

Mikromechanischer, elektrostatischer Schrittaktor für die hyperspektrale Bildgebung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn
M.Sc. Csaba Endrődy

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Hoffmann
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger
3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Schlaak

Tag der Einreichung: 22.12.2016

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26.01.2018

URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000013](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000013)

Kurzfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines zweiachsigen, mikromechanischen Schrittaktors für die diskrete Positionierung eines Blenden-Arrays. Die Anwendung liegt dabei in der hyperspektralen Bildgebung, die beispielsweise für die Qualitätssicherung und Fernerkundung wertvolle Analysemöglichkeiten bietet.

Basierend auf dem chromatisch-konfokalen Prinzip kann eine spektrale Filterung mittels einer Lochblende, eines Hyperchromaten, eines Bildsensors und einer softwareseitigen Nachbearbeitung des abgebildeten Punktes erfolgen. Wenn anstelle der Lochblende ein Blenden-Array eingesetzt wird, können mehrere Objektpunkte gleichzeitig erfasst werden. Die Objektebene kann mit dem Scannen des Blenden-Arrays vollständig abgetastet werden.

Für diese aktorische Aufgabe wird ein mikromechanisches System entwickelt, das neben dem geringen Platzbedarf hohes Integrationspotential bietet und eine kostengünstige Serienfertigung möglich macht. Abgeleitet von den optischen Anforderungen wird ein Bewegungsbereich von $\pm 100 \mu\text{m}$ mit einer minimalen Schrittgröße von $10 \mu\text{m}$ benötigt. Das Blenden-Array wird aus $200 \mu\text{m}$ dünnem Glas hergestellt, hat eine Größe von $5,5 \times 7 \text{ mm}^2$ und eine Masse von $17\text{--}20 \text{ mg}$. Das reaktive Ionentiefenätzen von Silicium (DRIE) spielt eine zentrale Rolle bei der Fertigung der Aktorchips auf einem Silicon-on-Insulator (SOI) Wafer und wird für eine bessere Strukturtreue optimiert.

Es werden zwei Aktorsysteme entworfen und umgesetzt. Im ersten Teil wird ein linearer Mikroschritttaktor mit elektrostatischer Aktuierung realisiert. Die Anordnung des Blenden-Arrays wird um 18° gedreht, um auch mit der einachsigen Bewegung eine vollständige Abtastung der Objektebene zu ermöglichen. Der Schrittmechanismus greift auf die Idee der Inchworm-Bewegung zurück. Der lineare Mikroschritttaktor weist eine Schrittgröße abhängig vom verwendeten Fertigungsprozess zwischen $10,3\text{--}13,6 \mu\text{m}$ auf und erreicht Wiederholgenauigkeiten ($\pm 2\sigma$) von unter $\pm 1,2 \mu\text{m}$. Der Bewegungsbereich beträgt $206,7 \mu\text{m}$. Die Schrittfrequenz kann beliebig klein und bis maximal 25 Hz eingestellt werden. Das Mikrosystem hat eine Größe von $10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$ und eine rechteckige Apertur von $5 \times 6,5 \text{ mm}^2$. Die Betriebsspannung beträgt weniger als 180 V bei vernachlässigbarer Stromaufnahme.

Im zweiten Teil der Dissertationsschrift wird ein zweiachsiger Mikroschritttaktor entwickelt. Das Systemkonzept besteht aus drei zueinander justierten Funktionsebenen, in der Mitte mit dem gekapselten Blenden-Array. Auf der einen Seite sorgt der Aktorchip für die Fortbewegung des gekapselten optischen Elementes. Auf der anderen Seite fixiert der Klemmchip das Blenden-Array nach jedem ausgeführten Schritt. Der entworfene zweiachsige Mikroschritttaktor hat eine Größe von $14 \times 10,7 \times 1 \text{ mm}^3$. Es wird eine resonante Ansteuerung für eine hohe Schrittfrequenz und für hohe Federsteifigkeiten optimiert. Die Antriebsspannungen liegen unter 200 V . Das zweiachsige System erreicht die angestrebten Entwurfswerte mit einer Schrittgröße von $8,4\text{--}18,1 \mu\text{m}$ (abhängig vom DRIE-Prozess) und einem Bewegungsbereich von $217\text{--}236 \mu\text{m}$. Die Wiederholgenauigkeit der Schrittgrößen liegt bei ca. $\pm 1,17 \mu\text{m}$. Mit der resonanten Ansteuerung kann eine Schrittfrequenz von $13,5 \text{ Hz}$ erreicht werden.

Die unübliche Kombination von realisierter Schrittgröße, Bewegungsbereich und Traglast übertreffen die bekannten, siliciumbasierten Mikropositioniersysteme. Die umgesetzten Schritttaktoren haben kleinste Abmessungen und können in das hyperspektrale System problemlos integriert werden. Weitere Anwendungsfelder sind in der Optik und spektralen Abbildung vorstellbar: Farbfilter-Arrays, segmentierte Linsen und resonante Wellenleitergitter können diskret positioniert werden, um dabei die resultierende Bildqualität zu steigern.

Abstract

The main goal of this dissertation is the development of a micromechanical stepping drive for the discrete positioning of a pinhole array. The application field behind the system is hyperspectral imaging, which is a valuable method for data acquisition e.g. in quality assurance and remote sensing.

Based on the chromatic-confocal principle, optical spectral filtering can be carried out by using a pinhole, a hyperchromat, an image sensor and digital post processing of the imaged spot. By changing the pinhole to an array of pinholes, multiple object points can be imaged simultaneously. With the scanning motion of the pinhole array the complete object plane can be sampled.

For this actuation task a micromechanical system is developed offering a small footprint, high integration potential and a cost effective batch production. The needed stepping performance is deduced from the optical requirements: The displacement range of $\pm 100\ \mu\text{m}$ has to be scanned with a minimum step size of $10\ \mu\text{m}$. The pinhole array is fabricated from a $200\ \mu\text{m}$ thin glass wafer, has a surface area of $5,5 \times 7\ \text{mm}^2$ and weighs about 17–20 mg. The deep reactive-ion etch (DRIE) process is crucial for the functionality of the system and is optimized for high structure fidelity.

Two microactuation systems are designed and implemented. In the first stage, a linear micromechanical stepping drive with electrostatic actuation is realized. The layout of the pinhole array is tilted by 18° to make a complete sampling of the image possible. The stepping mechanism is inspired by the inch-worm motion. The linear stepping drive has a step size of about $10,3\text{--}13,6\ \mu\text{m}$ depending on the fabrication process used. A step size repeatability ($\pm 2\sigma$) below $\pm 1,2\ \mu\text{m}$ is achieved. The displacement range measures $206,7\ \mu\text{m}$. The stepping frequency can be increased from arbitrary slow to a maximum of 25 Hz. The size of the microsystem is about $10 \times 10 \times 0,5\ \text{mm}^3$ with a free optical aperture of $5 \times 6,5\ \text{mm}^2$. The operating voltage is below 180 V at a negligible electrical current.

In the second stage a two-axis stepping microdrive is developed. The system consists of three aligned functional layers with the pinhole array encapsulated in the middle. On the one side, the actuator chip takes care of the movement of the optical element. On the other side, the clamping chip fixes the pinhole array after each executed step. The designed two-axis microdrive has a size of $14 \times 10,7 \times 1\ \text{mm}^3$. A resonant control sequence is implemented for high stepping frequencies and high spring constants. The operating voltages are below 200 V. The two-axis system achieves the design goals with a step size of $8,4\text{--}18,1\ \mu\text{m}$ (depending on the DRIE-process) and a displacement range of $217\text{--}236\ \mu\text{m}$. An average step size repeatability of $\pm 1,17\ \mu\text{m}$ is measured (optimized DRIE-process). With the resonant control sequence a stepping frequency of up to 13,5 Hz is achieved.

The unusual combination of step size, displacement range and carried payload exceeds the known, silicon-based micropositioning systems. The implemented stepping drives have dimensions comparable to common image sensors and can therefore be easily integrated into the hyperspectral imaging system. Further potential applications are possible in the field of optics: discrete positioning of color filter arrays, segmented lens arrays and resonant waveguide gratings to increase the resulting image quality.

Publikationsliste des Autors

Teile dieser Arbeit wurden bereits in Fachzeitschriften und bei Konferenzen veröffentlicht. Veröffentlichungen außerhalb der Thematik dieser Dissertation sind am Ende der Publikationsliste aufgeführt. Die aus der nachfolgenden Liste zitierten Veröffentlichungen sind im Literaturverzeichnis zusätzlich aufgelistet.

Journalbeiträge

Endrödy, Csaba; Mehner, Hannes; Grewe, Adrian; Hoffmann, Martin:

Linear micromechanical stepping drive for pinhole array positioning

In: Journal of Micromechanics and Microengineering 25 (2015), Nr. 5

DOI 10.1088/0960-1317/25/5/055009

Endrödy, Csaba; Mehner, Hannes; Grewe, Adrian; Sinzinger, Stefan; Hoffmann, Martin:

2D stepping drive for hyperspectral systems

In: Journal of Micromechanics and Microengineering 25 (2015) Nr. 7

DOI:10.1088/0960-1317/25/7/074002

Hillenbrand, Matthias; Weiss, Robert; Endrödy, Csaba; Grewe, Adrian; Hoffmann, Martin; Sinzinger, Stefan:

Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays

In: Applied Optics 54 (2015) Nr. 15

DOI 10.1364/AO.54.004927

Konferenzbeiträge

Endrödy, Csaba; Mehner, Hannes; Grewe, Adrian; Sinzinger, Stefan; Hoffmann, Martin:

Zweiachsiger Mikroschrittaktor mit großem Stellweg für die Positionierung von Blenden-Arrays

In: Proceedings Mikrosystemtechnik-Kongress 2015

Karlsruhe, Germany: VDE-Verlag, Oktober 2015

ISBN 978-3-8007-4100-7

Endrödy, Csaba; Mehner, Hannes; Grewe, Adrian; Sinzinger, Stefan; Hoffmann, Martin:
2D stepping microdrive for hyperspectral imaging
In: 2015 – SPIE Proceedings
Barcelona, Spain: SPIE Microtechnologies, Mai 2015
DOI 10.1117/12.2178867

Endrödy, Csaba; Mehner, Hannes; Grewe, Adrian; Sinzinger, Stefan; Hoffmann, Martin:
Two-dimensional stepping drive for hyperspectral systems
In: MME 2014 – Istanbul / Micromechanics and Microsystems Europe Conference
Istanbul, Türkei: Micromechanics and Microsystems Europe Conference September, 2014

Mehner, Hannes; Endrody, Csaba; Hoffmann, Martin:
Linear stepping microactuator for hyperspectral systems
In: 2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)
Glasgow, UK: IEEE, August 2014
ISBN 978-0-9928-4140-9

Grewe, Adrian; Endrody, Csaba; Hillenbrand, Matthias; Cu-Nguyen, Phuong-Ha; Seifert, Andreas; Hoffmann, Martin; Sinzinger, Stefan:
Compact hyperchromatic imaging systems based on tunable optical microsystems
In: 2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)
Glasgow, UK: IEEE, August 2014
DOI 10.1109/OMN.2014.6924554

Cu-Nguyen, Phuong-Ha; Grewe, Adrian; Endrody, Csaba; Sinzinger, Stefan; Zappe, Hans; Seifert, Andreas:
Compact tunable hyperspectral imaging system
In: IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)
San Fransisco, USA: IEEE, Januar 2014
DOI 10.1109/MEMSYS.2014.6765854

Grewe, Adrian; Endrödy, Csaba; Fütterer, Richard; Cu-Nguyen, Phoung-Ha.; Steiner, Stefan; Hillenbrand, Matthias et al.:
Opto-mechanical microsystems for hyperspectral imaging sensors
In: Proceedings Mikrosystemtechnik-Kongress 2013
Aachen, Germany: VDE-Verlag, Oktober 2013
ISBN 978-3-8007-3555-6

Grewe, Adrian; Hillenbrand, Matthias; Endrödy, Csaba; Hoffmann, Martin; Sinzinger, Stefan:
Advanced phase plates for confocal hyperspectral imaging systems
In: Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology Arlington Virginia USA: Optics infobase Juni 2013
DOI 10.1364/AIO.2013.AW1B.2

Veröffentlichungen zur Mikrofluidik

Dittrich, Lars; Endrödy, Csaba; Hoffmann, Martin:

Mikropumpe mit elektrostatischem Direktantrieb

In: Proceedings MikroSystemTechnik Kongress 2013

Aachen: VDE Verlag Oktober 2013

ISBN 978-3-8007-3555-6

Dittrich, Lars; Endrödy, Csaba; Hoffmann, Martin:

Design and technology concept for a novel micropump coping without moving mechanical components

In: Proceedings of the 23rd Micromechanics Europe Workshop

Ilmenau, Germany 2012

ISBN 978-3-938843-71-0

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorstellung des hyperspektralen Abbildungssystems	2
1.2	Anforderungen an das Positioniersystem	4
1.3	Stand der Technik	8
1.3.1	Einachsige Mikroaktoren mit großem Stellweg und großer Schrittgröße . . .	9
1.3.2	Zweiachsige Mikroaktoren mit großem Stellweg und großer Schrittgröße . .	12
1.4	Zielsetzung und Aufbau der Disserationsschrift	17
2	Linearer Mikroschrittaktor	19
2.1	Entwurf des Schrittmechanismus	20
2.1.1	Einachsiges Schrittaktorkonzept basierend auf Inchworm-Bewegung und SOI-Technologie	22
2.2	Dimensionierung des einachsigen Mikroschrittaktors	24
2.2.1	Technologische Konstruktionsaspekte des einachsigen Mikroschrittaktors . .	25
2.2.2	Auslegung der Federführung und Elektroden	25
2.3	Fertigung des einachsigen Mikroschrittaktors	34
2.3.1	Fertigungsablauf des Aktorchips	34
2.3.2	Fertigungsablauf des absorbierenden Blenden-Arrays und die Mikromontage	35
2.3.3	Prozessentwicklung des reaktiven Ionentiefätzens von Silicium durch das Oxford Instruments PlasmaPro100 Estrelas Deep Silicon Etch System	37
2.4	Entwurf der Steuerung des einachsigen Mikroschrittaktors	44
2.4.1	Steuersignale des einachsigen Mikroschrittaktors	45
2.5	Vermessung des einachsigen Mikroschrittaktors	47
2.5.1	Vorstellung des Messaufbaus	48
2.5.2	Bewegungsanalyse eines Schrittvorgangs	49
2.5.3	Vermessung des linearen Positionierbereichs	50
2.5.4	Vermessung der Schrittgrößen des einachsigen Mikroschrittaktors	53
2.5.5	Versuche bei höheren Schrittfolgen	56
2.5.6	Bewertung der Messergebnisse des einachsigen Mikroschrittaktors	57
3	Zweiachsiger Mikroschrittaktor	59
3.1	Dimensionierung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	60
3.1.1	Dimensionierung der Elektroden und Federführungen des zweiachsigen Mikroschrittaktors	62
3.1.2	Finaler Entwurf des zweiachsigen Mikroschrittaktors	64
3.2	Herstellung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	66
3.2.1	Herstellung des Blenden-Arrays und der Abstandshalter	67
3.2.2	Herstellung des Klemmchips	67

3.2.3	Aufbau- und Verbindungstechnik, Präzisionsmontage	68
3.3	Entwurf der Steuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	73
3.3.1	Dynamische Ansteuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	73
3.3.2	Resonante Ansteuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	74
3.4	Vermessung des zweiachsigen Mikroschrittaktors	75
3.4.1	Bewegungsanalyse des resonant angesteuerten zweiachsigen Mikroschritt- aktors	77
3.4.2	Charakterisierung des Positionierbereichs des zweiachsigen Mikroschrittaktors	80
3.4.3	Charakterisierung der Schrittgrößen des zweiachsigen Mikroschrittaktors . .	81
4	Zusammenfassung	85
4.1	Ergebnisse der Arbeit	85
4.2	Weitere Forschungsmöglichkeiten	90
	Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	III
	Literatur	VII
	Anhang	
A	Messreihe des linearen Mikroschrittaktors mit schnellen Ansteuersignalen	XIII

1 Einleitung

Mikroaktorik zeigt neue Wege, um Positioniersysteme auf kleinstmöglichem Raum hoch integriert umzusetzen und öffnet damit innovative Möglichkeiten technische Aufgaben zu lösen. Die Kommerzialisierung von Mikroaktoren wurde erst intensiviert, als die Systeme in einem versiegelten Gehäuse mit hoher Lebensdauer betrieben werden konnten (RFMEMS¹, MOEMS²), [Jud06]. Digital Light Processing (DLP) ist eine der bekanntesten Anwendungen für ein mikromechanisches Aktorsystem: Mikrospiegel werden digital zwischen zwei gekippten Zuständen geschaltet, um damit Licht in eine gewünschte Richtung zu lenken [Lee13]. DLPs finden Anwendung u.a. in Projektoren, im maschinellen Sehen und der Spektroskopie, [Tex].

In dieser Arbeit werden ein einachsiger und zweiachsiger Mikroschrittaktor auf Siliciumbasis vorgestellt. Die Mikropositioniersysteme sollen optische Filter versetzen können, um damit die Abbildungsqualität eines neuartigen, chromatisch-konfokalen³, hyperspektralen Abbildungssystems deutlich zu verbessern. Als hyperspektrale Bildgebung (HSB) wird „die parallele Erfassung der spektralen Signaturen mehrerer Objektpunkte“ [Gre+13] bezeichnet. Die spektrale Signatur ist die Intensitätsverteilung des Lichtes über einen Wellenlängenbereich mit begrenzter Bandbreite. Es können dabei Wellenlängen außerhalb des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums⁴ detektiert werden. Die einzelnen Spektralkanäle sind enger und feiner aufgelöst als bei der multispektralen Abbildung. Durch die gewonnene spektrale Information verbunden mit räumlichen Bildinformationen können Materialien und stoffliche Zusammensetzungen identifiziert, quantifiziert und räumlich aufgelöst werden. HSB findet Anwendung in der Qualitätssicherung, z.B. bei der Analyse der Mischungshomogenität medizinischer Produkte [Lyo+02] und medizinischer Diagnostik [Akb+12; GYM06] oder in der Fernerkundung und Landwirtschaft [Til+].

Die Realisierung des neuartigen, chromatisch-konfokalen, hyperspektralen Abbildungssystems (kurz HAS) war das Ziel des Projektes OPMISEN (**O**ptische **M**ikrosysteme für die hyperspektrale **S**ensorik). Das Projekt wurde seitens des Fachgebiets (FG) Mikromechanische Systeme drei Jahre lang bearbeitet. Projektpartner waren dabei:

- Fachgebiet Technische Optik (TO) mit Projektkoordinator PROF. DR. STEFAN SINZINGER
- FG Qualitätssicherung (QS) von der Technische Universität (TU) Ilmenau.
- Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg und
- Institut für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller Universität Freiburg.

Da die Motivation und das Ziel für die zu entwickelnden Mikroaktoren das hyperspektrale, optische System bildet, werden diese angrenzenden Systemteile im Folgenden kurz vorgestellt.

¹RFMEMS: engl. radio frequency microelectromechanical Systems

²MOEMS: engl. micro-opto-electromechanical systems

³Chromatisch-konfokales System: zwei gekoppelte optische Systeme, die einen gemeinsamen Brennpunkt auf dem Objekt besitzen und die Dispersion vom Licht gezielt ausnutzen (z.B. für die Abstandsmessung des Objektpunktes)

⁴Sichtbares, elektromagnetisches Spektrum: 380–780 nm

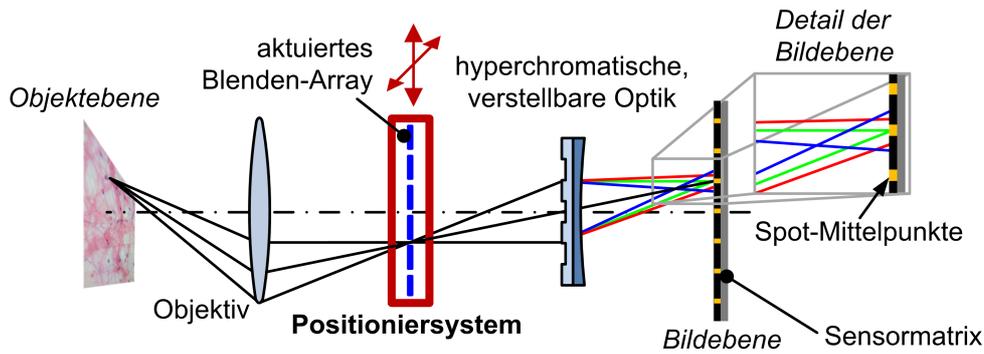


Abbildung 1.1: Optischer Aufbau des chromatisch-konfokalen, hyperspektralen Abbildungssystems

1.1 Vorstellung des hyperspektralen Abbildungssystems

Der konzeptionelle Aufbau des optischen Systems ist in Abbildung (Abb.) 1.1 dargestellt. Das optische System besteht aus einer Kombination aus kommerziellen und speziell für das HAS gefertigten optischen Elementen.

Die Objektebene wird mit der Optik auf eine farbfilterlose, hochauflösende Sensormatrix mit bekannter, breitbandiger spektraler Lichtempfindlichkeit projiziert. Im ersten, linken Teil des optischen Systems findet eine Zwischenabbildung der Objektebene auf das Blenden-Array statt (Abb. 1.2(a)). Das Blenden-Array ist ein flaches, optisches Element bestehend aus kreisrunden, optisch transparenten Öffnungen, die in einer Matrix gleichmäßig über dessen Fläche verteilt sind. Es maskiert das darauf abgebildete Bild, wobei eine Bildpunktmatrix entsteht (Abb. 1.2(b)). Diese Zwischenebene wird durch ein Hyperchromat⁵ mit verstellbarer Brennweite auf der digitalen Sensorfläche abgebildet. Das Hyperchromat verteilt die Fokusebenen von den spektralen Komponenten der Bildpunkte entlang der optischen Achse. Dadurch wird auf der Sensorfläche ein enges Spektrum scharf abgebildet. Der Rest des Spektrums bildet einen defokussierten Fleck um den fokussierten Punkt (Abb. 1.2(c)). Wenn die Brennweite des Hyperchromaten verstellt wird, können unterschiedliche Spektralbereiche auf dem Sensor scharfgestellt werden. Das digital erfasste Bild (Abb. 1.2(d)) wird mit einem Bildanalyseprogramm weiterprozessiert: die Spot-Mittelpunkte werden in ihren Intensitäten ausgewertet und dabei der defokussierte Bereich ausmaskiert. Die Intensität der Spotmitte wird jeweils für den ganzen Spot eingesetzt (Abb. 1.2(e)). Die Intensitätswerte werden anhand von Kalibrierkurven korrigiert, um der inhomogenen spektralen Empfindlichkeit des Bildsensors und den Abbildungsfehlern des optischen Systems entgegenzuwirken.

Anhand der eingestellten Brennweite des Hyperchromaten wird eine Wellenlänge⁶ zur gemessenen Intensität zugeordnet (Abb. 1.2(f)). Somit wird eine Matrix von Objektpunkten für eine Wellenlänge aufgenommen. Es werden nachfolgend Bilder bei weiteren Wellenlängen digital erfasst und gespeichert. Zum Schluss werden die Bilder zu einem hyperspektralen Bildkubus zusammengeführt. Die dabei erstellte Datei kann im Nachhinein mit geeigneten Algorithmen analysiert und ausgewertet werden.

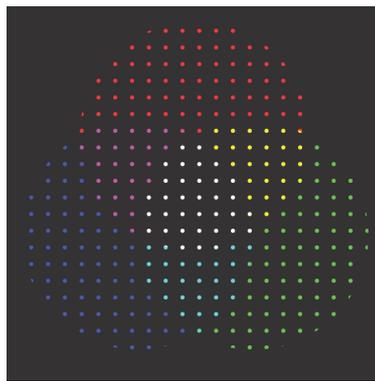
In gängigen spektralen Abbildungssystemen wird die Objektebene Punkt für Punkt oder Linie für

⁵Hyperchromat: Linsenelement mit starker longitudinaler, chromatischer Aberration, in dieser Arbeit ein diffraktives Element

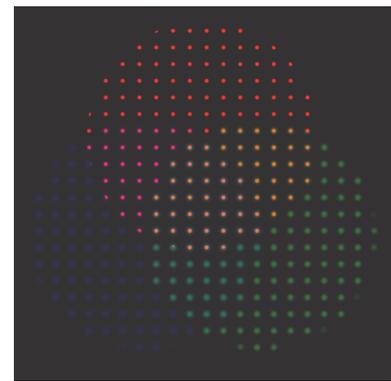
⁶Es handelt sich um einen Spektralbereich, dessen Maximum sich bei der entsprechenden Wellenlänge befindet.



