE) [82], einer freien Software, programmiert. Programme, welche mit der Arduino Software (IDE) geschrieben werden, werden „Sketch“ genannt und mit der Dateiendung .ino abgespeichert [83]. Zu Beginn können Bibliotheken eingebunden oder globale Variablen deklariert werden. Für die Piezozoomlinse werden für alle Steuersignale die Pin-Nummern der digitalen Ein-/Ausgänge definiert. Zwei Methodenblöcke bilden anschließend die grundlegende Programmstruktur (siehe Abb. 5-11).

Jedes Arduino-Programm beginnt mit der ersten Methode *void setup()*, welche genau einmal ausgeführt wird. Für die Piezozoomlinse werden zum einen alle benötigten digitalen Ein-/Ausgänge als Ausgang definiert und anschließend die Piezoaktoren in ihre Grundstellung gebracht. Zum anderen wird die Kommunikation des Arduino Due mit dem Anwender über den seriellen Monitor mit einer Baudrate von 9600 initialisiert. Dabei werden konkrete Benutzerhinweise auf dem seriellen Monitor wiedergegeben; z. B. „Type 'h01' to move horizontal Piezo 01 into the beam.“. Die zweite Methode ist die *void loop()* Methode, welche ständig wiederholt wird. Diese beginnt mit einer if-Abfrage und der Funktion *Serial.available()*. Dabei wartet das Programm bis an der seriellen Verbindung Daten ankommen. Anschließend wird ein Char-Array namens „command“ mit drei Chars erzeugt, welche jeweils 1 Byte groß sind und einzelne ASCII-Zeichen speichern können. In dieses Array werden dann mit der Funktion *Serial.readBytes(command,3)* die drei gelesenen ASCII-Zeichen gespeichert. Sobald ein Befehl des Nutzers gelesen und gespeichert wurde, wird dieser in einer if-Abfrage mit allen möglichen Befehlen verglichen. Wird ein unzulässiger Befehl eingegeben, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Andersfalls wird der jeweilige Anweisungsblock der if-Abfrage durchlaufen und das Programm wartet auf die nächste Befehlseingabe.

Für eine universelle Nutzung und zum Test der einzelnen Piezoaktoren wurde ein Befehl für jeden einzelnen Piezoaktor programmiert („v01“...“v24“ und „h01“...“h24“). Dabei wird zunächst immer der entsprechend erkannte Befehl auf dem seriellen Monitor mit der Funktion *Serial.println()* wiedergegeben. Anschließend wird das Steuersignal J auf HIGH und mit einer Verzögerungszeit von 1 ms das Clock-Signal C auf HIGH und wieder LOW gesetzt, um eine positive Flanke zu erzeugen. Zum Schluss wird auch J wieder auf LOW gesetzt (siehe Abb. 5-10). Die Piezoaktoren können so einzeln und unabhängig in den Strahl gestellt werden. Nach der Befehlseingabe „ini“ (Abkürzung für Initialposition) werden alle Piezoaktoren über das gemeinsame K-Steuersignal und allen Clock-Signalen C₀-C₅ aus dem Strahl genommen.

```
else if (command[0]=='h' & command[1]=='0' & command[2]=='1') {  
  Serial.println("Piezo for 'h01' is moved into beam.");  
  digitalWrite(J7, HIGH);  
  delay(1);  
  digitalWrite(C2, HIGH);  
  delay(1);  
  digitalWrite(C2, LOW);  
  digitalWrite(J7, LOW);  
}
```

Abb. 5-10: Programmausschnitt des Sketches zur Ansteuerung der Piezozoomlinse welcher zeigt, wie in einer if-Abfrage der eingelesene Befehl „command“ aus der seriellen Verbindung mit der ASCII-Zeichenfolge „h01“ verglichen wird und der anschließender Anweisungsblock.

Für die anwenderspezifische Zoomlinse mit Linsenlayout 1773_00_A0 #1 und #2 (siehe Kapitel 0) werden neun feste Konfigurationen benötigt. Die entsprechenden Piezoaktoren werden dann alle bei der Befehlseingabe von beispielsweise „c#1“ in den Strahl gestellt und müssen nicht mit zwölf Befehlseingaben für jeden Piezoaktor einzeln ausgewählt werden. Da die Piezoaktoren in nur wenigen Millisekunden geschaltet werden und der Zoomlinsenfinger dabei an der Vorspannstange abrupt abgebremst werden, vibrieren die Linsenelemente am freien Ende des Zoomlinsenfingers noch kurze Zeit nach. Werden in dieser Zeit die jeweils gegenüberliegenden Zoomlinsenfinger geschaltet, reicht die Montagetoleranz von circa 50 µm pro Linsenlücke nicht aus. Die bereits im Strahl stehenden Linsenelemente würden von den geschalteten Linsenelementen vom Zoomlinsensubstrat abgebrochen werden. Daher ist bei der Auswahl mehrerer Piezoaktoren innerhalb eines Befehls darauf zu achten, dass eine Verzögerungszeit von beispielsweise 0,5 s mit der Funktion *delay(500)* zwischen dem Schalten der vertikalen und horizontalen Aktoren eingehalten wird. Die kürzest mögliche Schaltzeit ohne ein Abbrechen von Linsenelementen ist noch nicht ermittelt worden.

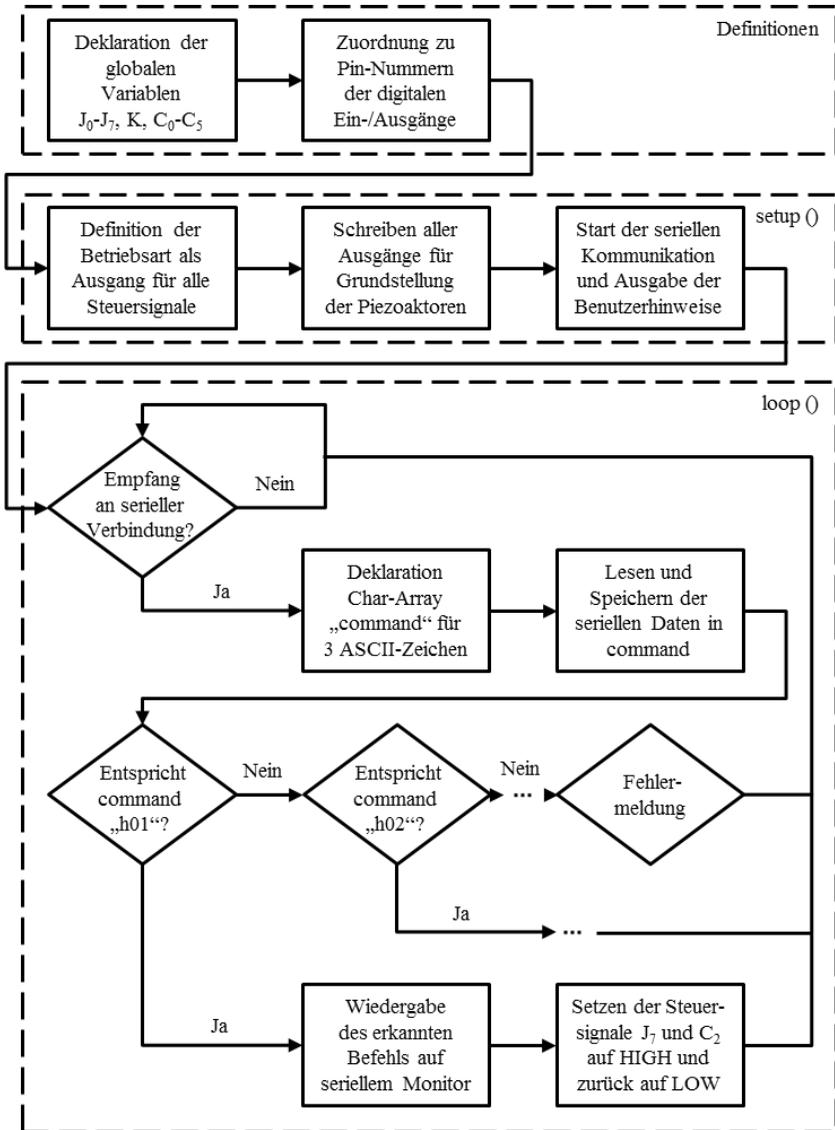


Abb. 5-11: Programmablaufplan für die Ansteuerung der Piezozoomlinse in der integrierten Entwicklungsumgebung Arduino Software (IDE)

5.2 Ansteuerung für motorgeschaltete Exzentrerscheiben

Die Aktorik des zweiten realisierten Röntgenzoomlinsen Prototyps hat die Aufgabe Exzentrerscheiben zwischen zwei Zuständen zu schalten (siehe Kapitel 4.3). Dabei hat die Aktoreinheit der Zoomlinse zwei Reihen mit bis zu 40 Exzentrerscheiben. Ein C-förmiger Schalthebel wird über zwei Motoren geführt (siehe Abb. 5-12). Ein linearer Schrittmotor mit Translationsfreiheitsgrad entlang der optischen Achse kann den Schalthebel, welcher auf einem Schiebeschlitten befestigt ist, an die Position jeder einzelnen Exzentrerscheibe fahren. Ein Servomotor stellt über einen Hebelarm den Winkel der Schaukel ein, auf der die Schrittmotoreinheit mit Schalthebel positioniert ist.

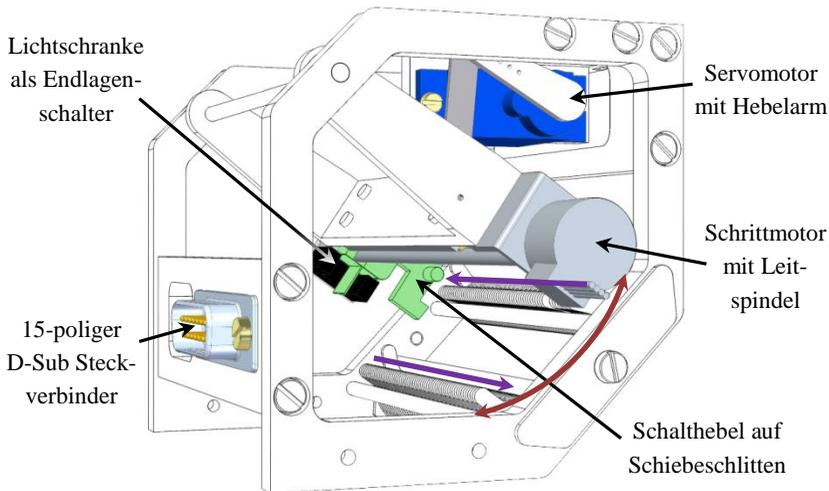


Abb. 5-12: CAD-Modell der Aktoreinheit der Exzenterzoomlinse mit hervorgehobenen Teilen der elektronischen Ansteuerung und eingetragener Fahrtrichtung des Schrittmotors in lila sowie des Servo in dunkelrot für eine Konfigurationseinstellung

Eine Lichtschranke am Anfang des Fahrwegs des Schrittmotors legt die exakte Anfangsposition des Schiebeschlittens mit Schalthebel fest. Alle

elektronischen Komponenten sind an einem 15-poligen D-Sub Steckverbinder angeschlossen, der sich an der Frontseite der Zoomlinse befindet. Die Ansteuerung erfolgt über einen Mikrokontroller, hier der Arduino Nano, welcher zur Kommunikation mit dem Nutzer an einen PC angeschlossen ist. Der Arduino Nano besitzt 14 digitale Ein-/Ausgänge, welche mit einer Spannung von 5 V betrieben werden. Sechs dieser Ausgänge können 8-Bit PWM Signale erzeugen [84].

5.2.1 Schaltungs- und Leiterplattendesign

Für die Ansteuerung der Exzenterzoomlinse galt es drei Hauptkomponenten auszuwählen und zu versorgen. Es wird ein linearer 2-Phasen Schrittmotor (Typ D8-MOTOR80, ebay-Verkäufer: idealholiday-ie, Guangzhou, China) genutzt, welcher mit 4-9 V Spannung bei maximal 500 mA betrieben werden kann. Der Nutzhub beträgt maximal 80 mm, wobei eine Distanz von 60 mm für die maximale Linsenlänge L_{CRL} ausreicht. Bei einer Gewindesteigung von 0,5 mm und einem Schrittwinkel von $\alpha = 18^\circ$ ist eine präzise Positionssteuerung im Vollschrittmodus auf 0,025 mm möglich. Bei einer Exzentrerscheibendicke von 1 mm ist die Präzision im Vollschrittmodus daher ausreichend. Der Schrittmotor wird mit dem Schrittmotortreiber DRV8834 (Texas Instruments Inc., Dallas) angesteuert, welcher eine Betriebsspannung von 2,5-10,8 V mit einem konstanten Ausgangsstrom von $I_{\text{sm}} = 1,5 \text{ A}$ bis maximal 2 A liefert. Der Ausgangsstrom muss zunächst vom Vorgabewert von 1,5 A auf maximal 0,5 A herunter geregelt werden, um den Schrittmotor nicht zu überlasten. Über ein Trimpotentiometer wird die Referenzspannung auf $V_{\text{Ref}} = 0,25 \text{ V}$ eingestellt, um über den Zusammenhang $I_{\text{sm}}/\text{A} = 2\Omega^{-1} \cdot V_{\text{Ref}}/\text{V}$ die gewünschten 0,5 A zu erreichen. Zur Ansteuerung des Schrittmotors werden vier Steuersignale benötigt: M0, M1, STEP und DIR. Der Zustand von M0 und M1 legt den Schrittmodus fest. Für den Vollschrittmodus werden beide auf LOW gesetzt. Das STEP Signal führt bei steigender Flanke einen Schritt aus und das DIR Signal gibt die Richtung des Schrittmotors vor. Der SLP Eingang muss HIGH gesetzt werden, um die Schaltung freizugeben. Der EN Eingang wird auf LOW gesetzt, um den Indexer-Modus des Schrittmotors zu nutzen, welcher wie beschrieben das

STEP und DIR Signal zur Ansteuerung nutzt. Der Treiber gibt die vier Schrittmotorphasen A1, A2, B1 und B2 aus, welche mit dem Schrittmotor zugeführt werden müssen (siehe Abb. 5-13 und Tabelle 5-2) [85].

Der Schrittmotor benötigt einen Endlagenschalter, um von dort wiederholbar die einzelnen Exzentrerscheiben genau anfahren zu können. Dazu wird eine optische Lichtschranke (GP1A58HR, SHARP corporation) am Anfang des Fahrweges des Schrittmotors montiert, welche ein digitales Ausgangssignal mit $V_O = 0\text{ V}$ bei Detektion eines Hindernisses (Schiebeschlitten des Schrittmotors) oder 5 V ohne Hindernis ausgibt. Eine detektierende Fotodiode schaltet über eine Verstärkerschaltung mit Transistor in Emitterschaltung zwischen den angeschlossenen 5 V und Masse (GND). Dieses Signal wird am digitalen Eingang D2 des Arduino Nano empfangen. Über einen parallel zum Kollektorwiderstand von $15\text{ k}\Omega$ eingefügten Widerstand von $330\ \Omega$ zwischen Versorgungsspannung und Ausgangssignal wird der Strom von wenigen μA auf mA verstärkt [86]. Die LED wird über einen Vorwiderstand von $330\ \Omega$ mit der 5 V Versorgungsleitung und Masse verbunden (siehe Abb. 5-13 und Tabelle 5-2).

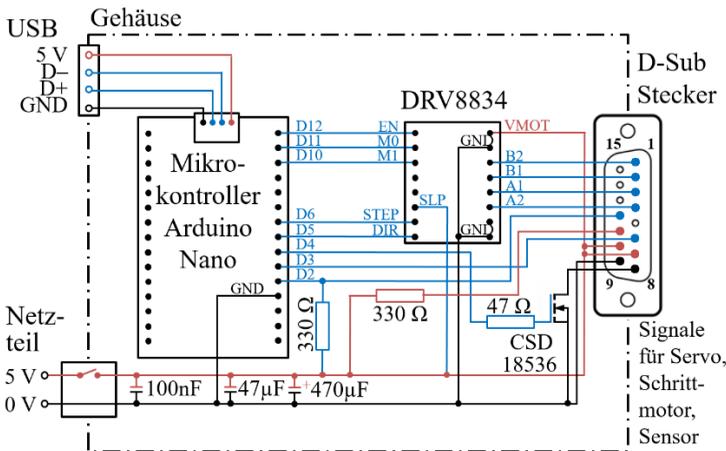


Abb. 5-13: Gesamtplan des Aufbaus und Schaltung der elektronischen Ansteuerungsbox der Exzentrerscheibe für einen Schrittmotor, Servo und Lichtschranke

Die dritte Hauptkomponente ist ein Servo, der seine Winkelposition mit einem an der Ausgangswelle verbundenen Potentiometer kontrolliert und darüber die gewünschte Sollposition regelt. Der ausgewählte analoge Servo ES08A II (EMAX US Inc., Brea) wird mit 4,8-6 V versorgt und über Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert (Arduino Nano D3). Er erzeugt dabei ein Drehmoment von 15 Ncm bei 4,8 V. Da der Servo im Betrieb vibriert, muss er nach der Einstellung einer Konfiguration und in sicherer Lage ausgeschaltet werden. Der Servo kann nicht über das PWM Signal ausgeschaltet werden, daher wird die Versorgung des Servo zusätzlich über den Arduino gesteuert. Zwischen dem Servo und seinem Masseanschluss wird dafür ein n-Kanal Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) eingefügt. Der Arduino Nano ist mit dem digitalen Ausgang D4 über einen Widerstand von 47Ω an der Steuerelektrode des MOSFET (Typ CSD18536, Texas Instruments) angeschlossen (siehe Abb. 5-13 und Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Zuordnung der Schrittmotorphasen, Servo Versorgung und Ansteuerungssignal, Lichtschranken (hier als Sensor bezeichnet) Versorgung, und Ausgangssignal zu den D-Sub-Stecker Pins (1-15)

Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung
1	Schrittmotorphase 2B	6	Servo PWM	11	Sensor LED
2	Schrittmotorphase 1B	7	Servo 5 V	12	Sensor V_O
3	Schrittmotorphase 1A	8	Servo GND	13	-
4	Schrittmotorphase 2A	9	Sensor 5 V	14	-
5	-	10	Sensor GND	15	-

Die gesamte Elektronik wird außerhalb und getrennt von der Zoomlinse in einer Elektronikbox gelagert (siehe Abb. 5-13). Da sich der Versorgungsspannungsbereich aller drei Komponenten überschneidet, konnte ein gemeinsames Netzteil ausgewählt werden. Es stellt bis zu 2 A bei einer Versorgungsspannung von 5 V bereit. Neben dem Steckeranschluss des Netzteils wird ein zusätzlicher Kippschalter an der Box eingebaut. Die Versorgungsleitung wird hier mit parallelgeschalteten 100 nF und $47 \mu\text{F}$

Keramikkondensatoren und einem 470 μF Elektrolytkondensator gepuffert, welche möglichst nahe dem IC des Schrittmotortreibers platziert werden (siehe Abb. 5-13 und Abb. 5-14). Alle benötigten Versorgungs- und Signalleitungen des Schrittmotors, Servos und der Lichtschranke werden über ein 2 m langes Kabel mit 15-poligem D-Sub Steckeranschlüssen von der Elektronikbox zur Exzenterzoomlinse übertragen.

Für die Verbindung aller Versorgungs- und Signalleitungen mit dem Mikrocontroller, Schrittmotortreiber, Netzteil und zusätzlichen elektrischen Komponenten wurde eine 45 mm x 45 mm große Leiterplatte design, geätzt und verlötet (siehe Abb. 5-14).

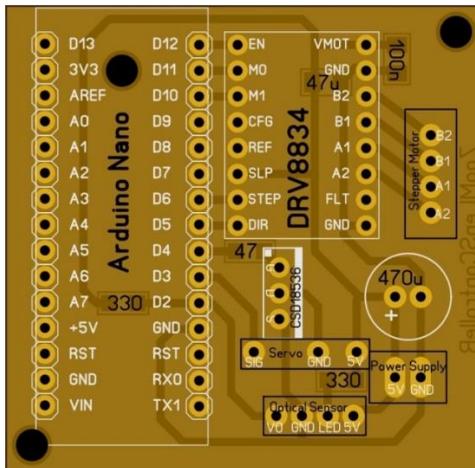


Abb. 5-14: Leiterplattendesign der Ansteuerungselektronik der Exzenterzoomlinse

5.2.2 Ansteuerung der Exzenterzoomlinse mittels Mikrocontroller

Der Arduino Nano wird ebenfalls mit der integrierten Entwicklungsumgebung Arduino Software (IDE) [82] programmiert. Zu Beginn wird die Arduino Bibliothek für Servos *servo.h* eingebunden und alle globalen

Variablen deklariert. Dazu zählen acht definierte Winkelpositionen des Servo; für jede Linsenreihe (horizontal und vertikal) vier. Dabei gibt es jeweils eine Winkelposition, um die Exzentrerscheibe in „1“-Stellung ($h1, v1$) oder „0“-Stellung ($h0, v0$) zu bringen, welche jeweils den Zoomlinsenfinger mit Linsenelementen in beziehungsweise aus dem Strahl bewegt. Zudem gibt es für jede Linsenreihe zwei neutrale Winkel, in denen der Schalthebel auf dem Schiebeschlitten so positioniert ist, dass er ohne Kollision zur nächsten Exzentrerscheibe bewegt werden kann. Je nachdem aus welcher Richtung diese neutrale Winkelposition angefahren wird, unterscheidet sich der Nennwinkel leicht aufgrund des Spiels zwischen Servo Hebelarm und Schaukel. Es wurden die Winkel $hn0, vn0$ und $hn1, vn1$ definiert, welche jeweils aus der „0“- beziehungsweise „1“-Stellung angefahren werden. Zudem werden alle benötigten Schaltarrays definiert. Es handelt sich um Int-Arrays mit 24 Elementen, welche entweder „1“ für Zoomlinsenfinger im Strahl oder „0“ für Zoomlinsenfinger aus dem Strahl sein können. Die horizontale Linsenreihe wird von links nach rechts und die vertikale von rechts nach links geschaltet (siehe Abb. 5-12). Die Reihenfolge ist entsprechend in den Schaltarrays zu beachten. In der Methode *void setup()* werden die digitalen Ein-/Ausgänge als Ausgang für die Motoren und Eingang für die Lichtschranke definiert. Die Steuersignale der Motoren werden für ihre Grundstellung gesetzt; in dem Fall ausgeschaltet. Weiterhin wird die Kommunikation des Arduino Nano mit dem Anwender gleich wie bei der Piezozoomlinse über den seriellen Monitor mit einer Baudrate von 9600 initialisiert. Benutzerhinweise wie z. B. „Type 'c1' to change the zoom lens configuration to Configuration 1.“ werden auf dem seriellen Monitor wiedergegeben (siehe Abb. 5-17 und Abb. 5-18).