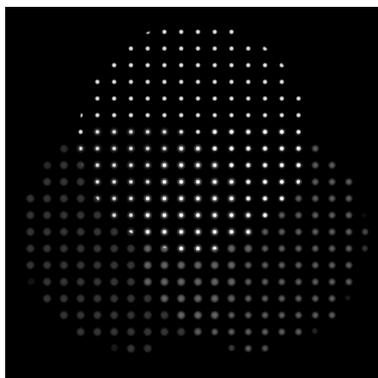
(a) Beispielobjekt mit überlappenden Kreisen der Farben Rot (611 nm), Grün (549 nm) und Blau (464 nm) (RGB)



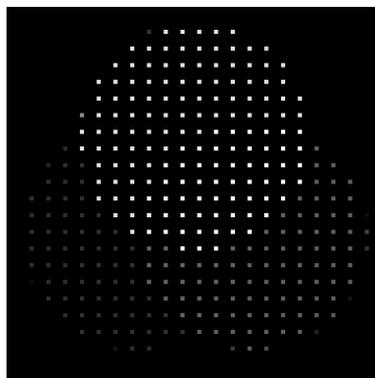
(b) Bild nach der Maskierung mit dem Blenden-Array



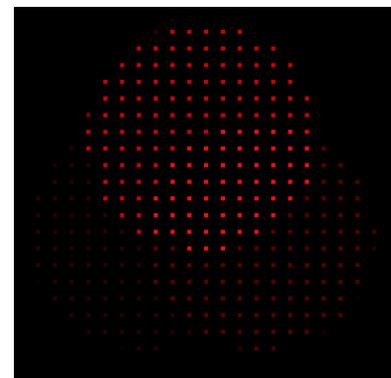
(c) 611 nm wird mit der verstellbaren Optik scharfgestellt



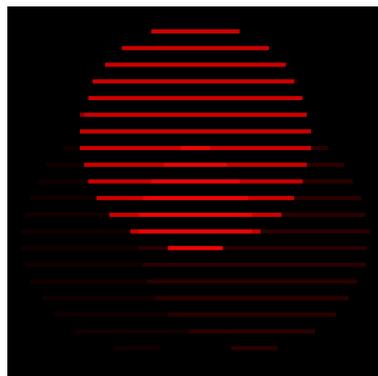
(d) Mit der Sensormatrix digital erfasstes, monochromatisches Bild



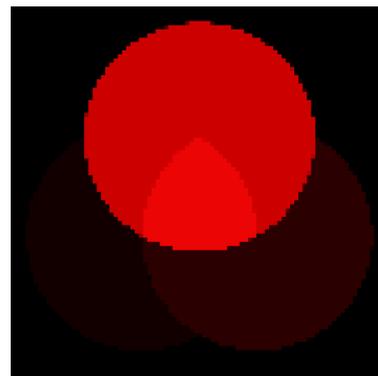
(e) Die Intensität der Spotmitte wird jeweils für den ganzen Spot eingesetzt



(f) Das Bild wird anhand der Position der verstellbaren Optik zur entsprechenden Wellenlänge zugeordnet



(g) Wenn das Blenden-Array entlang einer linearen Achse schrittweise (diskret) positioniert wird, werden zusammenhängende Linien der Objektebene erfasst



(h) Wenn das Blenden-Array entlang zwei senkrechter Achsen diskret positioniert wird, wird die gesamte Objektebene erfasst

Abbildung 1.2: Das Konzept der hyperspektralen Bilderfassung mithilfe des chromatisch-konfokalen Prinzips

Linie abgerastert und das Spektrum aufgenommen. Vorteil des chromatisch-konfokalen Konzeptes ist (Abb. 1.1), dass bei einer Aufnahme für eine Wellenlänge gleichzeitig mehrere räumliche Objektpunkte verteilt über die gesamte Objektebene mit dem Blenden-Array aufgenommen werden. Das System eignet sich daher bei Aufgaben, bei denen ein enges Spektrum mit hoher räumlicher Auflösung erfasst werden soll. Die zu erfassende Wellenlänge kann dabei frei eingestellt werden. Typischer Anwendungsbereich ist die Qualitätssicherung, bei der Materialien oder Strukturen anhand der spektralen Eigenschaften erkannt werden sollen.

Durch die Verwendung eines statischen (starren) Blenden-Arrays können nur die auf die Blendenöffnungen (Pinholes) projizierten Objektbereiche auf dem Sensor abgebildet werden. Um den ganzen Objektraum erfassen zu können, wird das Blenden-Array schrittweise mit einem Positioniersystem verschoben, so dass alle Objektbereiche mindestens einmal auf der Sensormatrix projiziert werden. Die dabei entstehenden Bilder werden nach der Bildbearbeitung summiert. Somit ergibt sich ein vollständiges Bild mit deutlich höherer räumlicher Bildinformation, siehe (s.) Abb. 1.2(g) und 1.2(h).

Ausführliche Details und Messungen bezüglich des optischen Aufbaus und der Abbildungseigenschaften können von erfolgten Veröffentlichungen von GREWE, HILLENBRAND und CU-NGUYEN entnommen werden: [Gre+13; GHS13; Gre+; Hil+15; Hil+13b; Hil+13a; Hil+12; HGS12; CuN+14; CuN+13].

1.2 Anforderungen an das Positioniersystem

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Aktorik ausgehend vom optischen System abgeleitet und spezifiziert. Das Blenden-Array wird als ein Bestandteil des Positioniersystems behandelt. Die folgenden Festlegungen wurden in Zusammenarbeit mit Herrn ADRIAN GREWE, MATTHIAS HILLENBRAND (FG TO) und RICHARD FÜTTERER (FG QS) getroffen.

Insgesamt ergeben sich die Leistungsmerkmale des HASs aus dem Zusammenspiel von vier technischen Domänen:

- Sensorik,
- Aktorik,
- Optik und
- Bildverarbeitung.

Das optische Konzept hat mehrere Parameter, die Einfluss auf die aktorischen Anforderungen haben. Entscheidend beim Entwurf des Schrittaktors sind der Blendendurchmesser und Rasterabstand. In Tabelle 1.1 sind die wichtigsten aktorischen Entwurfparameter aufgelistet und ihr Einfluss auf die Leistungsmerkmale des HASs dargestellt.

Die Leistungsmerkmale werden im Folgenden definiert:

Die **Spektrale Auflösung** wird als

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1.1)$$

definiert, wobei λ die mittlere Wellenlänge des messbaren Spektrums und $\Delta\lambda$ die Wellenlängendifferenz zwischen gerade noch trennbaren Spektrallinien ist, [Kit95].

Die **Aufnahmegeschwindigkeit** (oder Aufnahmefrequenz) ist die Reziproke der Aufnahmezeit. Die Aufnahmezeit ist das Zeitintervall, das bei einer vorgegebenen spektralen und räumlichen Abtastdichte notwendig ist, um ein vollständiges, hyperspektrales Bild zu erfassen.

Die **räumliche Auflösung (lokal) oder kurz Auflösung** ist der Abstand zwischen zwei voneinander trennbaren Strukturen/Punkten an einer Stelle des hyperspektralen Bildes. Der Wert wird typischerweise als Linienpaare pro Millimeter (Lp/mm) angegeben.

Der **Füllfaktor** (a_f) ist das Verhältnis zwischen der durch das Blenden-Array beleuchteten Sensorfläche A_{exp} und der gesamten Sensorfläche A_{CCD} , mit der Annahme, dass die Abbildung des Blenden-Arrays auf die Sensorfläche aberrationsfrei ist.⁷

$$a_f = \frac{A_{\text{exp}}}{A_{\text{CCD}}} [\%] \quad (1.2)$$

Wenn das Blenden-Array schrittweise bewegt wird, werden die A_{exp} der erfassten Bilder addiert. Bei der Addition muss die Überlappung der beleuchteten Flächen beachtet werden.

Tabelle 1.1: Einfluss der Entwurfsparameter auf die Leistungsmerkmale des HASs: als positive Beeinflussung \oplus wird ein Zusammenhang definiert, wenn mit der Erhöhung des Entwurfsparameters der Wert des Leistungsmerkmals auch steigt. Im Falle von einer negativen Beeinflussung \ominus ist der Zusammenhang umgedreht. Kein direkter Zusammenhang ist mit leeren Zellen gekennzeichnet.

Entwurfsparameter	Leistungsmerkmale			
	spektrale Auflösung	Aufnahmegeschwindigkeit	räumliche Auflösung	Füllfaktor a_f
Blendendurchmesser	\ominus	\oplus	\ominus	\oplus
Rasterabstand	\oplus	\ominus	\ominus	\ominus
Schrittgröße		\oplus	\ominus	\ominus
Positionierbereich		\ominus		\oplus
Schrittfrequenz		\oplus		

Die angestrebten Leistungsmerkmale beeinflussen sich auch gegenseitig. Anhand der aufgeführten Korrelationen können die Leistungseigenschaften des HASs auf spezifische Anwendungen optimiert werden: Wenn der Blendendurchmesser größer wird, wird eine geringere spektrale und räumliche Auflösung erreicht. Dadurch ergibt sich eine inverse (\ominus) Korrelation. Die Geschwindigkeit und der Füllfaktor steigen jedoch mit zunehmendem Blendendurchmesser (\oplus). Somit eignet sich ein System mit großem Blendendurchmesser für Anwendungen, bei denen eine schnelle Bilderfassung benötigt wird und die spektrale und räumliche Auflösung eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Vorstellung der HAS-Komponenten und abgeleiteten Anforderungen findet unterteilt in den drei technischen Domänen Sensorik, Aktorik und Optik statt. Die Bildverarbeitung wird aus thematischen Gründen in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

⁷Berechnung des Füllfaktors: Durch Bildverarbeitung wird der Kontrast des Bildes soweit erhöht, dass nur weiße und schwarze Pixel vorhanden sind. Danach wird aus dem Histogramm die Anzahl der weißen Pixel mit der Gesamtpixelzahl dividiert.

Sensorik

Als Bildsensor hat das FG QS den SONY ICX415AL CCD⁸-Sensor mit breiter spektraler Empfindlichkeit gewählt (s. Datenblatt [Son03]), der Gestaltungsfreiheit für die Elektronik und Programmierung bzw. Steuerung gewährleistet. Diese Eigenschaften sind wichtig, um später die Bewegung des Positioniersystems und der verstellbaren Optik mit der Bilderfassung synchronisieren zu können. Zusätzlich ist ein direkter Zugriff auf die Empfindlichkeit des Sensors, die Auslesefrequenz und den elektronischen Shutter möglich. Die Bildauflösung (768×576 px, ca. 60 Lp/mm) und die Videoaufnahmefunktion entsprechen den Anforderungen, die an das HAS gestellt werden. Das optische Abbildungssystem zwischen Blenden-Array und Sensormatrix weist einen Abbildungsmaßstab von $\beta \leq 1$ auf und wird hinsichtlich der Abbildungsfehler korrigiert. Um die Fläche des Bildsensors maximal ausnutzen zu können, entsprechen die minimalen Abmessungen der effektiv genutzten Fläche des Blenden-Arrays denen des CCD-Sensors (6490,6×4830,6 μm^2). Damit wird die Fläche des Blenden-Arrays inkl. Randbereich auf 7040×5440 μm^2 festgelegt. Wenn der Filter in Borosilikatglas Borofloat33⁹ mit 200 μm Dicke umgesetzt wird, ergibt sich eine Traglast von 17 mg.

Das einachsige Abscannen des Bildbereichs mit dem Blenden-Array ergibt ein Bild, bei dem die räumliche Auflösung, wenn die anderen Systemkomponenten vernachlässigt werden, durch den Blendendurchmesser und Schrittgröße maßgeblich definiert wird. Die räumlichen Bildinformationen, die durch eine Blendenöffnung des Arrays auf dem Bildsensor abgebildet werden, können nicht mehr voneinander getrennt werden. Wenn der Blendendurchmesser groß ist, ist das System lichtempfindlicher, hat aber eine schlechtere Auflösung. Berechnet man die räumliche Auflösung anhand des Blendendurchmessers, ergibt sich bei einem Durchmesser von 20 μm eine maximale Auflösung von 25 Lp/mm.

Aktorik

Die Schrittgröße ist in diesem Vergleich der Abstand zwischen zwei Fotodioden. In dem Sinne bringt eine kleine Schrittgröße eine höhere Auflösung mit sich. Bei einer Überlappung von zwei Bildpunkten kann man mit Bildverarbeitung die Auflösung weiter steigern. Es muss aber beachtet werden, dass die nicht-ideale Abbildung der Optik sowie Streuung, Beugung, Reflexionen und elektrisches Rauschen des Sensors die erreichbare Auflösung begrenzen. In Anbetracht der Lichtintensität und der optischen Aberrationen des Systems soll der kleinste Blendendurchmesser 20 μm betragen.

Es sollen über 12 spektrale Kanäle im Bereich von 300–1100 nm auflösbar sein. Ausgehend von optischen Simulationen wird die angestrebte spektrale Auflösung bei einem Rasterabstand (Abstand zwischen zwei Blendenöffnungen) von 65 μm erreicht, wobei 200 μm als Maximalwert angestrebt wird. Mit einer Schrittgröße von 10 μm und einem Positionierbereich von 190 μm können 100 % der Objektebene erfasst werden. Als Vergleichswert beträgt der Füllfaktor im Falle eines statischen Blenden-Arrays mit 20 μm Blendendurchmesser und 65 μm Rasterabstand $a_f = 7,4\%$. Schrittgrößen bis 15 μm bringen immer noch eine wesentliche Bildinformationssteigerung mit $a_f = 75\%$. In Tabelle 1.2 ist für drei Rasterabstände berechnet, wie viele Bildpunkte mit einem

⁸CCD: engl. charge-coupled device, ladungsgekoppeltes Element

⁹Dichte von Borofloat33: $2,23 \text{ g/cm}^3 = 2230 \text{ kg/m}^3$

Tabelle 1.2: Einfluss des Rasterabstands auf die Anzahl an parallel erfassten Bildpunkten bei einem Blendendurchmesser von 20 μm

Rasterabstand	Anzahl an parallel erfassten Bildpunkten
65 μm (um 18° gedreht)	7364
120 μm	2255 (55×41)
180 μm	999 (37×27)

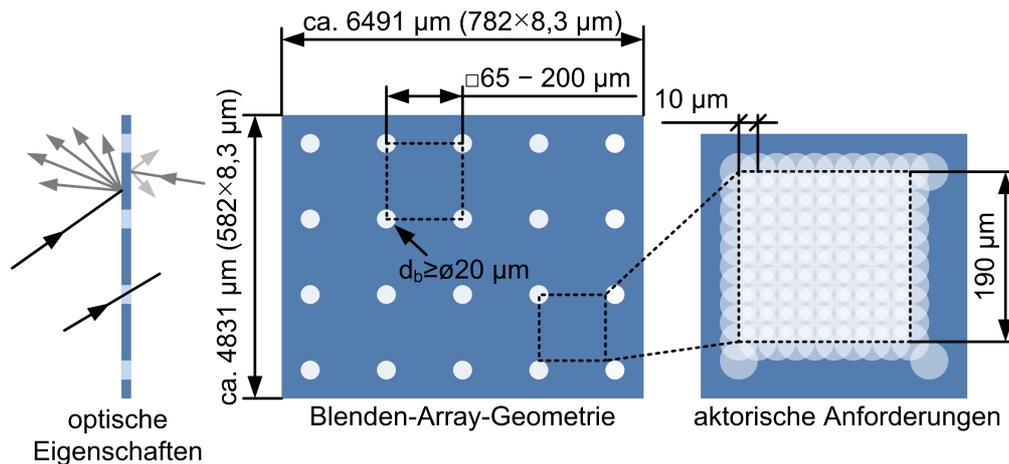


Abbildung 1.3: Anforderungen an das Blenden-Array

ca. $5 \times 6,5 \text{ mm}^2$ großen Blenden-Array parallel erfasst werden können.

Die notwendige Genauigkeit des Positioniersystems hängt von der konkreten Applikation des HASs ab. In dieser Arbeit wird eine Wiederholgenauigkeit¹⁰ der Schrittgröße von unter $\pm 1 \mu\text{m}$ als Ziel gesetzt, um die Bildauflösung möglichst homogen zu halten. Bei einer minimalen Blendengröße von $20 \mu\text{m}$ bedeutet eine Abweichung von $1 \mu\text{m}$ eine 5%ige Schwankung der räumlichen Auflösung und wird in diesem Ausmaß toleriert. Die maximale Abweichung der Schrittgröße soll $3 \mu\text{m}$ nicht überschreiten. Übersprechen¹¹ der orthogonalen Antriebsachsen soll vernachlässigbar ($< 1\%$) sein. In Abb. 1.3 sind die wichtigsten Anforderungen an das Blenden-Array zusammengefasst. Die notwendige Dynamik des Positioniersystems hängt stark von den Belichtungsverhältnissen des Objektes ab. Grundsätzlich muss die Ausführung eines Schrittes schneller als der Auslesevorgang (20 ms) des CCD-Sensors erfolgen, um keine weiteren Totzeiten im Bilderfassungsvorgang zu verursachen. Eine Position soll in den meisten Fällen nicht länger als 30 s gehalten werden können. Diese Vorgaben bedeuten eine Schrittfrequenz von 0,03 Hz bis max. 50 Hz.

Optik

Um eine hohe Abbildungsqualität zu gewährleisten, sind weitere Eigenschaften des Blenden-Arrays außer dem Blendendurchmesser und Rasterabstand von Interesse.

¹⁰Definition in Abschnitt 2.5

¹¹Definition in Abschnitt 2.5.

Tabelle 1.3: Zusammenfassung der Anforderungen an das Positioniersystem

Eigenschaft	Wert
Positionierbereich	$\pm 100 \mu\text{m}$
Schrittgröße	$\pm 10 \mu\text{m}$
Wiederholgenauigkeit ($\pm 2\sigma$)	$\pm 1 \mu\text{m}$
Übersprechen der Antriebsachsen	$< 1 \%$
Größe des integrierten Blenden-Arrays	$7040 \times 5440 \mu\text{m}^2$
Schrittfrequenz	0,03 – 50 Hz
Traglast	17–20 mg

- Die Oberfläche des Blenden-Arrays soll auf beiden Seiten eine möglichst hohe Absorption im relevanten Spektrum haben. Direkte Reflexionen sind nicht erwünscht und diffuse Reflexionen können in geringem Maß toleriert werden. Störende Reflexionen können mit Antireflexionsschichten auf den optischen Elementen unterdrückt und eine hohe optische Transmission gewährleistet werden.
- Die Rauheit der Oberfläche innerhalb der Blendenöffnungen soll minimal sein, um Streuung zu vermeiden. Die maskierende Schicht des Blenden-Arrays soll so dünn wie möglich sein, um Reflexionen und Abschattungen an der Kante der Blenden zu minimieren.

Das chromatisch-konfokale Konzept bietet ein großes Miniaturisierungspotential. Durch die Verwendung von diffraktiven Linsen und Spiegeloptiken mit gefalteter Strahlführung kann ein portables HAS realisiert werden. Um diesen Vorteil beizubehalten, muss das Positioniersystem auch kleinstmögliche Abmessungen besitzen. Eine flache Ausführung mit integriertem Blenden-Array wird angestrebt. Die elektrische Ansteuerung des Positionierers muss mit den anderen aktiven Systemkomponenten synchronisierbar sein. Mit einem niedrigen Energieverbrauch soll auch ein batteriebetriebener Einsatz ermöglicht werden. Aufgrund der Vision das optische System später planar herzustellen und die Aktorik darauf integrieren zu können ([Sin15]), ist eine mikrotechnische Lösung auf Basis der Silicium-Technologie am erfolgversprechendsten. Die abgeleiteten Anforderungen an das Positioniersystem sind in Tabelle 1.3 zusammengefasst.

1.3 Stand der Technik

Im Folgenden werden bestehende, auf Silicium-Technologie basierende Positionierlösungen anhand der im Abschnitt 1.2 festgelegten Eigenschaften auf ihre Eignung überprüft. Dazu wurde die internationale Fachliteratur auf Mikroschrittaktoren bzw. Mikroaktoren mit großem Stellweg und Schrittgröße durchsucht (Stand Juli, 2016). Die benutzten Suchbegriffe waren dabei: Schritttaktor, zwei orthogonale Bewegungsachsen, optischer Anwendungsbereich, großer Positionierbereich und Schrittgröße. Weitere Filterungskriterien waren: große Fläche des positionierten Elements, statischer Betrieb und kleine System- und Einbaugröße. Die Ergebnisse der Literaturrecherche werden aufgeteilt nach einachsigen- und zweiachsigen Mikroaktoren.

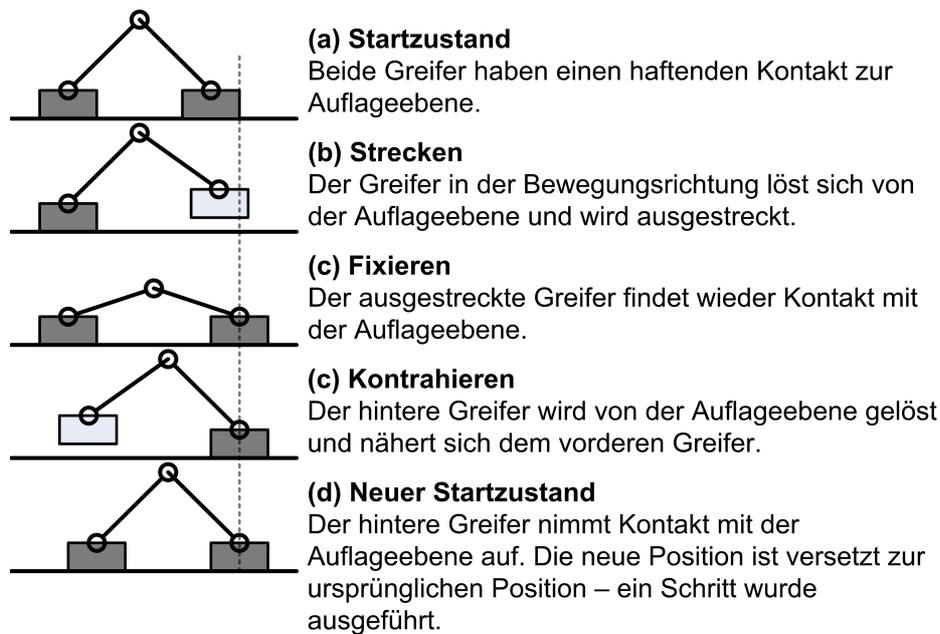


Abbildung 1.4: Prinzip der Inchworm-Bewegung

1.3.1 Einachsige Mikroaktoren mit großem Stellweg und großer Schrittgröße

Im ersten Schritt werden einachsige Mikroaktoren aus der Literatur vorgestellt, die durch Kaskadierung zweiachsig gestaltet werden können. Eine Auswahl an Veröffentlichungen ist in Tabelle 1.4 mit den wichtigsten, umgesetzten Aktoreigenschaften aufgelistet. Bedingt durch die einfache Dimensionierung, Ansteuerung, halbleitertechnische Fertigung und hohe Dynamik dominieren elektrostatische Lösungen. Wo nicht angemerkt, handelt es sich beim Aktorprinzip um elektrostatische Krafterzeugung. Alle Systeme erlauben eine *quasistatische*¹² Positionierung. Die Bewegungskonzepte basieren abgesehen von MITA ET AL. ([Mit+03]) auf dem *Inchworm*-Bewegungsprinzip (Klemmbewegung), um trotz der kleinen Reichweite von elektrostatischen Kräften einen großen Positionierbereich zu ermöglichen.

Grundlegend besteht die klassische *Inchworm*-Bewegung aus 5 Schrittphasen, s. Abb. 1.4. Die *Inchworm*-Bewegung kann weiter abstrahiert und auf Positioniersysteme angewendet werden, bei denen ein großer Positionierbereich und eine konstante Schrittgröße erwünscht sind.

Die untersuchten Literaturstellen weisen keine einachsigen Positioniersysteme auf, die sich mit einem transparenten Fenster oder Apertur für den optischen Einsatz bereits eignen würden. Die maximale Schrittgröße von $5\ \mu\text{m}$ wurde mit thermoelastischen Aktoren erreicht, wobei der Positionierbereich nur $15\ \mu\text{m}$ beträgt, [Kwo+03]. TODA und YANG ([TE; TY07]) haben elektrostatische Kammaktoren mit einem PZT¹³-Stapel kombiniert. Die Geschwindigkeit des Systems kombiniert mit der Schrittgröße ergibt ca. 12 s Bewegungsdauer für $10\ \mu\text{m}$ Verschiebung und ist damit für das hyperspektrale System zu träge. Aus Sicht der Spezifikationen kommt der einachsige Mikroschritktor von SHUTOV ET AL. am nächsten an das geplante Positioniersystem heran, [Shu+04]. Für die translatorische Bewegung sorgen dabei fünf Subsysteme, die insgesamt (ohne die verwendete Führungsschiene) eine Gesamtlänge von 4–5 cm besitzen, s. Abb. 1.5. Mit dem Aufbau lässt sich kein kompaktes, integriertes System realisieren.

¹²Quasistatische Positionierung bedeutet hier, dass die angefahrenen Positionen beliebig lang gehalten werden können.

¹³PZT: Blei-Zirkonat-Titanat, Piezokeramik mit relativ hohem Kopplungsfaktor

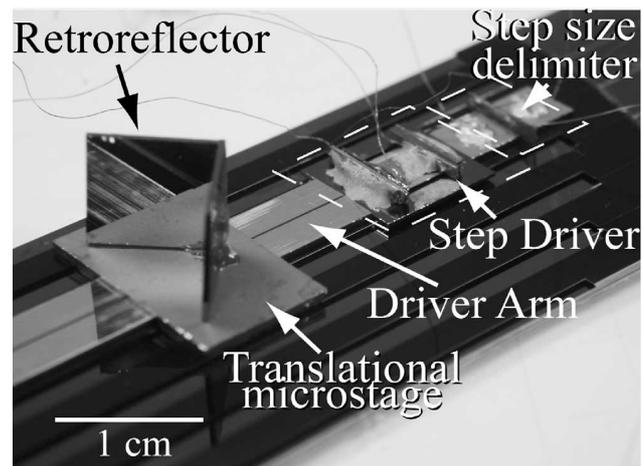


Abbildung 1.5: Foto des *Inchworm*-Mikrosystems bestehend aus einem bewegten Tisch (*microstage*), Antriebsarm (*driver arm*), Schrittantrieb (*step driver*) und Schrittbegrenzer (*step size delimiter*). Originalabbildung im Artikel [Shu+04], Nachdruck mit Erlaubnis vom ELSEVIER.

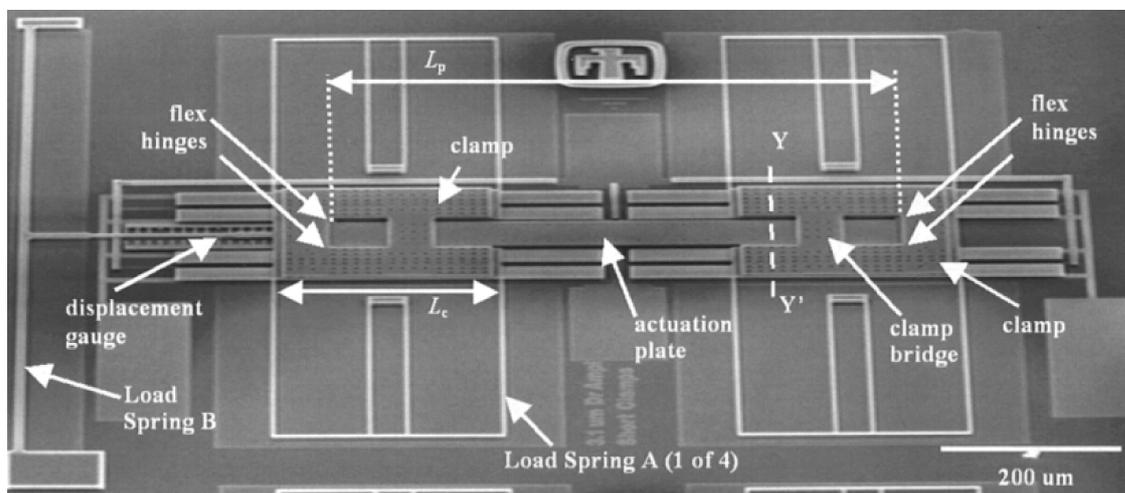


Abbildung 1.6: REM-Aufnahme des *Inchworm*-Aktuators von DEBOER ET AL., [deB+04]. ©2004 IEEE

Obwohl DEBOER ET AL. einen vergleichbar großen Positionierbereich erreicht, liegt die Schrittgröße zwischen 10–100 nm und es wurde keine Apertur realisiert, siehe die REM¹⁴-Aufnahme in Abb. 1.6, [deB+04]. Es gibt mehrere Gründe, warum die angestrebte Akteurleistung noch nicht mikrotechnisch in der Siliciumtechnologie umgesetzt wurde. Typischerweise werden mit Mikrosystemen vernachlässigbar kleine Massen <0,1 mg bewegt, die einer Belastung von <1 μN entsprechen. So können im Falle von externen Beschleunigungen keine großen, internen Kräfte entstehen. Das mikromechanische System bleibt unbeschädigt und kann zuverlässig weiter arbeiten. Positionierbereich, Schrittgröße und Präzision liegen bei Positionierungsaufgaben eines Mikrosystems üblicherweise im unteren Mikro- bzw. Nanometerbereich. Die Kombination der gestellten aktorischen Eigenschaften ist ungewöhnlich und fordert ein individuelles Entwurfskonzept.