Die *void loop()* Methode startet ebenfalls mit der Erzeugung eines Char-Array namens „command“, hier mit zwei Chars. In dieses Array werden die zwei aus der seriellen Verbindung gelesenen ASCII-Zeichen gespeichert. Ein solcher Befehl wird anschließend in einer if-Abfrage mit allen möglichen Befehlen verglichen. Bei Übereinstimmung wird der jeweilige Anweisungsblock der if-Abfrage durchlaufen und das Programm wartet auf die nächste Befehlseingabe. Jeder Anweisungsblock hat den gleichen Aufbau und unterscheidet sich lediglich durch das genutzte Schaltarray. Zuerst wird der erkannte Befehl auf dem seriellen Monitor wiedergegeben mit der

Aufforderung zu warten bis die Konfiguration eingestellt wurde. Dies dauert im aktuellen Programm 65 Sekunden. Anschließend werden beide Motoren eingeschaltet. Der Servo befindet sich in Grundstellung, welches dem Winkel $hn0$ entspricht. Die Richtung des Schrittmotors (SM) wird zunächst so eingestellt, dass der Schiebeschlitten schrittweise nach links bewegt wird, d. h. zur Seite der Lichtschranke (siehe Abb. 5-12). In einer while-Schleife wird dabei nach jedem Schritt der Zustand der Lichtschranke abgefragt. Solange kein Hindernis detektiert wird, führt der Schrittmotor einen weiteren Schritt aus. Sobald die Lichtschranke den Schiebeschlitten erkennt, wird die Richtung des Schrittmotors umgekehrt und er fährt zur Ausgangsposition, welche 2,54 mm vor der ersten Exzentrerscheibe definiert ist. Von hier aus wird die gesamte horizontale Linsenreihe in einer for-Schleife 24 mal abgearbeitet. Die Linsen des aktuellen Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 #1-#5 (siehe Anhang A) haben je 24 gleichbreite Zoomlinsenfinger. Die 24 Exzentrerscheiben stehen dazu mittig in dem Rastermaß von 2,54 mm. Je Schleifendurchgang fährt der Schrittmotor daher 2,54 mm zur nächsten Exzentrerscheibe, was 102 Schritten entspricht, und liest die gewünschte Position aus dem Schaltarray. Je nachdem wird der Winkel $h1$ oder $h0$ vom Servo angefahren und anschließend wieder die Neutralposition mit $hn1$ oder $hn0$. Am Ende der horizontalen Linsenreihe fährt der Schrittmotor noch 300 Schritte weiter, um in sicherer Position mit Servo von der horizontalen Linsenreihe zur vertikalen Linsenreihe wechseln zu können. Die Richtung des Schrittmotors wird umgekehrt, nach links gestellt und der Schrittmotor fährt zur Anfangsposition 2,54 mm vor die erste vertikale Exzentrerscheibe. Hier wird die for-Schleife für die gesamte vertikale Linsenreihe wiederholt mit den entsprechenden Winkeln $v1$, $v0$, $vn1$ und $vn0$. Zum Schluss fährt der Schrittmotor weitere 150 Schritte, um in sicherer Position mit dem Servo zurück in die horizontale Linsenreihe wechseln zu können. Hier werden die Motoren ausgeschaltet und es erfolgt eine Ausgabe auf dem seriellen Monitor über die erfolgreich eingestellte Konfiguration; z. B. „X-ray zoom lens in configuration 1.“ (siehe Abb. 5-17 und Abb. 5-18).

Mit der globalen Variable $t0$ wird die Zeit pro Schritt des Schrittmotors mit der Funktion `delayMicroseconds(t0)` festgelegt (siehe Abb. 5-15). Mit

$t0 = 500$ benötigt der Schrittmotor 1 ms pro Schritt und bewegt sich so mit seiner maximalen Geschwindigkeit von 25 mm/s.

```

for (int x = 0; x < 102; x++) {           // 102 steps (==2,54 mm)
  digitalWrite(stepPin,HIGH);
  delayMicroseconds(t0);
  digitalWrite(stepPin,LOW);
  delayMicroseconds(t0);
}

```

Abb. 5-15: Programmausschnitt des Sketches zur Ansteuerung der Exzenterzoomlinse welcher zeigt, wie der Schrittmotor eine definierte Strecke mit bestimmte Schrittzahl abfährt.

Der Servomotor soll nicht bei voller Geschwindigkeit betrieben werden, um die Beschleunigungskräfte und damit hervorgerufenen Vibrationen auf die Linsenelemente möglichst gering zu halten. Die Geschwindigkeit des Servos kann nicht direkt eingestellt werden, da ausschließlich der gewünschte Winkel über die PWM signalisiert wird. Als Lösung wurden hier die globalen Variablen $p1$, $s0$ und $s1$ eingeführt. Über eine for-Schleife fährt der Servo nicht direkt den gewünschten Winkel an, sondern über einzelne Grad-Schritte (siehe Abb. 5-16). Dabei gibt $p1$ die Größe der Einzelschritte an und wurde auf $0,5^\circ$ festgesetzt. Nach jedem Einzelschritt wartet der Servo mit der Funktion $delay(s0)$ und einer festgesetzten Zeit von $s0 = 5$ ms. In der erreichten Winkelstellung wartet der Servo $s1 = 0,5$ s bevor er in umgekehrter Richtung den nächsten Winkel anfährt.

```

if (c1[i]==1 {
  for (pos = hn0; pos >= h1; pos -= p1) {
    myservo.write(pos);
    delay(s0);
  }
  delay(s1);
  for (pos = h1; pos < hn1; pos += p1) {
    myservo.write(pos);
    delay(s0);
  }
  delay(s1); }

```

Abb. 5-16: Programmausschnitt des Sketches zur Ansteuerung der Exzenterzoomlinse welcher zeigt, wie bei gewünschter „1“-Stellung des i-ten Exzentrers der Konfiguration 1 der Servo zu Winkel $h1$ und $hn1$ bewegt wird.

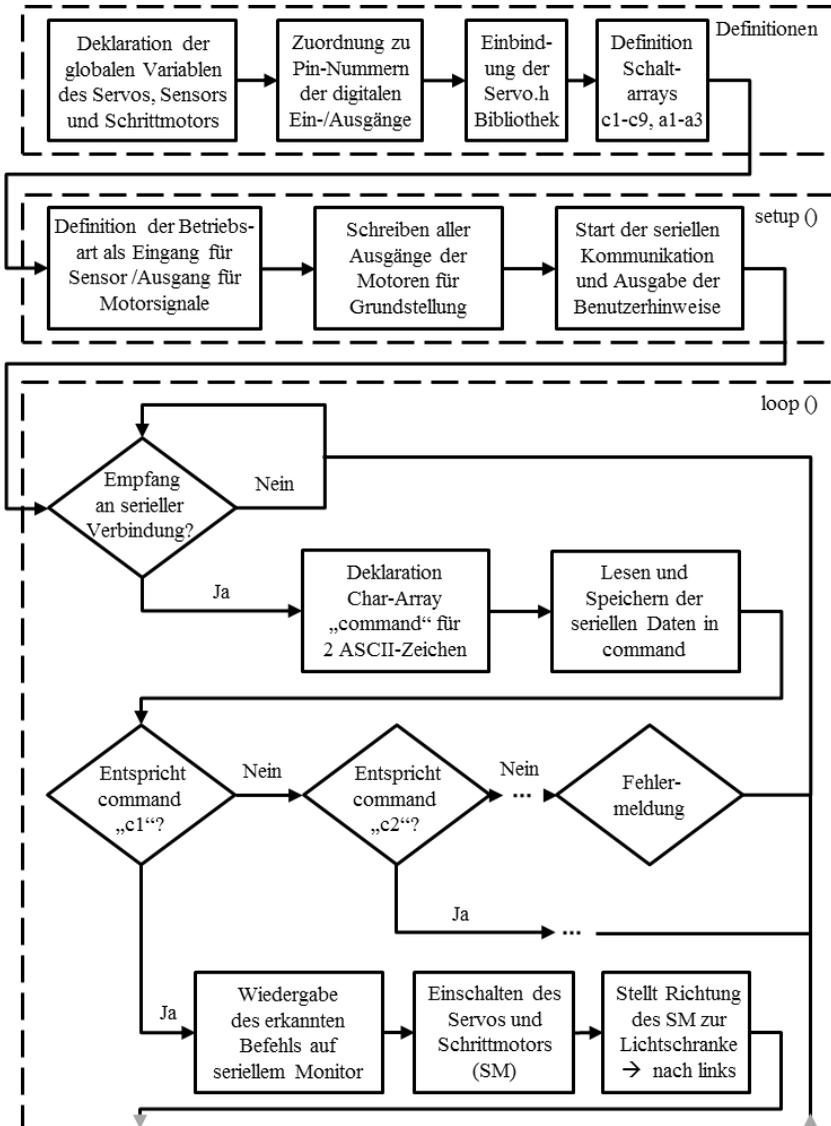


Abb. 5-17: Programmablaufplan für die Ansteuerung der Excenterzoomlinse in der integrierten Entwicklungsumgebung Arduino Software (IDE), Teil 1

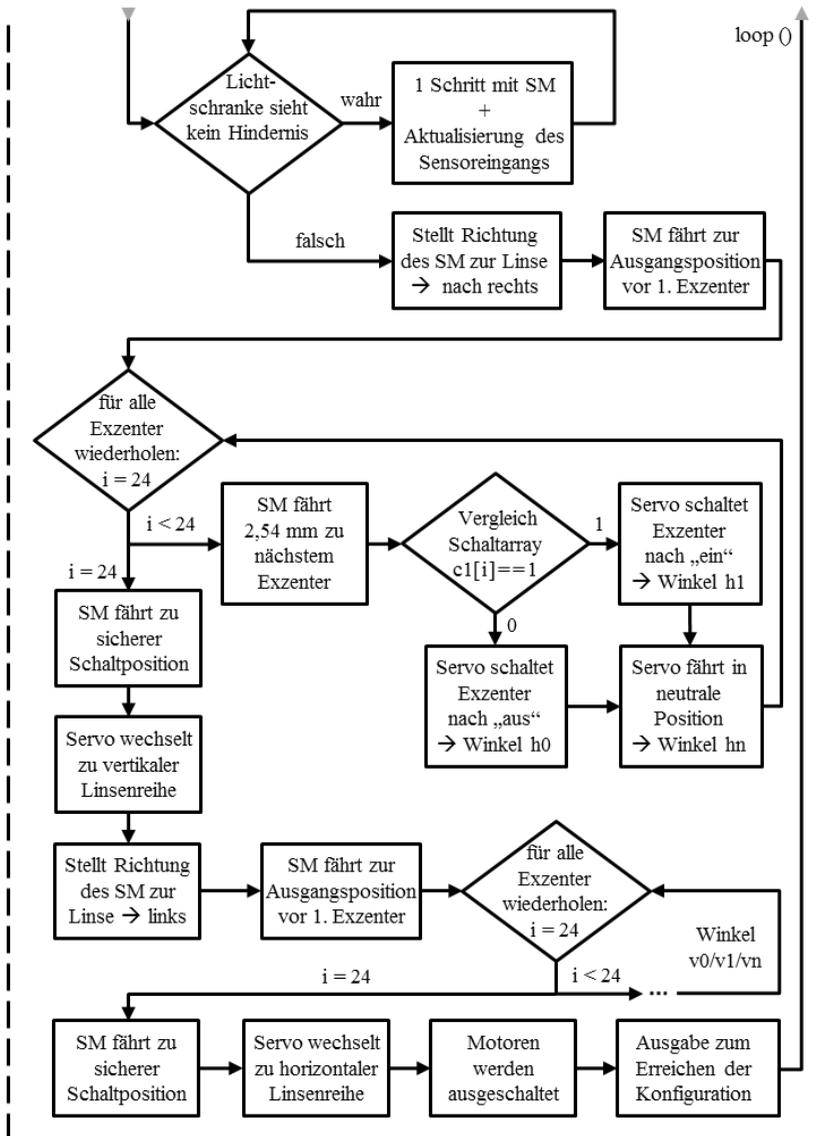


Abb. 5-18: Programmablaufplan für die Ansteuerung der Exzenterzoomlinse in der integrierten Entwicklungsumgebung Arduino Software (IDE), Teil 2

6 Auslegung anwendungsspezifischer Zoomlinsenlayouts

Die ersten Prototypen der Röntgenzoomlinse wurden zunächst auf vorhandene Linsenlayouts zugeschnitten, sodass für jedes andere Layout die Lage der Schnitte und Aktoren der Position der Linsenelemente angepasst werden musste. Nach erfolgreichem Funktionsnachweis (siehe Kapitel 7.1) wurden optimierte Zoomlinsenlayouts berechnet, gezeichnet und hergestellt, die alle die gleichen Schnitt- und Aktorpositionen haben. Damit kann eine einheitliche Konstruktion und Ansteuerung erfolgen. In diesem Kapitel werden die Besonderheiten zur Berechnung einer Linse für den Einsatz in einer Zoomlinse erläutert, sowie zwei anwendungsspezifische Layouts dargestellt, wobei eines bereits in einem Experiment erprobt wurde (siehe Kapitel 7.2).

6.1 Berechnung eines Zoomlinsenlayouts

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Excel-Programm erstellt, welches die Parameter einer CRL berechnet, die auch als Zoomlinse eingesetzt werden kann. Auch andere CRLs werden mit einem Excel-Programm berechnet, jedoch ist dieses nicht für Zoomlinsen geeignet. Eine Zoomlinse muss essentiell ihre Linsenelemente so positioniert haben, dass sie in festen Abständen der Breite der Zoomlinsenfinger gesägt werden kann. Diese Breite wird durch die Art und Anzahl der verwendeten Aktoren vorgegeben. In einem ersten Schritt wird die gewünschte Anzahl der Zoomlinsenfinger Z_N und deren Aufteilung mit meist gleicher Breite b_Z festgelegt. Die CRL wird später von der Wafersäge in die einzelnen Finger zertrennt. Dazu wird bereits im Layout der benötigte Platz mit Breite des Sägeschnitts s_w und einem Sicherheitsabstand d_s von Linsenelementkante zu Sägekante eingeplant. Weiterhin müssen

Luftspalte von $b_L = 50 \mu\text{m}$ zwischen den sich abwechselnden horizontalen und vertikalen Linsenelementen zur Vermeidung von Kollisionen eingehalten werden. Das Excel-Programm erlaubt dazu oben die Eingabe aller wichtigen Designparameter (siehe Tabelle 6-1). Für die Piezozoomlinse mit 24 Zoomlinsenfingern wurden fünf neue Linsen entworfen. Für die Exzenterzoomlinse mit 40 Zoomlinsenfingern wurden zwei neue Linsen entworfen (siehe Anhang B). Generell kann die Exzenterzoomlinse auf beliebige Layouts angepasst werden und kann auch für die Piezolinsenlayouts genutzt werden.

Tabelle 6-1: Designparameter für eine Zoomlinse

Symbol	Beschreibung	Werte
Z_N	Anzahl der Zoomlinsenfinger	24 (Piezo) max. 40 (Exzenter)
b_Z	Breite der Zoomlinsenfinger	2,54 mm (Piezo) min. 1,5 mm (Exzenter)
s_w	Sägeschnittbreite der Wafersäge	0,09 mm (400 μm Resist) 0,15 mm (2000 μm Resist)
d_s	Sicherheitsabstand CRL zur Schnittkante	0,05 mm
b_{nZ}	nutzbare Fingerbreite $b_{nZ} = b_Z - s_w - 2 \cdot d_s$	2,35 mm (Piezo) min. 1,31 mm (Exzenter)
N_f	Anzahl der Linsenelemente pro Zoomlinsenfinger	1, 2, 3
b_L	Lücke zwischen Linsenelementen der montierten CRL	50 μm
b_{St}	Stegbreite zwischen Parabeln	7 μm

Nachdem Anzahl und Breite der Zoomlinsenfinger feststehen, muss die Anzahl der Linsenelemente pro Finger N_f festgelegt werden. Auf jedem der typischerweise 24 Zoomlinsenfinger können $N_f = 1-3$ Linsenelemente sinnvoll platziert werden. Theoretisch wären auch noch mehr Linsenelemente möglich, jedoch haben diese Elemente entweder einen sehr großen Radius R oder eine nur sehr geringe Apertur A (siehe Abb. 6-1). Weiß man den

minimalen Radius der Linsenelemente, kann die maximale Apertur A_{\max} berechnet werden:

$$A_{\max} = 2 \sqrt{R_{\min} \frac{\frac{b_{hZ}}{2} - \frac{b_L}{2} - N_f b_{St} - (N_f - 1) b_L}{N_f}}. \quad (6.1)$$

Dabei wird von identischen Linsenelementen ausgegangen. Auf einem Zoomlinsenfinger müssen die horizontalen und die vertikalen Linsenelemente mit jeweils einem Abstand von $b_L = 50 \mu\text{m}$ Platz finden (siehe Abb. 6-1).

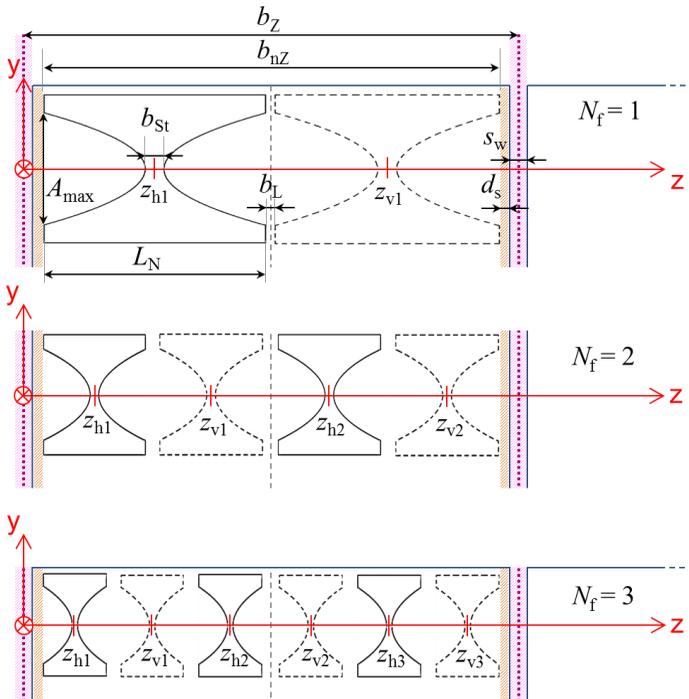


Abb. 6-1: Positionierung der Linsenelemente in Abhängigkeit der Designparameter entlang der optischen Achse z mit deren Mittelpunkten in z. B. z_{h1} für erstes horizontales Linsenelement auf dem ersten Zoomlinsenfinger

So wird ein Kompromiss von gewünschter Brennweite (in erster Näherung über Formeln (2.6) und (2.7)) über die Anzahl aller Linsenelemente $N = N_f \cdot Z_N$ und maximaler Apertur gefunden.

Anschließend wird die Photonenenergie festgelegt, bei der die CRL genutzt wird. Das Brechzahldekrement δ wurde für 400 μm starken SU-8-Resist als Linsenmaterial mit einer Toleranz kleiner 1 % gemessen und wird berechnet mit:

$$\delta = \frac{0,00027142}{(E/\text{keV})^2}. \quad (6.2)$$

Es wurde eine Strahlverfolgung in Excel realisiert, bei der zunächst ein parallel einfallender Strahl am äußersten Punkt der ersten Apertur y_1 eintrifft. Für diesen Strahl wird der Verlauf durch die gesamte CRL berechnet, um den Schnittpunkt dieses Strahls mit der optischen Achse zu berechnen, welcher dem ausgangseitigen Brennpunkt F' entspricht. Für die Strahlengangberechnungen wurde vereinfacht angenommen, dass die Brechung einmalig an der Linsenmitte z_i stattfindet anstatt zweimal an den beiden Parabeloberflächen beim Ein- und Austreten des Strahls in und aus der Linse. Diese Näherung wurde mittels Strahlverfolgungssimulationen mit dem kommerziellen Programm Zemax überprüft. Die Abweichungen durch die Näherung sind vernachlässigbar und führen zu Verschiebungen des Brennpunktes F' im Submikrometerbereich. Für ein einzelnes Linsenelement berechnet sich die Ablenkung des Strahls, angegeben als Strahlsteigung m , über seine Brechkraft (siehe Abb. 6-2).

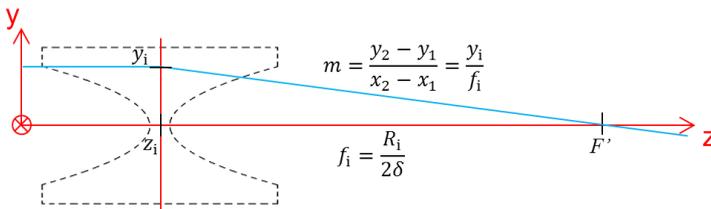


Abb. 6-2: Verlauf und Berechnung eines achsparallel eintreffenden Strahls an einem Linsenelement in (z_i, y_i) bis zum Kreuzen der optischen Achse (z) im Brennpunkt F'

Die Strahlsteigung m wird über eine lineare Funktion aus der bekannten Strecke des Abstands zur optischen Achse y_i des parallel einfallenden Strahls und der Brennweite f_i berechnet. Trifft der abgelenkte Strahl nun auf ein weiteres Linsenelement, so kann die Strahlsteigung aus der Summe der vorangegangenen Strahlsteigung m_{i-1} und zusätzlichen Strahlsteigungsänderung durch die Brechkraft des aktuellen Linsenelements Δm_i berechnet werden:

$$m_i = \Delta m_i + m_{i-1} \quad (6.3)$$

mit

$$\Delta m_i = y_i \frac{2\delta}{R}. \quad (6.4)$$

Der erste Abstand zur optischen Achse kann innerhalb der Apertur beliebig gewählt werden und wurde hier vorgegeben mit $y_1 = A/2$. Alle weiteren y_i mit $i \in [1;N]$ ergeben sich dann mit

$$y_i = y_{i-1} + \Delta m_{i-1}(z_i - z_{i-1}) \quad (6.5)$$

und können für die Berechnung des nächsten Linsenelements in den Formeln (6.3) und (6.4) eingefügt werden. Um den Fokusabstand f_d des Brennpunkts F' von der Position $z=0$ auf der optischen Achse z zu bestimmen (siehe Abb. 2-3), summiert man die Strecke bis zur Nullstelle des aus dem an Position z_N stehenden letzten Linsenelement austretenden Strahls und den Abstand z_N des Linsenelements zum Koordinatenursprung $z(0)$:

$$f_d = z(F') = \frac{y_N}{m_N} + z_N. \quad (6.6)$$

Damit hat man exakt den Fokusabstand des ausgangsseitigen Brennpunkts F' vom definierten Koordinatenursprung $z(0)$ in der Sägeschnittmitte vor dem ersten Zoomlinsenfinger bestimmt (siehe Abb. 6-1). Die ausgangsseitige Hauptebene H' liegt im Schnittpunkt des parallel einfallenden Strahls mit Abstand zur optischen Achse $y_1 = A/2$ und dem ausgangsseitigen Brennpunktstrahl mit Strahlsteigung m_N . Die effektive Brennweite f_{eff} der Zoomlinse ist der Abstand des Brennpunkts F' zur ausgangsseitigen Hauptebene H' (Vergleich Abb. 2-3) und berechnet sich mit

$$f_{\text{eff}} = -\frac{A}{2m_N}. \quad (6.7)$$

Damit sind alle Parameter der Zoomlinse bestimmt.

Da die Zoomlinse als abbildende Linse genutzt werden soll, sind meist weitere Kriterien neben der effektiven Brennweite bei einer bestimmten Energie einzuhalten. Dazu wurde ein weiterer Strahlengang für den Einsatz als abbildende Linse berechnet. Erster zu wählender Parameter ist der Abstand s_d der abzubildenden Probe zu $z(0)$. Vom Punkt $z(s_d)$ auf der optischen Achse wird ein Strahl mit Strahlsteigung m_0 angenommen, der das erste Linsenelement im Abstand $y_1 = A/4$ von der optischen Achse trifft. Dadurch wird sichergestellt, dass der Strahl die Linse auch vollständig durchläuft und nicht fälschlicherweise durch die Bereiche der Stützblöcke oder außerhalb der Linse berechnet wird. Von hier aus wird der Strahlengang wie oben beschrieben über die Formeln (6.3) bis (6.5) durch die gesamte Zoomlinse bestimmt. Berechnet man nun den Schnittpunkt mit der optischen Achse nach Formel (6.6) erhält man die Position des Abbildes der Probe auf der optischen Achse $z(D)$, hier genannt Detektorposition D . Über die errechneten Lagen des Detektors D und der ausgangsseitigen Hauptebene H' auf der optischen Achse z , kann die Bildweite s_i bestimmt werden. Die Gegenstandsweite s_o wird mithilfe der Abbildungsgleichung (2.8) und gegebener Bildweite und Brennweite berechnet. Abschließend kann auch die Vergrößerung M dieser Anordnung mit Formel (2.9) ermittelt werden.

Da sich die Linsenpositionen für die horizontalen und vertikalen Linsenelemente unterscheiden (siehe Abb. 6-1), werden die Strahlengänge und alle genannten Parameter getrennt für beide Raumrichtungen errechnet. Der durch die Positionsverschiebung der Linsenelemente der beiden Halblinsen eingebrachte Astigmatismus der Linse bei identischen Linsenelementen für beide Richtungen wird im Design durch angepasste Krümmungsradien R ausgeglichen. Je nach Anwendung kann die Linse optimiert werden. Zum einen kann eine Linse mit gleicher horizontaler und vertikaler effektiver Brennweite entworfen werden. Zum anderen kann die Linse so optimiert werden, dass eine Probe im Abstand s_d in einem konstanten Detektorabstand D abgebildet wird. In diesem Fall haben die beiden Halblinsen jedoch leicht

Ein neues CRL-Design gleicht den Astigmatismus symmetrisch zur Linsenmitte für einzelne Linsenelementpaare aus (siehe Abb. 6-3 (c)). Damit kann die Brennweite dieser CRL im Nachhinein durch Ausbrechen der jeweils vier äußersten Linsenelemente (jeweils horizontal und vertikal das erste und letztes Linsenelement) stufenweise verlängert werden. Dabei bleibt die Linse astigmatismusfrei.