In Kapitel 2 wird ein einachsiger Mikroschrittaktor präsentiert, der die Anforderungen (Tabelle 1.3) an das Positioniersystem erfüllt. Mit einer angepassten Blenden-Array-Anordnung wird eine komplette Erfassung der Objektebene trotz der einachsigen Aktuierung ermöglicht.

¹⁴REM: Rasterelektronenmikroskop

Tabelle 1.4: Lineare Mikroschrittaktoren aus der Literatur und ihre ausgewählten Eigenschaften. Standardabweichungen werden mit $\pm\sigma$ angegeben. Die Werte entsprechen den erreichten Maximalwerten. Wenn ein Wertebereich angegeben wird, wurden mehrere Systeme in der Literaturstelle vorgestellt. (b_x : maximaler, statischer Positionierbereich; a_i : Schrittgröße; f_a : Schrittfrequenz; m_t : Traglast; U_{\max} : maximale Betriebsspannung; theo. ∞ : theoretisch unbegrenzter Positionierbereich.)

Literaturstelle	b_x	a_i	f_a	m_t	U_{\max}	Besonderheiten
DANEMAN, 1996 [Dan+96]	350 μm	$0,27 \pm 0,16 \mu\text{m}$	7–7,2 kHz	–	50 V	mit Feedback
BALTZER, 1997 [BKO97]	110 μm	3 μm	–	–	15–30 V	
CUSIN, 2000 [CSK00]	4 mm	300 nm	10–100 Hz	–	120 V	
YEH, 2002 [YHP02]	80 μm	2 μm	<1 kHz	–	33 V	theo. ∞
KWON, 2003 [Kwo+03]	15 μm	0,5–5 μm	<250 Hz	–	–	thermoelastisches Aktorprinzip
MITA, 2003 [Mit+03]	∞	10–20 nm	200 Hz	1,2 mg	100 V	„impact“ Aktor, theo. ∞
TAS, 2003 [Tas+03]	15 μm	50 nm	1 Hz	–	40 V	
SHUTOV, 2004 [Shu+04]	5 cm	0,05–2 μm	10–30 Hz	1 g	120–200 V	
DEBOER, 2004 [deB+04]	$\pm 100 \mu\text{m}$	± 10 –100 nm	0–80 kHz	–	150 V	SUMMIT V ¹⁵
KIM, 2005 [Kim+05]	3 μm	5,2–120 nm	1,68 kHz	–	15 V	
TODA, 2006/7 [TY07]	>600 μm	59–856 nm	1 Hz	–	150–200 V	mit PZT kombiniert, theo. ∞
ERISMIS, 2008 [Eri+08]	$\pm 18 \mu\text{m}$, $\pm 35 \mu\text{m}$	1 bzw. 4 μm	1 Hz–1 kHz	–	7–16 V	
ERISMIS, 2009 [Eri+09]	$\pm 12 \mu\text{m}$	160 nm	–	–	18 V	
SARAJLIC, 2010 [Sar+10]	$\pm 70 \mu\text{m}$	0,6–62 nm	0,2–80 kHz	–	25–55 V	–
PENSKY, 2013 [PB13]	∞	2 μm	1,2 kHz	–	<120 V	unidirektional
diese Arbeit	$\pm 100 \mu\text{m}$	10 μm	50 Hz	17 mg	–	rechteckige Apertur $5 \times 6,5 \text{ mm}^2$

¹⁵SUMMIT V: etablierte Fertigungstechnologie für MEMS (engl. microelectromechanical system) mit fünf funktionellen Siliciumschichten, [SB00]

1.3.2 Zweiachsige Mikroaktoren mit großem Stellweg und großer Schrittgröße

Es sind mehrere auf Siliciumtechnologie basierende Mikropositioniersysteme aus der Literatur bekannt, die Stellwege im Mikrometerbereich entlang zwei linearer, zueinander orthogonaler Achsen implementiert haben. Eine Übersicht ist in Tabelle 1.5 zu sehen. Im Gegensatz zu den vorgestellten einachsigen Mikroaktoren sind nur analog betriebene und keine *Inchworm*-Mikrosysteme auf Siliciumbasis bekannt (ausgenommen [BSD08]). Entsprechend werden die relevanten Eigenschaften angepasst. Elektromagnetische Schrittmotoren, wie der XY-Mikroschrittaktor von HANSEN und GATZEN ([HG11]) werden hier nicht weiter betrachtet, da der Stromverbrauch von elektromagnetischen Systemen relativ hoch ist. Die hybride Fertigung (Führung durch Kugellager mit Rubinkugeln, teilweise Einsatz von Dauermagneten) sowie die notwendige Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) sind im Hinblick auf eine zukünftige, kostengünstige Herstellung ungeeignet. Die Abnutzung im Falle von Kugellagerführungen oder der Stromverbrauch bei elektromagnetischer Levitation sind Nachteile, die den Einsatz solcher Systeme weiter einschränken. Der Positionierbereich von analogen, elektrostatischen Kammaktoren ist durch die prinzipbedingte, mechanische Instabilität begrenzt. Wenn die elektrostatische Kraft höher als die Federkraft der Aufhängung ist und sich mit weiterer Auslenkung kein Kräftegleichgewicht mehr einstellt, kommt es zum sog. *pull-in*, dem Einschnappen und Kurzschluss der Elektroden. Daher ist das Ziel der meisten neuen, analogen, elektrostatischen Aktorsysteme innovative Ansätze aufzuzeigen, mit denen sich der stabile Bereich der Auslenkung maximieren lässt.

Aktoren mit zwei linearen Antriebsachsen (2D-Aktoren) lassen sich aus Sicht der Achsenkopplung in zwei Gruppen unterteilen:

1. seriell gekoppelte und
2. parallel gekoppelte 2D-Aktoren.

In Gruppe (1) fällt der größte Teil der makroskopischen, mehrachsigen Positioniersysteme, s. Abb 1.7. Die zweite Achse sitzt auf einer Plattform, die mit der ersten Achse bewegt wird. Somit haben die zwei Achsen eine unterschiedlich hohe Last und unterschiedliche Resonanzfrequenzen. Die Arbeitspunkte der Antriebe bleiben von der Querachse aber unbeeinflusst. In Gruppe (2)

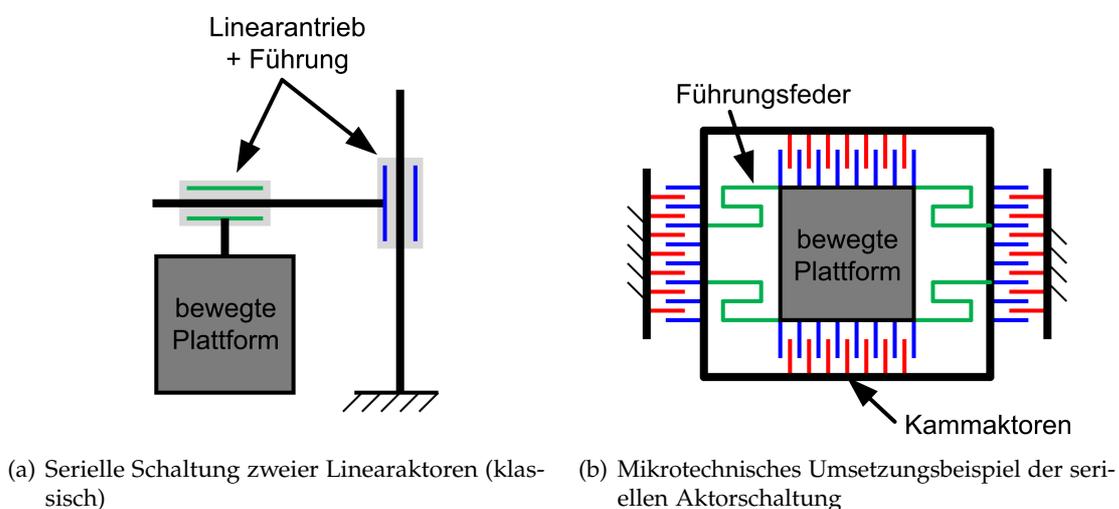


Abbildung 1.7: Seriell, zweiachsiges Aktorkonzept

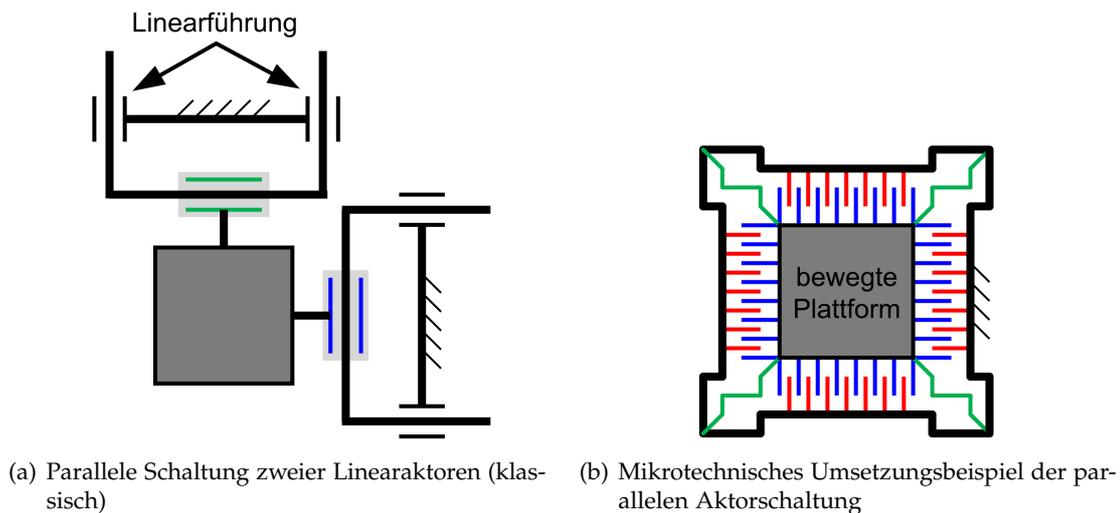


Abbildung 1.8: Paralleles, zweiachsiges Aktorkonzept

befinden sich Systeme, die die Plattform parallel zueinander bewegen können, s. Abb 1.8. Folglich werden die Arbeitsbereiche der beiden Aktoren durch deren Bewegungen gegenseitig beeinflusst. Dem Übersprechen kann man mit optimierter Geometrie oder mit geregelten Systemen aktiv entgegenwirken. Ein Vorteil der parallelen Kopplung ist die kompakte Ausführung auch im Falle einer mikrotechnischen, 2,5-dimensionalen Umsetzung. Da die gezielte Nachgiebigkeit in Querrichtung der Antriebe bzw. Aktoren gewährleistet werden muss, ist die Auslegung paralleler Aktorsysteme komplex. Mit dem besonderen Werkstoff Silicium als Einkristall ist es möglich weitaus lineare Federcharakteristiken für die nachgiebigen Führungen zu Nutze zu machen. Somit ist die parallele Kopplung für Mikrosysteme vorteilhaft und wird häufig eingesetzt.

Das angesprochene Übersprechen ist bei vielen der in Tabelle 1.5 aufgelisteten Beispielen trotz paralleler Kopplung vernachlässigbar. Bei OLFATNIA ET AL. ([Olf+13]) wurde ein maximales Übersprechen von 3% relativ zum Stellweg gemessen. Das *X-Y micro-stage* von LASZCZYK ET AL. ([Las+10]) ist das einzige System in der Auswahl mit seriell gekoppelten Achsen. Zusätzlich ist es eines der MOEMS mit offenem Fenster für eine Linse, s. Abb. 1.9. Einen besonderen Lösungsansatz bietet das von Plottermechanik inspirierte *Two-axis Microstage System*, [BSD08]. Als einziger Schritttaktor aus der Liste ermöglichen rotatorische Kammaktoren, Zahnräder und Spiralführungen eine diskrete zweiachsige Positionierung der kleinen Plattform mit Schrittgrößen < 500 nm. Die vorgestellte Mechanik lässt aber nur eine unidirektionale Bewegung zu.

Zusammengefasst ist aus Tabelle 1.5 ersichtlich, dass nur die *dual-axis micro-stage* von OLFATNIA ET AL. mit $180 \mu\text{m}$ an die Zielsetzung des Positionierbereichs herankommt, s. Abb. 1.10. Das implementierte MEMS wurde aber nicht für höhere Traglasten ausgelegt (die Belastbarkeit des Systems wird nicht diskutiert). Die höchste Last kann das *Silicon micro XY-stage* von CHE-HEUNG KIM ET AL. ([Che+03]) mit $2,8 \text{ mg}$ tragen, bleibt aber mit dem Positionierbereich von $\pm 18 \mu\text{m}$ weit hinter dem angesetzten $200 \mu\text{m}$. Kein zweiachsiges Mikropositioniersystem aus der vorgestellten Literaturrecherche wäre für das anvisierte HAS einsetzbar. Die größte Herausforderung schien der angestrebte Positionierbereich in Kombination mit der Schrittgröße und der Traglast zu sein. Wie das Ziel dieser Arbeit erreicht werden soll, wird im nächsten Abschnitt skizziert.

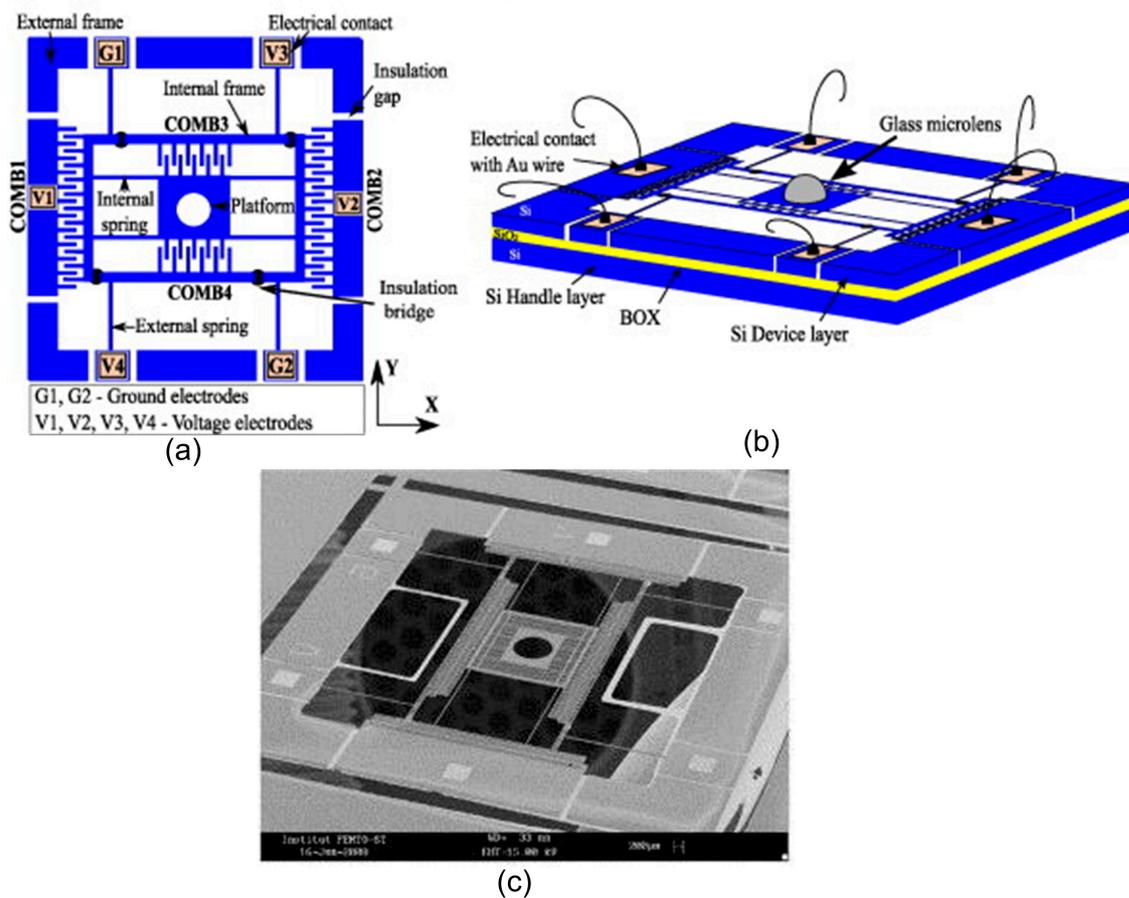


Abbildung 1.9: (a) Schematischer Entwurf des zweiachsigen Systems, (b) nach der Mikromontage, (c) REM-Aufnahme der Plattform mit einer Apertur von $\varnothing 800 \mu\text{m}$. Originalabbildungen im Artikel [Las+10], Nachdruck mit Erlaubnis vom ELSEVIER.

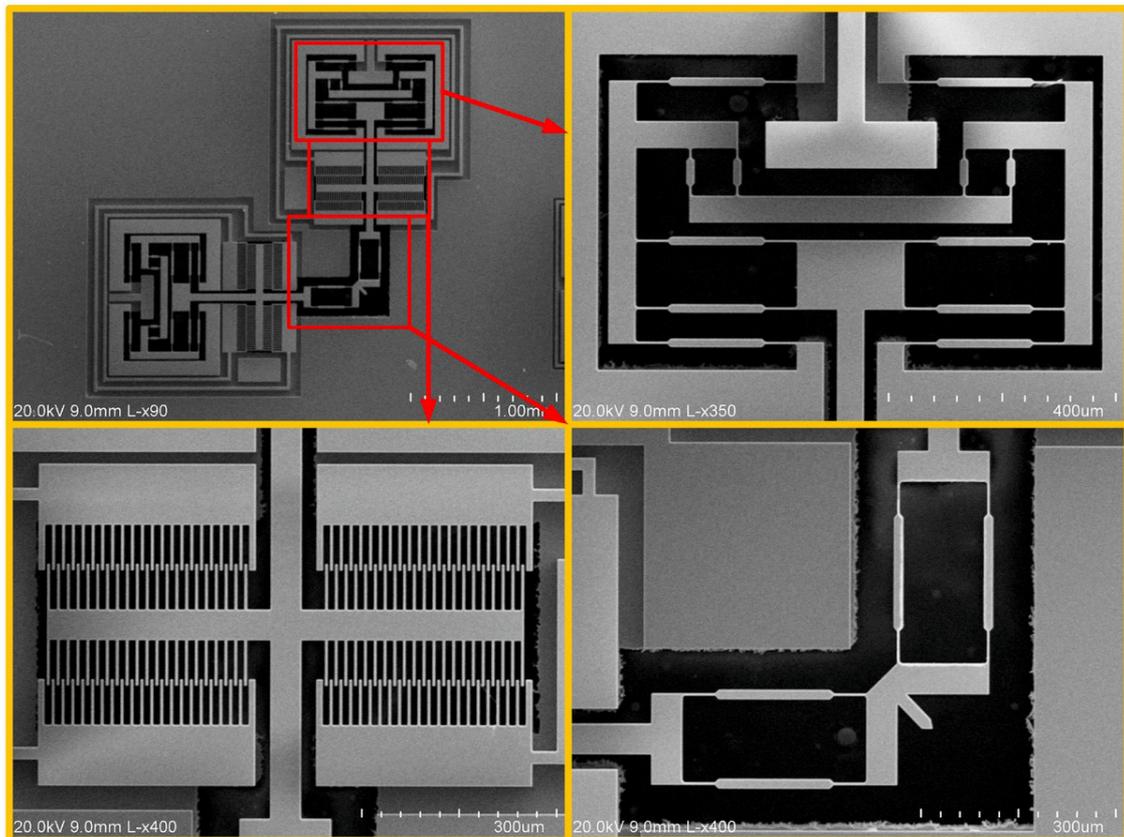


Abbildung 1.10: REM-Aufnahmen des zweiachsigen Mikropositionierers von OLFATNIA ET AL., [Olf+13] ©2013 IOP Science

Tabelle 1.5: Zwei- oder mehrachsige Mikroschrittaktoren aus der Literatur und ihre ausgewählten Eigenschaften. b_x, b_y : maximaler Positionierbereich in die jeweilige Richtung, wenn nur ein Wert angegeben: $b_x = b_y$; δ_w : Wiederholgenauigkeit; A_t : Tischgröße; t_d : Tischdicke; m_t : Traglast; f_0 : erste Resonanzfrequenz des Tisches; U_{\max} : maximale Betriebsspannung; NL.: Nichtlinearität; n.m.: nicht messbar, f_a : Schrittfrequenz.

Literaturstelle	b_x b_y	δ_w	A_t t_d	m_t	f_0	U_{\max}	Besonderheiten
LEE, 2000 [LHM00]	40 μm	-	400 \times 300 μm^2	54 μg	240 Hz	40 V	keine quasi-statische Messung
CHE-HEUNG KIM, 3003 [Che+03]	$\pm 18 \mu\text{m}$	1,5 % NL.	5,5 \times 5,5 mm^2 48 μm	2,8 mg	164 Hz	12 V	Anwendung als Datenspeichersystem
Gu, 2006 [Gu+06]	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 18 \text{nm}$	1,6 \times 1,6 mm^2 40 μm	-	-	23 V	
KWON, 2006 [Kwo+06]	55 μm	180 nm	$\varnothing 1 \text{mm}$ 40 μm	-	280 Hz	40 V	optische Anwendung im IR-Bereich
BEVERLY, 2008 [BSD08]	110 μm	-	-	-	$f_a = 50 \text{Hz}$	23 V	unidirektional, SUMMiT V, 500 nm Schritt, Zahnradantrieb
LASZCZYK, 2010 [Las+10]	$\pm 28 \mu\text{m}$ $\pm 37 \mu\text{m}$	$\pm 0,15 \mu\text{m}$ $\pm 0,83 \mu\text{m}$	2,2 \times 2,2 mm^2	67 μg	550 Hz 550 Hz	100 V	mikrooptische Anwendung
OLFATNIA, 2013 [Olf+13]	180 μm	1 μm	-	-	400 Hz	<100 V	weitere relevante Referenzen
diese Arbeit	$\pm 100 \mu\text{m}$	<1 μm	7 \times 5,5 mm^2 200 μm	17 mg	-	<200 V	rechteckige Apertur Schrittmechanismus

1.4 Zielsetzung und Aufbau der Disserationsschrift

Anhand der Literaturrecherche werden im Folgenden die Herausforderungen dieser Arbeit beschrieben (die Aussagen beziehen sich auf siliciumbasierte Mikrosysteme):

- $200 \times 200 \mu\text{m}$ quasistatischer Positionierbereich: Der angesetzte Positionierbereich mit zwei senkrechten, linearen Achsen wurde bisher noch nicht erreicht.
- $10 \mu\text{m}$ Schrittgröße: mikromechanische Schritttaktoren besitzen typischerweise Schrittgrößen im Nanometerbereich. Die maximal publizierte Schrittgröße beträgt $5 \mu\text{m}$, [Kwo+03].
- 17–20 mg Traglast: Mit wenigen Ausnahmen ([Shu+04; Che+03]) ist die bewegte Nutzlast von Mikroaktoren vernachlässigbar bzw. nicht angegeben oder bleibt im Mikrogramm-Bereich. Zusammen mit der Integrationsmöglichkeit eines optischen Elements und einer entsprechenden Apertur ist kein kompaktes Mikropositioniersystem bekannt.

Das Ziel ist im Folgenden ein solches Mikropositioniersystem zu entwickeln, welches die Kombination dieser Herausforderungen bewältigt und damit die Grenzen bestehender Mikroaktoren erweitert. In welchen Schritten dies umgesetzt wird, spiegelt der Aufbau der Dissertationsschrift wieder:

- Im Kapitel 2 wird ein einachsiger Mikroschrittaktor entwickelt und vermessen. Eine zur Bewegungsrichtung geneigte Blenden-Array-Anordnung ermöglicht die vollständige Erfassung der Objektebene im HAS. Im Abschnitt 2.1 werden Methoden der Kraftherzeugung verglichen. Es wird das Aktorprinzip ausgewählt und ein Schrittmechanismus ausgearbeitet. Im Abschnitt 2.2 findet die Dimensionierung unter Berücksichtigung der technologischen Möglichkeiten statt. Abschnitt 2.4 beschreibt das Steuerungskonzept des einachsigen Schritttaktors und die dazugehörige soft- und hardwareseitige Umsetzung. Abschnitt 2.3 betrachtet die Fertigungstechnologie und fasst den Prozessablauf der Systemkomponenten zusammen. Es wird das DRIE¹⁶ von Silicium optimiert, um die Strukturtreue des elektromechanischen Aktorchips zu verbessern. Anschließend wird der Mikroaktor im Abschnitt 2.5 bezüglich der erreichten Schrittgrößen, des Positionierbereichs, der Dynamik und Wiederholgenauigkeit charakterisiert.
- Im Kapitel 3 wird mithilfe der Erkenntnisse des einachsigen Systems die Konstruktion und Fertigung eines zweiachsigen Mikroschrittaktors vorgestellt. Der Ablauf des Kapitels folgt dem Muster des Kapitels 2. Besonderheiten sind die zwei vorgestellten Methoden zur Ansteuerung des Aktorsystems im Abschnitt 3.3. Weiterer Fokus des Kapitels liegt auf der komplexen Aufbau- und Verbindungstechnik des zweiachsigen Mikroaktors (Abschnitt 3.2).