Die Berechnung des Linsenlayouts erfolgt dazu von der Linsenmitte nach außen. Zunächst wird ein Radius R_1 und Elementanzahl N von gewünschter Brennweite und Photonenenergie abgeleitet. Für lange CRLs mit $L_{\text{CRL}} = 60$ mm (1773_00_A0 #9-#10) wird ein mittlerer Linsenblock von $N=5$ optimiert. Für kürzere CRLs von beispielsweise $L_{\text{CRL}} = 40$ mm (1773_00_A0 #11-#12) oder $L_{\text{CRL}} = 20$ mm (1773_00_A0 #13-#14) wird ein mittlerer Linsenblock von $N=3$ optimiert. Der kleinste Radius R_0 wird für die Halblinse mit weniger Elementen ($N=1$ oder 2) so gewählt, dass das Verhältnis $A/R \leq 18$ bleibt. Bei früheren CRLs hat sich gezeigt, dass ab einem Verhältnis $A/R > 24$ fertigungsbedingt die Qualität der CRLs abnimmt. Anschließend wird der Radius R_{0a} der anderen Halblinse ($N=2$ oder 3) für die ausgewählte Energie so angepasst, dass beide Halblinsen ihren Brennpunkt in gleicher Lage $z(F')$ erzeugen. Außerhalb dieses Mittelblocks haben alle Linsenelemente einer Halblinse den Radius R_1 und die dazugehörigen Linsenelementpaare werden von innen nach außen ($R_{1a1}, R_{1a2}, R_{1a3}, \dots$) astigmatismusfrei optimiert.

Die so optimierte Zoomlinse ist für die geplante Energie bei optimaler Montage astigmatismusfrei, aber auch über einen breiten Energiebereich ist der Astigmatismus mit diesem neuen Layout gegenüber den herkömmlichen Linsenlayouts besonders mit vielen Linsenelementen reduziert. Dies wird in einem Vergleich der Lage der Brennpunkte $z(F')$ der für $E = 25$ keV astigmatismusfrei ausgelegten Linse (1773_00_A0 #9) des Typs „vhVhv“ mit einer herkömmlichen CRL des Typs „VHVH“ deutlich (siehe Tabelle 6-2). Die optimierte Energie ist jeweils fett gekennzeichnet; dort ist die Linse astigmatismusfrei.

Je weniger Linsenelemente die CRLs haben, desto stärker wird der Astigmatismus durch die optimierten Linsenelemente ausgeprägt. Tabelle 6-2

vergleicht die Lage der Brennpunkte der kürzeren CRLs 1773_00_A0 #12 ($L_{\text{CRL}} = 40 \text{ mm}$) und #13 ($L_{\text{CRL}} = 17 \text{ mm}$) mit herkömmlichen CRLs des Typs „VHVH“. Der Astigmatismus der herkömmlichen CRLs hängt ausschließlich von der Versetzung der Linsenelemente der vertikalen und horizontalen Linsenreihe ab (siehe Kapitel 2.3), welcher sich demnach bei der Verwendung von großen Aperturen und damit längeren Linsenelementen verstärkt.

Tabelle 6-2: Vergleich der Lage der Brennpunkte der neuen astigmatismusfreien Linsen 1773_00_A0 #9, #12 und #13 des Typs „vhVhv“ mit herkömmlichen CRLs des Typs „VHVH“

Eigenschaften CRL#9/#12/#13: $A = 120/150/200 \mu\text{m}$ $R_1 = 9/10/15 \mu\text{m}$ $b_L = 30/25/20 \mu\text{m}$	Lage des Brennpunktes $z(F')$ / mm			
	8 keV	15 keV	25 keV	32 keV
astig.-freie CRL #9 Typ „vhVhv“ $N = 69/68$	innerhalb der CRL	V: 62,666 H: 62,593 $\Delta: 0,074$	V: 160,217 H: 160,217 $\Delta: 0,000$	V: 256,627 H: 256,742 $\Delta: -0,115$
vergleichbare CRL Typ „VHVH“ $N = 68$	innerhalb der CRL	V: 62,635 H: 63,072 $\Delta: -0,437$	V: 161,222 H: 161,659 $\Delta: -0,437$	V: 258,718 H: 259,155 $\Delta: -0,437$
astig.-freie CRL #12 Typ „vhVhv“ $N = 34/33$	V: 40,997 H: 41,115 $\Delta: -0,118$	V: 131,353 H: 131,353 $\Delta: 0,000$	V: 354,122 H: 353,650 $\Delta: 0,472$	V: 576,195 H: 575,240 $\Delta: 0,956$
vergleichbare CRL Typ „VHVH“ $N = 33$	V: 41,390 H: 40,795 $\Delta: 0,595$	V: 132,054 H: 131,459 $\Delta: 0,595$	V: 355,528 H: 354,933 $\Delta: 0,595$	V: 578,301 H: 577,706 $\Delta: 0,595$
astig.-freie CRL #13 Typ „vhVhv“ $N = 12/11$	V: 159,166 H: 159,166 $\Delta: 0,000$	V: 553,579 H: 552,732 $\Delta: 0,847$	V: 1530,475 H: 1533,439 $\Delta: 2,964$	V: 2505,767 H: 2510,845 $\Delta: 5,078$
vergleichbare CRL Typ „VHVH“ $N = 11$	V: 162,708 H: 163,402 $\Delta: 0,694$	V: 567,863 H: 567,169 $\Delta: 0,694$	V: 1571,991 H: 1572,685 $\Delta: 0,694$	V: 2574,297 H: 2574,992 $\Delta: 0,694$

6.2 Design anwendungsspezifischer Zoomlinsen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei anwendungsspezifische Zoomlinsenlayouts für die Anwendung am Strahlrohr ID01, ESRF entworfen. Beide Ideen beruhen darauf, eine Zoomlinse als Objektivlinse in der Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FFDXM) einzusetzen (siehe Abb. 6-4).

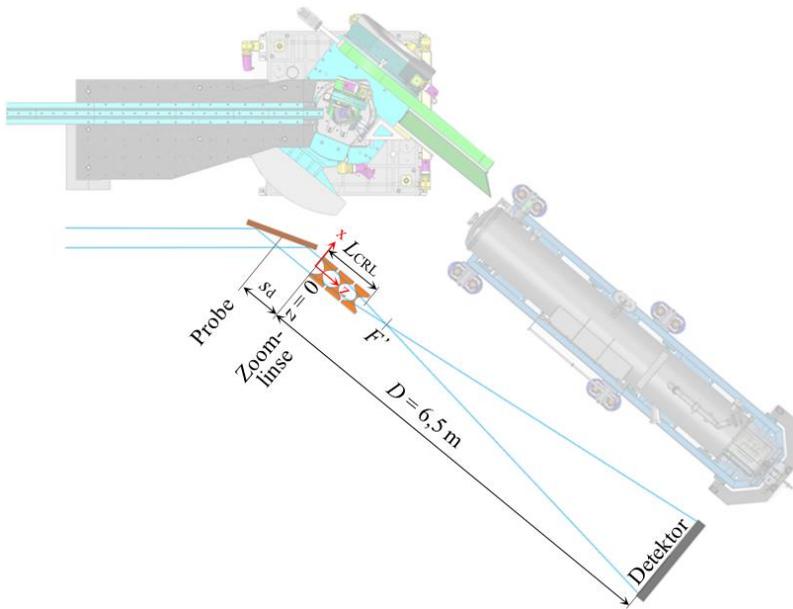


Abb. 6-4: Aufbau des Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskops am Strahlrohr ID01, ESRF (oben) und Strahlengang mit Zoomlinse als Objektivlinse (unten)

Die Linsen sollen in verschiedenen Energiescans eingesetzt werden. Die Linse bildet die an der Probe Bragg-reflektierte Strahlung auf einem $D = 6,5 \text{ m}$ strahlabwärts der Zoomlinse befindlichen Detektor ab. In beiden Anwendungen soll die Probe mit verschiedenen Energien untersucht werden. Dazu muss die Zoomlinse den ausgangsseitigen Brennpunkt F' für diese bestimmten Energien konstant halten, sodass mit dem Vollfeldbeugungs-

Röntgenmikroskop während des gesamten Energiescans ein scharfes Bild mit konstanter Vergrößerung aufgenommen werden kann. Der verwendete Detektor ist ein Andor Zyla 4.2 PLUS sCMOS mit 2160 x 2560 Pixeln und einer effektiven Pixelgröße von $p_{\text{CMOS}} = 6,5 \mu\text{m}$. Da auch kleinere Strukturen der Proben im Hundertnanometerbereich untersucht werden sollen, kann die reflektierte Strahlung nicht direkt detektiert werden, sondern muss mit einer Linse vergrößert abgebildet werden.

6.2.1 Design einer Linse für einen resonanten Energiescan

Das Abtasten in kleinen Energieschritten um die Absorptionsenergie eines Elements kann zusätzliche chemische Informationen über die Probe liefern, dies ist bekannt als resonante Streuung in der Röntgen-Nahkanten-Absorptions-Spektroskopie (XANES). Dieser Ansatz soll bei der Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FFDXM) am ID01-Strahlrohr der ESRF weiter ausgebaut werden. Zur Demonstration wurde die Zielenergie von 11,103 keV gewählt. Diese Energie entspricht der Ge- K_{α} -Absorptionskante, die in isolierten, kompositionell abgestuften SiGe-Säulen gefunden wurde. Diese Proben wurden zuvor bereits an ID01 untersucht [87]. Um das dabei verwendete Schema der multiplen anormalen Dispersion (MAD) [88] korrekt anwenden zu können, ist es notwendig, mehrere Datenpunkte in der Nähe der Ge- K_{α} -Absorptionskante in Energieschritten von 5 eV und zusätzlich zwei Datenpunkte mit 50 eV weit von der Kante entfernt zu messen. Dafür wurden zwei Zoomlinsen entworfen. Im Linsenlayout 1773_00_A0 #1 sind dafür 3 eV-Schritte und in 1773_00_A0 #2 (siehe Tabelle 6-3) sind 5 eV-Schritte genutzt worden.

Für eine gewünschte Auflösung von $\sigma_{\text{min}} = 400 \text{ nm}$ pro Linienpaar muss bei gegebener Pixelgröße des Detektors eine Vergrößerung von $M \sim 65$ erzielt werden:

$$M = \frac{4p_{\text{CMOS}}}{\sigma_{\text{min}}}. \quad (6.8)$$

Hier wird in einem konservativen Ansatz angenommen, dass man vier Pixel pro Linienpaar benötigt, um dieses sicher aufzulösen [89]. Mit der gewünschten Vergrößerung und festem Detektorabstand von $D = 6,5$ m wurde der Probenabstand mit dem erstellten Excel-Programm auf $s_d = 67,5$ mm berechnet.

Für kleine Energieschritte wie 5 eV ist es nicht sinnvoll die Anzahl der Linsenelemente zu verändern, um die resultierenden geringen Unterschiede in der Brennweite auszugleichen. Hier war die Idee, einzelne Linsenelemente durch Linsenelemente mit leicht veränderten Krümmungsradien zu ersetzen. Dazu wurden neun Energieschritte in neun verschiedenen Zoomlinsenkonfigurationen realisiert (siehe Tabelle 6-3). Die mittlere Konfiguration #5 ist für die Energie $E_{GeK\alpha} = 11,103$ keV ausgelegt. Die äußeren Konfigurationen #1 und #9 sind die extremen Energieschritte von ± 50 eV. Die dazwischen liegenden Konfigurationen haben jeweils 5 eV Schritte. Es wurden nur symmetrische Konfigurationen verwendet, um die Position der Hauptebenen so konstant wie möglich zu halten. Andernfalls würde sich das Verhältnis von Gegenstandsweite s_o und Bildweite s_i stärker ändern und damit auch die Vergrößerung M . Diese soll jedoch möglichst konstant bleiben. Die vier mittleren Zoomlinsenfinger bleiben immer im Strahl stehen. Sie haben die kleinsten Radien (siehe Tabelle B-2, Anhang B) und damit auch den größten Brechkraftanteil der Linse. Lediglich die beiden jeweils äußeren Zoomlinsenfinger werden ausgetauscht und über deren Radien- und Positionsveränderung die Brennweite f_{eff} so angepasst, dass der Brennpunkt F' sich nicht verschiebt und damit die im Abstand $s_d = 67,5$ mm stehende Probe immer im Abstand $D = 6,5$ m abgebildet wird (siehe Tabelle 6-3). Alle 22 Zoomlinsenfinger tragen jeweils $N_f = 3$ Linsenelemente mit einer Apertur von $A = 98$ μm .

Dieses Design ist nach der in Kapitel 6.1 erläuterten zweiten Methode optimiert. Die Linsenelemente werden nicht auf konstante effektive Brennweite f_{eff} für alle gewünschten Photonenenergien optimiert, sondern auf einen konstant gehaltenen Brennpunkt F' mit Fokusabstand f_d . Damit ist ein statischer Mikroskopaufbau mit konstanten Abständen zur Probe s_d und Detektor D mit möglichst minimaler Änderung der Vergrößerung M gegeben.

Auch für diese sehr kleinen Energieänderungen von 5 eV ist eine Anpassung der Objektivlinse notwendig. Tabelle 6-4 zeigt zum Vergleich die Eigenschaften einer statischen, nicht anpassbaren Objektivlinse identisch der Konfiguration #5 der Zoomlinse. Verwendet man diese für die gleichen gewünschten Photonenenergien im gleichen Mikroskopaufbau, so ist die Änderung der effektiven Brennweite f_{eff} im Vergleich teils geringer, da die Positionen der äußeren Linsenelemente sich nicht verändern. Dafür verschiebt sich jedoch die Position des Brennpunktes $z(F')$ auf der optischen Achse mit Fokusabstand $f_d \pm 0,8$ mm. Diese Änderung ist zwar gering, jedoch bewirkt diese bei einer Vergrößerung von $M \sim 65$ eine enorme Änderung des notwendigen Detektorabstandes D im Meterbereich.

Für die gewünschte Auflösung von $\sigma_{\text{min}} = 400$ nm pro Linienpaar auf dem Detektor ist eine Fokusgröße kleiner als $\sigma_{F,\text{max}} = 200$ nm nötig. Die Zoomlinse hat eine Apertur von $A = 98$ μm und in Konfiguration #5 eine Brennweite von $f = 97$ mm bei $E = 11,103$ keV. Somit ist die maximal zulässige Verschiebung des Fokuspunktes Δf_{max} entlang der optischen Achse bei $\sigma_{F,\text{max}} \ll A$:

$$\Delta f_{\text{max}} \approx \frac{f \cdot \sigma_{F,\text{max}}}{A} \approx 198 \mu\text{m}. \quad (6.9)$$

Dies entspricht einer maximalen Energieänderung von $\Delta E_{\text{max}} = 12$ eV, welche mit dem Berechnungsprogramm der Zoomlinse ermittelt wurde. Da es auch andere Effekte gibt, die die Fokusgröße beeinflussen (Quellgröße, Beugung, Fertigungsgenauigkeit), wurde die Energieschrittweite von 3 eV und 5 eV gewählt. Mit dieser Schrittweite ist sichergestellt, dass eine Vergrößerung des Fokusedurchmessers durch eine Verschiebung des Fokuspunktes ausgeschlossen werden kann. Zudem sind die kleinen Energieschritte notwendig, um die Vergrößerung M möglichst konstant zu halten.

Tabelle 6-3: Designparameter für Zoomlins layout 1773_00_A0 #2 bei festem Probenabstand $s_d = 67,5$ mm, Detektorabstand von $D = 6,50$ m und Fokusabstand $f_{d,ver} = 126,6$ mm und $f_{d,hor} = 127,4$ mm [19]

# Konfig.	E / keV	Konfiguration Zoomlinse: X = Zoomlinsfinger im Strahl; o = Zoomlinsfinger aus d. Strahl	M_{ver}	M_{hor}	$f_{eff,ver} / \text{mm}$	$f_{eff,hor} / \text{mm}$	$\Delta f_{eff,ver} / \%$	$\Delta f_{eff,hor} / \%$
1	11,053	XooooooooooXXXXoooooooooX	65,2	65,0	97,7	98,1	0,89	0,87
2	11,088	oXoooooooooXXXXoooooooooXo	65,4	65,2	97,4	97,8	0,63	0,61
3	11,093	ooXoooooooooXXXXoooooooooXoo	65,6	65,3	97,2	97,6	0,39	0,38
4	11,098	oooXoooooooooXXXXoooooooooXooo	65,7	65,4	97,0	97,4	0,18	0,17
5	11,103	ooooXoooooXXXXoooooXoooo	65,8	65,6	96,8	97,2	0,00	0,00
6	11,108	oooooXoooooXXXXoooooXooooo	65,9	65,7	96,7	97,1	-0,15	-0,14
7	11,113	ooooooXooXXXXooXoooooo	66,0	65,7	96,6	97,0	-0,26	-0,26
8	11,118	ooooooXoXXXXoXoooooo	66,1	65,8	96,5	96,9	-0,35	-0,35
9	11,153	ooooooXoXXXXXXoooooo	66,1	65,8	96,4	96,8	-0,42	-0,41

Tabelle 6-4: Vergleich der Eigenschaften des Zoomlins layouts 1773_00_A0 #2 in statischer Konfiguration #5 oooooXoooooXXXXoooooXoooo bei festem Probenabstand $s_d = 67,5$ mm [19]

# Konfig.	E / keV	$f_{d,ver} / \text{mm}$	$f_{d,hor} / \text{mm}$	D_{ver} / m	D_{hor} / m	M_{ver}	M_{hor}	$f_{eff,ver} / \text{mm}$	$f_{eff,hor} / \text{mm}$	$\Delta f_{eff,ver} / \%$	$\Delta f_{eff,hor} / \%$
1	11,053	125,8	126,5	4,14	4,15	41,8	41,7	96,0	96,4	-0,85	-0,85
2	11,088	126,3	127,1	5,55	5,56	56,2	56,0	96,6	97,0	-0,25	-0,25
3	11,093	126,4	127,2	5,84	5,84	59,1	58,9	96,7	97,0	-0,17	-0,17
4	11,098	126,5	127,3	6,15	6,15	62,3	62,0	96,7	97,1	-0,08	-0,08
5	11,103	126,6	127,4	6,50	6,50	65,8	65,6	96,8	97,2	0,00	0,00
6	11,108	126,7	127,5	6,89	6,89	69,8	69,5	96,9	97,3	0,08	0,08
7	11,113	126,8	127,5	7,33	7,33	74,3	74,0	97,0	97,4	0,17	0,17
8	11,118	126,8	127,6	7,83	7,83	79,4	79,0	97,1	97,5	0,25	0,25
9	11,153	127,4	128,2	15,0	14,9	151,9	150,7	97,7	98,0	0,85	0,85

6.2.2 Design einer Linse für einen Energiescan

Neben dieser speziellen Zoomlinse zur Untersuchung einer SiGe-Probe wurde eine Zoomlinse für Energiescans von $E \sim 19,7$ keV entworfen. Diese Energie ist optimal für Experimente am Strahlrohr ID01 an der ESRF. Die Zoomlinse soll für möglichst viele 50 eV-Schritte in diesem Energiebereich als Objektivlinse im Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskop (siehe Abb. 6-4) genutzt werden. Die Idee ist es, reziproke radiale Raumschans durch Energiescans zu ersetzen. Dies hat den Vorteil einer verbesserten Stabilität und Reproduzierbarkeit, da Motorbewegungen, Motorvibrationen und Bewegungstoleranzen des Goniometers eliminiert werden können. Eine solche Idee wurde in der Vergangenheit bereits meist mit chromatischen Optiken demonstriert [90], [91]. Nachteile des Einsatzes chromatischer Optiken in diesen Fällen sind die ständige Nachjustierung des Linsen-Probenabstandes und die zusätzlichen Korrekturen bei der Datenanalyse.

Die Zoomlinse soll eine möglichst starke Vergrößerung M erreichen. Dazu ist bei gegebenem Detektorabstand $D = 6,5$ m eine kurze Brennweite von circa $f \sim 100$ mm notwendig. Da hier eine etwa doppelt so hohe Photonenenergie wie bei der resonanten Energiescan-Zoomlinse genutzt wird, müssen in etwa viermal so viele Linsenelemente genutzt werden, um die gleiche Brennweite zu erhalten ($f \sim E^2$). Mit einer Linsenanzahl von $N \sim 72$ bei $N_f = 3$ und geforderter Mindestapertur von $A = 98$ μm , wird eine Linse 60 mm lang. Damit ist das Zoomlinsenlayout bereits gefüllt. Es bleibt kein Platz für Kombinationen mit verschiedenen Linsenelementen auf anderen Zoomlinsenringern. Die Lösung für diese Zoomlinse ist eine vorfokussierende feste CRL, sodass die einzelnen Zoomlinsenfinger nur 50 eV-Energieänderungen anpassen müssen. Dazu wird als vorfokussierende CRL eine Linse des Linsenlayouts 1773_00_A0 #2 in zwei Hälften mit jeweils 33 Linsenelementen geteilt. Damit ist die Hauptbrechkraft der Energiescanlinse gleichmäßig verteilt. Mit dem entworfenen Zoomlinsenlayout 1773_00_A0 #3 werden insgesamt 22 Energieschritte von 19,5 keV bis 20,55 keV realisiert (siehe Tabelle 6-5). Dazu werden bei der niedrigsten Energie die mittleren Zoomlinsenfinger #12-#14 mit jeweils drei Linsenelementen in den Strahl gestellt. Für jeden +50 eV-Schritt wird wechselweise strahlabwärts und strahlauwärts ein

weiterer Zoomlinsenfinger mit nur einem Linsenelement dazu gestellt (für alle Parameter siehe Tabelle B-2, Anhang B).

Tabelle 6-5: Designparameter für Zoomlinsenslayout 1773_00_A0 #3 bei festem Probenabstand $s_d = 25$ mm und Detektorabstand von $D = 6,5$ m; Zoomlinse zwischen zwei vorfokussierenden Halblinsen, wie z. B. Konfig. #1: XXXXXXXXXXXX ooooooooooXXXoooooooooooo XXXXXXXXXXXX

# Konfig.	E / keV	Konfiguration Zoomlinse: X = Zoomlinsenfinger im Strahl; o = Zoomlinsenfinger aus d. Strahl	M_{ver}	M_{hor}	$f_{eff,ver}$ / mm	$f_{eff,hor}$ / mm	$\Delta f_{eff,ver}$ / %	$\Delta f_{eff,hor}$ / %
1	19,50	ooooooooooooXXXoooooooooooo	59,3	59,4	107,0	106,9	0,47	0,46
2	19,55	ooooooooooooXXXXoooooooooooo	59,4	59,5	106,8	106,8	0,32	0,31
3	19,60	ooooooooooooXXXXXoooooooooooo	59,5	59,5	106,8	106,7	0,24	0,23
4	19,65	ooooooooooooXXXXXXoooooooooooo	59,6	59,6	106,6	106,5	0,06	0,06
5	19,70	ooooooooooooXXXXXXXXoooooooooooo	59,6	59,6	106,5	106,4	0,00	0,00
6	19,75	ooooooooooooXXXXXXXXXoooooooooooo	59,7	59,7	106,3	106,2	-0,19	-0,19
7	19,80	ooooooooooooXXXXXXXXXXoooooooooooo	59,7	59,8	106,3	106,2	-0,24	-0,23
8	19,85	ooooooooooooXXXXXXXXXXXoooooooooooo	59,9	59,9	106,0	106,0	-0,44	-0,43
9	19,90	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXoooooooooooo	59,9	59,9	106,0	106,0	-0,47	-0,46
10	19,95	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXoooooooooooo	60,0	60,0	105,8	105,7	-0,70	-0,68
11	20,00	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXoooooooooooo	60,0	60,1	105,7	105,7	-0,72	-0,69
12	20,05	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,2	60,2	105,5	105,4	-0,96	-0,94
13	20,10	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,2	60,2	105,5	105,5	-0,96	-0,93
14	20,15	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,4	60,4	105,2	105,2	-1,23	-1,19
15	20,20	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,3	60,4	105,2	105,2	-1,21	-1,18
16	20,25	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,5	60,5	104,9	104,9	-1,50	-1,46
17	20,30	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,5	60,5	104,9	104,9	-1,47	-1,43
18	20,35	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,7	60,7	104,6	104,6	-1,79	-1,74
19	20,40	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,7	60,7	104,7	104,6	-1,74	-1,69
20	20,45	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,9	60,9	104,3	104,3	-2,08	-2,02
21	20,50	ooooooooooooXXXXXXXXXXXXXXXo	60,9	60,8	104,4	104,4	-2,02	-1,96
22	20,55	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	61,1	61,1	104,0	104,0	-2,38	-2,32

7 Experimentelle Ergebnisse

Der Nachweis der Funktion und auch die Charakterisierung der optischen Eigenschaften einer Röntgenzoomlinse können nur im Röntgenstrahl erfolgen. Eine hinreichend genaue Untersuchung unter beispielsweise einem Lichtmikroskop ist aufgrund der Auflösung nur teilweise möglich. An den Strahlrohren P05, PETRA III, DESY in Hamburg, ID01, ESRF in Grenoble, IMAGE, KIT Synchrotronquelle in Karlsruhe und B16, DIAMOND in Oxford konnte in insgesamt vier Strahlzeiten der Funktionsnachweis der Röntgenzoomlinse erfolgen (siehe Kapitel 7.1). Auch eine erste optimierte und anwendungsspezifische Röntgenzoomlinse (siehe Kapitel 6.2.1) wurde am Strahlrohr ID01, ESRF in Grenoble charakterisiert. Die Röntgenzoomlinse ermöglicht als Mikroskopobjektiv mit positionsfestem Fokuspunkt für definierte Photonenenergieschritte eine neue Messmethode in der Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FDXM) (siehe Kapitel 7.2).