¹⁶DRIE: engl. deep reactive-ion etching, tiefes reaktives Ionenätzen

2 Linearer Mikroschrittaktor

Basierend auf den Festlegungen aus Abschnitt 1.2 wird in diesem Kapitel ein einachsiger Mikroschrittaktor entworfen und umgesetzt. Mit einem angepassten Blenden-Array kann die komplette Objektebene für die hyperspektrale Abbildung mit einer einachsigen Bewegung erfasst werden. Die Symmetrieachse der Blenden-Array-Anordnung wird dazu rotiert¹ und der Pinholeabstand entsprechend des Positionierbereichs gewählt. Der für die spektrale Auflösung wichtige Mindestabstand ($65\ \mu\text{m}$) zwischen den Pinholes wird dabei beibehalten.

Mit dem maximal festgelegten Positionierbereich ($200\ \mu\text{m}$), minimalen Blendendurchmesser ($20\ \mu\text{m}$) bzw. Rasterabstand von $65\ \mu\text{m}$ ergibt sich ein Rotationswinkel von 18° (Vorschlag FG TO). Mit dieser Anordnung ohne die Aktuierung des Blenden-Arrays (wie in [BSN06]) würde das HAS ca. 7% der Objektebene abbilden. Mit einer einachsigen Aktuierung (Schrittgröße $10\ \mu\text{m}$) lässt sich dies auf bis zu $a_f = 90\%$ steigern, s. Abb. 2.1.

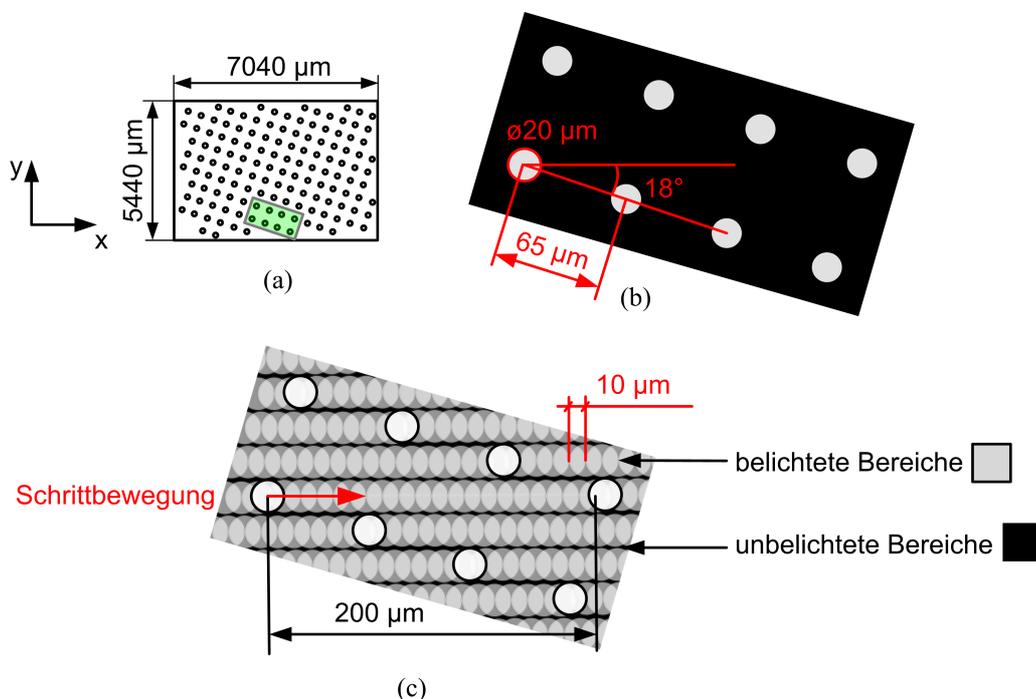


Abbildung 2.1: Geometrieparameter der rotierten Blenden-Array-Anordnung. Eine einachsige Schrittbewegung reicht aus, um die Objektebene bis zu 90% zu erfassen.

¹Die Neigung der Anordnung wurde bereits zur Erhöhung der spektralen Auflösung von vergleichbaren Abbildungssystemen eingesetzt, [Bac+88; Kla+13; BSN06].

2.1 Entwurf des Schrittmechanismus

Zum Schrittmechanismus wird im ersten Schritt das Aktorprinzip ausgewählt. Die Ziele bei der Auswahl neben der notwendige Krafterzeugung sind

- ein batteriebetriebener Einsatz (niedriger Energieverbrauch),
- kosteneffektive Fertigungstechnologie und
- kompakte Abmessungen zu ermöglichen.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass das elektrostatische Prinzip sehr erfolgreich bei Mikropositioniersystemen einsetzbar ist. Es gibt drei weitere, typische Prinzipien, um in Mikrosystemen Kräfte zu erzeugen: piezoelektrisch, thermisch und elektromagnetisch, wobei sich magnetische und piezoelektrische Aktoren nur begrenzt mit klassischer Mikrotechnologie fertigen lassen. Um das geeignete Prinzip auswählen zu können, werden ähnlich zu einer SWOT²-Analyse, die Stärken und Chancen sowie die Schwächen und Gefahren der jeweiligen Krafterzeugungsmethode in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Anhand der aufgelisteten und bewerteten Merkmale wird das elektrostatische Prinzip gewählt. Elektromagnetische Aktoren verbrauchen relativ viel elektrische Energie. Das würde die portable Umsetzung deutlich einschränken. Thermische Aktoren benötigen für eine hohe Dynamik geringe thermische Kapazitäten und für die Schrittgröße große Hebellängen. Deren Energieverbrauch ist ebenfalls nicht vernachlässigbar. Piezoelektrische Krafterzeugung in der Aktorchip- bzw. Blenden-Array-Ebene (in-plane) ist mit einer hybriden Fertigungstechnologie möglich. Dabei würde ein kommerziell erhältlicher Piezostapel in das Mikrosystem integriert und die erzeugte Auslenkung mit Hebelmechanismen bis zur Schrittgröße verstärkt. Eine andere Möglichkeit wäre es, mit Submikrometerschritten und hoher Schrittfrequenz zu arbeiten. In beiden Fällen würde die Kaskadierung zu einem zweiachsigen System die AVT deutlich komplexer und das System relativ groß machen.

Beim elektrostatischen Prinzip besteht kein Bedarf an besonderen Materialien oder Komponenten. Der Herstellungsprozess besteht aus wenigen Schritten. Es können freigestellte Siliciumstrukturen mit geeigneter p-Dotierung und einem niedrigen elektrischen Widerstand direkt als Elektroden verwendet werden. Der Energieverbrauch ist gering, da die Kapazitäten und Widerstände typischerweise klein sind. Zusätzlich können bei kleinen Abständen ($< 25 \mu\text{m}$) hinreichend hohe Kräfte ($> 10 \mu\text{N}$) bei akzeptablen elektrischen Spannungen ($< 200 \text{V}$) ohne zusätzliche Hebelmechanismen erzeugt werden. Mit hohen Kräften kann auch die geforderte Dynamik erreicht werden. Weiterhin hat die Umgebungstemperatur keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten im Gegensatz zu einem thermisch angeregten Aktor. Wird ein Schrittmechanismus verwendet, kann der notwendige Positionierbereich umgesetzt werden. Die genannten Schwächen und Gefahren (Tabelle 2.1) des elektrostatischen Prinzips können mit einem innovativen Entwurf und Systemkonzept weitgehend reduziert werden, wie es in den nächsten Abschnitten gezeigt wird.

²SWOT: engl. Strengths Weaknesses Opportunities Threats, eine entscheidungsunterstützende Methode, die typischerweise in der strategischen Analyse verwendet wird

Tabelle 2.1: SWOT-Analyse der wichtigsten Aktorprinzipien

	Stärken und Chancen	Schwächen und Gefahren
elektrostatisch	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ hohe Kraft bei kleinen Abständen ⊕ mit etablierten MEMS-Prozessen umsetzbar ⊕ einfacher Entwurf und Auslegung ⊕ keine besonderen Materialien notwendig ⊕ niedriger Energieverbrauch ⊕ günstige Herstellung 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Kraft sinkt quadratisch mit Elektrodenabstand ⊖ Versagen durch elektrischen Kurzschluss bei hoher Spannung oder Berührung der Elektroden ⊖ für die große Schrittgröße hohe Anzahl an Elektroden und hohe Spannung notwendig ⊖ Instabilität, Pull-in grenzt den Stellweg ein
piezoelektrisch	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ sehr hohe Kraftwirkung ⊕ hohe Dynamik ⊕ niedriger Energieverbrauch ⊕ durch Verwendung von Hebelmechanismen kann die Auslenkung erhöht werden 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ kleine Auslenkung ⊖ aufwendige Technologie ⊖ Dünnschichttechnologie für in-plane Auslenkung eingeschränkt möglich ⊖ Hysterese ⊖ Aufwändige AVT ⊖ hohe Fertigungskosten
thermomechanisch	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ sehr hohe Kraftwirkung ⊕ mit etablierten MEMS-Prozessen umsetzbar ⊕ durch Verwendung von Hebelmechanismen kann die Auslenkung erhöht werden 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ hoher Energieverbrauch ⊖ begrenzte Dynamik ⊖ kleine Auslenkung ⊖ für in-plane Aktuierung eingeschränkt geeignet ⊖ Energieverbrauch grenzt batteriebetriebene Anwendung ein
elektromagnetisch	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ hohe, bidirektionale Kraftwirkung ⊕ hohe Dynamik ⊕ Kraft mit Stromfluss gut einstellbar ⊕ Verbrauchsreduzierung durch Einsatz von Dauermagneten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ hoher Energieverbrauch grenzt batteriebetriebene Anwendung ein ⊖ komplexer mikrotechnischer Entwurf ⊖ aufwendige Fertigungstechnologie

2.1.1 Einachsiges Schrittaktorkonzept basierend auf Inchworm-Bewegung und SOI-Technologie

Die benötigte in-plane Schrittbewegung mit konstanter Schrittgröße kann mit einer Inchworm-Bewegung umgesetzt werden (vgl. Unterabschnitt 1.3.1). Um den Platzbedarf für die elektrostatische Krafterzeugung zu minimieren, wird eine dreidimensionale Elektrodenkonfiguration entworfen. In Abb. 2.2 ist vereinfacht, mit zwei Potentialniveaus dargestellt, wie die Elektrodenanordnung die elektrostatischen Kräfte für den entworfenen Schrittmechanismus erzeugen kann. Gefertigt aus einem SOI-Wafer³ befinden sich Filtrahmen, Seiten- und Kammelektroden im Devicelayer und die Klemmelektrode im Handlelayer. Das Blenden-Array verfügt über keine aktorische Aufgabe und wird in den Filtrahmen integriert.

Die 6 Teilschritte der entwickelten *Inchworm*-Bewegung sind in Abb. 2.3 schematisch dargestellt und erklärt. Die vereinfachte, dreidimensionale Darstellung zeigt eine Schnittansicht des Systems, um die Elektrodenanordnung sichtbar zu machen. Das im Filtrahmen integrierte Blenden-Array ist in Abb. 2.3 nicht separat dargestellt. In den Teilschritten (a), (e) und (f) wird der positionierte Rahmen vertikal zu der unterliegenden Klemmelektrode fixiert. Damit ist es möglich den Schrittmechanismus auf minimalem Raum zu realisieren und die Fläche des Gesamtsystems klein zu halten.

Wie sich der Schrittmechanismus und die Elektrodenanordnung in einem konkreten Entwurf umwandeln lassen, wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

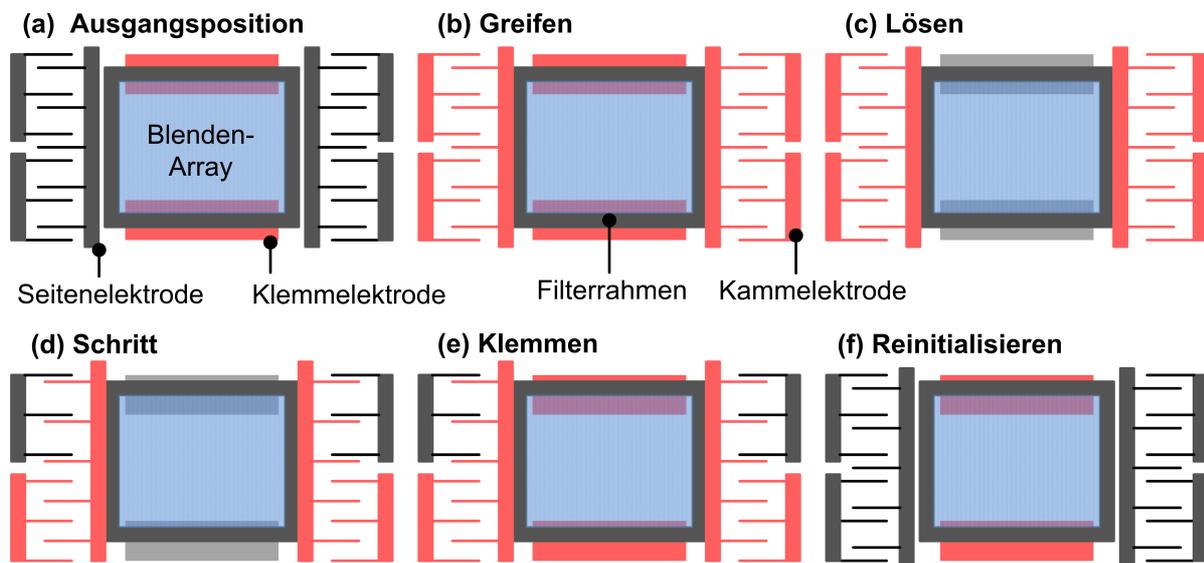


Abbildung 2.2: Potentialdifferenzen der Elektroden für die elektrostatische Krafterzeugung (Grau, Schwarz: Bezugspotential; Rot: erhöhtes Potential)

³SOI: engl. silicon-on-insulator, Silicium auf Isolator, ein Wafer bestehend aus einem Devicelayer aus Silicium, ein BOX-Layer (engl.: buried oxide) aus SiO_2 und ein Handlelayer wiederum aus Silicium. Die Dicke des Handlelayers ist größer als die vom Devicelayer.

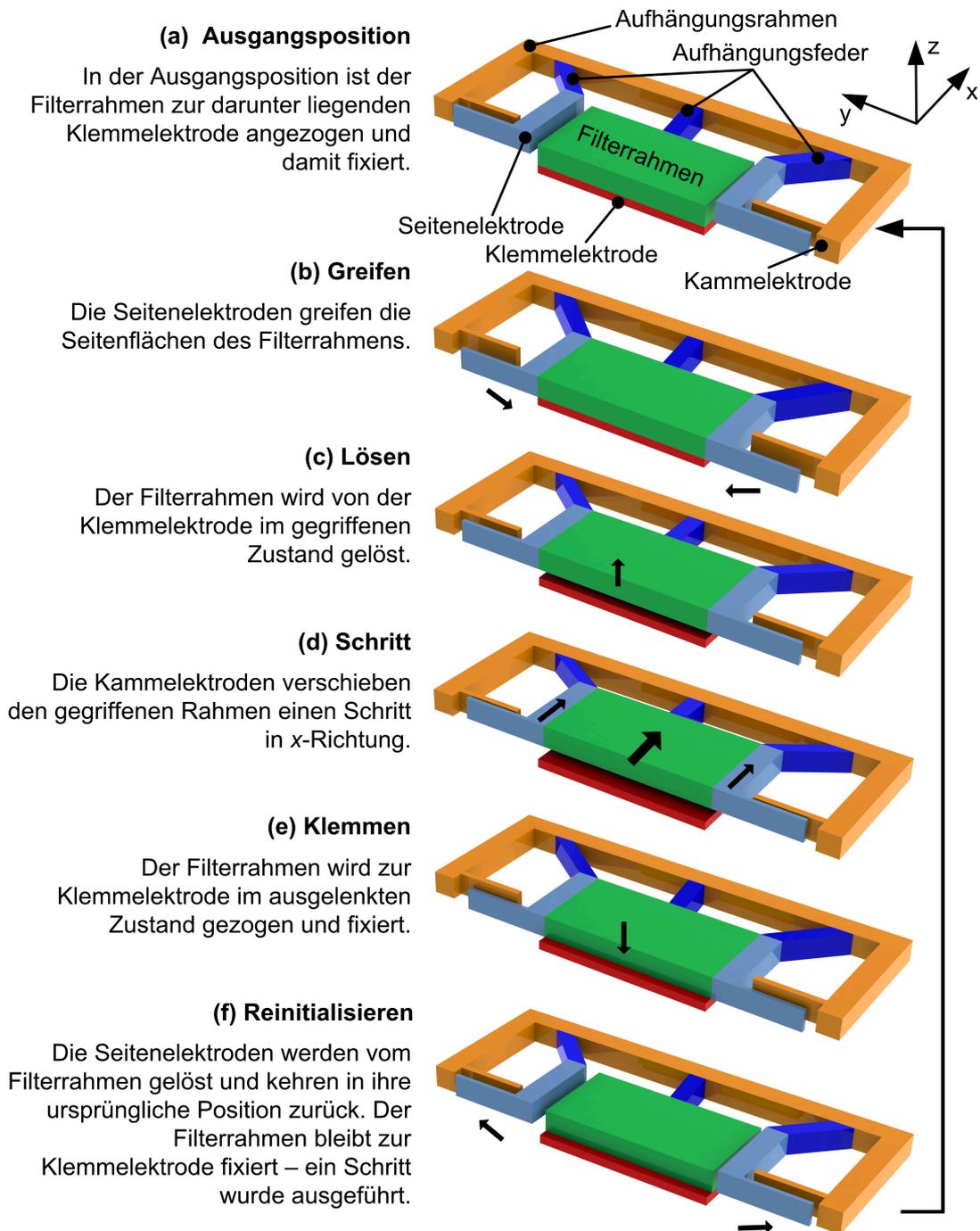


Abbildung 2.3: Konzept der Inchworm-Bewegung mit vertikaler Klemmelektrode für den Schrittmechanismus

2.2 Dimensionierung des einachsigen Mikroschrittaktors

Die funktionellen Komponente des Aktorentwurfs sind in Abb. 2.4 dargestellt.

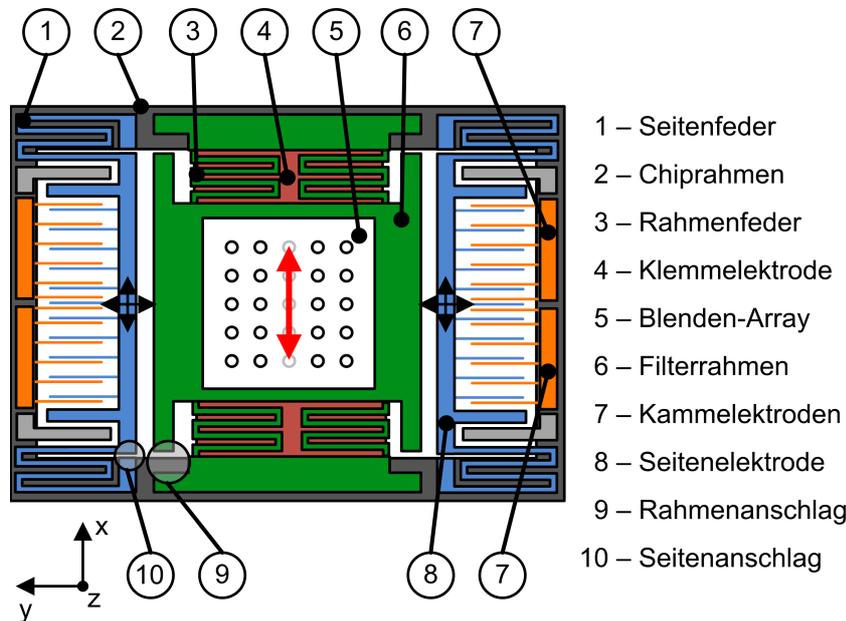


Abbildung 2.4: Konzeptioneller Aufbau des einachsigen Mikroschrittaktors

Der rote Pfeil zeigt die Richtung der einachsigen, linearen Schrittbewegung. Die symmetrische Elektrodenanordnung in Kombination mit dem Spannermechanismus erlaubt einen bidirektionalen Betrieb mit einem Positionierbereich von $\pm 100 \mu\text{m}$ entlang der x -Achse bis ein mechanischer Anschlag die weitergehende Bewegung verhindert.

Der Systementwurf besteht aus 10 Hauptkomponenten mit spezifischen Funktionen:

Im Filterrahmen (6) ist das Blenden-Array (5) integriert. Vier Mäanderfedern (3) unterstützen die Bewegung des Rahmens in x -Richtung. Die Seitenflächen des Filterrahmens sind gleichzeitig Elektrodenoberflächen für das seitliche Greifen mit den Seitenelektroden.

Die zwei Seitenelektroden (8) sind an ihren beiden Enden mit Mäanderfedern (1) am Chiprahmen (2) befestigt. Die Federn sind für eine dreidimensionale Bewegung ausgelegt. Die Seitenelektroden werden für das Greifen des Filterrahmens in y -Richtung aktuiert. Die Seitenwände des Filterrahmens und die Seitenelektroden ergeben einen elektrostatischen Aktor, womit eine kompakte Ausführung entsteht. Die beiden Flächen kommen während des Schrittvorgangs miteinander in Berührung. Um einen elektrischen Kurzschluss zu vermeiden, müssen die Elektroden bei der Herstellung an der Kontaktfläche mit einer Isolatorschicht versehen werden.

Das Schieben bzw. der Schritt in x -Richtung wird mit der Kraft zwischen der symmetrisch angeordneten Kammelektroden (7) und den Elektrodenfingern der Seitenelektroden ausgeübt. Die Größe der Verschiebung von der zentralen Initialposition wird durch mechanische Anschläge (10) festgelegt. So können die Seitenelektroden eine konstante Schrittgröße gewährleisten. Nach einem ausgeführten Schritt hält die Klemmelektrode (4) den Filterrahmen und die Rahmenfedern fest in Position. Hierbei muss eine ausreichende elektrische Isolierung auch wegen des mechanischen Kontakts zwischen den Elektroden vorhanden sein. Die Klemmelektrode ist so ausgelegt, dass der optische Pfad dabei nicht gestört wird. Der Positionierbereich wird durch den Rahmenanschlag (9) begrenzt.

Das entworfene Konzept lässt eine leichte Anpassung der Schrittgröße und des Positionierbereichs zu. Somit kann das HAS mit unterschiedlichen Blenden-Arrays mit variierten Rasterabständen getestet werden. Bevor die exakte Chipgeometrie entworfen wird, müssen die technologischen Rahmenbedingungen betrachtet werden.

2.2.1 Technologische Konstruktionsaspekte des einachsigen Mikroschrittaktors

Die folgenden Überlegungen basieren auf dem gewählten Technologiekonzept mit einem SOI-Wafer (Aktorchip) und Glaswafer (Blenden-Array), s. Abschnitt 2.3. Die Schlüsseltechnologie der Fertigung ist das DRIE. Damit bekommen die Federführungen, Elektroden und mechanischen Anschläge ihre geometrische Form. Federn würden durch eine Überätzung bzw. Notching⁴ eine niedrigere Federrate besitzen. Der Abstand zwischen den Kammelektroden erhöht sich bei Überätzung, dadurch sinken die elektrostatischen Kräfte bei gleicher elektrischer Spannung. Weiterhin würde sich die Schrittgröße vergrößern.

Die Riffelung der Seitenwände, ein Merkmal des DRIE-Prozesses, macht die Seitenfläche rau und damit unempfindlicher für Sticking⁵. Zusätzlich entstehen üblicherweise Ätzflanken⁶ (Flankenwinkel) bis zu -2° . Somit besteht keine Gefahr eines flächigen Kontakts zwischen den Seitenelektroden und dem Filterrahmen.

Zum Silicium-Tiefenätzen wird die Plasmaätzanlage STS ADVANCED SILICON ETCHER mit zwei relevanten, etablierten DRIE-Prozessen eingesetzt. Die geometrischen Rahmenbedingungen für eine gute Strukturtreue wurden bei vorhergehenden Arbeiten bereits gefunden, [Meh+15; GDH13]. Die Abstände zwischen den einzelnen Strukturen sind für ein Aspektverhältnis von 1:4 ausgelegt. Dies bedeutet bei dem gewählten Substrat eine Ätztiefe von 100 μm und einen Strukturabstand von 25 μm . Bei Einhaltung des genannten Aspektverhältnisses wird eine hohe Ätzratenhomogenität über den Wafer gewährleistet. Der kleinste Strukturabstand, der für die Definition der Schrittgröße verantwortlich ist, beträgt 10 μm . Die maximale Strukturbreite der beweglichen Elemente ist auf 25 μm begrenzt, um die notwendige Unterätzung des isotropen Freistellungsprozesses⁷ zu minimieren. Schmalere Strukturen würden die Auswirkungen vom prozessbedingten Notching auf die mechanischen Eigenschaften (z.B. Federrate) der Strukturen stärken.

2.2.2 Auslegung der Federführung und Elektroden

Als Rahmen- und Seitenfedern werden gefaltete Balken, sog. Mäanderfedern (auch Serpentinfedern genannt) eingesetzt, die niedrige Steifigkeiten in x - und y -Richtungen bei geringem Platzbedarf besitzen. Die Elektrodenflächen der elektrostatischen Aktoren bilden die Seitenwände der Kammstrukturen und des Filterrahmens. Die Dimensionierung basiert auf den folgenden Überlegungen:

⁴Notching: Anisotrope Überätzung der Siliciumstrukturen eines SOI-Wafers durch die Aufladung des BOX-Layers, [Lai+05]. Die Struktur weitet sich über dem BOX-Layer auf.

⁵Sticking: Festkleben von glatten Oberflächen durch VAN-DER-WAALS-Kräfte

⁶Ätzflanke: Abweichung der idealen, zur Substratebene senkrechten Seitenwand. Ein negativer Flankenwinkel bedeutet, dass die Struktur auf der Substratoberfläche eine kleinere Breite hat als am Ätzboden.

⁷Freistellungsprozess: Die Strukturen des Devicelayers werden im Flusssäuredampf vom Handlayer mechanisch getrennt, indem das darunterliegende BOX-Layer (SiO_2) isotrop geätzt wird.