7.1 Charakterisierung der Prototypen

Ein erster Prototyp einer zur Punktfokuslinse montierten Piezozoomlinse wurde am Strahlrohr ID01, ESRF in Grenoble charakterisiert. Um die Funktionalität der Zoomlinse nachzuweisen, wurden fünf verschiedene Konfigurationen bei den beiden Photonenenergien $E = 10$ keV und $E = 19,5$ keV analysiert. Zur Ausrichtung der Zoomlinse (siehe Abb. 7-1 (links)) im Strahl wurde eine Basler-Kamera (acA1300-30gm, Basler-AG, Ahrensburg) mit einer Pixelgröße von $3,75 \mu\text{m}$ verwendet. Zur Bewertung der Qualität der Zoomlinse mit Linsenlayout 1405_00_A0 #10 erfolgten Klingentests mit einem Erodierdraht mit einem Durchmesser von $250 \mu\text{m}$ als Klinge entlang der optischen Achse für die vertikale und die horizontale Fokusgröße (siehe Abb. 7-1 (rechts)). Der ermittelte Fokusabstand f_d ist bei dieser Messung von der Mitte der Linse bis zur Fokusebene definiert. In Tabelle 7-1 werden die berechneten Fokusabstände und Fokusgrößen mit den

Messwerten verglichen. Die Fokusabstände liegen alle im erwarteten Bereich. Unterschiede zwischen den berechneten und den gemessenen (Tabelle 7-1, Spalten 4 bis 6) Fokusabständen liegen innerhalb der Messgenauigkeit von ± 5 mm. Dies bestätigt das Konzept und die Funktionalität der Röntgenzoomlinse. Weiterhin wurden für die Fokusgrößen Werte von σ (FWHM) von $0,45 \mu\text{m}$ bis $1,37 \mu\text{m}$ ermittelt (siehe Abb. 7-1 (rechts) und Tabelle 7-1, Spalten 9, 11).

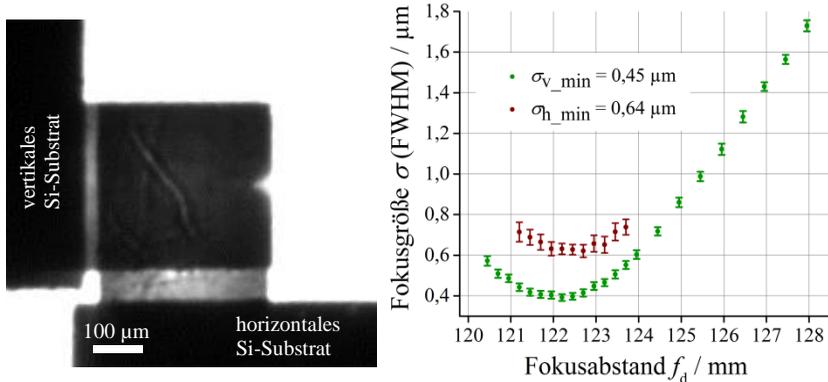


Abb. 7-1: Im Strahl ausgerichtete Piezozoomlinse mit Punktfokus bei $E = 10$ keV (links); Messergebnis des Fokusabstands f_d und Fokusgröße σ (FWHM) in horizontaler und vertikaler Richtung der Konfiguration #1 bei $E = 10$ keV (rechts) [17]

Die Zoomlinse kann in Konfiguration #1 bei $E = 10$ keV theoretisch eine beugungsbegrenzte Fokusgröße nach Formel (2.14) von $\sigma_{\text{min,diff}} = 0,35 \mu\text{m}$ erreichen (siehe Tabelle 7-1, Spalte 7). Mit dem Abbild der Quelle von ID01 nach Formel (2.16) mit einer Größe h_o von $15 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$ (vertikal \times horizontal) in einer Entfernung von $s_o = 120$ m und einer Bildweite von $s_i = 126$ mm sowie dem Astigmatismus der Zoomlinse nach Formel (2.17), ergibt sich, näherungsweise als geometrisches Mittel aus den drei Begrenzungen, eine minimale Fokusgröße von $\sigma_v = 0,45 \mu\text{m} \times \sigma_h = 0,64 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 7-1, Spalten 8, 10). Im Vergleich zu den errechneten minimal erreichbaren Fokusgrößen sind die gemessenen Fokusgrößen um den Faktor 1,2 bis 3,3 größer. Bei statischen CRLs desselben Linsenlayouts 1405_00_A0 #10 treten so hohe Abweichungen nicht auf.

Es gibt einen Unterschied der Abweichungen von horizontalen und vertikalen Bildweiten und Fokusgrößen. Ein Grund ist ein Montagefehler, der zu einer Verdrehung der horizontalen Zoomlinsehälfte um circa $0,07^\circ$ um die y-Achse führte, welche über die Auswertung der Radiografie in Abb. 7-1 ermittelt wurde. In der Praxis verschlechtert sich die Qualität der CRL je näher am Substrat sie genutzt wird, da die Seitenwände der Strukturen von einem exakten 90° -Winkel zum Substrat um $0,17^\circ \pm 0,04^\circ$ abweichen [68]. Dadurch haben die brechenden Oberflächen an der Resistorseite die gewünschte Parabelform, während die Form zum Substrat hin von dieser immer weiter abweicht [52]. Die größere horizontale Quellbreite führt ebenfalls zu einer Verbreiterung des Fokus. Weiterhin ist die präzise Ausrichtung der Linse im Strahl wegen der relativ großen Detektorpixel nicht sicher gegeben (siehe Abb. 7-1 (links)).

Tabelle 7-1: Ergebnisse der Messungen einer Piezozoomlinse mit simuliertem Fokusabstand und berechneter Fokusgröße verglichen mit den gemessenen Werten in fünf Konfigurationen bei $E = 10$ keV und $E = 19,5$ keV [17]

E / keV	# Konfiguration Anzahl der Linsenelemente N	Simulierter Fokusabstand f_d / mm	Gemessene vertikale Fokusabstand f_d / mm	Gemessene horizontale Fokusabstand f_d / mm	Beugungslimitierte Fokusgröße $\sigma_{\text{min,diff}} / \mu\text{m}$	Minimale beugungslimit. Fokusgröße, Astigmatismus, abgebildete vertikale Quellgröße $\sigma_v / \mu\text{m}$	Gemessene vertikale Fokusgröße $\sigma_{v,\text{min}} / \mu\text{m}$	Minimale beugungslimit. Fokusgröße, Astigmatismus, abgebildete horizontale Quellgröße $\sigma_h / \mu\text{m}$	Gemessene horizontale Fokusgröße $\sigma_{h,\text{min}} / \mu\text{m}$
10	1 32	126	122	122	0,35	0,42	0,45	0,44	0,64
	2 28	141	142	143	0,32	0,39	0,54	0,42	1,14
	3 28	142	143	144	0,27	0,38	0,89	0,41	1,37
	4 24	162	162	166	0,31	0,39	0,60	0,43	0,67
	5 24	164	165	167	0,31	0,39	0,60	0,43	0,60
19,5	1 32	453	448	448	0,21	0,28	0,79	0,58	1,18
	2 28	510	514	516	0,21	0,29	0,92	0,64	1,27

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Bewertung der Zoomlinse ist neben der einstellbaren Brennweite auch die Eignung als abbildende Linse in einem Vollfeldmikroskop (siehe Kapitel 2.4.2). Dazu wurde am Strahlrohr IMAGE, KIT Synchrotronquelle in Karlsruhe ein Mikroskop mit einer Probe, Zoomlinse als Objektiv und einem PCO4000-Detektor aufgebaut (siehe Abb. 7-2).

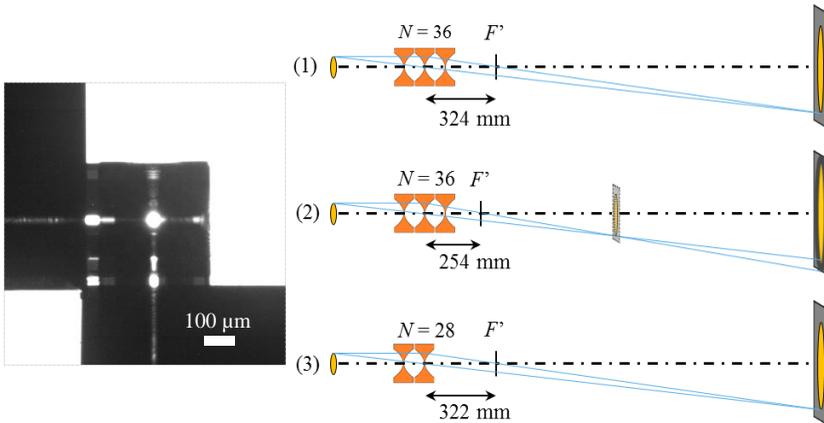


Abb. 7-2: Im Strahl ausgerichtete Piezozoomlinse mit Punktfokus bei $E = 17,5$ keV (links); Schema des statischen Mikroskopaufbaus bei $E = 17,5$ keV (1); bei geänderter Energie $E = 15,43$ keV (2) und mit angepasster Brennweite (3)

Die abgebildete Teststruktur war ein Siemensstern (Zeiss-Xradia, Typ X500-200-30). Ziel war es zu zeigen, dass eine Probe mit verschiedenen Photonenenergien abgebildet werden kann ohne den Mikroskopaufbau verändern zu müssen. Dazu wurde das Mikroskop bei einer Energie von $E = 17,5$ keV eingestellt (siehe Abb. 7-2 (1)). Die Zoomlinse nutzt alle Linsenelemente mit $N = 36$ und erreicht damit eine simulierte Brennweite von $f_{\text{eff}} = 324$ mm. Im justierten Mikroskop wurde eine Gegenstandsweite von $s_o = 388$ mm und eine Bildweite von $s_i = 2350$ mm gemessen. Damit ergibt sich nach der Abbildungsformel (2.8) eine gemessene Brennweite von $f_{\text{mess}} = 333$ mm, die um 2,7 % von der simulierten Brennweite abweicht. Diese Abweichung kann von dem sich ändernden Brechzahldecrement δ des SU-8-Resists kommen, welches für jede Resistlieferung neu vermessen

werden müsste, um diese Abweichung vermeiden zu können. Das Mikroskop hat eine Vergrößerung von $M = 6$. Die Zoomlinse kann in einem Bildfeld von $\text{FoV} = 185 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ auch die kleinsten Teststrukturen des Siemensstern von $0,5 \mu\text{m}$ auflösen (siehe Abb. 7-3 (1)).

Um im gleichen Mikroskopaufbau die Probe bei der Energie $E = 15,43 \text{ keV}$ zu untersuchen, wurde die Konfiguration der Röntgenzoomlinse angepasst. Bei gleicher Anzahl an Linsenelementen würde sich die Brennweite auf $f_{\text{eff}} = 254 \text{ mm}$ verändern und man würde ein unscharfes Bild am Detektor erhalten (siehe Abb. 7-2 und Abb. 7-3 (2)). Bei $N = 28$ Linsenelementen ergibt sich dagegen eine simulierte Brennweite von $f_{\text{eff}} = 322 \text{ mm}$, nahezu der gleiche Wert wie in der ersten Konfiguration bei $E = 17,5 \text{ keV}$. So wird die Teststruktur auch bei $E = 15,43 \text{ keV}$ mit vergleichbarer Auflösung, Schärfe und Vergrößerung abgebildet (siehe Abb. 7-3 (3)). Im Detailbild der kleinsten aufgelösten Strukturen erkennt man eine leichte Unschärfe, die durch die nur stufenweise einstellbare Brennweite der Zoomlinse zu Stande kommt.

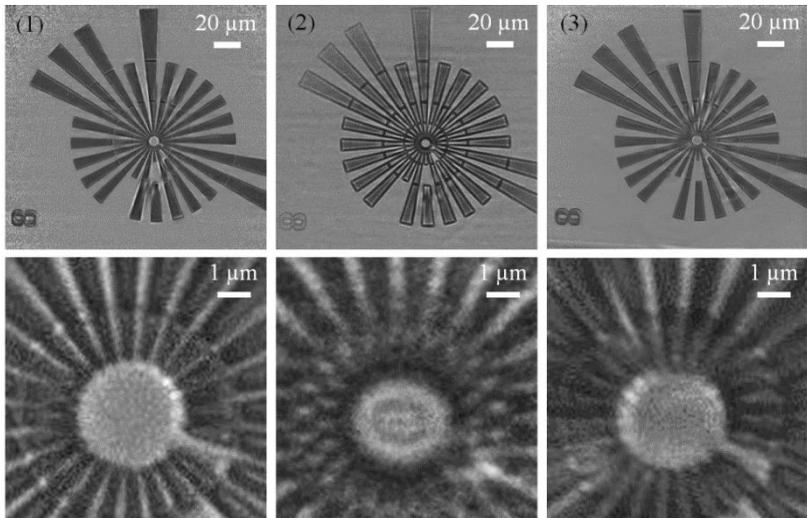
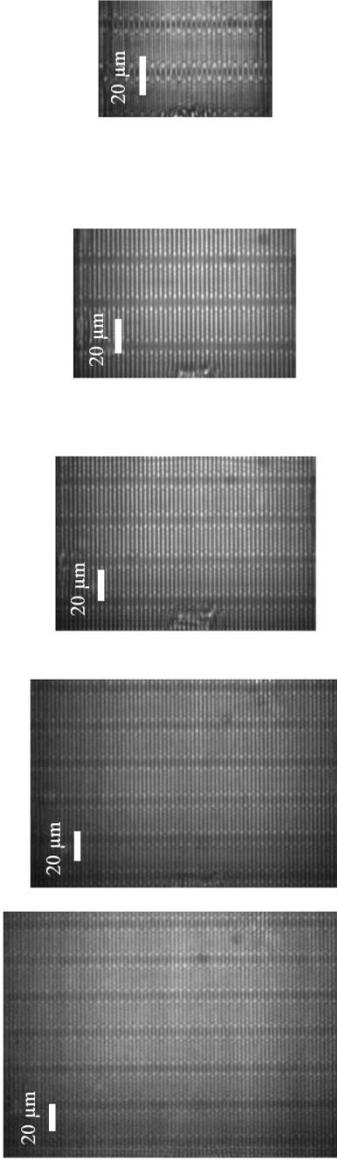


Abb. 7-3: Bilder des Siemenssterns X500-200-30 mit $\text{FoV} = 185 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ (oben) und den zugehörigen Detailausschnitten mit kleinsten Strukturen von $0,5 \mu\text{m}$ (unten) mit Einstellungen: (1) $E = 17,5 \text{ keV}$, $N = 36$, $f_{\text{eff}} = 324 \text{ mm}$; (2) $E = 15,43 \text{ keV}$, $N = 36$, $f_{\text{eff}} = 254 \text{ mm}$; (3) $E = 15,43 \text{ keV}$, $N = 28$, $f_{\text{eff}} = 322 \text{ mm}$

Mit diesem Experiment wurde die Eigenschaft der Zoomlinse gezeigt, eine Probe unter gleichen Bedingungen in einem statischen Mikroskopaufbau mit verschiedenen Energien aufnehmen zu können, indem die Brennweite angepasst wird, sodass der Brennpunkt F' immer ortsfest bleibt.

Die Zoomlinse wurde ebenfalls in einem Schattenwurfmikroskop (siehe Kapitel 2.4.1) am Strahlrohr B16, DIAMOND untersucht. Dabei wurde die Untersuchung einer Probe in einem statischen Mikroskopaufbau mit verschiedenen Vergrößerungen M und Bildfeldern demonstriert. In diesem Experiment wurde erstmals eine Exzenterzoomlinse mit einer Punktfokuslinse des Layouts 1405_00_A0 #7 eingesetzt. Ein Klingentest mit einem Golddraht mit 200 μm Durchmesser als Klinge ergab eine Fokusgröße von $\sigma(\text{FWHM}) = 0,6 \mu\text{m}$. Anschließend wurde im Mikroskopaufbau (siehe Abb. 2-11) als Probe ein Gitter der Periode 2,3 μm mit 11 μm Nickel auf einem 525 μm Si-Substrat abgebildet. Das Gitter stand im Abstand von $s_d = 534 \text{ mm}$ hinter Position $z(0)$ der Röntgenzoomlinse. Der Detektor folgte strahlabwärts der Probe mit einem Abstand von 646 mm. Die Photonenenergie blieb konstant bei $E = 19 \text{ keV}$. Verändert wurde die Anzahl der Linsenelemente N in fünf verschiedenen Konfigurationen (siehe Abb. 7-4). Dadurch vergrößert sich die Brennweite f und damit auch die Vergrößerung M . Das Bildfeld FoV wird entsprechend kleiner. In diesem Fall wurde die Brennweite von minimal $f_1 = 190 \text{ mm}$ (Abb. 7-4 a) auf $f_5 = 308 \text{ mm}$ (Abb. 7-4 e) in fünf Schritten geändert. Dies führte zu einer Änderung der Vergrößerung M um den Faktor 1,5. Mit dem verwendeten Linsenlayout könnte bis zu einer Brennweite von $f = 7,7 \text{ m}$ gearbeitet werden, was aufgrund des begrenzten Detektorabstands nicht ausgenutzt werden konnte. Im Gesamtüberblick des Gitters kann man die Formtreue und das Rastermaß beurteilen. Je weiter man „reinzoomt“, desto deutlicher sieht man die einzelnen Lamellen des Gitters und die zueinander versetzten Brückenstrukturen. Das Gitter zeigt hier keine Defekte. Die im Bild zu erkennenden Verschmutzungen sind durch den Detektor verursacht, da in diesem Aufbau kein Flatfield zur Korrektur aufgenommen werden konnte. Die Zoomlinse ermöglicht, eine Probe in einem Gesamtüberblick, das heißt mit großem Bildfeld, zu analysieren und darin erkannte Details durch Zoomen ohne Änderung des Mikroskopaufbaus mit stärkerer Vergrößerung genauer untersuchen zu können.



- a)** $f_1 = 190$ mm
 $N = 44$ (config. #1)
 $M_1 = 1.88$
 $\text{FoV} = (219 \times 328) \mu\text{m}^2$
- b)** $f_2 = 211$ mm
 $N = 38$ (config. #2)
 $M_2 = 2.00$
 $\text{FoV} = (174 \times 261) \mu\text{m}^2$
- c)** $f_3 = 242$ mm
 $N = 34$ (config. #3)
 $M_3 = 2.21$
 $\text{FoV} = (133 \times 199) \mu\text{m}^2$
- d)** $f_4 = 270$ mm
 $N = 32$ (config. #4)
 $M_4 = 2.45$
 $\text{FoV} = (102 \times 153) \mu\text{m}^2$
- e)** $f_5 = 308$ mm
 $N = 28$ (config. #5)
 $M_5 = 2.86$
 $\text{FoV} = (68 \times 103) \mu\text{m}^2$

Abb. 7-4: Schattenwurfmikroskopie bei einer Photonenenergie von $E = 19$ keV zur Abbildung eines $11 \mu\text{m}$ starken Nickel-Gitters auf einem $525 \mu\text{m}$ starken Si-Substrat der Periode $2,3 \mu\text{m}$; Zoomlinse als fokussierende Optik in fünf Konfigurationen a)-e) mit resultierender größer werdender Brennweite f ; Vergrößerung M und kleiner werdendem Bildfeld FoV

7.2 Untersuchung einer anwendungsspezifischen Röntgenzoomlinse

In Kapitel 6.2.1 wurde das entworfene Zoomlinsenlayout 1773_00_A0 #1 und #2 für das Strahlrohr ID01, ESRF beschrieben. Die Hauptaufgabe der Zoomlinse ist es, den Brennpunkt für neun bestimmte Photonenenergien ortsfest zu halten. Dadurch soll im Vollfeldbeugungs-Mikroskopaufbau die Bildweite und auch die Vergrößerung über die verschiedenen Energien hinweg konstant gehalten werden. Zunächst wurde sowohl eine Piezozoomlinse als auch eine Exzenterzoomlinse strahlaufwärts eines Siemenssterns platziert (siehe Abb. 7-5 links). Daraufhin konnten mit Ptychographie die Lage und Größe des Brennpunktes für verschiedene Konfigurationen und Energien ermittelt werden.

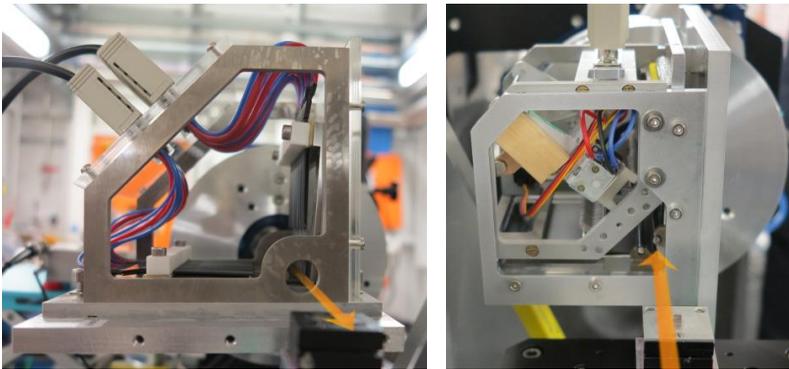


Abb. 7-5: Strahlrohr ID01, ESRF mit Piezozoomlinse vor der Probe zur Fokusmessung (links) und Exzenterzoomlinse zur Abbildung als Objektiv im FFDXM Aufbau nach der Probe (rechts) sowie orange eingezeichnetem Strahlverlauf

Die ausgerichtete Zoomlinse wurde bei 11 keV mit einem Detektor 0,6 m strahlabwärts aufgenommen und die Bewegungsfunktion und Auslenkung der Zoomlinsenfinger getestet (siehe Abb. 7-6). Die Zoomlinsen zeigten eine ausreichende Auslenkung aller Zoomlinsenfinger und eine sehr gut im oberen Drittel der 400 μm hohen Strukturen gekreuzt montierte Punktfokuslinse.

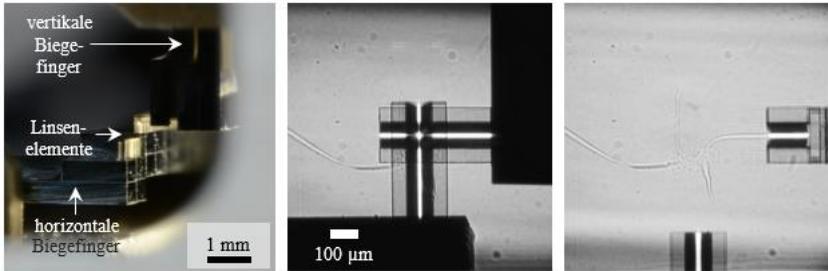


Abb. 7-6: Nahaufnahme der Röntgenzoomlinse (1773_00_A0 #2) mit Apertur $A = 98 \mu\text{m}$. Die ersten zwei Biegefingerring sind aus dem Strahl gebogen, alle anderen Linsenelemente sind im Strahl ausgerichtet (links); ausgerichtete Piezozoomlinse mit $N = 6$ Linsenelemente je Fokussierichtung im Strahl (mittig) und alle Biegefingerring aus dem Strahl gebogen (rechts) [19]

Die Exzenterzoomlinse wurde durch eine Reihe von Ptychographie-Scans an einem Siemensstern Testmuster optisch charakterisiert. Das beleuchtete Objekt und das Wellenfeld wurden von ESRF Mitarbeitern mit PyNX.Ptycho rekonstruiert, einem offenen Quellcode für die zweidimensionale ptychographische Rekonstruktion [92]. Dabei wurden die Strahlprofile der Zoomlinse in Konfiguration #5 bei 11,103 keV aufgenommen (siehe Abb. 7-7).

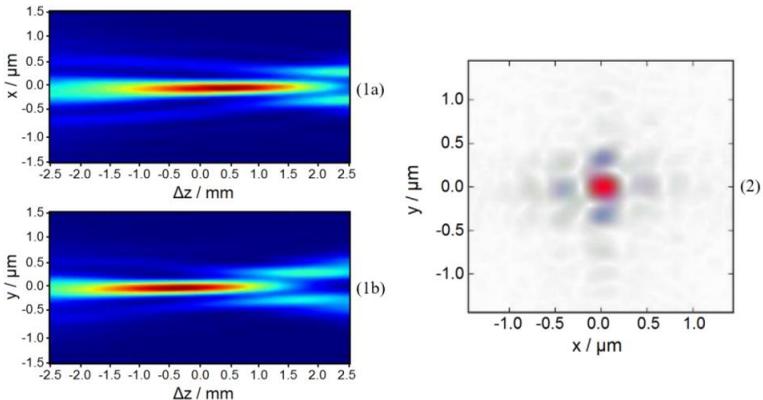


Abb. 7-7: Strahlprofile der Röntgenzoomlinse in Konfiguration #5 bei 11,103 keV, die den Verlauf der Fokusprofile entlang des Strahlwegs in horizontaler (1a) und vertikaler (1b) Richtung zeigen; eine Punkt fokussierung wird erreicht, wie das Strahlprofil in der Fokusebene zeigt (2) [19].

Auf der linken Seite sind die Fokusprofile entlang des Strahlengangs in horizontaler (1a) und vertikaler (1b) Richtung dargestellt. Die beabsichtigte Differenz zwischen horizontalem und vertikalem Brennpunkt (siehe Kapitel 6.2.1) wird deutlich (siehe Abb. 7-7). Rechts im Bild sieht man den erreichten Punktfokus, dargestellt durch die Intensitätsverteilung in der Fokusebene.

Weitere Ptychographie-Messungen wurden in verschiedenen Konfigurationen und bei unterschiedlichen Energien durchgeführt. Alle rekonstruierten Fokusabstände f_d sind mit der Lage des Brennpunktes auf der optischen Achse $z(F')$ angegeben. Ausgehend von der Intensitätsverteilung in den Fokusprofilen in horizontaler und vertikaler Richtung wurde jeweils die Fokusgröße σ (FWHM) für jede Pixelspalte der optischen Achse aufgetragen (siehe Abb. 7-8). Die Diagramme werden aufgrund der großen Anzahl von bis zu 500 Datenpunkten als Linien und nicht als Punkte dargestellt.

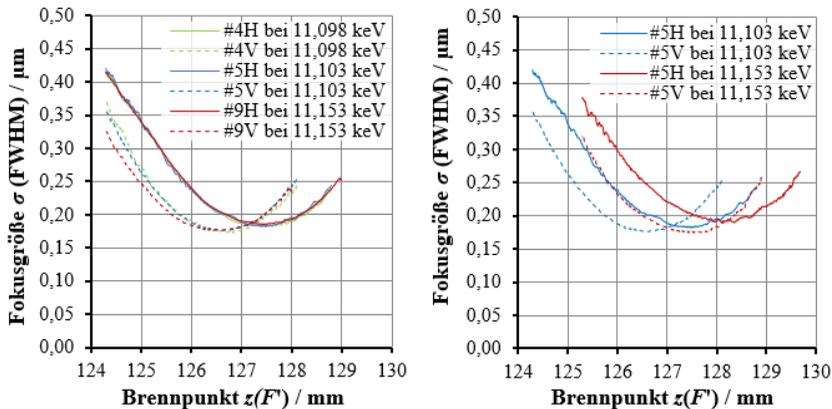


Abb. 7-8: Ergebnisse der ptychographischen Rekonstruktion der Zoomlinse mit ortsfester Lage des Brennpunkts $z(F')$ und Fokusgröße σ in drei Konfigurationen bei der jeweils vorgesehenen Photonenergie (links) und die Verschiebung in Konfiguration #5 im Vergleich bei 50 eV höherer Photonenergie (rechts) [19]

Anhand der drei gewählten Konfigurationen #4, #5 und #9 konnte gezeigt werden, dass der Brennpunkt für die ausgewählten Energien konstant in seiner Soll-Position gehalten werden kann (siehe Abb. 7-8 links). Zur

Demonstration wurde weiterhin gezeigt, wie weit sich der Brennpunkt einer CRL verschiebt, wenn sie nicht entsprechend angepasst wird. Dazu wurde die Zoomlinse in Konfiguration #5 sowohl in ihrer vorgesehenen Energie als auch mit einer um 50 eV höheren Energie untersucht (siehe Abb. 7-8 rechts). Dabei wurde eine Fokusverschiebung von circa 0,8 mm beobachtet. Die Verschiebung stimmt mit den simulierten Werten überein. Diese Verschiebung sollte vermieden werden, da sie die Vergrößerung M ändert und die Probe unscharf abgebildet wird. In einem weiteren Versuch wurde die Zoomlinse schließlich als Mikroskopobjektiv im FFDXM-Aufbau in Transmission verwendet. In Tabelle 7-2 sind die mittels Ptychographie rekonstruierten Fokusabstände f_d und die Punktfokusgrößen σ im Vergleich zu ihren simulierten Werten dargestellt.

Tabelle 7-2: Vergleich der Fokusabstände und Fokusgrößen, die durch ptychographische Rekonstruktionen und durch Simulationen für die entworfene Zoomlinse erhalten wurden. Gezeigt werden Ergebnisse der Konfigurationen #4, #5 und #9 in ihrer vorgesehenen Photonenenergie und Konfiguration #5 zusätzlich bei 50 eV über der vorgesehenen Photonenenergie [19].

# Konfiguration	E / keV	horizontaler Fokusabstand $f_{d,H} / \text{mm gemessen}$ (simuliert)	vertikaler Fokusabstand $f_{d,V} / \text{mm gemessen}$ (simuliert)	$\Delta f_{d,H}$ (gemessen – simuliert) absolut / mm und (relativ / %)	$\Delta f_{d,V}$ (gemessen – simuliert) absolut / mm und (relativ / %)	Astigmatismus $\Delta(f_{d,H} - f_{d,V}) / \text{mm gemessen}$ (simuliert)	horizontale Fokusgröße $\sigma_H / \mu\text{m gemessen}$ (berechnet)	Vertikale Fokusgröße $\sigma_V / \mu\text{m gemessen}$ (berechnet)
4	11.098	127.377 (127.377)	126.602 (126.589)	0.000 (0.00)	0.013 (0.01)	0.775 (0.788)	0.183 (0.167)	0.176 (0.080)
5	11.103	127.397 (127.372)	126.650 (126.584)	0.025 (0.02)	0.066 (0.05)	0.747 (0.788)	0.182 (0.167)	0.175 (0.080)
9	11.153	127.406 (127.389)	126.544 (126.601)	0.017 (0.01)	-0.057 (-0.04)	0.862 (0.788)	0.184 (0.167)	0.175 (0.080)
5	11.153	128.129 (128.209)	127.488 (127.417)	-0.080 (-0.06)	0.071 (0.06)	0.641 (0.792)	0.193 (0.167)	0.176 (0.080)

In einem weiteren Versuch wurde die Zoomlinse schließlich als Mikroskopobjektiv im FFDXM-Aufbau in Transmission verwendet. Ein Testmuster wurde im Abstand $s_d = (67 \pm 1)$ mm strahlaufwärts der Linse positioniert. Zwei Blenden mit einer Öffnung von 0,3 mm wurden vor die Probe gestellt, um die Apertur der Zoomlinse zu begrenzen. Der Detektor befand sich strahlabwärts der Zoomlinse mit $w_d = 6,5$ m (siehe Abb. 6-4). Die Vergrößerung betrug somit $M \sim 65$. Eine Reihe von Bildern wurde aufgenommen, um die Auflösung der Zoomlinse mit unterschiedlichen Konfigurationen und bei unterschiedlichen Energien zu untersuchen. Die gesamte Teststruktur wurde mit der Zoomlinse in Konfiguration #6 bei $E = 11,103$ keV mit einem Bildfeld von $\text{FoV} = 86 \mu\text{m} \times 86 \mu\text{m}$ aufgenommen (siehe Abb. 7-9 oben links). Eine Detailansicht zeigt die kleinsten aufgelösten Strukturen (siehe Abb. 7-9 oben rechts). Unten in dieser Abbildung sind drei Bilder dargestellt, die in (a) mit Konfiguration #6 bei ihrer vorgesehenen Energie von 11,103 keV und in (b) mit Konfiguration #9 bei ihrer vorgesehenen Energie von 11,148 keV aufgenommen wurden. Beide weisen die gleiche Abbildungsqualität auf, die 150 nm Linien sind aufgelöst. Abbildung 7-11 (c) wurde in Konfiguration #6 aufgenommen, aber bei einer Energie von 11,148 keV, also nicht mehr fokussiert. Im Vergleich zu (b) zeigt das Bild (c) verbreiterte Streifen zwischen den strukturierten Feldern und signifikante Randeffekte, die auf die Unschärfe der Linse hinweisen. Die 100 nm Linien sind nicht auflösbar, da sie mit nur zwei Pixeln pro Zeile und Raum in der Detektorebene unterabgetastet sind. Weiterhin ist mit der adaptiven Zoomlinse die gemessene Änderung der Vergrößerung (Vergleich der Ergebnisse aus (a) und (b)) um 35 % kleiner als die zu erwartende Änderung für eine chromatische CRL (Vergleich der Ergebnisse aus (a) und (c)). Die Bilder des Testmusters bestätigten, dass die gewünschte Auflösung von $\sigma_{\min} = 400$ nm pro Linienpaar für die charakterisierte Zoomlinse erreicht wurde. Die erreichbare Auflösung des Mikroskopieaufbaus wurde durch die Detektorauflösung eingeschränkt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Ptychographie-Scans mit einer gemessenen Fokusgröße von $\sigma \sim 180$ nm ist mit der Röntgenzoomlinse eine Auflösung von 350 nm pro Linienpaar erreichbar [19].

Die für die Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FFDXM) speziell entworfene und gefertigte Linse 1773_00_A0 #2 wurde erfolgreich in einer voll

funktionsfähigen Röntgenzoomlinse am Strahlrohr ID01 der ESRF getestet. Für die in einem resonanten Energiescan benötigten neun festen Energien konnte der Brennpunkt auf $100\ \mu\text{m}$ konstant gehalten werden. Damit blieb sowohl die Bildweite als auch der Vergrößerungsmaßstab des Mikroskop-aufbaus konstant, ohne die Probe, das Objektiv oder den Detektor bewegen zu müssen. Die Bilder wurden in einem Bildfeld von $86\ \mu\text{m} \times 86\ \mu\text{m}$ mit der geforderten Auflösung von $400\ \text{nm}$ pro Linienpaar scharf abgebildet.

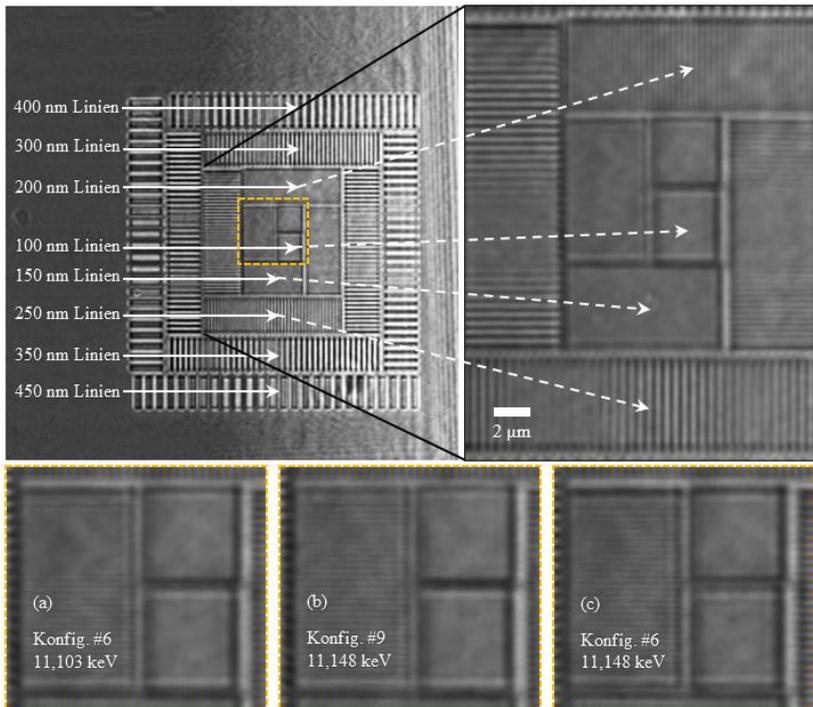


Abb. 7-9: Testmuster mit vertikalen und horizontalen Linienstrukturen mit der Röntgenzoomlinse bei einem FoV von $86\ \mu\text{m} \times 86\ \mu\text{m}$ in Konfiguration #6 bei $E = 11,103\ \text{keV}$ abgebildet (oben links); detailliertere Ansicht mit kleinsten auflösbaren Strukturen (oben rechts); Vergleich von (a) Konfiguration #6 mit vorgesehener Energie von $11,103\ \text{keV}$ und (b) Konfiguration #9 mit vorgesehener Energie von $11,148\ \text{keV}$ und (c) nicht mehr fokussierende Konfiguration #6 bei der Energie von $11,148\ \text{keV}$ [19]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmalig eine Röntgenzoomlinse mit einem Bauvolumen von weniger als 1,7 Litern und einer Masse von nur 0,8 kg entwickelt, die erfolgreich in Experimenten der Röntgen-Vollfeldmikroskopie eingesetzt wurde. Aufgrund ihres kleinen Bauvolumens und der lithographischen Fertigung der Linsen ist sie den heute üblicherweise eingesetzten achromatischen oder brennweitenanpassbaren Systemen wie Kirkpatrick-Baez-Spiegel oder Transfokatoren in der Bildgebung weit überlegen. Denn das geringe Gewicht und die einfache Positionierung im Röntgenstrahl ermöglichen einen sehr flexiblen Einsatz, auch in bereits bestehenden röntgenoptischen Aufbauten. Dadurch werden Experimente in der Röntgen-Vollfeldmikroskopie möglich, die bisher nur mit chromatischen Optiken durchgeführt werden konnten. Dort werden abbildende Optiken benötigt, wofür brechende Röntgenlinsen (Englisch „Compound Refractive X-ray Lens“, CRL) für Photonenenergien oberhalb von 10 keV besonders gut geeignet sind. Deren große chromatische Aberration wird nun durch die Brennweitenanpassung der Röntgenzoomlinse überwunden und somit können Röntgenzoomlinsen erstmalig auch in der Bildgebung eingesetzt werden. Über einen breiten Photonenenergiebereich sind so konstante optische Eigenschaften erreichbar. Gerade für Untersuchungsmethoden, bei denen eine Energieänderung essentiell ist, ist eine Röntgenlinse mit variabler Brennweite von unschätzbarem Vorteil. Durch eine brennweitenanpassbare CRL lässt sich zudem der Vergrößerungsmaßstab eines Mikroskops einstellen, ohne die Linse verschieben zu müssen.

Eine Röntgenzoomlinse basiert auf den am IMT röntgentiefenlithografisch aus SU-8-Resist hergestellten CRLs. Die Grundidee ist, die Brechkraft der Linse zu ändern, indem einzelne Linsenelemente aus dem Strahlengang genommen beziehungsweise präzise wieder in den Strahl gestellt werden. Dazu wurde in dieser Arbeit ein flexibles Substrat entwickelt, das senkrecht zur optischen Achse der Linse fingerartig eingeschnitten ist. Jeder der biegbaren Zoomlinsenfinger trägt an seinem Ende ein oder mehrere

Linsenelemente. Die einzelnen Biegefingern können unabhängig aus dem Strahlengang gebogen werden und federn reversibel auch wieder zurück. Ein Endanschlag definiert dabei die exakte Position aller Linsenelemente im Strahlengang.

Drei verschiedene Prototypen mit unterschiedlichen Aktorprinzipien wurden im Rahmen dieser Arbeit entworfen und aufgebaut. Deren verschiedene Vorzüge erlauben einen idealen Aufbau und die Anpassung an unterschiedlichste Experimente. Die eingesetzten Aktortypen waren Piezobiegeaktoren, Formgedächtnisaktoren und von einem Schrittmotor und einem Servo bewegte Exzentrerscheiben. Die Exzentrerscheiben- und Formgedächtniszoomlinse können beide bis zu 40 Biegefingern bewegen und Linsenelemente mit Strukturhöhen bis zu 2 mm aus dem Strahlengang biegen. Damit sind auch typische Beleuchtungslinsen mit sehr großer Apertur sowie Fresnel-Linsen brennweitenanpassbar. Als Beleuchtungsoptiken eingesetzt, bieten Zoomlinsen eine individuell einstellbare Größe und Distanz des beleuchteten Bildfeldes. Die Exzenterzoomlinse ist dabei am einfachsten aufgebaut und leicht an verschiedene Linsenlayouts anpassbar, jedoch mit einer Schaltzeit von einer Minute langsam. Vorteile der Exzenterzoomlinse sind die einfache Ansteuerung und der mögliche manuelle Einsatz durch die bistabilen Schaltzustände. Dadurch wird auch ein stromloser Einsatz ermöglicht. Die optischen Eigenschaften der Zoomlinse bleiben im abgeschalteten Zustand erhalten. Die Formgedächtniszoomlinse kann die Brennweite in nur etwa 2 s anpassen, der Aufbau ist jedoch aufwändig. Mit einigen Verbesserungen des Konstruktionskonzepts ist diese Variante vielversprechend. Die Piezozoomlinse ist mit 24 Biegefingern und circa 10 ms Schaltzeit die schnellste Variante und kann für schnelle Spektroskopiemessungen eingesetzt werden. Sie kann Linsenelemente mit Strukturhöhen von maximal 400 μm auslenken, was für die Anwendung in der Röntgen-Vollfeldmikroskopie ausreichend ist.

Sowohl für die Piezozoomlinse als auch für die Exzenterzoomlinse wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Ansteuerungselektronik entwickelt. Die gesamte Elektronik ist in einem getrennten Gehäuse untergebracht, um die Optik möglichst kompakt und leicht zu gestalten. Ein Programm ermöglicht die ferngesteuerte Auslenkung der Biegefingern durch den Anwender. So ist es

möglich, die Brennweite der Zoomlinse von außerhalb der Experimentierhütte einzustellen, ohne das Experiment zu unterbrechen.

Um das Potential einer Zoomlinse voll ausschöpfen zu können, war es notwendig, die bisher am IMT hergestellten SU-8-Linsen entsprechend zu modifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein spezielles Zoomlinsenlayout mit verschiedenen CRLs mit optimierten Eigenschaften berechnet und umgesetzt. Ein neu entwickeltes Programm zur Berechnung der Linsen berücksichtigt die speziellen Anforderungen an eine Zoomlinse. Die Abstände zwischen den Linsenelementen wurden vergrößert, um Kollisionen benachbarter Linsenelemente beim Schalten der Biegefingern zu vermeiden. Besonders wichtig war es, die Radien der Linsenelemente so zu optimieren, dass die horizontale und die vertikale Fokusebene möglichst genau zusammenfallen, um Astigmatismus zu vermeiden. Um Zoomlinsen ideal bei flexiblen Anwendungen in der Beleuchtung und der Mikroskopie (z. B. Anpassung des Vergrößerungsmaßstabs) einsetzen zu können, ist es notwendig, die Brennweite stufenweise in möglichst kleinen Schritten verändern zu können. Dafür wurden Linsendesigns mit Linsenelementen mit unterschiedlichen Krümmungsradien erarbeitet und umgesetzt. In drei anwendungsspezifischen Zoomlinsenlayouts wurden Konfigurationen für die Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskopie (FFDXM) für das Strahlrohr ID01 an der ESRF in Grenoble entworfen, welche die Bildweite und den Vergrößerungsmaßstab über ausgesuchte Photonenergien konstant halten. Mit dem entwickelten Programm zur Auslegung von Zoomlinsen kann in Zukunft schnell ein optimiertes Layout für spezielle Anwenderwünsche entworfen werden. Besonders die getrennte Berechnung der horizontalen und vertikalen Linsenreihe zur astigmatismusfreien Abstimmung der Lage von Brennpunkt- oder Detektorebene ergeben eine optimierte Auflösung der Röntgenlinsen.

Die Funktionsfähigkeit der Zoomlinse wurde in verschiedenen Experimenten getestet. Um möglichst kleine Fokusgrößen für eine sehr gute optische Auflösung zu erreichen, muss eine sehr präzise und vor allem wiederholbare Positionierung der Linsenelemente im Strahlengang erzielt werden. Die Präzision der Positionierung wurde mit Klingentests und Ptychographie-Scans nachgewiesen. Die ermittelten Werte für die Lage und Größe des Brennpunktes wurden mit simulierten Werten des jeweils genutzten

Linsenslayouts verglichen. Für Linse 1405_A0_00 #10 wurde beispielsweise bei einer Photonenenergie von 10 keV ein Fokusabstand von 122 mm mit einer vertikalen Fokusgröße von 450 nm ermittelt. Die Brennweiten lagen innerhalb der Messtoleranzen und die Fokusgrößen in vergleichbarem Bereich wie die von herkömmlichen CRLs mit fester Brennweite. Damit arbeitet die Röntgenzoomlinse sehr präzise und die Auflösung einer CRL verschlechtert sich nicht durch den Einsatz in einer Zoomlinse. Das Funktionsprinzip der Röntgenzoomlinse wurde dadurch erfolgreich nachgewiesen.

In einem Experiment am Strahlrohr ID01 konnte schließlich eine voll funktionsfähige Zoomlinse mit anwendungsspezifischem Linsenslayout getestet werden. Das Konzept der speziell für das Vollfeldbeugungs-Röntgenmikroskop entworfenen Linse mit unterschiedlichen Krümmungsradien wurde bestätigt. Der Brennpunkt der Zoomlinse konnte für neun ausgewählte Photonenenergien um die Ge- K_{α} -Absorptionsenergie bei 11,103 keV sowohl für 5 eV als auch für 50 eV Schritte auf 100 μm genau konstant gehalten werden. Sowohl die Bildweite von 6,5 m als auch der damit erzielte Vergrößerungsmaßstab von 65 blieben konstant ohne Komponenten des Mikroskops verschieben zu müssen. Dabei wurden Fokusgrößen von circa 180 nm gemessen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten Zoomlinsen mit SU-8-Linsen eine sehr flexible Bereicherung der Einsatzmöglichkeiten der CRLs darstellen. Gerade für spezielle Energien und exakte oder sehr kleine Energieschritte, beispielsweise für resonante Energiescans oder um reziproke radiale Raumschans in der Diffraktometrie zu ersetzen, können perfekt abgestimmte Linsenslayouts mit auf wenige Nanometer genau angepassten Krümmungsradien konzipiert werden.