- Die erreichbaren elektrostatischen Kräfte sollen größer als die maximal wirkenden Federkräfte sein.
- Die Gewichtskräfte sollen einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Aktorsystem haben.
- Die Kammelektroden sollen eine hohe Kraft bei niedrigem Platzbedarf gewährleisten.
- Die Betriebsspannung soll minimal sein. Um die komplexe Fragestellung zu umgehen, wie und bei welcher Spannung ein elektrischer Durchbruch erfolgt, wird 200 V als obere Grenze eingesetzt. Die Durchbruchfeldstärke von thermischem SiO_2 liegt bei ca. $800 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}}$ ([Nak+95]) und die von Luft bei $300 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}}$, ([Tip87]). Somit ist eine stabile elektrische Isolierung der Elektroden in Kombination mit dem gewählten Fertigungsablauf (Abschnitt 2.3) bei max. 200 V sichergestellt.
- Der Entwurf soll innerhalb der genannten technologischen Grenzen bezüglich Aspektverhältnis, Strukturbreite und -abstand liegen.
- Größe und Gewicht sollen möglichst klein werden.

Grundlagen der Dimensionierung und Modellierung

Die elektrostatische Kraft F^e zwischen zwei flächigen, parallelen Elektroden mit einem Potentialunterschied von U lässt sich mit

$$F^e = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U^2 \cdot A_e}{2 \cdot d_e^2} \quad (2.1)$$

annähernd berechnen. Dabei werden die Streufelder vernachlässigt. Die Krafrichtung ist senkrecht zur Elektrodenoberfläche und wirkt anziehend. Das berücksichtigte, homogene elektrische Feld hat dabei eine Querschnittsfläche von A_e und eine Dicke von d_e (Elektrodenabstand). Die Permittivität des Vakuums ist ϵ_0 und die relative Permittivität des Zwischenraumes ist ϵ_r .

Die Federkraft \vec{F}^s wird mithilfe der Federkonstanten (Federsteifigkeiten) c_x, c_y, c_z und der jeweiligen Verschiebungen des freien Endes einer Feder $\vec{r}^s(t) = [x^s(t), y^s(t), z^s(t)]^T$ berechnet:

$$\vec{F}^s(\vec{r}^s(t)) = -\vec{r}^s(t) \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Die Federrate wird als konstant angenommen, da es sich um kleine Verschiebungen und ideal elastischem Material in Form von monokristallinem Silicium handelt. Eine Bewegung der an den Federn aufgehängten Masse wird hervorgerufen, wenn das Kriterium $F^e - F^s > 0$ im Positionierbereich in Antriebsrichtung x erfüllt wird. Dazu werden die Federkonstanten, Elektrodenanzahl und -länge so ausgelegt, dass das Kriterium für Spannungen unterhalb von 200 V erfüllt wird. Zusätzlich muss die resultierende Aktorkraft ausreichen, um die Traglast mit hoher Dynamik um $10 \mu\text{m}$ bis zum mechanischen Seitenanschlag zu bewegen. Die maximale, angestrebte Schrittfrequenz beträgt $f_a = 50 \text{ Hz}$ und gibt damit 20 ms Zeit um einen Schritt auszuführen. Die Dynamik wird mit der Bewegungsgleichung analysiert:

$$\sum \vec{F}(\vec{r}(t)) = m_t \cdot \ddot{\vec{r}}(t) \quad (2.3)$$

wobei $\ddot{\vec{r}}(t)$ der Beschleunigung der betrachteten Masse entspricht. Im aufgestellten elektromechanischen Modell wird die Dämpfung vernachlässigt, s. Abb. 2.5. Die federgelagerte Masse entspricht

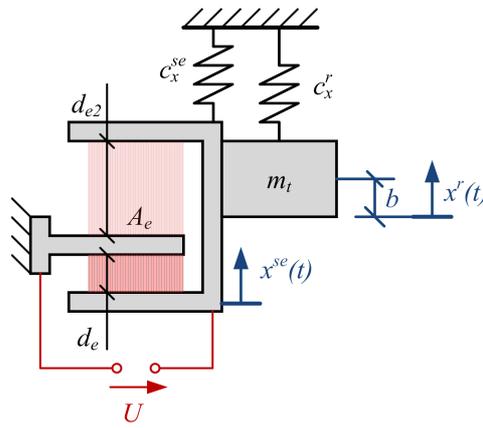


Abbildung 2.5: Elektromechanisches Ersatzschaltbild des einachsigen Mikroaktors bei Bewegungen in x -Richtung

dem Gewicht des Filterrahmens mit integriertem Blenden-Array. Die Gleichung wird auf die Schrittrichtung x reduziert und Skalar betrachtet. Dies ist zulässig, da F_e symmetrisch auf den Filterrahmen wirkt, kein Drehmoment entsteht und die resultierende Krafrichtung in x -Richtung zeigt. Die Federkraft ist eine Reaktionskraft und wirkt im angenommenen 2D-Modell (Abb. 2.5) der Auslenkung parallel entgegen. Die Federkonstanten zur Modellierung und Berechnung sind die Summen der entsprechenden Federkonstanten der parallel geschalteten Mäanderfedern. Das elektrische System wird idealisiert: durch den angestrebten Frequenzbereich, niedrige Widerstände und Kapazitäten hat die elektrische Domäne einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Dynamik des elektrostatisch angetriebenen Feder-Masse-Systems und wird folglich nicht in die Berechnungen einbezogen. In der Schrittphase ist die Seitenelektrode durch die Haftreibung zum Filterrahmen fest gekoppelt und somit sind die relativen Verschiebungen gleich. Die Gleichungen (Gl.) 2.1 und 2.2 werden in die Bewegungsgleichung 2.3 eingesetzt:

$$F_x^e - F_x^s = m_t \cdot \frac{d^2 x^{se}(t)}{dt^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{dx^{se}(t)}{dt} = v_x^{se}(t) \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r A_e U^2 \left(\frac{1}{(d_e - x^{se}(t))^2} - \frac{1}{(d_{e2} + x^{se}(t))^2} \right) - c_x^{se} x^{se}(t) - c_x^r (x^r(t)) = m_t \cdot \frac{dv_x^{se}(t)}{dt} \quad (2.6)$$

v_x^{se} ist die Geschwindigkeit, $x^{se}(t)$ die Position der Seitenelektrode, $x^r(t)$ die Position des Filterrahmens (die Rahmenposition ist $x^r(t) = b + x^{se}(t)$, wobei b die Vorauslenkung des Filterrahmens ist), d_e und d_{e2} die jeweiligen Elektrodenabstände, c_x^{se} die Federkonstante der Seitenfeder und c_x^r die der Rahmenfeder in x -Richtung, s. Abb. 2.5. Mit der numerischen Lösung der Bewegungsgleichung⁸ wird später die Zeitdauer eines Schrittes berechnet (Abb. 2.10(a)).

Gestaltung der Federführung und Elektroden des einachsigen Mikroschrittaktors

Das Aktor-Feder-System wird um das 20 mg schwere⁹ und $7040 \times 5440 \mu\text{m}^2$ große Blenden-Array herum konzipiert. Die Dimensionierungsziele der Mäanderfedern sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Auslegung der Federgeometrie orientiert sich im Wesentlichen an den Seitenlängen des

⁸Gewöhnliche, nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung

⁹Traglast des Blenden-Arrays (16,85 mg) inkl. Filterrahmen (3,28 mg)

Tabelle 2.2: Optimierungsziele der Federkonstanten des einachsigen Mikroschrittaktors

Federkonstante	Ziel	Begründung
c_x^r	minimieren	hohe Auslenkung von $\pm 100 \mu\text{m}$
c_y^r	maximieren	keine Nachgiebigkeit in diese Richtung erwünscht
c_z^r	relativ hoch	$2 \mu\text{m}$ Auslenkung bei kleiner Elektrodenfläche
c_x^{se}	minimieren	$\pm 10 \mu\text{m}$ Auslenkung bei kleiner Elektrodenfläche
c_y^{se}	minimieren	$25 \mu\text{m}$ Auslenkung bei kleiner Elektrodenfläche
c_z^{se}	relativ hoch	$2 \mu\text{m}$ Auslenkung parallel zum Filtrerrahmen

Blenden-Arrays (maximale Länge eines Mäanders) und den technologischen Bedingungen (Unterabschnitt 2.2.1) und nicht an optimalen Steifigkeitswerten. Grund dafür ist, dass im ersten Schritt ein grundlegender Funktionsnachweis angestrebt wird anstatt eines komplex optimierten Produktes. Die Rahmenfeder soll sich um $100 \mu\text{m}$ stauchen lassen, was die minimale Anzahl der Windungen auf 4 begrenzt. Die Seitenfedern sollen auch in y -Richtung eine niedrige Federrate besitzen, die sich mit einer höheren Anzahl an Windungen realisieren lässt.

Die entworfene Geometrie mit den relevanten Maßen ist in Abb. 2.6 vereinfacht skizziert. Die Rahmenfeder besitzt 7 Windungen und die Seitenfeder 9. Die Federn werden abgerundet um einen möglichst konstanten Querschnitt über die Länge der Feder zu gewährleisten. Die Federkonstanten werden mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) auf Basis der konstruierten 3D-Modelle bestimmt und in Tabelle 2.3 aufgeführt. Das monokristalline Silicium wird anisotrop mit den Materialeigenschaften von HOPCROFT ET AL. für die Berechnung hinterlegt, [HNK10]. Die Federbalken werden mit einem rechteckigen Querschnitt modelliert. Durch die negative Ätzflanke des DRIE-Prozesses (vgl. Unterabschnitt 2.2.1) stellen die berechneten Federraten somit Maximalwerte dar. Die Steifigkeit der Rahmenfeder in y -Richtung sinkt mit der Vorspannung in x -Richtung. $c_y^r = 54,36 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ gilt für die vier Rahmenfeder ohne Vorspannung in x -Richtung.

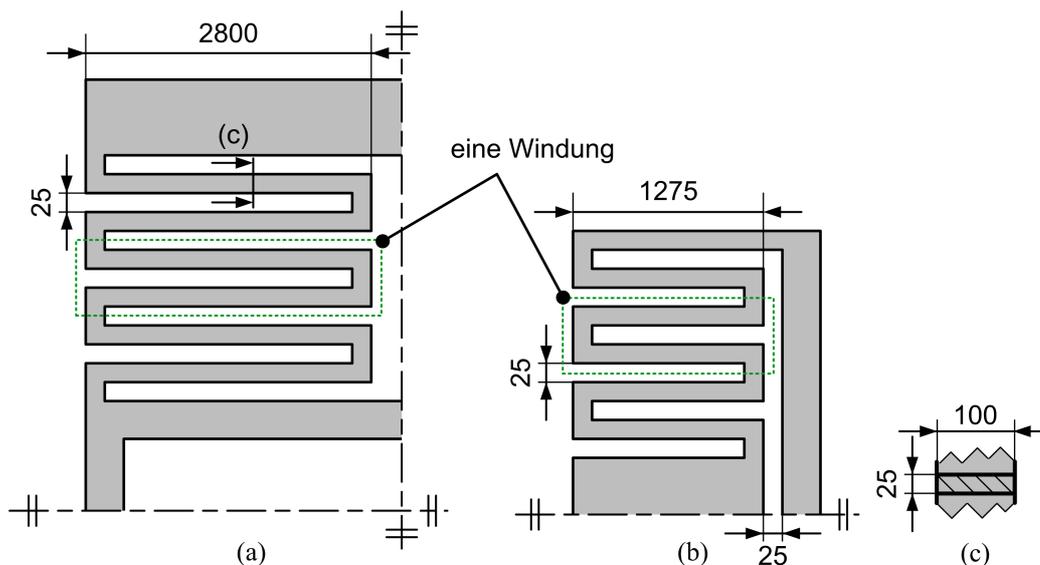


Abbildung 2.6: Vereinfachte Geometrie der (a) Rahmen- und (b) Seitenfedern, (c) Querschnitt der Mäanderstruktur, alle Maße in μm . Die Rahmenfeder hat im finalen Entwurf 7, die Seitenfeder 9 Windungen. Die Außenkanten sind mit einem Radius von $25 \mu\text{m}$, die Innenkanten mit $12 \mu\text{m}$ abgerundet.

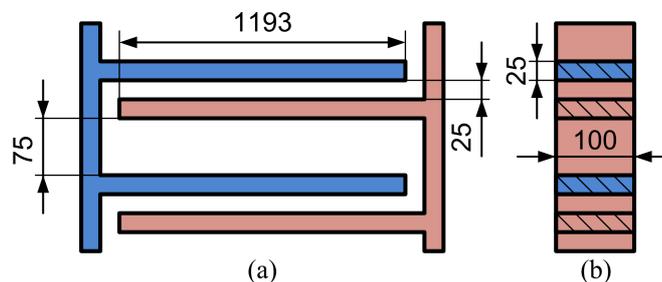
Tabelle 2.3: Mittels FEM berechnete Federraten der Rahmen- und Seitenfeder mit rechteckigem Querschnitt

Richtung i	c_i^r	c_i^{se}
x	$3,39 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$11,16 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
y	$54,36 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$22,00 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
z	$25,41 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$16,67 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

Ohne das Blenden-Array übt der Filterrahmen in horizontaler Lage eine Kraft von $-32 \mu\text{N}$ auf die Rahmenfedern in z -Richtung aus. Daraus folgt eine Durchhängung von $1,27 \mu\text{m}$. Die BOX-Layer-Dicke von $2 \mu\text{m}$ gewährleistet somit eine hysteresefreie Positionierung. Das Blenden-Array fügt $-167 \mu\text{N}$ Traglast hinzu. Die dann resultierende, initiale Auslenkung von $7,77 \mu\text{m}$ bedeutet, dass der Filterrahmen und teilweise die Federn mechanischen Kontakt zur Klemmelektrode haben. Aus diesem Grund haben die Rahmenfedern eine hysteresebehaftete Bewegung. Die Schrittgrößen sind mit mechanischen Anschlägen definiert und sollen durch die Reibung der Federn nicht beeinflusst werden, da der Filterrahmen mit der Klemmelektrode direkt festgehalten wird.

Bei $c_z^r \geq 99 \text{ N/m}$ würde der Filterrahmen das Handlelayer nicht mehr berühren. Die z -Steifigkeit kann durch höhere Aspektverhältnisse des Federquerschnittes gesteigert werden. Dies hat wiederum technologische Grenzen: die Ätzrate würde sich in engen Bereichen verringern und bei breiteren Gräben zu Überätzung führen. Schmale Federquerschnitte werden vom Notching des DRIE-Prozesses stark angegriffen und die Federrate würde dadurch stark vom Entwurfswert abweichen. Demzufolge wird die Reibung in diesem Konzept mit der bestehenden Technologie nicht eliminiert und bei der Ansteuerung des Mikroschrittaktors berücksichtigt.

Die Elektrodenanzahl und -länge orientiert sich an den Federkonstanten und soll die Betriebsspannung gering halten. Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, übernehmen laterale Kammelektroden die Krafterzeugung in x -Richtung (Schrittrichtung). Die Kraft für das Greifen wird mit der Seitenfläche der Seitenelektrode und des Filterrahmens erzeugt (das Elektrodenpaar wird als Greifaktor bezeichnet). Für beide Elektroden soll die effektive Fläche maximalisiert werden, um die Aktorspannungen minimieren zu können.

Abbildung 2.7: (a) Vereinfachte Geometrie und (b) Querschnitt der Kammelektroden, alle Maße in μm .

Die Maße der entworfenen Kammelektroden sind in Abb. 2.7 dargestellt. Zum Greifen steht eine Elektrodenfläche von $100 \times 9214 \mu\text{m}^2$ mit einem Plattenabstand von $25 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Die Kapazitäten der Kammelektroden (40 Elektrodenpaare) in jeder Antriebsrichtung betragen $1,68 \text{ pF}$ und die des Greifaktors $0,33 \text{ pF}$. Wenn beim Greifvorgang die Federkraft der Seitenfeder und die elektrostatische Kraft der Greifaktoren über die relative Verschiebung der Seitenelektrode y^{se} (bei

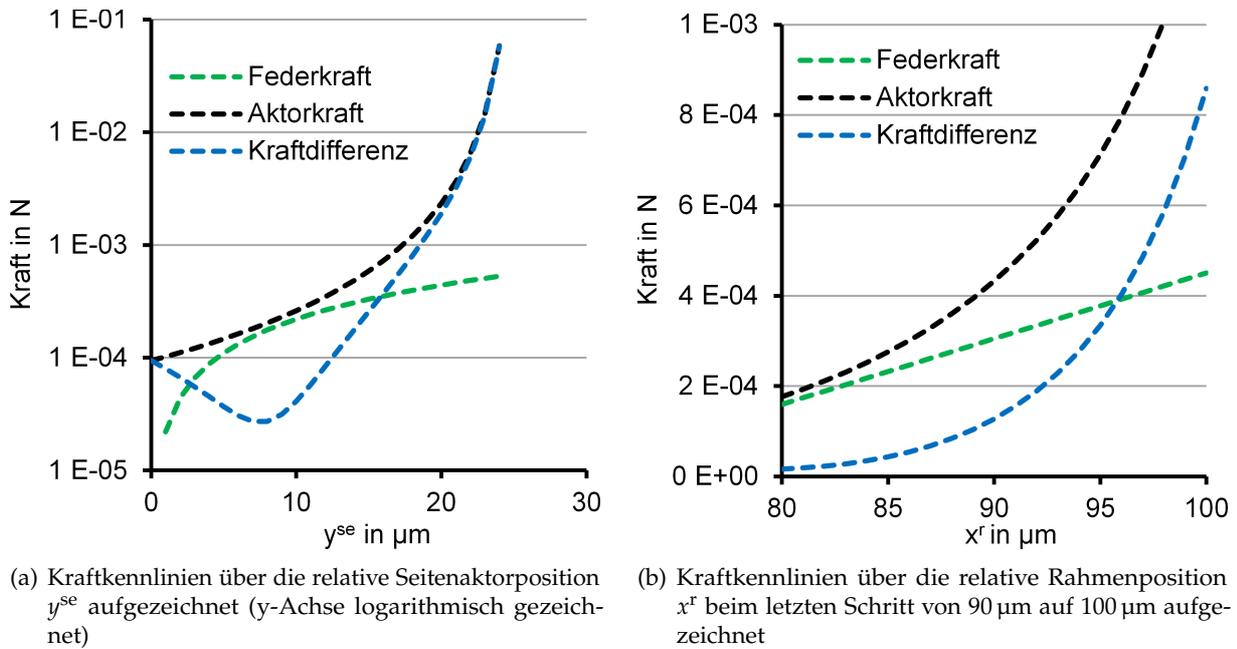


Abbildung 2.8: Kraftkennlinien bei 120 V Elektrodenspannung

$y^{se} = 0$ ist die Federkraft null) bei $U = 120 \text{ V}$ dargestellt wird, zeigen diese durchgängig eine positive Kraftdifferenz, so dass das Kriterium $F^e - F^s > 0$ erfüllt wird, s. Abb. 2.8(a). Die y -Position der Filtrahmen bleibt beim Greifen unverändert, $y^r = 0$. Ähnlich wird die Schrittbewegung bei $90 \mu\text{m}$ Vorauslenkung des Filtrahmens untersucht, s. Abb. 2.8(b). Eine Potentialdifferenz von 120 V reicht für eine durchgängig positive Kraftdifferenz aus. Damit ist sichergestellt, dass die Schrittbewegung im gesamten Positionierbereich ausgeführt werden kann.

Dynamische Analyse des einachsigen Mikroschrittaktors

Die aufgestellte Bewegungsgleichung 2.3 wird numerisch mit einem Zeitschritt von $\delta t = 30 \mu\text{s}$ bei $v_x^{se}(t) \leq 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und $\delta t = 10 \mu\text{s}$ bei $v_x^{se}(t) > 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ gelöst. Das modellierte System wurde bereits in Abb. 2.5 vorgestellt. Die numerische Simulationsmethode von RUNGE-KUTTA 4. Ordnung wird für die Berechnung eingesetzt. Es werden zwei Eigenschaften mit dem Modell berechnet:

1. Die Resonanzfrequenz wird mittels der Impulsantwort bestimmt und die resonante Anregung nachgebildet. Die analytisch berechnete Resonanzfrequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_x^{se} + c_x^r}{m_t}} \quad (2.7)$$

wird mit der Resonanzfrequenz der Simulation verglichen und somit die Korrektheit des numerischen Modells überprüft.

2. Die Dauer des letzten Schrittes wird am Rand des Bewegungsbereichs bei einer Vorauslenkung von $b = 90 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ und $U = 120 \text{ V}$ analysiert.

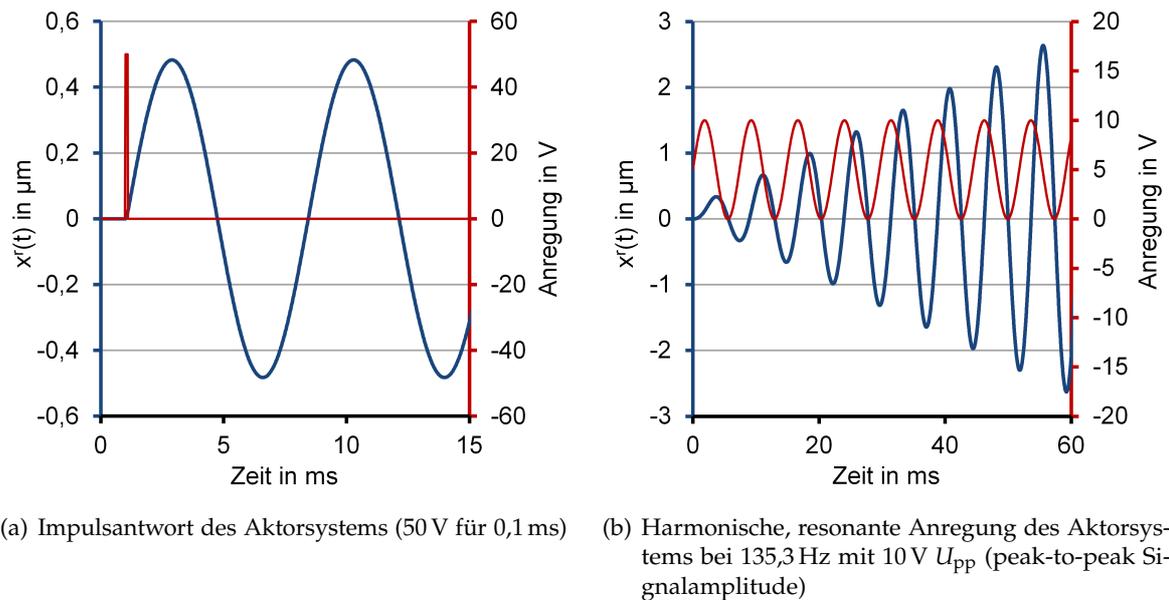


Abbildung 2.9: Elektromechanische Simulation des modellierten Feder-Masse-Systems

Die verwendeten Parameter sind dabei:

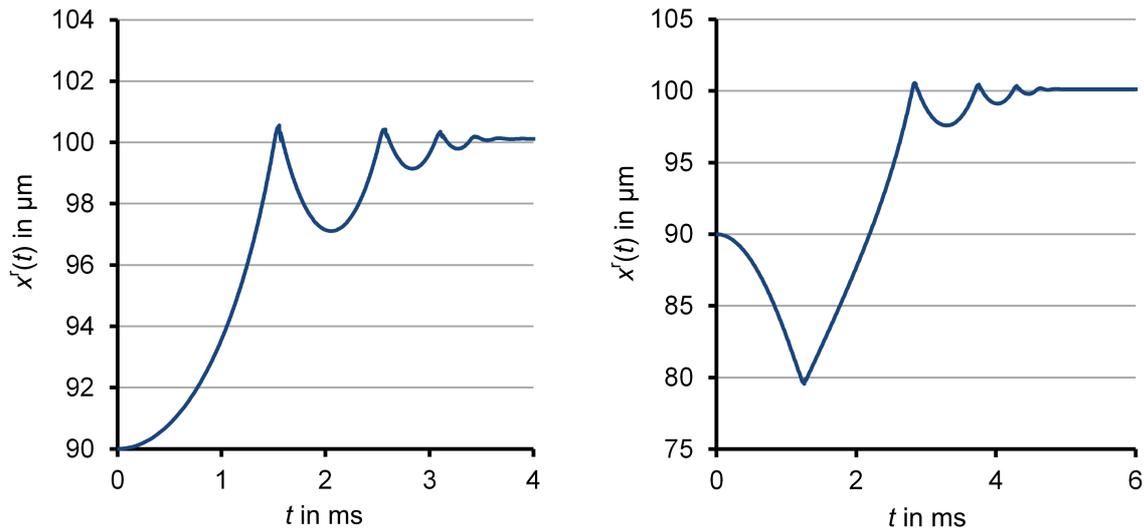
$$\begin{aligned}
 \epsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} & \epsilon_r &= 1 \\
 A_e &= 4,772 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 & m_t &= 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \\
 c_x^{se} &= 11,16 \frac{\text{N}}{\text{m}} & d_e &= 25 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\
 c_x^r &= 3,39 \frac{\text{N}}{\text{m}} & d_{e2} &= 75 \cdot 10^{-6} \text{ m}
 \end{aligned}$$

Die Resonanzfrequenz des gegriffenen Filterrahmens beträgt nach Gl. 2.7 $f_0 = 135,3 \text{ Hz}$. Das numerische Modell wird im ersten Schritt mit einem Impuls angeregt. Die Frequenz der entstehenden Grundschwingung (Abb. 2.9(a)) beträgt $f_0 = 135,28 \text{ Hz}$ und ist damit in sehr guter Übereinstimmung mit dem analytischen Wert. Die harmonische Anregung mit kleiner Spannungsamplitude bewirkt erwartungsgemäß eine resonante Anregung mit steigender Amplitude, s. Abb. 2.9(b).