Mit den in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen haben die Röntgenzoomlinsen bereits eine hohe Anwendungsreife erreicht und können für verschiedene Anwendungen in Kleinserie hergestellt werden. Weiteres Verbesserungs- und Optimierungspotential liegt im Einsatz von integrierten Blenden und optischen Korrekturlementen. Direkt hinter der CRL auf Zoomlinsenfingern positionierte Blenden können Streustrahlung vollständig absorbieren und sperrige externe Strahlblenden ersetzen. Optische Korrekturlemente, auf Biegefingern platziert, könnten kleine, prozessbedingte Abweichungen im

Strahlengang korrigieren. Beide Ansätze versprechen eine weitere wesentliche Verbesserung der Bildqualität.

Die Röntgenzoomlinse kann weiterhin als universelles Werkzeug in der Entwicklung neuer optischer Instrumente eingesetzt werden, beispielsweise bei der Entwicklung der optischen Korrektur Elemente. So kann in einer Zoomlinse eine CRL zusammen mit verschiedenen Korrektur Elementen kombiniert und diese unter gleichen Bedingungen getestet und verglichen werden. Dazu würden diese auf verschiedenen Zoomlinsenringern befestigt, welche dann wahlweise in den Strahl gestellt werden können. Generell bietet die Zoomlinse die Möglichkeit einzelne Linsenelemente oder CRLs direkt vergleichend in einem Aufbau zu charakterisieren. Diese Möglichkeit wurde bereits mit einer Linienfokuslinse an der ESRF genutzt. Somit kann die Qualität von CRLs mit Hilfe der Zoomlinsen in Zukunft weiter verbessert werden.

Anhang

A Dokumentation zur elektronischen Ansteuerung

Die Piezozoomlinse erforderte die Entwicklung einer Verstärkerschnittstelle vom Mikrokontroller zu den Piezoaktoren. Die ausgewählten Piezoaktoren benötigen für die unipolare Zweidrahtverbindung einen Masseanschluss (GND) sowie eine potentialwechselnde Verbindung zwischen 0 V und 200 V. Der Potentialwechsel wird durch Schalten der digitalen Ein-/Ausgänge des Mikrokontroller Arduino Due gesteuert. Deren Ausgangsspannung von 3,3 V wird genutzt, um einen Bipolartransistor in einer Emitterschaltung zu schalten. Der Basisstrom des Transistors wird vom Ausgang eines J-K Flip-Flops gesteuert. Durch den Matrixaufbau ist die Anzahl schaltbarer Aktoren nicht durch die Anzahl der digitalen Ein-/Ausgänge des Mikrokontrollers begrenzt. Mit der verwendeten 8x6 Matrix können mit 15 Eingangssignalen (J₀-J₇, K, C₀-C₅) vom Mikrokontroller bis zu 48 Ausgangssignale (P₀-P₄₇) für die Steuerung der Piezoaktoren erzeugt werden.

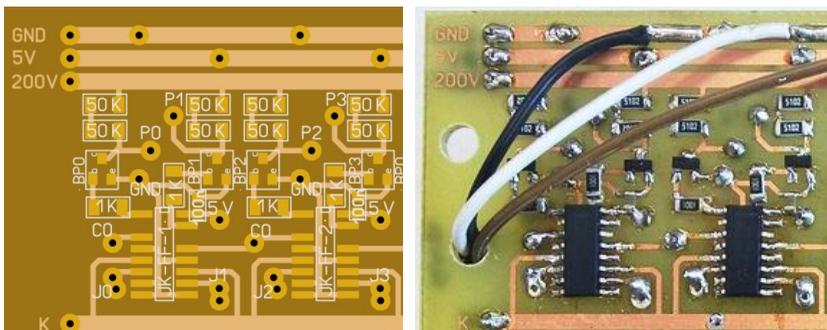


Abb. A-1: Detail der Schaltung über vier Ansteuerungseinheiten mit den vier Signalausgängen P₀-P₃ zu den Piezoaktoren (links) und Detailfoto der gefertigten Verstärkerschnittstelle (rechts)

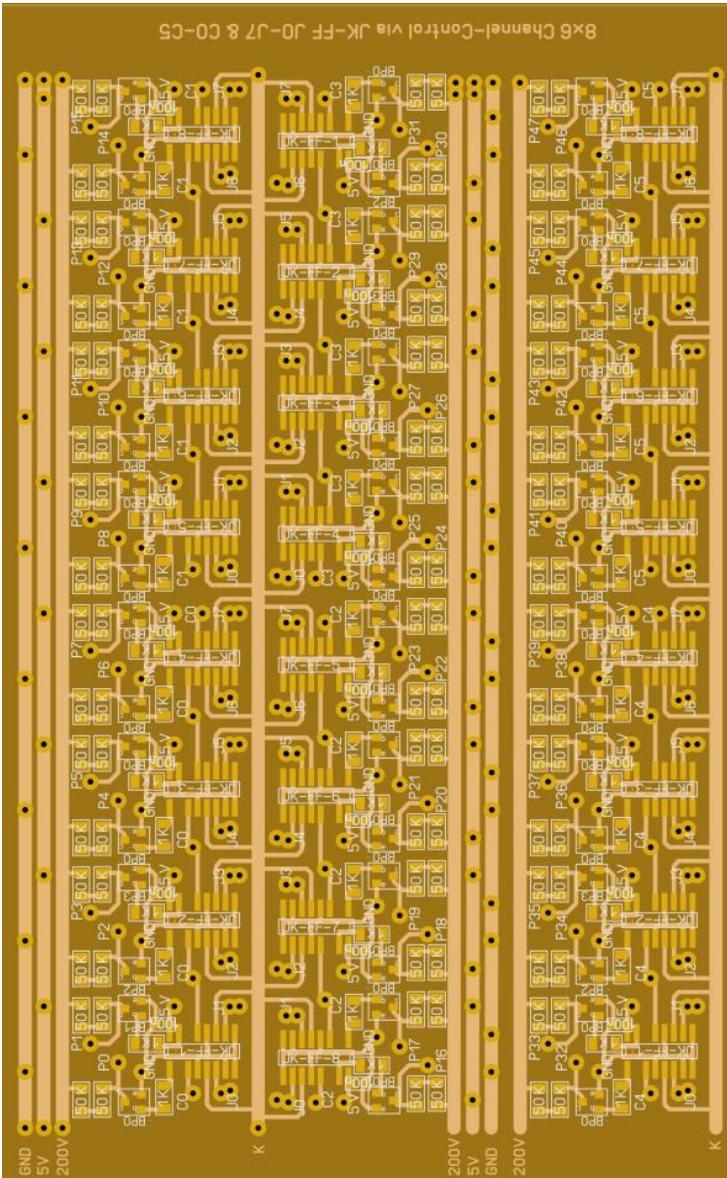


Abb. A-2: Leiterplattendesign der Verstärkerschnittstelle der Piezozoomlinse

Tabelle A-1: Zuordnung der Piezoaktoren (V_{01} - V_{24} , H_{01} - H_{24}) zu den D-Sub-Stecker Pins (V_1 - V_{25} , H_1 - H_{25}), Signalausgängen der Verstärkerschnitte (P_0 - P_{47}) und benötigter Steuerungssignale (J_0 - J_7 , C_0 - C_5)

Piezoaktor	D-Sub Pin	Signalausgang der Verstärkerschnittstelle	Steuerungssignale	Piezoaktor	D-Sub Pin	Signalausgang der Verstärkerschnittstelle	Steuerungssignale
V ₀₁	V25	P36	J ₄ C ₄	H ₀₁	H14	P23	J ₇ C ₂
V ₀₂	V12	P24	J ₀ C ₃	H ₀₂	H2	P11	J ₃ C ₁
V ₀₃	V24	P37	J ₅ C ₄	H ₀₃	H15	P22	J ₆ C ₂
V ₀₄	V11	P25	J ₁ C ₃	H ₀₄	H3	P10	J ₂ C ₁
V ₀₅	V23	P38	J ₆ C ₄	H ₀₅	H16	P21	J ₅ C ₂
V ₀₆	V10	P26	J ₂ C ₃	H ₀₆	H4	P9	J ₁ C ₁
V ₀₇	V22	P39	J ₇ C ₄	H ₀₇	H17	P20	J ₄ C ₂
V ₀₈	V9	P27	J ₃ C ₃	H ₀₈	H5	P8	J ₀ C ₁
V ₀₉	V21	P40	J ₀ C ₅	H ₀₉	H18	P19	J ₃ C ₂
V ₁₀	V8	P28	J ₄ C ₃	H ₁₀	H6	P7	J ₇ C ₀
V ₁₁	V20	P41	J ₁ C ₅	H ₁₁	H19	P18	J ₂ C ₂
V ₁₂	V7	P29	J ₅ C ₃	H ₁₂	H7	P6	J ₆ C ₀
V ₁₃	V19	P42	J ₂ C ₅	H ₁₃	H20	P17	J ₁ C ₂
V ₁₄	V6	P30	J ₆ C ₃	H ₁₄	H8	P5	J ₅ C ₀
V ₁₅	V18	P43	J ₃ C ₅	H ₁₅	H21	P16	J ₀ C ₂
V ₁₆	V5	P31	J ₇ C ₃	H ₁₆	H9	P4	J ₄ C ₀
V ₁₇	V17	P44	J ₄ C ₅	H ₁₇	H22	P15	J ₇ C ₁
V ₁₈	V4	P32	J ₀ C ₄	H ₁₈	H10	P3	J ₃ C ₀
V ₁₉	V16	P45	J ₅ C ₅	H ₁₉	H23	P14	J ₆ C ₁
V ₂₀	V3	P33	J ₁ C ₄	H ₂₀	H11	P2	J ₂ C ₀
V ₂₁	V15	P46	J ₆ C ₅	H ₂₁	H24	P13	J ₅ C ₁
V ₂₂	V2	P34	J ₂ C ₄	H ₂₂	H12	P1	J ₁ C ₀
V ₂₃	V14	P47	J ₇ C ₅	H ₂₃	H25	P12	J ₄ C ₁
V ₂₄	V1	P35	J ₃ C ₄	H ₂₄	H13	P0	J ₀ C ₀
	V13	GND			H1	GND	

B Linsenlayout 1773_00_A0

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Maskenlayout für die Herstellung von Röntgenzoomlinsen mittels Röntgentiefenlithografie erstellt (siehe Kapitel 2.2). Solch eine Maske bietet eine Layoutfläche von 20 mm x 60 mm. Diese Fläche wurde in zwölf Streifen unterteilt (Reihe 1-12), auf denen an beiden Rändern jeweils CRLs platziert werden (siehe Abb. B-1).

Tabelle B-1: Eigenschaften des neuen Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0

	Beschreibung	Zoomlinsen-Variante/ Z_N	$A / \mu\text{m}$	N	$b_L / \mu\text{m}$	$R_{\min} / \mu\text{m}$ ($R_1 / \mu\text{m}$)
#1	11,1 keV, Energiescan - 3 eV	Piezo / 24	98	66	50	7,0287
#2	11,1 keV, Energiescan - 5 eV	Piezo / 24	98	66	50	7,0287
#3	19,7 keV, Energiescan - 50 eV	Piezo / 24	98	30	50	7,9886
#4	15 keV, 1 % R -Änderung	Exzenter / 40	100	76	50	12,7824
#5	20 keV, 1 % R -Änderung	Exzenter / 40	200	38	50	16,1191
#6	17 keV, 2 % R -Änderung	Piezo / 24	150	66	50	16,4377
#7	25 keV, 2 % R -Änderung	Piezo / 24	250	22	50	13,6890
#8a	115 keV, Linienfokus	–	200	91	20	15,7500
#8b	115 keV, Linienfokus	–	250	63	20	17,0000
#9	25 keV, astigmatismusfrei	–	120	69/68	30	6,7 (9)
#10	25 keV, astigmatismusfrei	–	100	75/74	30	6,0 (7)
#11	10 keV, astigmatismusfrei	–	250	25/24	25	14,0 (20)
#12	15 keV, astigmatismusfrei	–	150	34/33	25	8,5 (10)
#13	8 keV, astigmatismusfrei	–	200	12/11	20	11,5 (15)
#14	8 keV, astigmatismusfrei	–	250	10/9	20	14,0 (16)

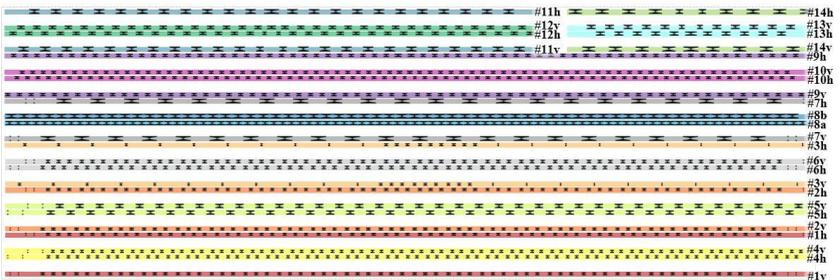


Abb. B-1: Linsenlayout 1773_00_A0 in einem Layoutfeld von 60 mm x 20 mm

Tabelle B-2: Parameter der Zoomlinslayouts 1773_00_A0 #1-#3 mit $A = 98 \mu\text{m}$

Elementnummer	CRL #1 ver.		CRL #1 hor.		CRL #2 ver.		CRL #2 hor.		CRL #3 ver.		CRL #3 hor.	
	z / mm	R / μm										
	#1	2,81	7,2792	3,21	7,4433	2,81	7,2792	3,21	7,4433	1,07	9,7323	1,47
#2	3,61	7,2792	4,01	7,4433	3,61	7,2792	4,01	7,4433	3,61	10,4207	4,01	10,5737
#3	4,41	7,2792	4,81	7,4433	4,41	7,2792	4,81	7,4433	6,15	11,1319	6,55	11,2930
#4	5,35	7,2450	5,75	7,4050	5,35	7,2715	5,75	7,4326	8,69	11,8657	9,09	12,0354
#5	6,15	7,2450	6,55	7,4050	6,15	7,2715	6,55	7,4326	11,23	12,6219	11,63	12,8004
#6	6,95	7,2450	7,35	7,4050	6,95	7,2715	7,35	7,4326	13,77	13,4000	14,17	13,5877
#7	7,89	7,3837	8,29	7,5467	7,89	7,4017	8,29	7,5654	16,31	14,1996	16,71	14,3969
#8	8,69	7,3837	9,09	7,5467	8,69	7,4017	9,09	7,5654	18,85	15,0200	19,25	15,2275
#9	9,49	7,3837	9,89	7,5467	9,49	7,4017	9,89	7,5654	21,39	15,8605	21,79	16,0787
#10	10,43	7,5276	10,83	7,6936	10,43	7,5368	10,83	7,7031	23,93	16,7204	24,33	16,9497
#11	11,23	7,5276	11,63	7,6936	11,23	7,5368	11,63	7,7031	26,47	17,5972	26,87	17,8409
#12	12,03	7,5276	12,43	7,6936	12,03	7,5368	12,43	7,7031	28,21	18,1111	28,61	17,9886
#13	12,97	7,6766	13,37	7,8456	12,97	7,6766	13,37	7,8456	29,01	8,8111	29,41	7,9886
#14	13,77	7,6766	14,17	7,8456	13,77	7,6766	14,17	7,8456	29,81	8,8111	30,21	7,9886
#15	14,57	7,6766	14,97	7,8456	14,57	7,6766	14,97	7,8456	30,75	8,8111	31,15	7,9886
#16	15,51	7,8306	15,91	8,0027	15,51	7,8210	15,91	7,9927	31,55	8,8111	31,95	7,9886
#17	16,31	7,8306	16,71	8,0027	16,31	7,8210	16,71	7,9927	32,35	8,8111	32,75	7,9886
#18	17,11	7,8306	17,51	8,0027	17,11	7,8210	17,51	7,9927	33,29	8,8111	33,69	7,9886
#19	18,05	7,9894	18,45	8,1646	18,05	7,9699	18,45	8,1443	34,09	8,8111	34,49	7,9886
#20	18,85	7,9894	19,25	8,1646	18,85	7,9699	19,25	8,1443	34,89	8,8111	35,29	7,9886
#21	19,65	7,9894	20,05	8,1646	19,65	7,9699	20,05	8,1443	36,63	21,0685	37,03	21,3068
#22	20,59	8,1530	20,99	8,3314	20,59	8,1231	20,99	8,3003	39,17	21,8815	39,57	22,1062
#23	21,39	8,1530	21,79	8,3314	21,39	8,1231	21,79	8,3003	41,71	22,6853	42,11	22,8962
#24	22,19	8,1530	22,59	8,3314	22,19	8,1231	22,59	8,3003	44,25	23,4791	44,65	23,6760
#25	23,13	8,1310	23,53	8,3051	23,13	8,1310	23,53	8,3051	46,79	24,2624	47,19	24,4452
#26	23,93	8,1310	24,33	8,3051	23,93	8,1310	24,33	8,3051	49,33	25,0348	49,73	25,2033
#27	24,73	8,1310	25,13	8,3051	24,73	8,1310	25,13	8,3051	51,87	25,7957	52,27	25,9497
#28	25,67	7,0500	26,07	7,0287	25,67	7,0500	26,07	7,0287	54,41	26,5445	54,81	26,6843
#29	26,47	7,0500	26,87	7,0287	26,47	7,0500	26,87	7,0287	56,95	27,2810	57,35	27,4066
#30	27,27	7,0500	27,67	7,0287	27,27	7,0500	27,67	7,0287	59,49	28,0047	59,89	28,1162
#31	28,21	7,0500	28,61	7,0287	28,21	7,0500	28,61	7,0287				
#32	29,01	7,0500	29,41	7,0287	29,01	7,0500	29,41	7,0287				
#33	29,81	7,0500	30,21	7,0287	29,81	7,0500	30,21	7,0287				
#34	30,75	7,0500	31,15	7,0287	30,75	7,0500	31,15	7,0287				
#35	31,55	7,0500	31,95	7,0287	31,55	7,0500	31,95	7,0287				
#36	32,35	7,0500	32,75	7,0287	32,35	7,0500	32,75	7,0287				
#37	33,29	7,0500	33,69	7,0287	33,29	7,0500	33,69	7,0287				
#38	34,09	7,0500	34,49	7,0287	34,09	7,0500	34,49	7,0287				
#39	34,89	7,0500	35,29	7,0287	34,89	7,0500	35,29	7,0287				
#40	35,83	8,1310	36,23	8,3051	35,83	8,1310	36,23	8,3051				

#41	36,63	8,1310	37,03	8,3051	36,63	8,1310	37,03	8,3051
#42	37,43	8,1310	37,83	8,3051	37,43	8,1310	37,83	8,3051
#43	38,37	8,1530	38,77	8,3314	38,37	8,1231	38,77	8,3003
#44	39,17	8,1530	39,57	8,3314	39,17	8,1231	39,57	8,3003
#45	39,97	8,1530	40,37	8,3314	39,97	8,1231	40,37	8,3003
#46	40,91	7,9894	41,31	8,1646	40,91	7,9699	41,31	8,1443
#47	41,71	7,9894	42,11	8,1646	41,71	7,9699	42,11	8,1443
#48	42,51	7,9894	42,91	8,1646	42,51	7,9699	42,91	8,1443
#49	43,45	7,8306	43,85	8,0027	43,45	7,8210	43,85	7,9927
#50	44,25	7,8306	44,65	8,0027	44,25	7,8210	44,65	7,9927
#51	45,05	7,8306	45,45	8,0027	45,05	7,8210	45,45	7,9927
#52	45,99	7,6766	46,39	7,8456	45,99	7,6766	46,39	7,8456
#53	46,79	7,6766	47,19	7,8456	46,79	7,6766	47,19	7,8456
#54	47,59	7,6766	47,99	7,8456	47,59	7,6766	47,99	7,8456
#55	48,53	7,5276	48,93	7,6936	48,53	7,5368	48,93	7,7031
#56	49,33	7,5276	49,73	7,6936	49,33	7,5368	49,73	7,7031
#57	50,13	7,5276	50,53	7,6936	50,13	7,5368	50,53	7,7031
#58	51,07	7,3837	51,47	7,5467	51,07	7,4017	51,47	7,5654
#59	51,87	7,3837	52,27	7,5467	51,87	7,4017	52,27	7,5654
#60	52,67	7,3837	53,07	7,5467	52,67	7,4017	53,07	7,5654
#61	53,61	7,2450	54,01	7,4050	53,61	7,2715	54,01	7,4326
#62	54,41	7,2450	54,81	7,4050	54,41	7,2715	54,81	7,4326
#63	55,21	7,2450	55,61	7,4050	55,21	7,2715	55,61	7,4326
#64	56,15	7,2792	56,55	7,4433	56,15	7,2792	56,55	7,4433
#65	56,95	7,2792	57,35	7,4433	56,95	7,2792	57,35	7,4433
#66	57,75	7,2792	58,15	7,4433	57,75	7,2792	58,15	7,4433

Tabelle B-3: Parameter der Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 #4-#7

Elementnummer	CRL #4 ver.		CRL #4 hor.		CRL #5 ver.		CRL #5 hor.		CRL #6 ver.		CRL #6 hor.	
	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m
#1	3,58	13,0944	3,24	13,1964	4,09	16,6442	3,41	16,7106	3,21	17,0214	2,81	17,1102
#2	4,26	13,0944	3,92	13,1964	5,59	16,6135	4,91	16,6772	4,01	17,0214	3,61	17,1102
#3	5,08	13,0690	4,74	13,1700	7,09	16,5850	6,41	16,6439	4,81	17,0214	4,41	17,1102
#4	5,76	13,0690	5,42	13,1700	8,59	16,5544	7,91	16,6107	5,75	16,9609	5,35	17,0420
#5	6,58	13,0473	6,24	13,1437	10,09	16,5252	9,41	16,5775	6,55	16,9609	6,15	17,0420
#6	7,26	13,0473	6,92	13,1437	11,59	16,4949	10,91	16,5444	7,35	16,9609	6,95	17,0420
#7	8,08	13,0251	7,74	13,1175	13,09	16,4667	12,41	16,5114	8,29	16,9021	7,89	16,9740
#8	8,76	13,0251	8,42	13,1175	14,59	16,4368	13,91	16,4784	9,09	16,9021	8,69	16,9740
#9	9,58	13,0047	9,24	13,0913	16,09	16,4074	15,41	16,4455	9,89	16,9021	9,49	16,9740
#10	10,26	13,0047	9,92	13,0913	17,59	16,3781	16,91	16,4126	10,83	16,8419	10,43	16,9064
#11	11,08	12,9827	10,74	13,0652	19,09	16,3496	18,41	16,3799	11,63	16,8419	11,23	16,9064
#12	11,76	12,9827	11,42	13,0652	20,59	16,3203	19,91	16,3472	12,43	16,8419	12,03	16,9064
#13	12,58	12,9619	12,24	13,0391	22,09	16,2914	21,41	16,3145	13,37	16,7833	12,97	16,8389

#14	13,26	12,9619	12,92	13,0391	23,59	16,2624	22,91	16,2819	14,17	16,7833	13,77	16,8389
#15	14,08	12,9402	13,74	13,0130	25,09	16,2337	24,41	16,2494	14,97	16,7833	14,57	16,8389
#16	14,76	12,9402	14,42	13,0130	26,59	16,2050	25,91	16,2170	15,91	16,7248	15,51	16,7718
#17	15,58	12,9214	15,24	12,9870	28,09	16,1763	27,41	16,1846	16,71	16,7248	16,31	16,7718
#18	16,26	12,9214	15,92	12,9870	29,59	16,1477	28,91	16,1520	17,51	16,7248	17,11	16,7718
#19	17,08	12,9013	16,74	12,9611	31,09	16,1191	30,41	16,1203	18,45	16,6668	18,05	16,7049
#20	17,76	12,9013	17,42	12,9611	32,59	16,1333	31,91	16,1361	19,25	16,6668	18,85	16,7049
#21	18,58	12,8825	18,24	12,9352	34,09	16,1619	33,41	16,1684	20,05	16,6668	19,65	16,7049
#22	19,26	12,8825	18,92	12,9352	35,59	16,1905	34,91	16,2008	20,99	16,6089	20,59	16,6383
#23	20,08	12,8619	19,74	12,9094	37,09	16,2192	36,41	16,2332	21,79	16,6089	21,39	16,6383
#24	20,76	12,8619	20,42	12,9094	38,59	16,2480	37,91	16,2657	22,59	16,6089	22,19	16,6383
#25	21,58	12,8433	21,24	12,8836	40,09	16,2769	39,41	16,2982	23,53	16,5515	23,13	16,5719
#26	22,26	12,8433	21,92	12,8836	41,59	16,3054	40,91	16,3308	24,33	16,5515	23,93	16,5719
#27	23,08	12,8240	22,74	12,8579	43,09	16,3343	42,41	16,3635	25,13	16,5515	24,73	16,5719
#28	23,76	12,8240	23,42	12,8579	44,59	16,3633	43,91	16,3962	26,07	16,4945	25,67	16,5058
#29	24,58	12,8043	24,24	12,8322	46,09	16,3925	45,41	16,4291	26,87	16,4945	26,47	16,5058
#30	25,26	12,8043	24,92	12,8322	47,59	16,4213	46,91	16,4619	27,67	16,4945	27,27	16,5058
#31	26,08	12,7853	25,74	12,8066	49,09	16,4497	48,41	16,4949	28,61	16,4377	28,21	16,4400
#32	26,76	12,7853	26,42	12,8066	50,59	16,4790	49,91	16,5279	29,41	16,4377	29,01	16,4400
#33	27,58	12,7663	27,24	12,7810	52,09	16,5082	51,41	16,5609	30,21	16,4377	29,81	16,4400
#34	28,26	12,7663	27,92	12,7810	53,59	16,5366	52,91	16,5941	31,15	16,4662	30,75	16,4729
#35	29,08	12,7472	28,74	12,7555	55,09	16,5658	54,41	16,6273	31,95	16,4662	31,55	16,4729
#36	29,76	12,7472	29,42	12,7555	56,59	16,5946	55,91	16,6606	32,75	16,4662	32,35	16,4729
#37	30,58	12,7284	30,24	12,7300	58,09	16,6229	57,41	16,6939	33,69	16,5230	33,29	16,5388
#38	31,26	12,7284	30,92	12,7300	59,59	16,6525	58,91	16,7273	34,49	16,5230	34,09	16,5388
#39	32,08	12,7378	31,74	12,7427					34,89	16,5388	35,29	16,5230
#40	32,76	12,7378	32,42	12,7427					35,83	16,6051	36,23	16,5799
#41	33,58	12,7567	33,24	12,7682					36,63	16,6051	37,03	16,5799
#42	34,26	12,7567	33,92	12,7682					37,43	16,6051	37,83	16,5799
#43	35,08	12,7755	34,74	12,7938					38,37	16,6715	38,77	16,6371
#44	35,76	12,7755	35,42	12,7938					39,17	16,6715	39,57	16,6371
#45	36,58	12,7945	36,24	12,8194					39,97	16,6715	40,37	16,6371
#46	37,26	12,7945	36,92	12,8194					40,91	16,7383	41,31	16,6935
#47	38,08	12,8131	37,74	12,8450					41,71	16,7383	42,11	16,6935
#48	38,76	12,8131	38,42	12,8450					42,51	16,7383	42,91	16,6935
#49	39,58	12,8313	39,24	12,8707					43,45	16,8053	43,85	16,7514
#50	40,26	12,8313	39,92	12,8707					44,25	16,8053	44,65	16,7514
#51	41,08	12,8504	40,74	12,8965					45,45	16,7514	45,05	16,8053
#52	41,76	12,8504	41,42	12,8965					46,39	16,8068	45,99	16,8726
#53	42,58	12,8687	42,24	12,9223					47,19	16,8068	46,79	16,8726
#54	43,26	12,8687	42,92	12,9223					47,99	16,8068	47,59	16,8726
#55	44,08	12,8869	43,74	12,9481	3,21	14,2339	4,41	14,1910	48,93	16,8641	48,53	16,9402
#56	44,76	12,8869	44,42	12,9481	5,75	14,1771	6,95	14,1381	49,73	16,8641	49,33	16,9402
#57	45,58	12,9052	45,24	12,9741	8,29	14,1206	9,49	14,0859	50,53	16,8641	50,13	16,9402
#58	46,26	12,9052	45,92	12,9741	10,83	14,0643	12,03	14,0338	51,47	16,9200	51,07	17,0080
#59	47,08	12,9235	46,74	13,0000	13,37	14,0082	14,57	13,9819	52,27	16,9200	51,87	17,0080
#60	47,76	12,9235	47,42	13,0000	15,91	13,9523	17,11	13,9303	53,07	16,9200	52,67	17,0080
#61	48,58	12,9401	48,24	13,0260	18,45	13,8967	19,65	13,8789	54,01	16,9746	53,61	17,0761
#62	49,26	12,9401	48,92	13,0260	20,99	13,8413	22,19	13,8277	54,81	16,9746	54,41	17,0761
#63	50,08	12,9558	49,74	13,0521	23,53	13,7861	24,73	13,7767	55,61	16,9746	55,21	17,0761

#64	50,76	12,9558	50,42	13,0521	26,07	13,7311	27,27	13,7259	56,55	17,0315	56,15	17,1445
#65	51,58	12,9704	51,24	13,0782	28,61	13,6900	29,81	13,6890	57,35	17,0315	56,95	17,1445
#66	52,26	12,9704	51,92	13,0782	31,15	13,7037	32,35	13,7005	58,15	17,0315	57,75	17,1445
#67	53,08	12,9864	52,74	13,1044	33,69	13,7586	34,89	13,7512				
#68	53,76	12,9864	53,42	13,1044	36,23	13,8136	37,43	13,8021				
#69	54,58	13,0014	54,24	13,1306	38,77	13,8690	39,97	13,8531				
#70	55,26	13,0014	54,92	13,1306	41,31	13,9245	42,51	13,9044				
#71	56,08	13,0110	55,74	13,1569	43,85	13,9802	45,05	13,9558				
#72	56,76	13,0110	56,42	13,1569	46,39	14,0362	47,59	14,0075				
#73	57,58	13,0211	57,24	13,1832	48,93	14,0924	50,13	14,0593				
#74	58,26	13,0211	57,92	13,1832	51,47	14,1488	52,67	14,1112				
#75	59,08	13,0278	58,74	13,2096	54,01	14,2055	55,21	14,1631				
#76	59,76	13,0278	59,42	13,2096	56,55	14,2624	57,75	14,2153				

Tabelle B-4: Parameter der Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 #9-#10, #12

Elementnummer	CRL #9 ver.		CRL #9 hor.		CRL #10 ver.		CRL #10 hor.		CRL #12 ver.		CRL #12 hor.	
	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m	z / mm	R / μ m
#1	0,19	8,9799	0,63	9,0000	1,27	7,0000	0,88	7,0073	1,18	10,0397	0,58	10,0000
#2	1,07	8,9798	1,50	9,0000	2,06	7,0000	1,67	7,0064	2,36	10,0374	1,77	10,0000
#3	1,94	8,9814	2,38	9,0000	2,85	7,0000	2,46	7,0070	3,55	10,0362	2,96	10,0000
#4	2,82	8,9802	3,25	9,0000	3,64	7,0000	3,24	7,0062	4,74	10,0337	4,14	10,0000
#5	3,69	8,9800	4,13	9,0000	4,42	7,0000	4,03	7,0090	5,93	10,0318	5,33	10,0000
#6	4,57	8,9822	5,00	9,0000	5,21	7,0000	4,82	7,0015	7,11	10,0301	6,52	10,0000
#7	5,44	8,9814	5,88	9,0000	6,00	7,0000	5,61	6,9839	8,30	10,0275	7,71	10,0000
#8	6,32	8,9821	6,75	9,0000	6,79	7,0000	6,40	6,9827	9,49	10,0250	8,89	10,0000
#9	7,19	8,9820	7,63	9,0000	7,58	7,0000	7,19	6,9838	10,68	10,0223	10,08	10,0000
#10	8,07	8,9830	8,50	9,0000	8,37	7,0000	7,98	6,9836	11,86	10,0198	11,27	10,0000
#11	8,94	8,9831	9,38	9,0000	9,16	7,0000	8,76	6,9853	13,05	10,0172	12,46	10,0000
#12	9,81	8,9848	10,25	9,0000	9,95	7,0000	9,55	6,9846	14,24	10,0144	13,64	10,0000
#13	10,69	8,9844	11,13	9,0000	10,74	7,0000	10,34	6,9841	15,43	10,0116	14,83	10,0000
#14	11,56	8,9853	12,00	9,0000	11,53	7,0000	11,13	6,9856	16,62	10,0088	16,02	10,0000
#15	12,44	8,9854	12,88	9,0000	12,31	7,0000	11,92	6,9864	17,80	10,0060	17,21	10,0000
#16	13,31	8,9866	13,75	9,0000	13,10	7,0000	12,71	6,9865	18,99	10,0031	18,40	10,0000
#17	14,19	8,9875	14,63	9,0000	13,89	7,0000	13,50	6,9869	20,00	8,5000	19,47	16,9987
#18	15,06	8,9874	15,50	9,0000	14,68	7,0000	14,29	6,9870	21,01	10,0031	20,53	16,9987
#19	15,94	8,9887	16,37	9,0000	15,47	7,0000	15,08	6,9883	22,20	10,0060	21,60	10,0000
#20	16,81	8,9888	17,25	9,0000	16,26	7,0000	15,87	6,9887	23,38	10,0088	22,79	10,0000
#21	17,69	8,9898	18,12	9,0000	17,05	7,0000	16,65	6,9892	24,57	10,0116	23,98	10,0000
#22	18,56	8,9906	19,00	9,0000	17,84	7,0000	17,44	6,9896	25,76	10,0144	25,17	10,0000
#23	19,44	8,9911	19,87	9,0000	18,63	7,0000	18,23	6,9902	26,95	10,0172	26,36	10,0000
#24	20,31	8,9920	20,75	9,0000	19,41	7,0000	19,02	6,9910	28,14	10,0198	27,54	10,0000
#25	21,18	8,9926	21,62	9,0000	20,20	7,0000	19,81	6,9917	29,32	10,0223	28,73	10,0000

#26	22,06	8,9935	22,50	9,0000	20,99	7,0000	20,60	6,9921	30,51	10,0250	29,92	10,0000
#27	22,93	8,9940	23,37	9,0000	21,78	7,0000	21,39	6,9928	31,70	10,0275	31,11	10,0000
#28	23,81	8,9949	24,24	9,0000	22,57	7,0000	22,18	6,9935	32,89	10,0301	32,29	10,0000
#29	24,68	8,9956	25,12	9,0000	23,36	7,0000	22,96	6,9941	34,07	10,0318	33,48	10,0000
#30	25,55	8,9964	25,99	9,0000	24,15	7,0000	23,75	6,9948	35,26	10,0337	34,67	10,0000
#31	26,43	8,9971	26,87	9,0000	24,94	7,0000	24,54	6,9955	36,45	10,0362	35,86	10,0000
#32	27,30	8,9978	27,74	9,0000	25,72	7,0000	25,33	6,9961	37,64	10,0374	37,04	10,0000
#33	28,18	8,9987	28,61	9,0000	26,51	7,0000	26,12	6,9968	38,82	10,0397	38,23	10,0000
#34	29,03	10,0496	29,52	6,7001	27,30	7,0000	26,91	6,9975			39,42	10,0000
#35	30,00	10,0496	30,48	6,7001	28,09	7,0000	27,69	6,9982				
#36	30,97	10,0496	31,39	9,0000	28,88	7,0000	28,48	6,9989				
#37	31,82	8,9987	32,26	9,0000	29,62	6,0000	29,23	8,9996				
#38	32,70	8,9978	33,13	9,0000	30,38	6,0000	30,00	8,9996				
#39	33,57	8,9971	34,01	9,0000	31,12	7,0000	30,77	8,9996				
#40	34,45	8,9964	34,88	9,0000	31,91	7,0000	31,52	6,9989				
#41	35,32	8,9956	35,76	9,0000	32,70	7,0000	32,31	6,9982				
#42	36,19	8,9949	36,63	9,0000	33,49	7,0000	33,09	6,9975				
#43	37,07	8,9940	37,50	9,0000	34,28	7,0000	33,88	6,9968				
#44	37,94	8,9935	38,38	9,0000	35,06	7,0000	34,67	6,9961				
#45	38,82	8,9926	39,25	9,0000	35,85	7,0000	35,46	6,9955				
#46	39,69	8,9920	40,13	9,0000	36,64	7,0000	36,25	6,9948				
#47	40,56	8,9911	41,00	9,0000	37,43	7,0000	37,04	6,9941				
#48	41,44	8,9906	41,88	9,0000	38,22	7,0000	37,82	6,9935				
#49	42,31	8,9898	42,75	9,0000	39,01	7,0000	38,61	6,9928				
#50	43,19	8,9888	43,63	9,0000	39,80	7,0000	39,40	6,9921				
#51	44,06	8,9887	44,50	9,0000	40,59	7,0000	40,19	6,9917				
#52	44,94	8,9874	45,37	9,0000	41,37	7,0000	40,98	6,9910				
#53	45,81	8,9875	46,25	9,0000	42,16	7,0000	41,77	6,9902				
#54	46,69	8,9866	47,12	9,0000	42,95	7,0000	42,56	6,9896				
#55	47,56	8,9854	48,00	9,0000	43,74	7,0000	43,35	6,9892				
#56	48,44	8,9853	48,87	9,0000	44,53	7,0000	44,13	6,9887				
#57	49,31	8,9844	49,75	9,0000	45,32	7,0000	44,92	6,9883				
#58	50,19	8,9848	50,62	9,0000	46,11	7,0000	45,71	6,9870				
#59	51,06	8,9831	51,50	9,0000	46,90	7,0000	46,50	6,9869				
#60	51,93	8,9830	52,37	9,0000	47,69	7,0000	47,29	6,9865				
#61	52,81	8,9820	53,25	9,0000	48,47	7,0000	48,08	6,9864				
#62	53,68	8,9821	54,12	9,0000	49,26	7,0000	48,87	6,9856				
#63	54,56	8,9814	55,00	9,0000	50,05	7,0000	49,66	6,9841				
#64	55,43	8,9822	55,87	9,0000	50,84	7,0000	50,45	6,9846				
#65	56,31	8,9800	56,75	9,0000	51,63	7,0000	51,24	6,9853				
#66	57,18	8,9802	57,62	9,0000	52,42	7,0000	52,02	6,9836				
#67	58,06	8,9814	58,50	9,0000	53,21	7,0000	52,81	6,9838				
#68	58,93	8,9798	59,37	9,0000	54,00	7,0000	53,60	6,9827				
#69	59,81	8,9799			54,79	7,0000	54,39	6,9839				
#70					55,58	7,0000	55,18	7,0015				
#71					56,36	7,0000	55,97	7,0090				
#72					57,15	7,0000	56,76	7,0062				
#73					57,94	7,0000	57,54	7,0070				
#74					58,73	7,0000	58,33	7,0064				
#75							59,12	7,0073				

Tabelle B-5: Parameter der Zoomlinsenlayouts 1773_00_A0 #11, #13-#14

Elementnummer	CRL #11 ver.		CRL #11 hor.		CRL #13 ver.		CRL #13 hor.		CRL #14 ver.		CRL #14 hor.	
	z / mm	R / μm										
#1	1,37	20,0000	0,17	10,0000	44,01	15,0000	44,70	15,0583	43,83	16,0672	42,83	16,0000
#2	3,00	20,0000	2,18	20,0882	45,39	15,0000	46,09	15,0477	45,83	16,0513	44,83	16,0000
#3	4,62	20,0000	3,81	20,0827	46,78	15,0000	47,47	15,0367	47,84	16,0351	46,83	16,0000
#4	6,24	20,0000	5,43	20,0756	48,16	15,0000	48,86	15,0252	49,84	16,0182	48,84	16,0000
#5	7,87	20,0000	7,05	20,0685	49,55	15,0000	50,24	15,0135	51,50	14,0000	50,64	27,9927
#6	9,49	20,0000	8,68	20,0612	50,82	22,9942	51,50	11,5000	53,16	16,0182	52,36	27,9927
#7	11,12	20,0000	10,30	20,0532	52,18	22,9942	52,76	15,0135	55,16	16,0351	54,16	16,0000
#8	12,74	20,0000	11,93	20,0451	53,45	15,0000	54,14	15,0252	57,17	16,0513	56,17	16,0000
#9	14,37	20,0000	13,55	20,0367	54,84	15,0000	55,53	15,0367	59,17	16,0672	58,17	16,0000
#10	15,99	20,0000	15,18	20,0282	56,22	15,0000	56,91	15,0477			60,17	16,0000
#11	17,62	20,0000	16,80	20,0195	57,61	15,0000	58,30	15,0583				
#12	19,13	27,9953	18,43	20,0107	58,99	15,0000						
#13	20,87	27,9953	20,00	14,0000								
#14	22,38	20,0000	21,57	20,0107								
#15	24,01	20,0000	23,20	20,0195								
#16	25,63	20,0000	24,82	20,0282								
#17	27,26	20,0000	26,45	20,0367								
#18	28,88	20,0000	28,07	20,0451								
#19	30,51	20,0000	29,70	20,0532								
#20	32,13	20,0000	31,32	20,0612								
#21	33,76	20,0000	32,95	20,0685								
#22	35,38	20,0000	34,57	20,0756								
#23	37,00	20,0000	36,19	20,0827								
#24	38,63	20,0000	37,82	20,0882								
#25			39,83	10,0000								

C Veröffentlichungen

Beiträge in referierten Fachzeitschriften (chronologische Reihenfolge)

E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, T. Zhou, I. Greving, M. Storm, C. Krywka, A. Last und J. Mohr, „Miniaturized compound refractive X-ray zoom lens,“ *Opt. Express* 25, 22455-22466 (2017).
doi: 10.1364/OE.25.022455.

E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, K. Sawhney, A. Cecilia, M. Hurst, T. Baumbach, A. Last und J. Mohr, „Optical Characterization of an X-ray Zoom Lens,“ *Microscopy and Microanalysis* 24(S2), 268-269 (2018).
doi: 10.1017/S1431927618013685.

O. Márkus, I. Greving, E. Kornemann, M. Storm, F. Beckmann, J. Mohr und A. Last, „Optimizing illumination for full field imaging at high brilliance hard X-ray synchrotron sources,“ *Opt. Express* 26, 30435-30443 (2018).
doi: 10.1364/OE.26.030435.

E. Kornemann, T. Zhou, O. Márkus, A. Opolka, T. U. Schüllli, J. Mohr und A. Last, „X-ray zoom lens allowing for energy scans in X-ray microscopy,“ *Opt. Express* 27, 185-195 (2019). doi: 10.1364/OE.27.000185

Konferenz Beiträge (nur als präsentierender Autor)

E. Kornemann, O. Márkus, I. Greving, M. Ogurreck, T. Zhou, A. Last und J. Mohr, „Development of a compound refractive X-ray zoom lens,“ Poster Präsentation, KNMF User Meeting 2016, Karlsruhe, Deutschland

E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, T. Zhou, I. Greving, M. Ogurreck, C. Krywka, A. Last und J. Mohr, „Miniaturized X-ray zoom lens,“ mündliche Präsentation, ICXOM 2017, Triest, Italien

E. Kornemann, „Miniaturized compound refractive X-ray zoom lens,“ Poster Präsentation, KDOP 2017, Karlsruhe, Deutschland

E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, K. Sawhney, A. Cecilia, M. Hurst, T. Baumbach, A. Last und J. Mohr, „Optical characterization of an X-ray zoom lens,“ mündliche Präsentation, XRM 2018, Saskatoon, Kanada

Literaturverzeichnis

- [1] W. C. Röntgen, „Über eine neue Art von Strahlen. (Vorläufige Mitteilung)“, *Sitzungsberichte der Würzburger Phys.-Medic. Gesellschaft*, 1896.
- [2] T. Tomie “X-ray lens,” Patent Nr. US5594773A, 1994.
- [3] A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva und B. Lengeler, „A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays“, *Nature* 384, S. 49-51, 1996.
- [4] C. G. Schroer, M. Kuhlmann, B. Lengeler, T. F. Günzler, O. Kurapova, B. Benner, C. Rau, A. S. Simionovici, A. Snigirev und I. Snigireva, „Beryllium parabolic refractive x-ray lenses“, *Proc. SPIE* 4783, *Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics*, S. 10-19, 2002.
- [5] B. Lengeler, C. G. Schroer, M. Kuhlmann, B. Benner, T. F. Günzler, O. Kurapova, A. Somogyi, A. Snigirev und I. Snigireva „Beryllium parabolic refractive x-ray lenses“, *AIP Conference Proceedings* 705, S. 748-751, 2004.
- [6] N. R. Pereira, E. M. Dufresne, R. Clarke und D. A. Arms, „Parabolic lithium refractive optics for x rays“, *Review of Scientific Instruments* 75, S. 37, 2004.
- [7] K. Young, A. Khounsary, A. N. Jansen, E. M. Dufresne und P. Nash, „Fabrication and Performance of a Lithium X-Ray Lens“, *AIP Conference Proceedings* 879, S. 989, 2007.
- [8] A. Stein, K. Evans-Lutterodt, N. Bozovic und A. Taylor, „Fabrication of silicon kinoform lenses for hard x-ray focusing by electron beam lithography and deep reactive ion etching“, *J. Vac. Sci. Technol. B* 26 (1), S. 122-127, 2008.

- [9] L. Alianelli, I. Pape, J. P. Sutter, O. J. L. Fox, K. J. S. Sawhney und K. Korwin-Mikke, „Aberration-free x-ray lenses made of silicon,“ *Proc. SPIE 9963, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XI*, 99630S, 2016.
- [10] B. Nöhammer, C. David, H. Rothuizen, J. Hoszowska und A. Simionovici, „Deep reactive ion etching of silicon and diamond for the fabrication of planar refractive hard x-ray lenses,“ *Microelectron Eng.* 67–68, S. 453–460, 2003.
- [11] V. Nazmov, E. Reznikova, J. Mohr, A. Snigirev, I. Snigireva, S. Achenbach und V. Saile, „Fabrication and preliminary testing of X-ray lenses in thick SU-8 resist layers,“ *Microsystem Technologies* 10, S. 716-721, 2004.
- [12] E. Reznikova, T. Weitkamp, V. Nazmov, M. Simon, A. Last und V. Saile, „Transmission hard x-ray microscope with increased view field using planar refractive objectives and condensers made of SU-8 polymer,“ *J. Phys.: Conf. Ser.* 186, 012070, 2009.
- [13] V. Nazmov, E. Reznikova, A. Snigirev, I. Snigireva, M. DiMichiel, M. Grigoriev, J. Mohr, B. Matthis und V. Saile, „LIGA fabrication of X-ray Nickel lenses,“ *Microsystem Technologies* 11, S. 292–297, 2005.
- [14] V. Nazmov, E. Reznikova, A. Last, J. Mohr, V. Saile, M. DiMichiel und J. Göttert, „Crossed planar x-ray lenses made from nickel for x-ray micro focusing and imaging applications,“ *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 582(1), S. 120–122, 2007.
- [15] P. Elleaume, „Optimization of compound refractive lenses for X-rays,“ *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 412(2–3), S. 483-506, 1998.
- [16] G. B. M. Vaughan, J. P. Wright, A. Bytchkov, M. Rossat, H. Gleyzolle, I. Snigireva und A. Snigirev, „X-ray transfocators: focusing devices based on compound refractive lenses,“ *J. Synchrotron Rad.* 18, S. 125-133, 2011.

-
- [17] E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, T. Zhou, I. Greving, M. Storm, C. Krywka, A. Last und J. Mohr, „Miniaturized compound refractive X-ray zoom lens,“ *Opt. Express* 25(19), S. 22455-22466, 2017.
- [18] E. Kornemann, O. Márkus, A. Opolka, K. Sawhney, A. Cecilia, M. Hurst, T. Baumbach, A. Last und J. Mohr, „Optical Characterization of an X-ray Zoom Lens,“ *Microscopy and Microanalysis* 24(S2), S. 268-269, 2018.
- [19] E. Kornemann, T. Zhou, O. Márkus, A. Opolka, T. U. Schüllli, J. Mohr und A. Last „X-ray zoom lens allowing for energy scans in X-ray microscopy,“ *Opt. Express* 27(1), S. 185-195, 2019.
- [20] J. T. Cremer, „Neutron and X-ray microscopy,“ 1. Auflage, Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [21] M. Born und E. Wolf, „Principles of Optics,“ 7. Auflage, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [22] E. Hecht, „Optik,“ 5. Auflage, München: Oldenbourg, 2009.
- [23] B. D. Cullity und S. R. Stock, „Elements of X-ray diffraction,“ 3. Auflage, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2001.
- [24] A. Momose, „Phase-sensitive imaging and phase tomography using X-ray interferometers,“ *Opt. Express* 11(19), S. 2303-2314, 2003.
- [25] T. Weitkamp, A. Diaz, C. David, F. Pfeiffer, M. Stampanoni, P. Cloetens und E. Ziegler, „X-ray phase imaging with a grating interferometer,“ *Opt. Express* 13(16), S. 6296-6304, 2005.
- [26] J. L. Soret, „Über die durch Kreisgitter erzeugten Diffraktionsphänomene,“ *Ann. Phys.* 232(9), S. 99-113, 1875.
- [27] B. Rösner, F. Koch, F. Döring, V. Guzenko, M. Meyer, J. Ornelas, A. Späth, R. H. Fink, S. Stanescu, S. Swaraj, R. Belkhou, B. Watts, J. Raabe und C. David, „7 nm Spatial Resolution in Soft X-ray Microscopy,“ *Microscopy and Microanalysis* 24(S2), S. 270-271, 2018.