Um die Dauer des letzten Schrittes berechnen zu können, wird der Startzustand definiert:

$$\begin{aligned}
 x^{se}(0) &= 0 \text{ m} \\
 \dot{x}^{se}(0) &= 0 \text{ m} \\
 x^r = b &= 90 \cdot 10^{-6} \text{ m}
 \end{aligned}$$

Der Filterrahmen wird in die Position $x^r = 90 \mu\text{m}$ gebracht und dort geklemmt. Damit ist die Rahmenfeder stark vorgespannt. Ohne eine Aktorspannung an den Kammelektroden würde der Filterrahmen beim Lösen (Teilschritt (c)) gegriffen mit den Seitenelektroden bis zum negativen Seitenanschlag zurückfedern. Eine Aktorspannung zwischen Kamm- und Seitenelektroden von $U = 120 \text{ V}$ reicht aus, um im Ausgangszustand dem Zurückfedern entgegenzuwirken und den Schritt auszuführen. Die numerische Simulation wird mit einem leicht nachgiebigen Anschlag bei $x^r \geq 100 \mu\text{m}$ erweitert, um die Stabilität der Simulation beim Anschlag zu erhöhen. Ohne Dämpfung wird $x^r(t) = 100 \mu\text{m}$ innerhalb von $t = 1,51 \text{ ms}$ erreicht, s. Abb. 2.10(a). Bei einer Verzögerung der Aktorspannung um 1 ms würde der Schritt wegen der vorgespannten Rahmenfeder



(a) Bewegungskurve eines Schrittes bei sofortigem Einschalten der Aktorspannung

(b) Bewegungskurve eines Schrittes, wenn die Aktorspannung mit 1 ms Verzögerung eingeschaltet wird

Abbildung 2.10: Ausführung des letzten Schrittes des Positionierbereichs mit 120 V Aktorspannung zwischen Kamm- und Seitenelektroden. Der Anschlag ist als nachgiebiges Element modelliert, um die Simulation zu stabilisieren.

Tabelle 2.4: Eigenschaften des entworfenen einachsigen Mikroschrittaktors

Eigenschaft	Wert
Positionierbereich	$\pm 100 \mu\text{m}$
Schrittgröße	$\pm 10 \mu\text{m}$
Antriebsspannung	$< 200 \text{ V}$
Traglast (Filterrahmen+Blenden-Array)	$198 \mu\text{N}$
Größe des Positioniersystems	$10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$
Gewicht des Positioniersystems	54 mg
Größe des Filters	$5,5 \times 7 \text{ mm}^2$
rechteckige Apertur	$5 \times 6,5 \text{ mm}^2$

um 1,29 ms später ausgeführt, s. Abb. 2.10(b).

Die Dämpfung spielt bei diesem Vorgang eine untergeordnete Rolle. Da die maximale Geschwindigkeit gering ($< 25 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$) bleibt, ist der auftretende Luftwiderstand für diese Abschätzung vernachlässigbar. Die Zeit für das Greifen ist durch die kleine Masse des Seitenaktors vernachlässigbar. Daher ist eine Schrittfrequenz von $f_a = 50 \text{ Hz}$ (Schrittzeit $< 20 \text{ ms}$) aus Sicht der Aktorkräfte umsetzbar.

Zum Schluss wird eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften des Mikroaktorentwurfs in Tabelle 2.4 dargestellt. Der finale Entwurf ist in Abb. 2.11 dargestellt. Die Färbung des Konzeptes wird von Abb. 2.4 übertragen und mit der gleichen Nummerierung versehen. Ein parametrisch aufgebautes 3D-CAD-Modell dient zur Maskenerstellung, welches in Abb. 2.12 in gerenderter Form gezeigt ist.

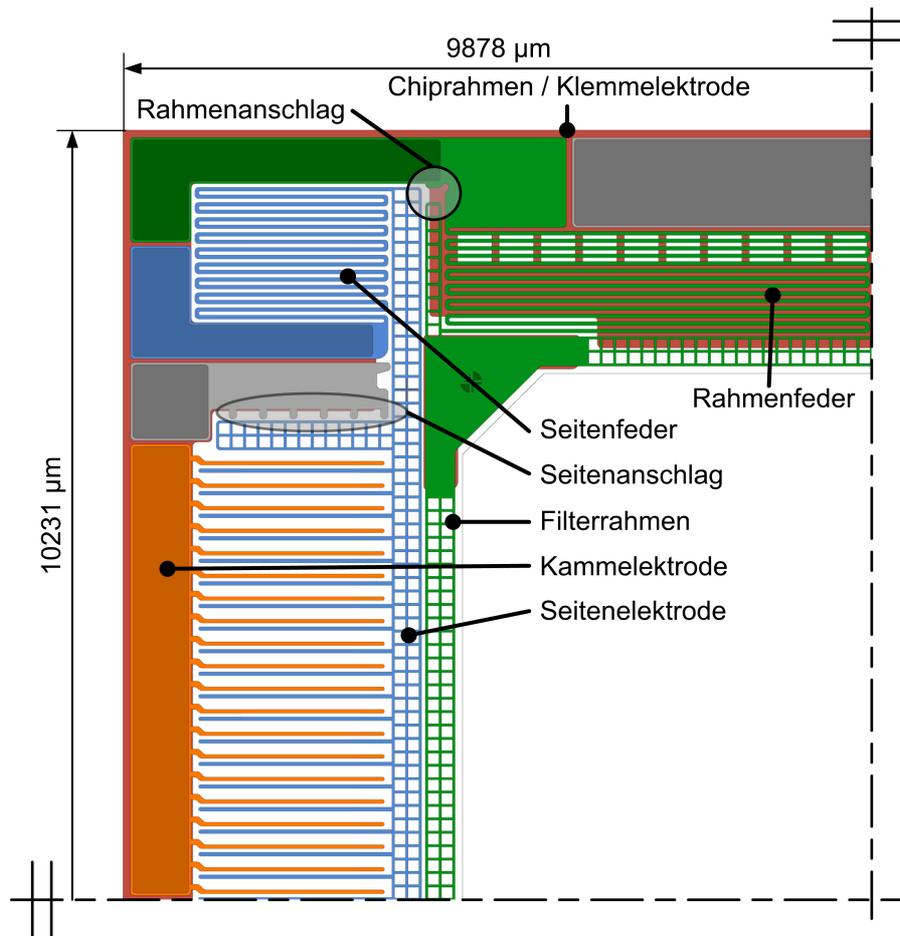


Abbildung 2.11: Ein Viertel des symmetrisch aufgebauten, einachsigen Mikroschrittaktorentwurfs

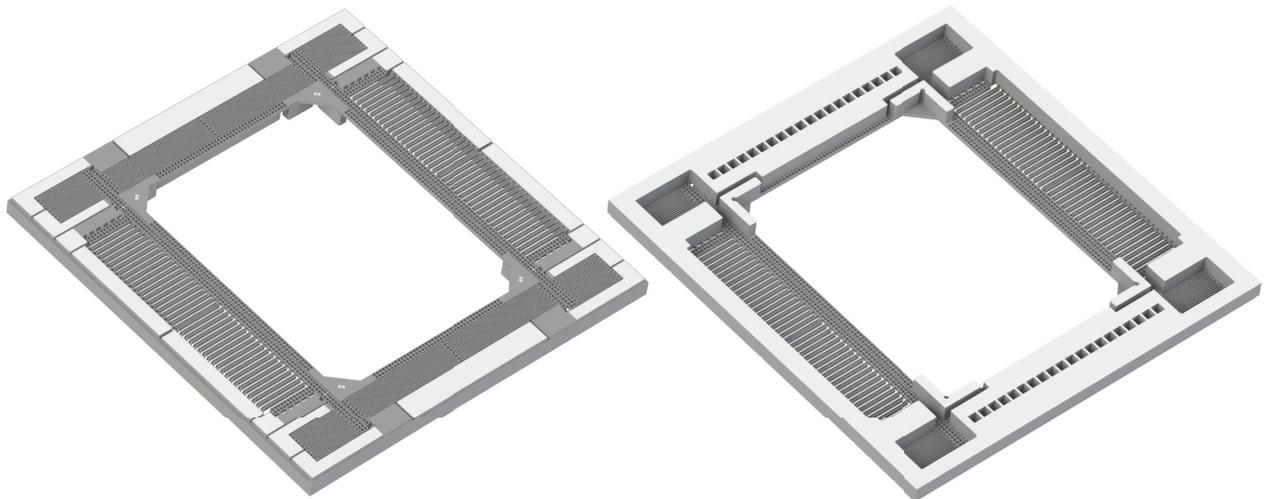


Abbildung 2.12: Das 3D-CAD-Modell des einachsigen Mikroschrittaktors von der Vorder- (links) und Rückseite (rechts). Die hellen Inseln auf der Oberfläche entsprechen den metallisierten Bereichen, die für die elektrische Kontaktierung vorgesehen sind. Die großen Öffnungen (Blendenbereich, Bereich der Kammelektroden und Seitenfedern im Handlelayer) sind während der Herstellung mit Opferkörpern ausgefüllt, die eine niedrige Ätzlast und homogene Aspectverhältnisse garantieren. Für das bessere Verständnis werden diese in den Abbildungen nicht dargestellt.

2.3 Fertigung des einachsigen Mikroschrittaktors

Nach dem kurzen Auszug im Unterabschnitt 2.2.1 wird hier der Fertigungsablauf des Aktorchips und des Blenden-Arrays detaillierter vorgestellt. Die Herstellung wird in den Reinräumen¹⁰ des INSTITUTS FÜR MIKRO- UND NANOTECHNOLOGIEN MACRONANO (IMN) durchgeführt. Der Fertigungsablauf des Mikroaktors ist in Abb. 2.13 schematisch dargestellt.

Die Beschreibung der Fertigung wird im Folgenden in

- Aktorchip (Unterabschnitt 2.3.1) und
- entspiegeltes Blenden-Array inkl. Mikromontage (Unterabschnitt 2.3.2)

unterteilt. Im Unterabschnitt 2.3.3 wird die Optimierung des DRIE-Prozesses an einem OXFORD INSTRUMENTS PLASMAPRO100 ESTRELAS DEEP SILICON ETCH SYSTEM vorgestellt, mit dem Ziel eine höhere Strukturtreue bei dem Aktorchip zu erreichen.

2.3.1 Fertigungsablauf des Aktorchips

Die hier beschriebene Technologie wird für den einachsigen Mikroschrittaktor entwickelt. Grundlage bilden dafür die Arbeiten GOJ [Goj15; GDH13] und MEHNER [Meh+15]. Materialien werden mit ihrem Symbol aus dem Periodensystem abgekürzt.

Das Aktorkonzept lässt sich auf einem SOI-Wafer mit üblichen mikrotechnologischen Prozessen umsetzen. Die zwei voneinander isolierten Silicium-Schichten des SOI-Wafers ermöglichen es die Klemmelektrode direkt unter den Führungsfedern und dem Filterrahmen umzusetzen. Ausgehend von Entwurf und Dimensionierung werden die Dicken des Device-, BOX- und Handlelayers zu jeweils 100 μm , 2 μm und 400 μm gewählt. Das SOI-Substrat¹¹ Abb. 2.13(a1) wird im ersten Schritt beidseitig mit Al beschichtet. Um einen ohmschen Kontakt sicherzustellen wird der Wafer davor mittels HF-Dip¹² und inversem Sputterätzen von der nativen Oxidschicht befreit. Zusätzlich findet nach der Beschichtung ein 10-minütiger Temperprozess bei 450 °C unter N₂-Atmosphäre statt. Nach einer vorderseitigen (Device-Seite) Lithographie und rückseitigen Schutzbelackung wird das Al nasschemisch strukturiert und der Lack entfernt. Die Al-Schicht wird auf der Handle-Seite die gleiche Weise strukturiert (a2). Die strukturierte Metallschicht ermöglicht die spätere elektrische Kontaktierung der Elektroden mit Bonddrähten (Device-Seite) und leitfähigem Kleber (Handle-Seite). Nachfolgend wird das Devicelayer mittels DRIE durch eine Fotoresistmaske bis zum BOX-Layer durchgeätzt. Der Prozess ist auf der SiO₂-Schicht selbststoppend. Um die Homogenität der Ätzrate zu maximieren, wird die Ätzlast gering (17%) und das Aspektverhältnis (1:4) über den Wafer möglichst gleich gehalten. Damit werden die Überätzung und das Notching minimiert. Um die strukturierte Vorderseite vor dem Plasmaumgriff bei dem rückseitigen DRIE zu schützen, wird bei 300 °C mit ICPCVD¹³ 1 μm SiO₂ abgeschieden (a3). Das Handlelayer wird mit der Al-Hartmaske bis zum BOX-Layer mithilfe des DRIE-Prozesses durchgeätzt. Die somit perforierte Öffnung macht den optischen Weg für das Blenden-Array frei. In den beiden DRIE-Prozessen erfolgt auch die Vereinzelung der Chips. Die Freistellung der beweglichen Strukturen erfolgt im

¹⁰Reinraumklasse 5-7 nach DIN EN ISO 14644

¹¹Eigenschaften des verwendeten SOI-Wafers: p-dotiert, Leitfähigkeit 1-20 $\Omega\text{ cm}$, beidseitig poliert (DSP)

¹²HF: Hydrogenfluorid, im Wasser gelöst auch Flußsäure genannt

¹³engl. inductively coupled plasma chemical vapour deposition, chemische Gasphasenabscheidung mit induktiv gekoppeltem Plasma

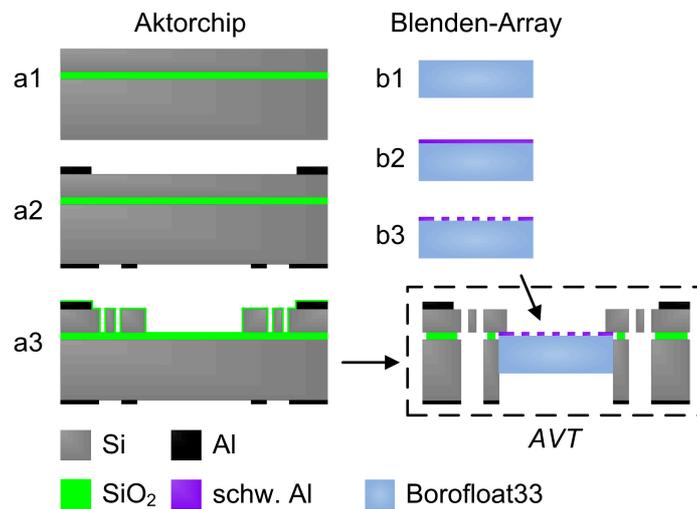


Abbildung 2.13: Vereinfachter, technologischer Prozessablauf der Herstellung des einachsigen Mikroschrittaktors (schw. Al: absorbierende (schwarze) Aluminium/Aluminiumnitrid Schicht)

HF-Dampf. Dabei wird die vorderseitige SiO₂-Schutzschicht auch von den Strukturen entfernt und es fallen die Füllkörper aus dem Chip heraus.

Der fertiggestellte Aktorchip wird mit der Handle-Seite auf einer Leiterplattenkarte mit leitfähigem Kleber montiert. Die Karte ist mit einer Ausfräsung versehen, die für das Blenden-Array eine ausreichende Apertur bietet. Die Elektroden des Device Layers werden mit Au-Bonddrähten zu den Leiterbahnen kontaktiert. Die Seitenflächen der Seitenelektroden werden danach mittels ICPCVD auf einem Tragwafer bei 150 °C mit 1 µm SiO₂ beschichtet. Die Kontaktflächen der Leiterplatte für die Steckverbindung werden während des Prozesses mit einem Keramikstück maskiert.

Wie im Unterabschnitt 2.2.1 beschrieben, hat der DRIE-Prozess in der technologischen Umsetzung des Aktorchips einen großen Einfluss auf die Strukturtreue. Aus diesem Grund wird der DRIE-Prozess an einem OXFORD INSTRUMENTS PLASMAPro100 ESTRELAS DEEP SILICON ETCH SYSTEM – im Weiteren als OXFORD DRIE bezeichnet – optimiert, s. Unterabschnitt 2.3.3.

2.3.2 Fertigungsablauf des absorbierenden Blenden-Arrays und die Mikromontage

Das Blenden-Array wird auf einem 200 µm dünnem Borofloat33-Substrat umgesetzt. Diese Materialstärke lässt sich noch bei allen geplanten Prozessschritten sicher handhaben. Das Material hat eine gute Transmission (über 90 % im Wellenlängenbereich von 355–2000 nm, [AG]). Um unerwünschte interne Reflexionen zu unterdrücken, wird für die Blenden nach einer Schicht mit breitbandig hoher Absorption gesucht. JOACHIM DÖLL, technischer Mitarbeiter des IMN hat beim gepulsten Magnetronspütern von AlN bei sehr niedrigen Stickstoffkonzentration eine optisch schwarze Schicht abgeschieden (Abb. 2.13(b2)), die sich für diese Anwendung als geeignet erwies, s. Abb. 2.14(a).

Die totale Reflexion der Schicht bleibt unter 10 % im Wellenlängenbereich von 300–1700 nm. Auf eine genauere Beschreibung des Prozesses wird in dieser Arbeit verzichtet. Die Strukturierung der Schicht ist nasschemisch durch die Mischung von AlN-Kristallen mit Aluminium nur begrenzt möglich. Es wird daher das physikalische Sputtern (SE) mit Argon zur Abtragung der entspiegelnden Schicht benutzt (b3). Als Maske wird positiver Fotolack verwendet. Nachteilig ist die

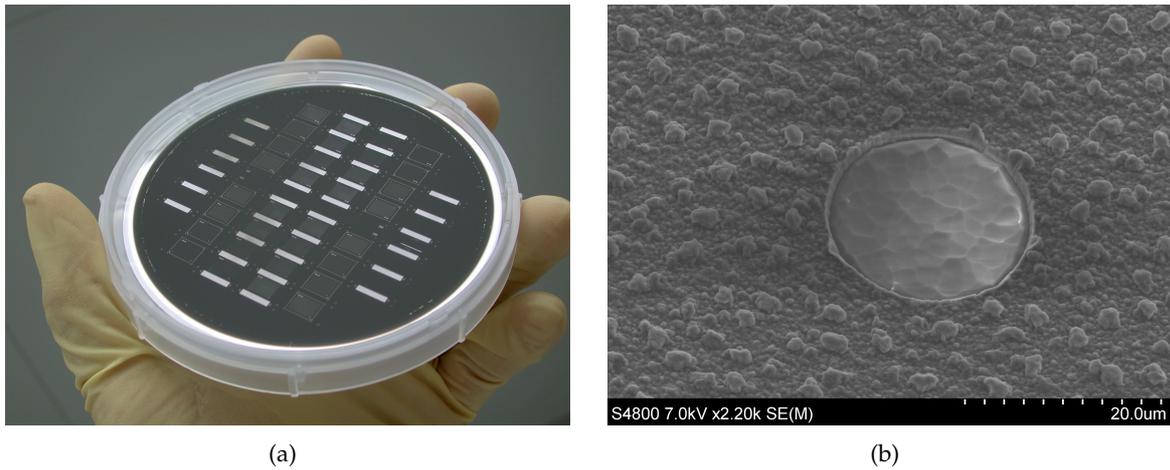


Abbildung 2.14: (a) Entspiegelte Blenden fertig geätzt vor der Vereinzelung. (b) Mit Ar-SE geätzter Blendenöffnung in der abgeschiedenen, entspiegelnden AlN-Schicht.

Aufrauung der Oberfläche im Bereich der transmittierenden Blendenöffnungen durch das Sputterätzen, s. Abb. 2.14(b). Dies kann zur leichten Verringerung der abgebildeten Intensität durch die diffuse Ausbreitung an den Blenden führen. Diese Auswirkung auf die optische Leistung wird hier nicht genauer untersucht.

Das Blenden-Array wird in den bereits auf die Leiterplatte montierten Aktorchip mit einem Mikromontagegerät (MMG) eingesetzt und mit UV-härtendem Kleber fixiert. Im Fokus-Stapelung-Foto 2.15 ist ein einachsiger Mikroschrittaktor mit einem entspiegelten Blenden-Array auf dem Leiterplattenadapter dargestellt.

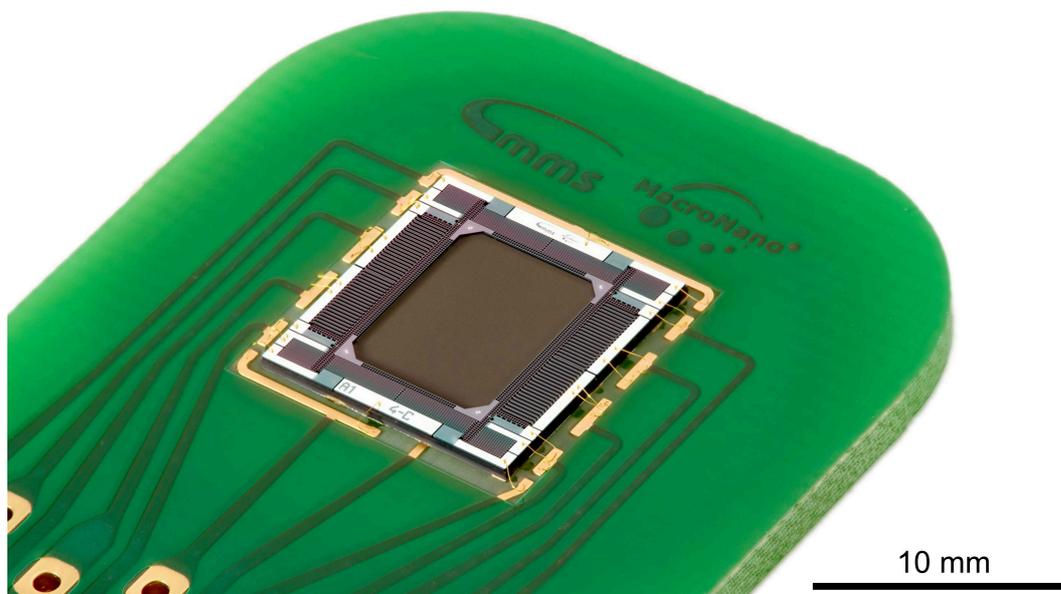
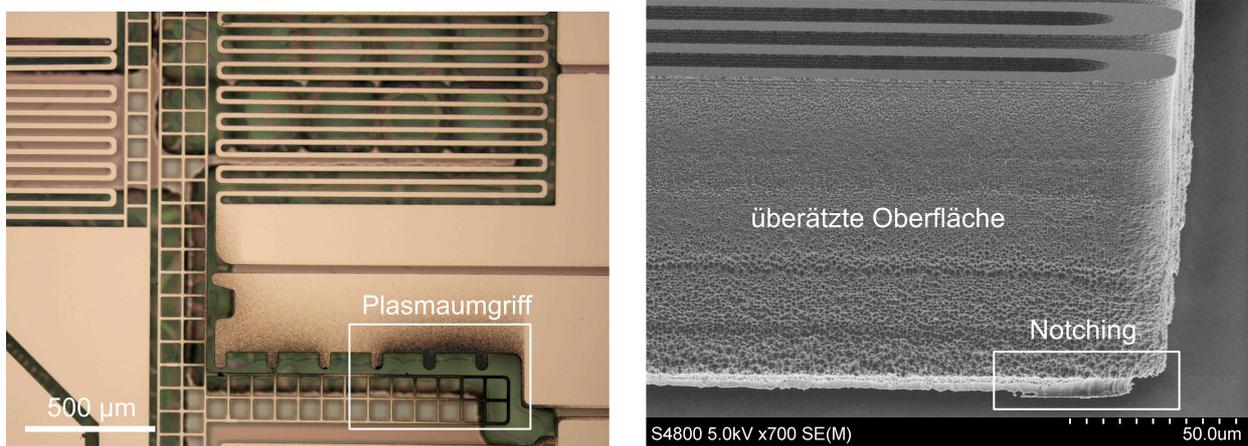


Abbildung 2.15: Einachsiger Mikroschrittaktor mit entspiegeltem Blenden-Array (Fokus-Stapelung-Foto)



(a) Durch Plasmaumgriff beschädigte Stelle an den mechanischen Anschlägen

(b) Erodierete Seitenwände und Notching der Seitenfeder

Abbildung 2.16: Mögliche Ursachen für Abweichungen in der Schrittgröße und Federkonstante des einachsigen Mikroschrittaktors

2.3.3 Prozessentwicklung des reaktiven Ionentiefätzens von Silicium durch das Oxford Instruments PlasmaPro100 Estrelas Deep Silicon Etch System

Der Aktorchip, gefertigt aus einem SOI-Wafer, wird von beiden Seiten mit dem DRIE-Prozess strukturiert. Die dabei erreichte Strukturtreue, die Rauheit der Ätzflächen, die Nadelbildung oder Polymerreste beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften des Aktorchips, s. Abb. 2.16. Von der Strukturtreue hängen Federkonstante, Elektrodenabstand und Schrittgröße ab. Zu raue Oberflächen oder Nadelbildung können zu mechanischen oder elektrischen Problemen führen. Siliciumreste können stärkere Leckströme zwischen Device- und Handlelayer verursachen, weswegen die elektrischen Potentiale nicht aufgebaut werden können. Polymerreste können die saubere Freistellung der Device-Strukturen im HF-Dampf verhindern.

Im Folgenden werden die bestehenden Ätzprozesse an der STS DRIE beschrieben und im Anschluss die Optimierung und Ergebnisse der DRIE-Prozesse an der OXFORD DRIE vorgestellt.

Der zyklische DRIE-Prozess ([LS93; Lae+]) ist eine etablierte und wichtige Fertigungsmethode von mikromechanischen Systemen. Die genauen Prozessparameter variieren abhängig von der verwendeten Anlage, dem geätzten Substrat und der Zielsetzung. Die STS DRIE besitzt zwei etablierte DRIE-Prozesse, die bei der Fertigung des Aktorchips zum Einsatz kommen:

- Der Prozess *STS-HR*¹⁴ für das schnelle Tiefätzen (ca. $3 \frac{\mu\text{m}}{\text{min}}$) von nicht durchgängigen Strukturen. Der Wafer soll mit dem rückseitigen Heliumkissen eine gute und homogene thermische Ankopplung zum Kammertisch besitzen.
- Der langsame Ätzprozess *STS-NR*¹⁵ mit niedriger Plasmaleistung, um durchgängige Strukturen bei geringer thermischer Belastung zu realisieren und die Degradation der Lackmaske zu verhindern. Zusätzlich wird der *STS-NR*-Prozess mit Abkühlpausen sequenziell für die Bearbeitung von einzelnen Chips (Chiplevel) auf Tragwafer angewendet. Die Ätzrate beträgt dabei ca. $1 \frac{\mu\text{m}}{\text{min}}$.

¹⁴STS-HR: Ätzprozess mit hoher Ätzrate der STS-Anlage

¹⁵STS-NR: Ätzprozess mit niedriger Ätzrate der STS-Anlage

Beide Prozesse bestehen aus zwei Schritten: als erstes wird eine Polymerschicht (auch Passivierungsschicht genannt) aus induktiv gekoppelten C_4F_8 Plasma abgeschieden. Im zweiten Schritt wird eine Plasmamischung aus SF_6 und O_2 die Polymerschicht von den horizontalen Oberflächen anisotrop abtragen und das Silicium der befreiten Flächen isotrop, chemisch geätzt.