- [28] P. Kirkpatrick und A. V. Baez, „Formation of optical images by X-rays,“ *J. Opt. Soc. Am.* 38(9), S. 766-774, 1948.
- [29] H. Wolter, „Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen,“ *Ann. Phys.* 445(1-2), S. 94-114, 1952.
- [30] A. Bjeoumikhov und S. Bjeoumikhova, „Capillary Optics for X-Rays“ S. 287-306 in A. Erko, M. Idir, T. Krist und A. G. Michette, „Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics,“ Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [31] K. Shimizu und K. Omote, „Multilayer optics for X-ray analysis,“ *The Rigaku Journal* 24(1), 2008.
- [32] D. Vaughan, A. Thompson, J. Kirz, D. Attwood, E. Gullikson, M. Howells, K. Kim, J. Kortright, I. Lindau, P. Pianetta, A. Robinson, J. Underwood, G. Williams und H. Winick, „X-ray Data Booklet,“ Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2001.
- [33] The Center for X-Ray Optics, X-Ray Interactions With Matter - Index of refraction, URL: henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html (Stand: 05.10.2018).
- [34] IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, GESTIS-Stoffdatenbank: Lithium, URL: gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/008010.xml?f=templates&fn=default.htm (Stand: 18.09.2018).
- [35] IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, GESTIS-Stoffdatenbank: Beryllium, URL: gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/008020.xml?f=templates&fn=default.htm (Stand: 18.09.2018).
- [36] V. G. Kohn, I. Snigireva und A. Snigirev, „Diffraction theory of imaging with X-ray compound refractive lens,“ *Optics Communications* 216, S. 247-260, 2003.

-
- [37] V. G. Kohn, „An Exact Theory of Imaging with a Parabolic Continuously Refractive X-ray Lens,“ *J. of Exp. and Theo. Physics* 97(1), S. 204-215, 2003.
- [38] VDI/VDE, Röntgenoptische Systeme - Begriffe. Richtlinie 5575, Blatt 1, 2009
- [39] H. Vogt, A. Last, J. Mohr, F. Marschall, K. Mettendorf, R. Eisenhower und M. Simon, „Low-cost Rolled X-ray Prism Lenses to increase photon flux density in diffractometry experiments,“ *Powder Diffraction* 29(2), S. 118-122, 2014.
- [40] V. Nazmov, L. Shabel'nikov, F.-J. Pantenburg, J. Mohr, E. Reznikova, A. Snigirev, I. Snigireva, S. Kouznetsov und M. DiMichiel, „Kinofom x-ray lens creation in polymer materials by deep x-ray lithography,“ *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 217(3), S. 409–416, 2004.
- [41] V. Nazmov, J. Mohr und R. Simon, „Mosaic-like micropillar array for hard x-ray focusing—one-dimensional version,“ *J. Micromech. Microeng.* 23, 095015, 2013.
- [42] M. Simon, E. Reznikova, V. Nazmov, A. Last und W. Jark, „X-ray prism lenses with large apertures,“ *Proc. SPIE* 7077, 70771Q, 2008.
- [43] V. G. Kohn, „Effective aperture of X-ray compound refractive lenses,“ *J. Synchrotron Rad.* 24, S. 609-614, 2017.
- [44] B. Lengeler, C. Schroer, J. Tümmler, B. Benner, M. Richwin, A. Snigirev, I. Snigireva und M. Drakopoulos, „Imaging by parabolic refractive lenses in the hard X-ray range,“ *J. Synchrotron Rad.* 6, S. 1153-1167, 1999.
- [45] V. G. Kohn, „On the theory of X-ray refractive optics: Exact solution for a parabolic medium,“ *J. of Exp. and Theo. Physics Letters* 76(10), S. 600–603, 2002.

- [46] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Haggmann, A. Maner und D. Münchmeyer, „Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming and plastic moulding (LIGA process),“ *Microelectronic Engineering* 4, S. 35-56, 1986.
- [47] E. Reznikova, J. Mohr, M. Boerner, V. Nazmov und P.-J. Jakobs, „Soft X-ray lithography of high aspect ratio SU-8 submicron structures,“ *Microsyst. Technol.* 14(9-11), S. 1683-1688, 2008.
- [48] A. Last, „Fehllicht in LIGA-Mikrospektrometern,“ Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, 2003.
- [49] RXOPTICS GmbH & Co. KG, Refractive X-ray lenses, URL: www.rxoptics.de/lenses.html (Stand: 21.09.2018).
- [50] F. Marschall, A. Last, M. Simon, H. Vogt und J. Mohr, „Simulation of aperture-optimised refractive lenses for hard X-ray full field microscopy,“ *Opt. Express* 24(10), S. 10880-10889, 2016.
- [51] A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, A. Souvorov und B. Lengeler, „Focusing high-energy x rays by compound refractive lenses,“ *Appl. Opt.* 37, S. 653-662, 1998.
- [52] F.-J. Pantenburg und J. Mohr, „Influence of secondary effects on the structure quality in deep x-ray lithographie,“ *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 97(1-4), S. 551-556, 1995.
- [53] F. Marschall, „Entwicklung eines Röntgenmikroskops für Photonenenergien von 15 keV bis 30 keV,“ Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau, 2014.
- [54] E. Abbe, „Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop,“ Braunschweig: Vieweg, 1910.
- [55] M. Y. Hu, T. S. Toellner, W. Sturhahn, P. M. Hession, J. P. Sutter und E. E. Alp, „A high-resolution monochromator for inelastic nuclear resonant scattering experiments using ^{119}Sn ,“ *Nucl. Instrum. Methods* A430, S. 271-277, 1999.

-
- [56] FMB Oxford Ltd, Monochromator, URL: www.fmb-oxford.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/Monochromator_Brochure_34.pdf (Stand: 11.10.2018).
- [57] B. Benner, „Imaging with parabolic refractive X-ray lenses,“ Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, 2005.
- [58] A. Last, Übersicht über viele Arten von Röntgenoptiken, URL: www.x-ray-optics.de (Stand: 21.10.2018).
- [59] A. Snigirev, I. Snigireva, G. Vaughan, J. Wright, M. Rossat, A. Bytchkov und C. Curfs, „High energy x-ray transfocator based on Al parabolic refractive lenses for focusing and collimation,“ *J. Phys. Conf. Ser.* 186, 012073, 2009.
- [60] G. B. M. Vaughan, J. P. Wright, A. Bytchkov, M. Rossat, H. Gleyzolle, I. Snigireva und A. Snigirev, „X-ray transfocators: focusing devices based on compound refractive lenses,“ *Journal of Synchrotron Radiation* 18(2), S. 125–133, 2011.
- [61] A. V. Zozulya, S. Bondarenko, A. Schavkan, F. Westermeier, G. Grübel und M. Sprung, „Microfocusing transfocator for 1D and 2D compound refractive lenses,“ *Opt. Express* 20, S. 18967-18976, 2012.
- [62] G. M. A. Duller, D. R. Hall und A. Stallwood, „F-Switch: Novel 'Random Access' Manipulator for Large Numbers of Compound Refractive Lenses,“ *Conf. Proc. MEDSI'16*, WEPE22, S. 345-347, 2017.
- [63] J. Raabe, K. Ederer, C. Schlueter, R. Grifone und D. Novikov, „Novel comprehensive UHV lens changer at the PETRA III beamlines P22, P23 and P24,“ *Conf. Proc. MEDSI'18*, Poster THPH39, 2018.
- [64] A. Narikovich, A. Barannikov, P. Ershov, N. Klimova, A. Lushnikov, I. Lyatun, I. Panormov, M. Polikarpov, A. Sinitsyn, D. Zverev, I. Snigireva und A. Snigirev, „Mini-Transfocator for X-ray Focusing and Microscopy,“ *Microscopy and Microanalysis* 24(S2), S. 290-291, 2018.

- [65] T. Roth, L. Alianelli, D. Lengeler, A. Snigirev und F. Seiboth, „Materials for x-ray refractive lenses minimizing wavefront distortions,“ *MRS Bulletin* 42(6), S. 430-436, 2017.
- [66] W. Krause, „Grundlagen der Konstruktion: Elektronik – Elektrotechnik - Feinwerktechnik – Mechatronik,“ 10. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [67] R. H. Pantell, J. Feinstein, H. R. Beguiristain, M. A. Piestrup, C. K. Gary und J. T. Cremer, „The effect of unit lens alignment and surface roughness on x-ray compound lens performance,“ *Review of Scientific Instruments* 72, S. 48-52, 2001.
- [68] A. Last, O. Márkus, S. Georgi und J. Mohr, „Röntgenoptische Messung des Seitenwandwinkels direktlithografischer refraktiver Röntgenlinse,“ *MikroSystemTechnik-Kongress* 6, S. 508-510, 2015.
- [69] A. Etemeyer, B. Schäfer und O. Wallrapp, „Technische Mechanik – Teil2: Elastostatik,“ *Fachhochschule München Fachbereich 06 - Feinwerk- und Mikrotechnik*, Version 2.02, 2006.
- [70] N. Santen, „Dotierungsabhängigkeit des elastischen Verhaltens von Silizium,“ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2009.
- [71] H+S Präzisionsfolien Gmbh, Technisches Informationsblatt - Kaltgewalzter Federbandstahl W.-Nr. 1.4310 (2014), URL: www.hs-folien.de/fileadmin/user_upload/techn_infoblaetter/1.4310_Informationsblatt_2014.pdf (Stand 25.06.2018).
- [72] WST - Werkzeug Stahl Center GmbH & Co. KG, Werkstoffblatt 3.4345 AlZnMgCu 0,5 hochfest, URL: www.wst-center.de/fileadmin/user_upload/PDF-Dateien/Werkstoffe/34345.pdf (Stand: 04.07.2018).
- [73] SmarAct GmbH, Produkte - SmarPod – Hexapod - SmarPod 70.42, URL: www.smaract.com/products/smarpod-hexapod/70-42 (Stand: 23.10.2018).
- [74] Dynalloy Incorporated, Flexinol® Actuator Wire Technical and Design Data, URL: www.dynalloy.com/tech_data_wire.php (Stand: 23.10.2018).

- [75] PiezoDrive Pty Ltd, Datenblatt BA Series Bender Actuators, URL: www.piezodrive.com/wp-content/uploads/2016/01/BASeries.pdf (Stand: 18.07.2018).
- [76] PI Ceramic GmbH, Piezokeramik Aktoren, URL: www.physikinstrumente.store/de/pl112-pl140-picma-bender (Stand: 12.09.2018).
- [77] Piezo Systems Inc., Katalog Standard 4-Lagen Piezoelektrische Biegeaktoren, URL: piezo.com/catalog8.pdf%20files/Cat8.55.pdf (Stand: 12.09.2018).
- [78] Freie Hardware Arduino Due, URL: store.arduino.cc/arduino-due (Stand: 07.08.2018).
- [79] P. Schnabel, „Elektronik-Fibel: Elektronik Grundlagen, Bauelemente, Schaltungstechnik, Digitaltechnik,“ 6. überarb. Auflage, Ludwigsburg: Schnabel, 2014.
- [80] PI Ceramic GmbH, Eigenschaften von Piezoaktoren - Verhalten bei Ansteuerung, URL: www.piceramic.de/de/piezo-technologie/eigenschaften-piezoaktoren/ansteuerverhalten (Stand: 13.10.2018).
- [81] International Rectifier, Datenblatt IR2153, URL: www.promelec.ru/pdf/ir2153.pdf (Stand: 13.10.2018).
- [82] Freie Software Download - Arduino Software (IDE), URL: www.arduino.cc/en/Main/Software (Stand: 07.08.2018).
- [83] Arduino Software (IDE), URL: www.arduino.cc/en/Guide/Environment (Stand: 07.08.2018).
- [84] Freie Hardware Arduino Nano, URL: store.arduino.cc/arduino-nano (Stand: 10.08.2018).
- [85] Pololu Corporation, Datenblatt Schrittmotortreiber DRV8834, URL: www.pololu.com/file/0J617/drv8834.pdf (Stand: 05.09.2018).
- [86] SHARP corporation, Datenblatt GP1A58HR, URL: www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1a58hr_e.pdf (Stand: 05.09.2018).

- [87] M. Meduňa, F. Isa, A. Jung, A. Marzegalli, M. Albani, G. Isella, K. Zweier, L. Miglio und H. von Känel, „Lattice tilt and strain mapped by X-ray scanning nanodiffraction in compositionally graded SiGe/Si microcrystals,” *J. Appl. Cryst.* 51, S. 368-385, 2018.
- [88] H. Renevier, J. Coraux, M. G. Proietti, V. Favre-Nicolin und B. Daudin, „Multiwavelength Anomalous Diffraction (MAD) and Diffraction Anomalous Fine Structure (DAFS) in the study of structural properties of nanostructures,” *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography* 63(a1), S. 63, 2017.
- [89] R. J. Marks II, „Introduction to Shannon Sampling and Interpolation Theory,” New York: Springer-Verlag, 1991.
- [90] W. Cha, A. Ulvestad, M. Allain, V. Chamard, R. Harder, S. J. Leake, J. Maser, P. H. Fuoss und S. O. Hruszkewycz, „Three Dimensional Variable-Wavelength X-Ray Bragg Coherent Diffraction Imaging,” *Phys. Rev. Lett.* 117, S. 225501, 2016.
- [91] T. W. Cornelius, D. Carbone, V. L. R. Jacques, T. U. Schüllli und T. H. Metzger, „Three-dimensional diffraction mapping by tuning the X-ray energy,” *Journal of Synchrotron Radiation* 18(Pt 3), S. 413-417, 2011.
- [92] O. Mandula, M. E. Aizarna, J. Eymery, M. Burghammer und V. Favre-Nicolin, „PyNX.Ptycho: a computing library for X-ray coherent diffraction imaging of nanostructures,” *Journal of Applied Crystallography* 49, S. 1842–1848, 2016.

ISSN 1869-5183

Herausgeber: Institut für Mikrostrukturtechnik

- Band 1** Georg Obermaier
Research-to-Business Beziehungen: Technologietransfer
durch Kommunikation von Werten (Barrieren, Erfolgs-
faktoren und Strategien). 2009
ISBN 978-3-86644-448-5
- Band 2** Thomas Grund
Entwicklung von Kunststoff-Mikroventilen im
Batch-Verfahren. 2010
ISBN 978-3-86644-496-6
- Band 3** Sven Schüle
Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination
mit Mikroaktoren. 2010
ISBN 978-3-86644-529-1
- Band 4** Markus Simon
Röntgenlinsen mit großer Apertur. 2010
ISBN 978-3-86644-530-7
- Band 5** K. Phillip Schierjott
Miniaturisierte Kapillarelektrophorese zur kontinuierlichen
Überwachung von Kationen und Anionen in Prozess-
strömen. 2010
ISBN 978-3-86644-523-9
- Band 6** Stephanie Kißling
Chemische und elektrochemische Methoden zur
Oberflächenbearbeitung von galvanogeformten
Nickel-Mikrostrukturen. 2010
ISBN 978-3-86644-548-2

- Band 7** **Friederike J. Gruhl**
Oberflächenmodifikation von Surface Acoustic Wave (SAW)
Biosensoren für biomedizinische Anwendungen. 2010
ISBN 978-3-86644-543-7
- Band 8** **Laura Zimmermann**
Dreidimensional nanostrukturierte und superhydrophobe
mikrofluidische Systeme zur Tröpfchengenerierung und
-handhabung. 2011
ISBN 978-3-86644-634-2
- Band 9** **Martina Reinhardt**
Funktionalisierte, polymere Mikrostrukturen für die
dreidimensionale Zellkultur. 2011
ISBN 978-3-86644-616-8
- Band 10** **Mauno Schelb**
Integrierte Sensoren mit photonischen Kristallen auf
Polymerbasis. 2012
ISBN 978-3-86644-813-1
- Band 11** **Daniel Auernhammer**
Integrierte Lagesensorik für ein adaptives mikrooptisches
Ablensystem. 2012
ISBN 978-3-86644-829-2
- Band 12** **Nils Z. Danckwardt**
Pumpfreier Magnetpartikeltransport in einem
Mikroreaktionssystem: Konzeption, Simulation
und Machbarkeitsnachweis. 2012
ISBN 978-3-86644-846-9
- Band 13** **Alexander Kolew**
Heißprägen von Verbundfolien für mikrofluidische
Anwendungen. 2012
ISBN 978-3-86644-888-9

- Band 14 Marko Brammer**
Modulare Optoelektronische Mikrofluidische
Backplane. 2012
ISBN 978-3-86644-920-6
- Band 15 Christiane Neumann**
Entwicklung einer Plattform zur individuellen Ansteuerung
von Mikroventilen und Aktoren auf der Grundlage eines
Phasenüberganges zum Einsatz in der Mikrofluidik. 2013
ISBN 978-3-86644-975-6
- Band 16 Julian Hartbaum**
Magnetisches Nanoaktorsystem. 2013
ISBN 978-3-86644-981-7
- Band 17 Johannes Kenntner**
Herstellung von Gitterstrukturen mit Aspektverhältnis 100 für die
Phasenkontrastbildgebung in einem Talbot-Interferometer. 2013
ISBN 978-3-7315-0016-2
- Band 18 Kristina Kreppenhofer**
Modular Biomicrofluidics - Mikrofluidikchips im Baukasten-
system für Anwendungen aus der Zellbiologie. 2013
ISBN 978-3-7315-0036-0
- Band 19 Ansgar Waldbaur**
Entwicklung eines maskenlosen Fotolithographiesystems
zum Einsatz im Rapid Prototyping in der Mikrofluidik und
zur gezielten Oberflächenfunktionalisierung. 2013
ISBN 978-3-7315-0119-0
- Band 20 Christof Megnin**
Formgedächtnis-Mikroventile für eine fluidische Plattform. 2013
ISBN 978-3-7315-0121-3
- Band 21 Srinivasa Reddy Yeduru**
Development of Microactuators Based on
the Magnetic Shape Memory Effect. 2013
ISBN 978-3-7315-0125-1

- Band 22 Michael Röhrig**
Fabrication and Analysis of Bio-Inspired Smart Surfaces. 2014
ISBN 978-3-7315-0163-3
- Band 23 Taleieh Rajabi**
Entwicklung eines mikrofluidischen Zweikammer-Chipsystems mit integrierter Sensorik für die Anwendung in der Tumorforschung. 2014
ISBN 978-3-7315-0220-3
- Band 24 Frieder Märkle**
Laserbasierte Verfahren zur Herstellung hochdichter Peptidarrays. 2014
ISBN 978-3-7315-0222-7
- Band 25 Tobias Meier**
Magnetoresistive and Thermoresistive Scanning Probe Microscopy with Applications in Micro- and Nanotechnology. 2014
ISBN 978-3-7315-0253-1
- Band 26 Felix Marschall**
Entwicklung eines Röntgenmikroskops für Photonenenergien von 15 keV bis 30 keV. 2014
ISBN 978-3-7315-0263-0
- Band 27 Leonardo Pires Carneiro**
Development of an Electrochemical Biosensor Platform and a Suitable Low-Impedance Surface Modification Strategy. 2014
ISBN 978-3-7315-0272-2
- Band 28 Sebastian Mathias Schillo**
Prozessentwicklung für die Automatisierung der Herstellung und Anwendung von hochdichten Peptidmicroarrays. 2014
ISBN 978-3-7315-0274-6

- Band 29** Nicole E. Steidle
Micro- and Nanostructured Microfluidic Devices
for Localized Protein Immobilization and Other
Biomedical Applications. 2014
ISBN 978-3-7315-0297-5
- Band 30** Jochen Heneka
Prozessentwicklung eines industrietauglichen Verfahrens
zur Fertigung von vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen. 2015
ISBN 978-3-7315-0326-2
- Band 31** Seoung-Eun Kim
Konzeption und prototypische Fertigung einer
nicht-invasiven mikrofluidischen Plattform für die
Elektrophysiologie (NIMEP) zur Zellenanalyse. 2015
ISBN 978-3-7315-0378-1
- Band 32** Elisabeth Wilhelm
Entwicklung eines mikrofluidischen Brailledisplays. 2015
ISBN 978-3-7315-0385-9
- Band 33** Viktor Pinneker
Entwicklung miniaturisierter Aktorsysteme basierend
auf magnetischen Formgedächtnislegierungen. 2019
ISBN 978-3-7315-0500-6
- Band 34** Ali Caglar Özen
Novel MRI Technologies for Structural and Functional
Imaging of Tissues with Ultra-short T_2 Values. 2017
ISBN 978-3-7315-0657-7
- Band 35** Anne Bäcker
Veränderliche 3D Zellgerüstträger auf Cryogelbasis
zur Kultivierung von Prostatakarzinomzellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0676-8
- Band 36** Frieder Johannes Koch
X-ray optics made by X-ray lithography:
Process optimization and quality control. 2017
ISBN 978-3-7315-0679-9

- Band 37** Tobias Jörg Schröter
Vergrößerung des Sehfeldes der Röntgen-Phasenkontrast-
Bildgebung für die klinische Anwendung. 2017
ISBN 978-3-7315-0731-4
- Band 38** Felix Vüllers
Bioinspired Superhydrophobic Nano- and Microstructured
Surfaces for Drag Reduction and Optoelectronics. 2018
ISBN 978-3-7315-0816-8
- Band 39** Frederik Kotz
Entwicklung neuer Materialien für die additive
Fertigung und das Rapid Prototyping von Glas
und Polymethylmethacrylat. 2018
ISBN 978-3-7315-0835-9
- Band 40** Michael Oldenburg
Photon upconversion heterostructures made from
surface-anchored metal-organic frameworks. 2019
ISBN 978-3-7315-0863-2
- Band 41** Elisa Kornemann
Entwicklung einer Röntgenzoomlinse. 2019
ISBN 978-3-7315-0885-4

ELISA KORNE MANN

Entwicklung einer Röntgenzoomlinse

Abbildende Verfahren wie die Röntgen-Vollfeldmikroskopie werden in der zerstörungsfreien Werkstoffanalyse eingesetzt, um Auflösungen im Submikrometerbereich zu erreichen. Dort werden abbildende Optiken benötigt, wofür brechende Röntgenlinsen für Photonenenergien oberhalb von 10 keV besonders gut geeignet sind. Die Brechungseigenschaften und demzufolge die Brennweite hängen jedoch stark von der Photonenenergie ab (chromatische Aberration). Damit solche Linsen universell mit konstanten optischen Eigenschaften über einen breiten Photonenenergiebereich einsetzbar sind, wurde in dieser Arbeit erstmalig eine Röntgenzoomlinse mit einem Bauvolumen von weniger als 1,7 Litern und einer Masse von nur 0,8 kg entwickelt. Aufgrund ihres kleinen Bauvolumens und der lithographischen Fertigung der Linsen ist sie den heute üblicherweise eingesetzten achromatischen oder brennweitenanpassbaren Systemen wie Kirkpatrick-Baez-Spiegel oder Transfokatoren in der Bildgebung weit überlegen. Denn das geringe Gewicht und die einfache Positionierung im Röntgenstrahl ermöglichen einen sehr flexiblen Einsatz, auch in bereits bestehenden röntgenoptischen Aufbauten. Dadurch werden Experimente in der Röntgen-Vollfeldmikroskopie möglich, die bisher nur mit chromatischen Optiken durchgeführt werden konnten.

ISSN 1869-5183

ISBN 978-3-7315-0885-4

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