Ein Nachteil der Prozesse an der STS-DRIE ist das ausgeprägte Notching und die Erosion der Seitenwände beim Überätzen der Strukturen (Abb. 2.17(c)). Die OXFORD DRIE besitzt technische Möglichkeiten zur Vermeidung von Notching: Es wird ein pulsierter LF-Generator anstatt eines HF-Generators verwendet um die Ionenenergie und Aufladung des BOX-Layers zu steuern und erlaubt dadurch eine deutlich bessere Strukturtreue. Weiterhin wird somit die Seitenwand nicht erodiert, die Rauheit bleibt kontrolliert und die Strukturen werden nur minimal überätzt.

Das Ätzen des Devicelayers für vernachlässigbares Notching und Maskenunterschnitt sowie für senkrechte Seitenwände wurde von STEFFEN LEOPOLD (FG MMS) optimiert. Das Ergebnis dieses Ox-HR-Prozesses¹⁶ ist in den Abb. 2.17 und 2.18 mit REM-Aufnahmen veranschaulicht. Als Vergleich werden die mit der STS-HR geätzten Strukturen in den Abbildungen herangezogen und zeigen die qualitativen Unterschiede der Ätzwände des Devicelayers im Falle der jeweiligen DRIE-Prozesse. Die Strukturtreue hat sich deutlich verbessert. Der Flankenwinkel der Strukturen mit dem Ox-HR-Prozess beträgt ca. 1° . Die Ätzrate beträgt $7,9 \frac{\mu m}{min}$. Die Prozessparameter des Ox-HR-Prozesses sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Der Kern des Prozesses baut sich aus 6 kurzen Prozessschritten auf:

1. Isotrope Abscheidung der Passivierungsschicht (Fluoropolymer) [*dep1*]
2. Gaswechsel auf Ätzgas SF_6 , Stabilisierung, ohne physikalischen Anteil [*dep1A*]
3. Druckstabilisierung, ohne physikalischen Anteil [*dep1B*]
4. Anisotropes Passivierungsätzen, gerichtet mit LF Generator (20 % Auslastungsgrad, Modulationsfrequenz 10 Hz) [*etch1*]
5. Isotropes Siliciumätzen ohne LF-Generator mit hoher ICP-Leistung und SF_6 -Zufluss [*etch2*]
6. Gaswechsel auf C_4F_8 , Druckstabilisierung, Start der Polymerabscheidung [*etch2B*]

In dieser Arbeit wird für das rückseitige Tiefätzen und Freistellen der Ox-HR-Prozess weiterentwickelt.

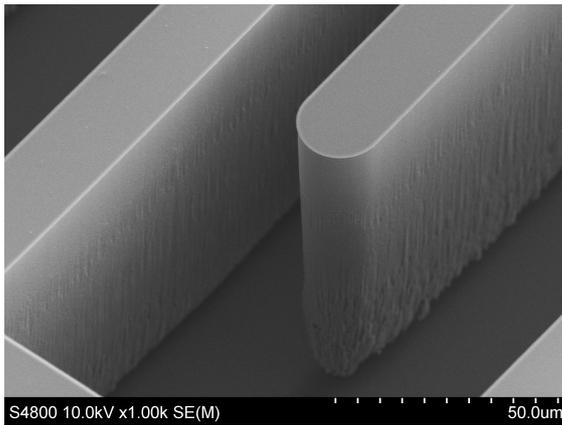
Beim Ätzen des Devicelayers liegt der SOI-Wafer thermisch gut angekoppelt auf dem aktiv gekühlten Tisch mit He-Kissen. Während des rückseitigen (Handlelayer) Ätzprozesses ist die thermische Ankopplung zum gekühlten Tisch durch die strukturierte Device-Oberfläche und mechanische Instabilität beim Vereinzeln der Chips deutlich schlechter. Auf Chiplevel kann man nur mit einem Tragwafer arbeiten, der den Wärmefluss weiter einschränkt.

Beim rückseitigen Ätzen hat die Strukturtreue entwurfsbedingt eine niedrigere Priorität als bei dem vorderseitigen Ätzprozess. Wichtig ist, dass keine Nadelbildung und keine starke Polymerisierung an den Oberflächen stattfindet. Es dürfen keine Reste und Verunreinigungen die elektrischen und mechanischen Funktionen des Aktorchips beeinträchtigen. Polymerablagerungen können zusätzlich den HF-Dampf-Prozess bei der Freistellung der beweglichen Elementen behindern. Die DRIE-Ätztiefe mit $400 \mu m$ und Strukturweiten zwischen $160 \mu m$ und $6 mm$ stellen eine andere Ätzlast¹⁷ und Aspektverhältnisdifferenzen dar, als dies beim vorderseitigen DRIE-Prozess der Fall ist. Um $400 \mu m$ tief ätzen zu können, muss eine hohe Selektivität zur Maskierung gewährleistet

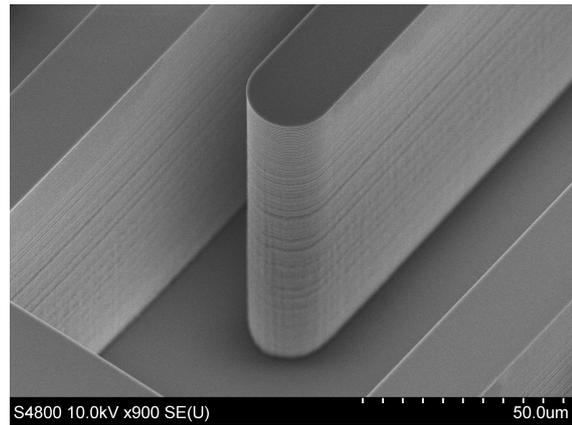
¹⁶Ox-HR: Ätzprozess mit hoher Ätzrate der Oxford DRIE

¹⁷Ätzlast des DRIE-Prozesses beträgt beim Devicelayer 17 % und beim Handlelayer 38 %.

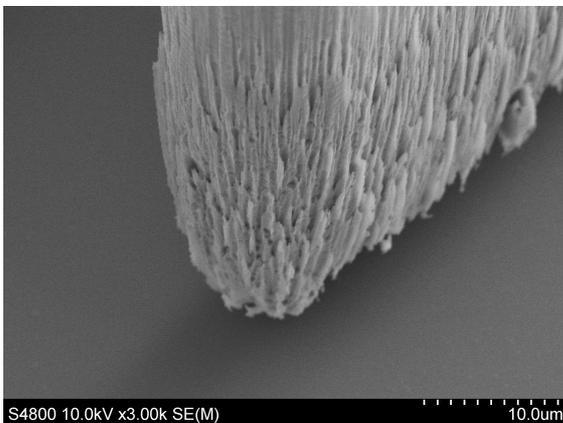
werden. Mit einer Fotolackmaske war es nicht möglich das Handlelayer durchzuätzen. Daher wird auch wie beim DRIE-Prozess an der STS DRIE eine Aluminiummaske verwendet.



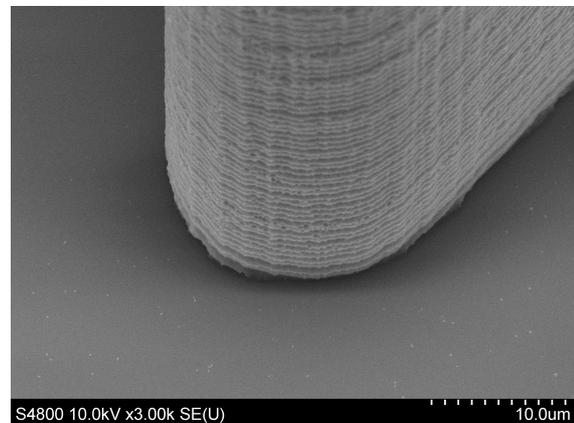
(a) Ergebnis des STS-HR-Prozesses



(b) Ergebnis des Ox-HR-Prozesses

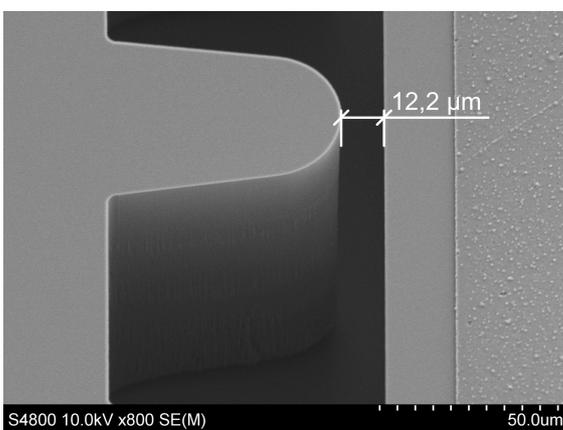


(c) Ergebnis des STS-HR-Prozesses: Notching an einer Kammelektrode des zweiachsigen Mikroschrittaktors

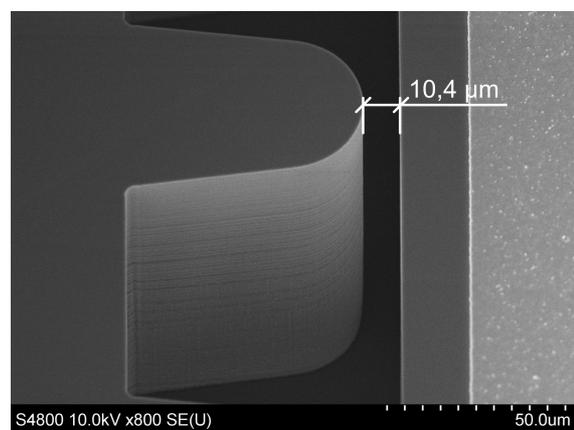


(d) Ergebnis des Ox-HR-Prozesses

Abbildung 2.17: REM-Aufnahmen einer Kammelektrode des zweiachsigen Mikroschrittaktors



(a) Ergebnis des STS-HR-Prozesses



(b) Ergebnis des Ox-HR-Prozesses

Abbildung 2.18: REM-Aufnahmen eines mechanischen Anschlags des zweiachsigen Mikroschrittaktors. Sollabstand des Anschlags beträgt 10 µm.

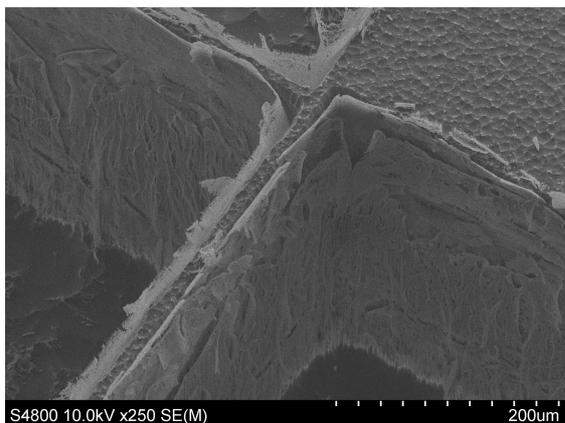
Für das Si-Ätzen auf Chiplevel hat OXFORD INSTRUMENTS als Startpunkt das Rezept *Ox-CL*¹⁸ übermittelt. Die Prozessparameter können aus Tabelle 2.5 entnommen werden.

Die Prozessoptimierung wird aus Kostengründen auf unstrukturierten, 525 µm dicken, einseitig polierten Si-Wafern durchgeführt. Als Tragwafer kommt beim Chiplevelprozess ein Ø150 mm DSP Si-Wafer zum Einsatz. Den daraufgelegten Ø100 mm Wafer halten verdeckt geklebte Keramikstücke in Position. Der Tragwafer wird mit Al beschichtet, um dessen elektrische Aufladung und chemischen Angriff während des Prozesses zu vermeiden.

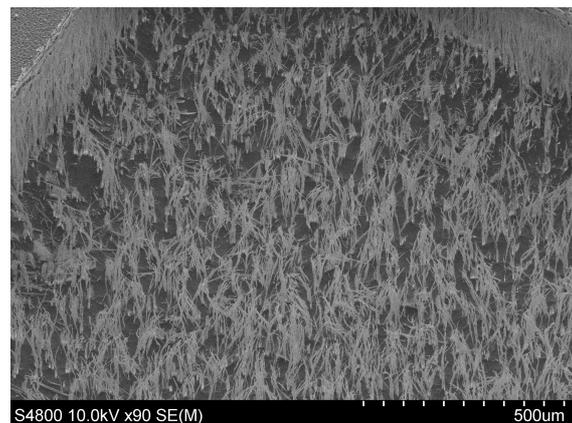
Im ersten Schritt wird für das rückseitige Ätzen der *Ox-HR*-Prozess bis ca. 370 µm Ätztiefe wiederholt und zum Schluss mit *Ox-CL* durchgeätzt. Beim LF-Generator wird durchgängig die Frequenz auf 10 Hz gehalten. Als Ergebnis der Prozessfolge ist eine starke Polymerbildung und ein Ablösen der Polymerschicht an den Seitenwänden sowie Si-Gras auf den nicht durchgeätzten horizontalen Oberflächen sichtbar, s. Abb. 2.19.

Die Änderung der Prozessparameter bei der Optimierung zeigen die Tabellen 2.6 (Prozessphasen 1-3) und 2.7 (Prozessphase 4 auf Tragwafer). Es werden grundsätzlich die Prozesszeiten variiert, um die Gras- und Polymerbildung zu eliminieren. Am Anfang der Optimierung (Optimierungsschritte 1-4) wird die Ätzzeit der Passivierung erhöht. Im Schritt 5 wird mit verringerter Passivierungszeit der einachsige Mikroschrittaktor (SOI-Wafer) rückseitig fertiggeätzt. Obwohl die erhöhte *etch1*-Zeit im *Ox-CL*-Prozess die Grasbildung reduziert, lagern sich Polymere stark an den Seitenwänden an. Daher müssen die vereinzelt Chips im Sauerstoffplasma 10–15 min gereinigt werden, um eine saubere Freistellung im HF-Dampf zu ermöglichen.

In den weiteren Schritten wird das Verhältnis *etch1*- zu *dep1*-Zeit weiter erhöht, indem die Polymerabscheidezeit *dep1* reduziert wird. Somit erweisen sich die ursprünglichen Prozesse für das rückseitige Tiefenätzen als passivierungslastig. Als letzte Maßnahme wird die ICP-Leistung des Passivierungsschrittes reduziert um die Abscheiderate zu verringern. Die 160 µm breiten Gräben haben eine Überätzung¹⁹ von 2,5 µm am Rand bis zu 5 µm in der Mitte und einen Flankenwinkel von $-0,8^\circ$. Diese geometrischen Abweichungen beeinträchtigen die Funktion des Aktorchips in keiner Weise. Die somit optimierten Prozesse werden als *Ox-RSHR* (rückseitiges *Ox-HR*) und *Ox-CLO* (Chiplevel optimiert) bezeichnet, s. Tabelle 2.8.



(a) Starke Polymerbildung an den Seitenwänden



(b) Grasbildung auf großen Ätzflächen

Abbildung 2.19: Erster DRIE Testprozess mit *Ox-HR* und *Ox-CL* auf einem 525 µm dicken, einseitig polierten Si-Wafer

¹⁸*Ox-CL*: Chiplevel-Ätzprozess der Oxford DRIE

¹⁹Differenz zwischen der idealen Struktur und der gemessenen Oberfläche

Tabelle 2.6: Variierte Prozessparameter und Verlauf der Optimierung des Ox-HR-Prozesses und Veranschaulichung der Prozessphasen (Ph.)

Ph.	Prozessparameter	Optimierungsschritte									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	[dep1] Zeit in ms	500	500	500	500	400	340	500	250	250	250
	[etch1] Zeit in ms	500	500	550	650	500	450	450	400	400	380
	[etch 2] Zeit in ms	1900	1900	2000	2000	1900	1900	1900	1900	1900	1900
2	[dep1] Zeit in ms	500	500	500	500	400	350				
	[etch1] Zeit in ms	500	700	700	700	500	525				
	[etch 2] Zeit in ms	1900	1900	2000	2000	1900	1900				
3	[dep1] Zeit in ms	500	500	500	500	350	350				
	[etch1] Zeit in ms	500	700	800	850	600	550				
	[etch 2] Zeit in ms	1900	1900	2100	2000	1900	1800				
	[dep1, etch2B] ICP-P in W	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2400
	Tischtemperatur in °C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Wiederholung	220	180	170	170	170	170	512	515	515	530
2		220	200	200	200	200	200				
3		220	140	140	140	140	140				
	Auslastungsgrad in %	20	20	40	40	40	40	40	40	40	40
	[etch1/dep1]	1,00	1,26	1,35	1,45	1,37	1,46	0,90	1,60	1,60	1,52

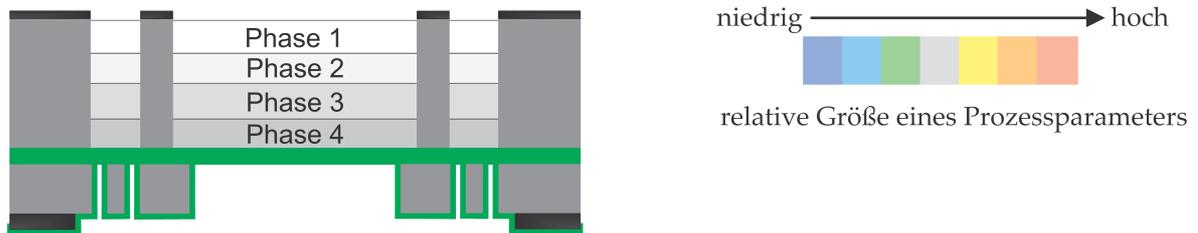


Tabelle 2.7: Variierte Prozessparameter und Verlauf der Optimierung des Ox-CL-Prozesses (Phase 4), Wh.: Wiederholung

Prozessparameter	Phase 4	Optimierungsschritte									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[dep1] Zeit in ms		4000	4000	4000	4000	4000	3900	3600	2500	2500	1900
[etch1] Zeit in ms		2000	1500	1700	5000	4600	4700	4500	3800	3500	3500
[etch 2] Zeit in ms			2500	2600	2600	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Tischtemperatur in °C		0	-10	-10	0	0	0	0	0	0	0
Wh. mit Abkühlen		90	30	30	30	50	57	86	90	100	100
Wh. ohne Abkühlen		10	10	10	5	3	3	2	2	2	2
[etch1/dep1]		0,50	0,38	0,43	1,25	1,15	1,21	1,25	1,52	1,40	



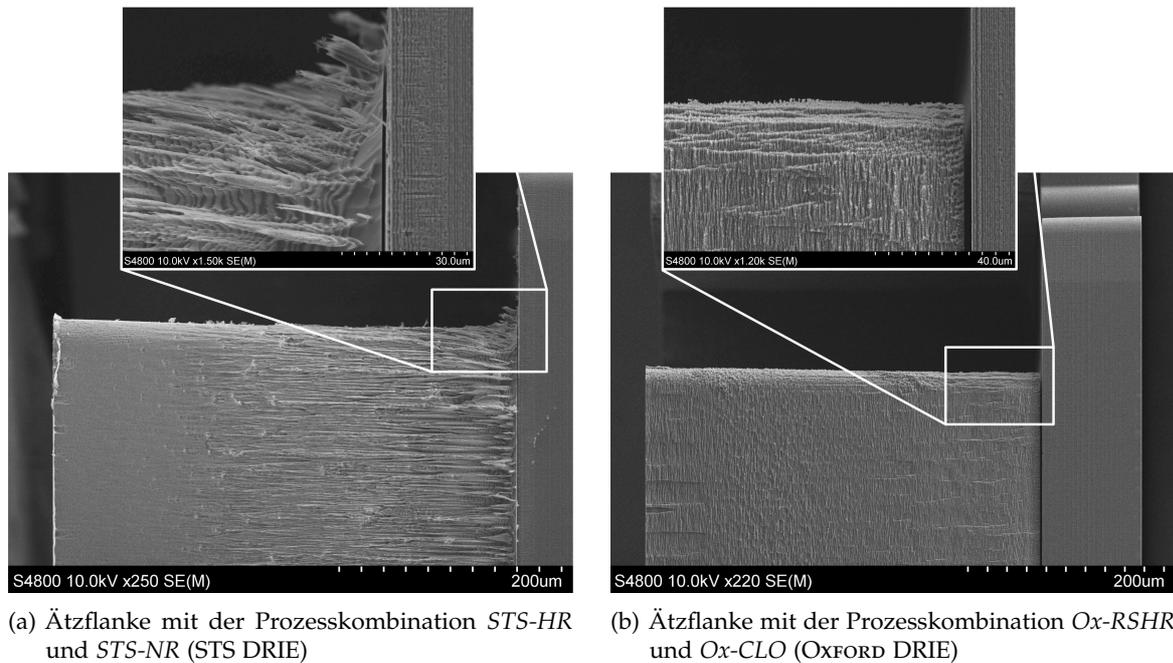


Abbildung 2.20: REM-Aufnahmen von Ätzflanke und -boden des Handlelayers mit nasschemisch freigestelltem Devicelayer (zweiachsiger Mikroschrittaktor)

Ein SOI-Wafer (die Aktorchips des zweiachsigen Systems) wurde mit den optimierten *Ox-RSHR*- und *Ox-CLO*-Prozessen an der *OXFORD DRIE* geätzt. Ebenfalls wurde ein Wafer an der *STS DRIE* mit den ursprünglichen *STS-HR*- und *STS-NR*-Prozessen strukturiert.

Die Ergebnisse und charakteristischen Unterschiede sind in Abb. 2.20 in den REM-Aufnahmen deutlich zu erkennen. Mit dem optimierten *Ox-RSHS*-Prozess konnte eine hohe Sauberkeit des *BOX*-Layers erreicht werden, s. Abb. 2.20. Eventuelle Leckströme zwischen dem Handle- und Devicelayer werden somit stark reduziert und der Aufbau der notwendigen elektrischen Potentiale sichergestellt.

Mit den technischen Fähigkeiten der *OXFORD DRIE* sind neue Möglichkeiten eröffnet. Da der *Ox-HR*-Prozess beim Überätzen kein ausgeprägtes Notching hat, kann man unterschiedliche Aspektverhältnisse besser tief ätzen, ohne dabei an Strukturtreue zu verlieren. Wie die erreichte Strukturtreue die Eigenschaften des einachsigen Mikroschrittaktors beeinflusst, wird in Abschnitt 2.5 analysiert.

2.4 Entwurf der Steuerung des einachsigen Mikroschrittaktors

In Abb. 2.3 wurde der Bewegungsablauf des einachsigen Schrittaktors vorgestellt. Für die Umsetzung dieser Bewegung sind mehrere unabhängige, elektrische Signale notwendig, mit denen die jeweiligen Elektroden angesteuert werden können. Die Spannungsverläufe sind in einem *NATIONAL INSTRUMENTS™ (NI) LABVIEW™ 2012* Programm definiert und werden über eine USB-Ausgabekarte *NI 9264²⁰* in analoge Signale umgewandelt. Diese (0–5 V) werden in einen Mehrkanal-Spannungsverstärker geleitet und auf ca. 100-faches Spannungsniveau gehoben.

²⁰Datenblatt siehe [Nat]

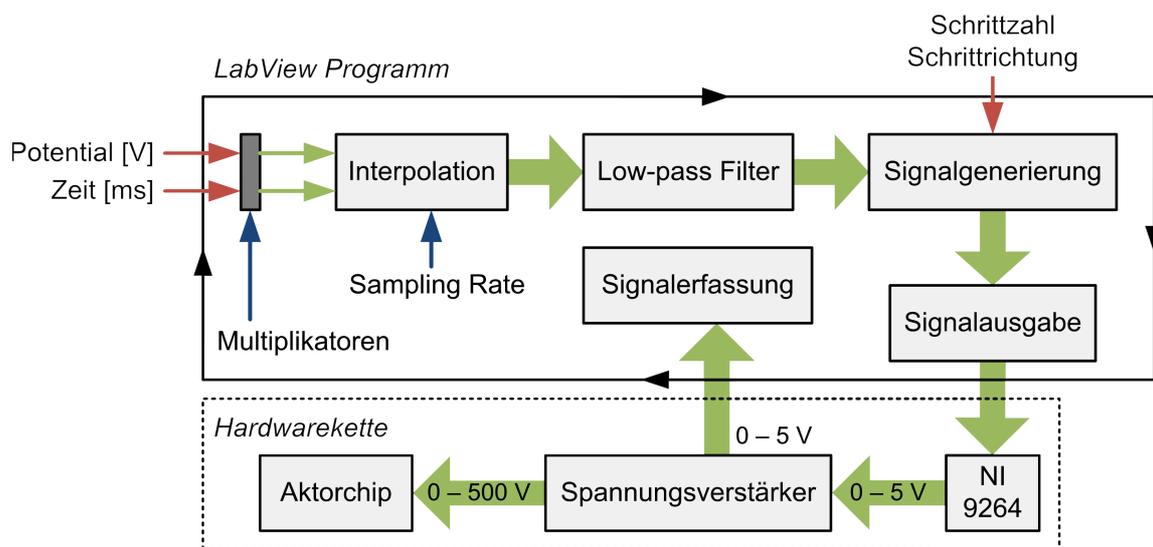


Abbildung 2.21: Konzept der Steuerungsumgebung des einachsigen Mikroschrittaktors

Tabelle 2.9: Eigenschaften der Ansteuerung des einachsigen Mikroschrittaktors

Eigenschaft	Wert
Spannungsbereich	0–200 V, max. 300 V
Kanalanzahl	5 (9 bei asymmetrischer Steuerung)
Signalform	Freiform, zyklisch
verwendeter Frequenzbereich	0–5000 Hz

Der Spannungsverstärker hat zwei Ausgangsgruppen: Die erste Ausgangsgruppe liefert die Hochspannungssignale für den Mikroaktor. An der zweiten Ausgangsgruppe liegen Signale des ersten Ausgangs mit herunterskaliertem Spannungsniveau für das Monitoring der Signalausgabe vor. Die Überwachung ist notwendig, da der Verstärker eine Strombegrenzung bei 5 mA besitzt. Wenn der Strom z.B. wegen eines elektrischen Durchbruchs über diese Grenze steigt, wird die Verstärkung unverzüglich nachgeregt, bis sich der Strom unter der 5 mA Grenze befindet. Demzufolge kann man mit den Monitorignalen erkennen, wenn der eingestellte Spannungswert nicht erreicht wird bzw. ein elektrischer Durchbruch im System vorliegt. Das Konzept der Steuerungsumgebung ist in Abb. 2.21 dargestellt und die Steuersignale werden im folgenden Unterabschnitt detailliert beschrieben. Die Hauptmerkmale der Steuerung sind in der Tabelle 2.9 aufgelistet.

2.4.1 Steuersignale des einachsigen Mikroschrittaktors

Der Mikroaktor wird angesteuert und nicht geregelt. Die entworfene *Inchworm*-Bewegung und der mechanische Entwurf definieren feste Schrittweiten, sodass auf zusätzliche Sensoren und einen Regelungskreis verzichtet werden kann. Bei dem Steuerungskonzept wird davon ausgegangen, dass der Mikroschrittaktor entsprechend dem Entwurf gefertigt ist und keine Asymmetrien auftreten. Bei der Programmierung wird die Möglichkeit frei gehalten alle Elektroden mit unterschiedlichen Spannungssignalen beaufschlagen zu können, um so fertigungstechnisch bedingte Abweichungen (unterschiedliche Federraten, Elektrodenabstände) zu kompensieren.

Im symmetrischen Fall wird der Mikroschrittaktor mit fünf individuell angepassten Signalen

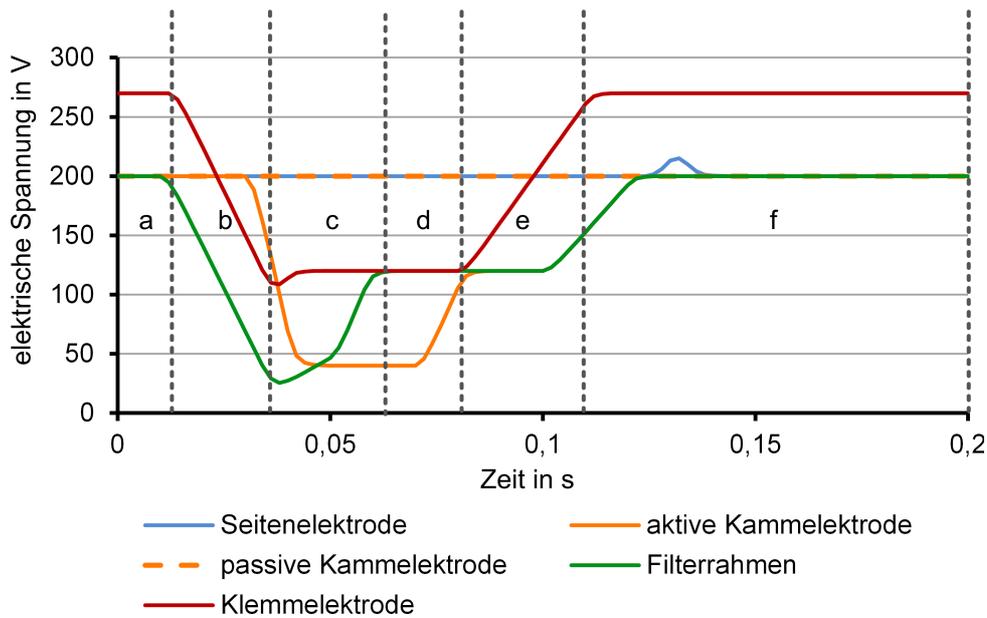


Abbildung 2.22: Spannungsverlauf der Aktorelektroden für einen Schritt

betrieben. Der Verlauf der Steuersignale eines Schrittes ist in Abb. 2.22 aufgezeichnet. Die quantitativen Werte der Signale werden ausgehend von den Berechnungen (Abschnitt 2.2) und mithilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen festgelegt. Die elektrischen Potentiale sind relativ zur Gerätemasse des DA-Wandlers als Spannungen U definiert.

Einen Schrittzzyklus kann man in sechs Teilschritte unterteilen. Die Seitenelektroden (Blau) haben ein konstantes elektrisches Potential (200 V) über einen Schrittzzyklus.

- Der erste Teilschritt entspricht den Initialzustand. Der Filterrahmen wird zur Klemmelektrode mit einer Spannungsdifferenz von 70 V gezogen und fixiert.
- Im zweiten Teilschritt wird die Spannung vom Filterrahmen innerhalb von 28 ms bis auf 26 V gesenkt. Demzufolge zieht die elektrostatische Kraft die Seitenelektroden an den Filterrahmen heran. Damit keine unnötig hohe Spannung zwischen Filterrahmen und Klemmelektrode entsteht, wird in diesem Teilschritt parallel auch das Potential der Klemmelektrode gesenkt.
- Der Filterrahmen wird entlang der x -Achse bewegt. Dazu wird erst die Spannung der symmetrisch angeordneten, aktiven Kammelektroden bis auf 40 V gesenkt. Die elektrostatische Kraft wird damit für die Ausführung des Schrittes aufgebaut. Danach wird der Filterrahmen von der Klemmelektrode gelöst, indem die Spannungen auf das gleiche 120 V Niveau gezogen werden. Der Filterrahmen bewegt sich zusammen mit den Seitenelektroden entlang der x -Achse bis zum mechanischen Anschlag.
- Das Potential der aktiven Kammelektrode wird erhöht, da im ausgelenkten Zustand eine niedrigere Spannungsdifferenz zum Halten der Position ausreicht.
- Der Filterrahmen wird in der ausgelenkten Position zur Klemmelektrode gezogen und festgehalten. Die aktive Kammelektrode zusammen mit dem Filterrahmen wird auf das Potentialniveau der Seitenelektroden gehoben.
- In der letzten Phase erreichen die Potentiale ihre Initialwerte und die Seitenelektroden lösen sich vom Filterrahmen. Da der Filterrahmen an der Klemmelektrode fixiert ist und Leckströme fließen können, kann es dazu kommen, dass das Potential des Filterrahmens

leicht erhöht wird und somit eine Potentialdifferenz zwischen den Seitenelektroden und dem Filterrahmen besteht. Deswegen wird das Potential der Seitenelektroden kurzzeitig leicht angehoben um das Loslösen zu begünstigen.

Damit ist der Schritt beendet. Jeder weitere Schritt wird durch eine Wiederholung dieses Signalverlaufs erzeugt. Während des Vorgangs sind zwar Potentiale über 200 V verwendet worden, die maximale Spannung bleibt aber unter 175 V.

Eine graphische Bedienungsfläche des Steuerungsprogramms ermöglicht die automatische Ausführung einer vordefinierten Schrittfolge. Es können Parameter wie die Vorverstärkung, die Signalfilterung mit einer einstellbaren Tiefpassfrequenz oder die Dauer eines Schrittes mit der Multiplikation aller Zeitwerte nach Bedarf eingestellt werden.

2.5 Vermessung des einachsigen Mikroschrittaktors

In diesem Abschnitt werden einachsige Mikroschrittaktoren mit einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert und die gemessenen Bewegungskurven ausgewertet. Es werden u.a. die Schrittgrößen, Positionierbereiche und erreichbaren Schrittfrequenzen ermittelt. Das Hauptziel ist es zu prüfen, ob die entworfenen und hergestellten Mikroschrittaktoren die Anforderungen für den Einsatz im HAS erfüllen. Bei den Messungen werden zwei Demonstratoren verwendet: ein Aktorchip jeweils mit der

1. STS DRIE (STS 1DA CHIP) und
2. der OXFORD DRIE Plasmaätzanlage (OXFORD 1DA CHIP) gefertigt.

Auf den entsprechenden Demonstrator wird bei jeder Messung hingewiesen. Die Aktorchips werden beide mit einem Blenden-Array bestückt. Die Charakterisierung erfolgt in folgenden Schritten:

1. Bewegungsanalyse (Unterabschnitt 2.5.2)
2. Vermessung des Positionierbereichs (Unterabschnitt 2.5.3)
3. Messung der Schrittgrößen entlang des gesamten Positionierbereichs (Unterabschnitt 2.5.4)
4. Versuche mit schnellen Ansteuersignalen (Unterabschnitt 2.5.5)

Um den Messwerten und Diagrammen eine eindeutige Bedeutung zuzuordnen, werden die verwendeten Begriffe folgend definiert:

Pos_i : Die angefahrene Lage des Blenden-Arrays. Pos_0 ist die Startposition am Anfang eines Scanvorgangs. Pos_i ist die Lage des Blenden-Arrays nach i Schritten in Antriebsrichtung ($i \in \mathbb{Z}^+$).

$Schritt_i$: Der Vorgang, um den Filterrahmen von Pos_{i-1} zu Pos_i zu versetzen.

$x^r(t)$, $y^r(t)$: die (relative) x - und y -Position des Filterrahmens und somit des Blenden-Arrays ($x^b(t)$, $y^b(t)$).

x_i^r , y_i^r : Die relative x - und y -Position des Filterrahmens in $i = Pos_i$. Allgemein werden die relativen Positionen in Pos_i mit x_i und y_i gekennzeichnet.

a_i : Die Schrittgröße bzw. der Weg in x -Richtung, der beim $Schritt_i$ zurückgelegt wird: $x_{i+1}^r - x_i^r$. Abweichungen in y -Richtung werden getrennt ausgewertet.

μ_a : Mittelwert aller Schrittgrößen in einer Messreihe je Richtung.

μ_{ai} : Mittelwert der Schrittgrößen beim $Schritt_i$ in einer Messreihe. Diese Mittelwertbildung lässt

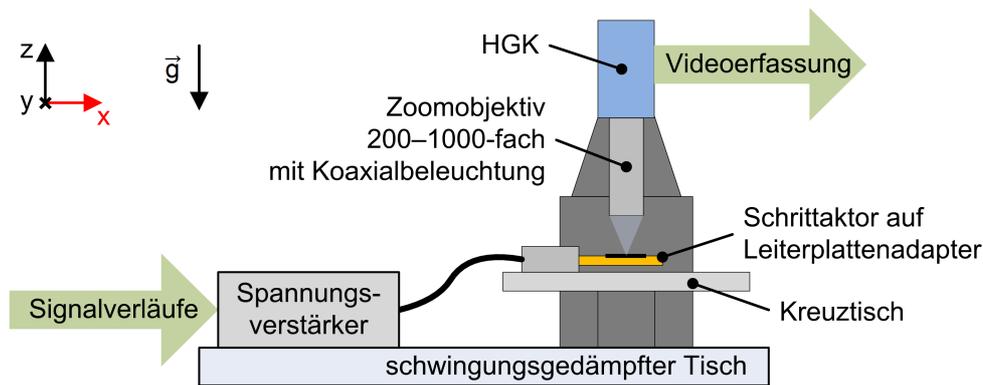


Abbildung 2.23: Messaufbau zur Charakterisierung des einachsigen Mikroschrittaktors

beurteilen, ob über den Positionierbereich tendenzielle Unterschiede zwischen den jeweiligen Schrittgrößen und Abweichungen vorhanden sind.

Genauigkeit, $\pm 2\sigma$: Mit dem Begriff wird in dieser Arbeit die Wiederholgenauigkeit bezeichnet. Bezogen auf die Schrittgröße ist die Wiederholgenauigkeit $\pm 2\sigma_a$, wobei σ_a die Standardabweichung²¹ der Schrittgrößen ist. Damit sagt die Genauigkeit aus, in welchem Bereich um den Mittelwert μ_a die Schrittgröße mit einer 95,4%igen Wahrscheinlichkeit liegen wird. Dabei wird angenommen, dass eine Normalverteilung vorliegt und die Messunsicherheit vernachlässigbar ist.

Unidirektionale Reproduzierbarkeit, χ : Mit wiederholten Schrittfolgen wird eine Aussage getroffen, mit welcher Genauigkeit von Pos_0 die Pos_i angefahren werden kann. Der Wert wird als $\pm\sigma$ von x_i berechnet.

Schrittfehler: Die absolute Differenz zwischen der Schrittgröße und dem Mittelwert der Schrittgrößen, $|a_i - \mu_a|$.

Linearitätsfehler: Die maximale Abweichung von der linear angenommenen Kennlinie ($i \cdot \mu_a$) relativ zum Positionierbereich.

Übersprechen: im allgemeinen Fall $\frac{1}{n} \sum_n \frac{y_i - y_{i-1}}{\mu_a}$ in %, wobei y die inaktive Achse, μ_a der Mittelwert der Schrittgröße der angesteuerten Achse und n die Gesamtzahl der ausgeführten Schritte in x -Richtung bzw. Antriebsrichtung ist.

2.5.1 Vorstellung des Messaufbaus

Der Messaufbau ist schematisch in Abb. 2.23 dargestellt und besteht aus den folgenden Komponenten:

- Hochgeschwindigkeitskamera (HGK) (KEYENCE VW-600C mit Koaxialbeleuchtung)
- Steuereinheit der HGK (KEYENCE VW-9000E)
- Zoomobjektiv (100–1000 \times) mit 25 mm Arbeitsabstand (KEYENCE VH-Z100UW)
- Kamerastativ mit XYZ-Tisch (KEYENCE VH-S50)
- Schwingungsgedämpfter Tisch
- Spannungsverstärker (max. 10-Kanäle)

²¹Standardabweichung einer Stichprobe: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \mu_a)^2}$, wobei σ die Standardabweichung des Mittelwertes und n die Anzahl an Stichproben ist

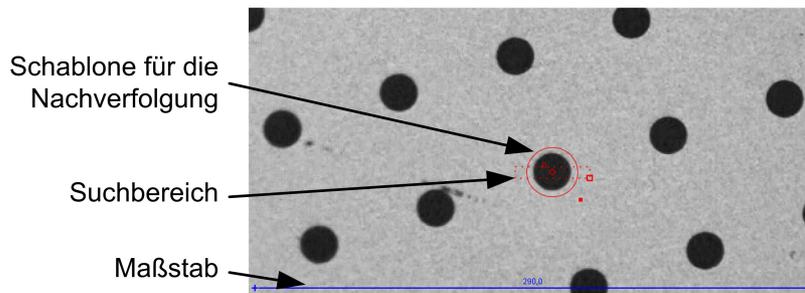


Abbildung 2.24: Definition des nachzuverfolgenden Bildbereichs

Die Pixelzahl des HGK-Sensors beträgt 640×480 px. Bei der maximalen Vergrößerung von $1000 \times$ bedeutet dies einen lateralen Abbildungsmaßstab von 480 nm/px . Das verwendete Programm zur Bewegungsanalyse (TRACKER) erreicht durch Interpolation eine Wiederholgenauigkeit²² bei der Nachverfolgung besser als 3 nm im Falle eines Bildmaterials mit maximaler Auflösung der HGK. Für die Analyse des Mikroaktors ist die Wiederholgenauigkeit des Messsystems entscheidend und im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar. Absolute Werte (Schrittgröße, Positionierbereich) können durch den manuell gesetzten Maßstab bis zu 1% vom realen Wert abweichen. Bei der Punktnachverfolgung mit TRACKER (s. Abb. 2.24) wird ein Referenzpunkt in den Einzelbildern der Videoaufnahme gesucht und die Position des Punktes aufgezeichnet. Im Falle von 500 fps heißt es, dass im $2 \text{ Millisekundentakt}$ die Position des verfolgten Objektes erfasst und daraus eine Bewegungskurve erstellt wird. Im Programm wird ein Nullpunkt beliebig definiert. Als Ergebnis werden die x - und y -Koordinaten des nachverfolgten Punktes der relevanten Struktur relativ zum Ursprung in Mikrometer ausgegeben. Für die jeweiligen Diagramme werden diese Koordinaten typischerweise verschoben, um eine leicht verständliche Darstellung zu gewährleisten und sind somit als relative x - bzw. y -Position zu verstehen.

Vor den eigentlichen Messungen wird das Bewegungs- und Steuerkonzept überprüft: Einzelbilder aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Abb. 2.25 zeigen den implementierten Schrittmechanismus. Die Buchstaben für die Kennzeichnung entsprechen den jeweiligen Teilschritten. Der Schritt beginnt mit dem Teilschritt (a), bei dem der Filterrahmen zu der Klemmelektrode fixiert ist. Im Teilschritt (b) greifen die Seitenelektroden die isolierten Seitenwände des Filterrahmens. Der Filterrahmen wird von der Klemmelektrode gelöst und der Schritt selbst wird in 5 ms ausgeführt (d). Dabei erreicht der Filterrahmen eine Maximalgeschwindigkeit von $7 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Danach wird der Filterrahmen zur Klemmelektrode fixiert und die Seitenelektroden kehren in ihre initialen Positionen zurück (f).

2.5.2 Bewegungsanalyse eines Schrittvorgangs

Es wird der OXFORD 1DA CHIP bei dieser Messung eingesetzt. Das Diagramm in Abb. 2.26 ist eine zweidimensionale Bewegungsanalyse des Filterrahmens anhand einer Blendenöffnung. Die Schrittdauer beträgt im dargestellten Fall 200 ms . Angesichts der hohen Abtastfrequenz der Bewegungsanalysen sind die Bewegungskurven als Liniendiagramm dargestellt. Um die Bewegung mit der Steuerung abgleichen zu können, werden die elektrischen Steuersignale parallel

²²Maximale Differenzen der Bewegungskurve, wenn die Schablone für die Nachverfolgung bei derselben Aufnahme jedes mal neu (leicht verschoben) definiert wird.

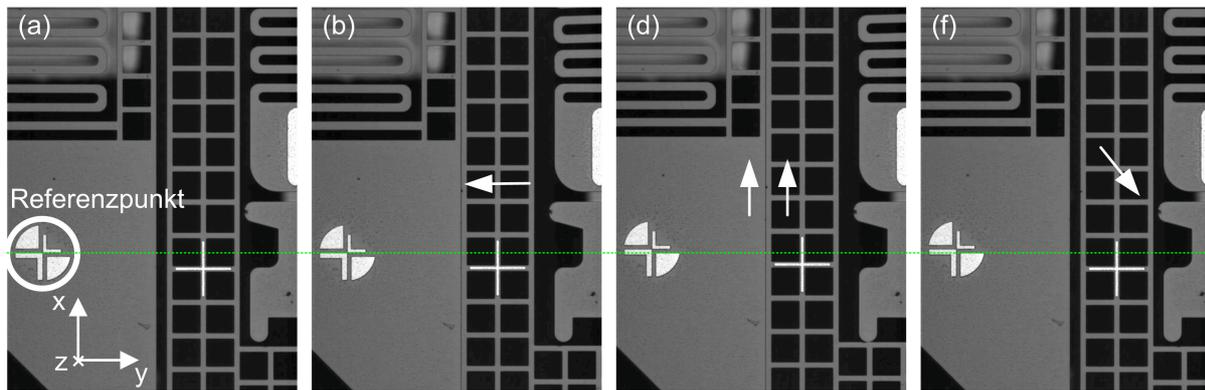


Abbildung 2.25: Einzelbilder einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme (1000 fps) zeigen den Schritt-ablauf des einachsigen Mikroschrittaktors (OXFORD 1DA CHIP). Ein Schritt dauert im dargestellten Fall 190 ms.

zu den Bewegungskurven dargestellt. Der Mikroaktor wird mit zwei Schritten vorgespannt und die darauffolgenden zwei Schritte (*Schritt₃* und *Schritt₄*) in x -Richtung nachverfolgt.

In Abb. 2.26 ist die Schritt-bewegung anhand der x -Position gut erkennbar. Im Teilschritt (c) wird der eigentliche Schritt ausgeführt. Die einzige Abweichung vom im Steuerkonzept skizzierten Ablauf ist, dass der Rahmen trotz der noch vorhandenen Klemmspannung schon fortbewegt wird. Dies hat aber konzeptbedingt keine nachteilige Auswirkung auf die Positioniergenauigkeit des Mikroaktors. Die Kraft für den Schritt wird aufgebaut, während der Filterrahmen noch geklemmt ist. Somit wird die Rückbewegung des Filterrahmens wegen der vorgespannten Federführung reduziert.

Das Blenden-Array behält die Position in den Schrittphasen (f), (a) und (b) für insgesamt ca. 120 ms bei, während die Bildaufnahme für ein Spektralband stattfinden kann. Dieses Belichtungsintervall kann frei eingestellt werden, mit einer Einschränkung. Nach dem Loslassen des Filterrahmens fangen die Seitenelektroden an zu schwingen. Typische Abklingzeiten variieren im Bereich von 80 – 160 ms. Bevor der nächste Schritt ausgeführt werden kann, muss die Schwingung vollständig abklingen und sich die Seitenelektroden in ihrer Initialposition befinden, um gleichmäßige Schrittgrößen zu erhalten.

2.5.3 Vermessung des linearen Positionierbereichs

Die Federführung des Filterrahmens und dessen Position relativ zur Klemmelektrode können einen Einfluss auf die Aktorleistung über den $\pm 100 \mu\text{m}$ Positionierbereich haben. Welcher Positionierbereich umgesetzt werden kann und wie die vollständige Bewegungskurve eines Scanvorgangs aussieht, wird in diesem Unterabschnitt mit dem OXFORD 1DA CHIP gezeigt.

Technologisch bedingt können die Schrittgrößen in den zwei Antriebsrichtungen leicht voneinander abweichen. Um bei der hyperspektralen Bildaufnahme die bestmögliche Abtasthomogenität zu erreichen, wird für ein Bild die folgende Schrittfolge verwendet:

1. 10 Schritte in $+x$ -Richtung bis Rahmenanschlag
2. 20 Schritte in $-x$ -Richtung bis Rahmenanschlag
3. 2 Initialisierungsschritte

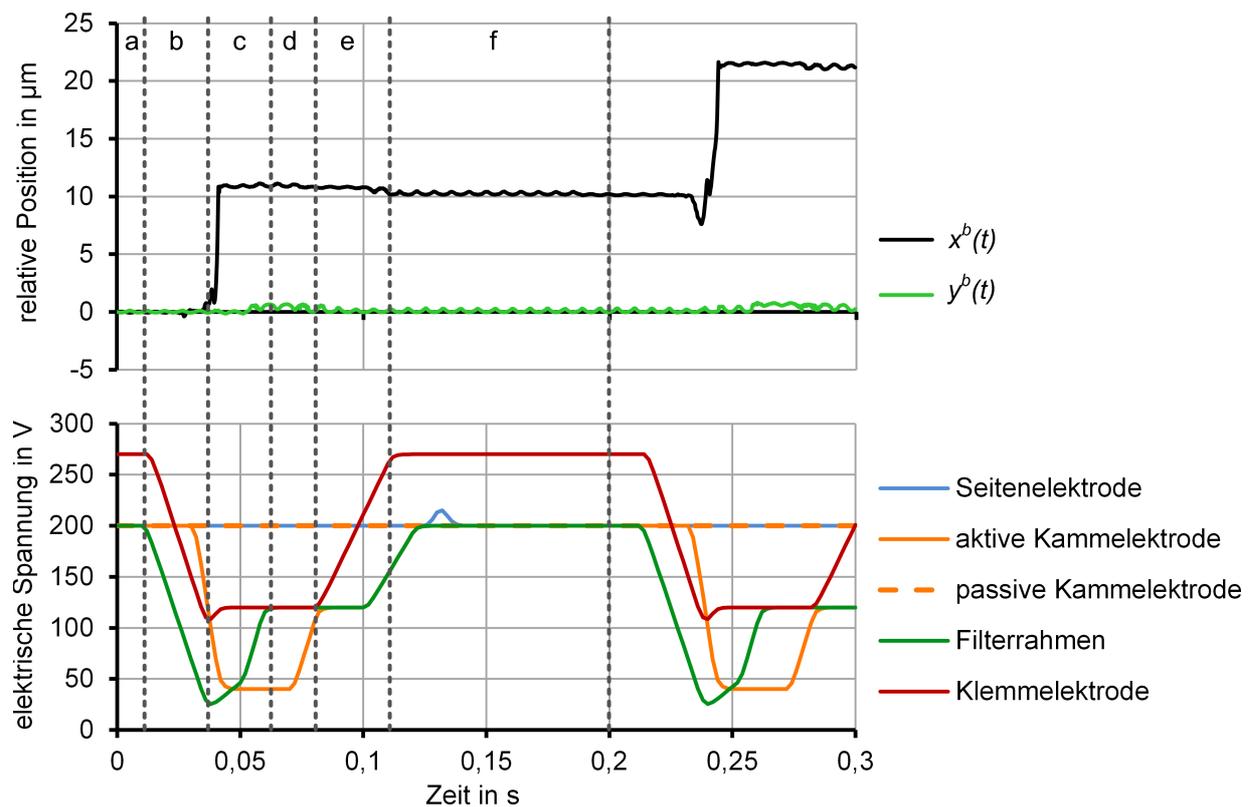


Abbildung 2.26: Zeitlicher Verlauf der relativen x - und y -Position des Blenden-Arrays während des Betriebs mit 500 fps aufgezeichnet (OXFORD 1DA CHIP)

Mit dieser Schrittfolge kann man eine der Endlagen als Ausgangsposition betrachten. Das Blenden-Array scannt den Bildbereich unidirektional ab und damit bleibt eine hohe Abtasthomogenität erhalten. Mit dieser Schrittsequenz werden später auch die Schrittgrößen vermessen. Die Bewegungskurve des ganzen Positionierbereichs ist in Abb. 2.27 aufgezeichnet. Der erreichte Positionierbereich ist $204 \mu\text{m}$ groß ($\pm 2 \mu\text{m}$ Messunsicherheit) und erfüllt damit die gesetzte Anforderung. Die positive Abweichung von $4 \mu\text{m}$ gegenüber dem Entwurf ist das Ergebnis der leichten Überätzung und der Unterschneidung der Strukturen bei dem DRIE-Prozess. Die Schrittgröße ist in $-x$ -Richtung ($13,07 \mu\text{m}$) größer als in $+x$ -Richtung ($10,36 \mu\text{m}$). Diese Abweichung kommt von der Vorauslenkung der Seitenelektrode beim Greifen in $+x$ -Richtung und nicht von ungleichmäßig geätzten Anschlägen. Die Gründe dafür können vielseitig sein:

- Parasitäre, elektrostatische Kräfte durch leicht abweichende Elektrodenabstände,
- asymmetrische Federkonstanten bzw.
- intrinsische mechanische Spannungen vom thermisch härtenden Kleber bei der AVT.

Diese und weitere Phänomene können einen messbaren Einfluss auf die Aktoreigenschaften haben. Durch den unidirektionalen Scanvorgang verlieren diese Abweichungen an Bedeutung, werden aber bei der Entwicklung des zweiachsigen Mikroschrittaktors beachtet.

Zwei Initialisierungsschritte werden ausgeführt, um das Schwingen des Rahmens schneller dämpfen zu können. Die erste geklemmte Position kann eine erhebliche Abweichung von der Nullposition aufweisen, weswegen der Initialisierungsschritt wiederholt wird. Das Loslassen und Klemmen erfolgt mit den in Abb. 2.28 dargestellten Steuersignalen.

Bedingt durch die Durchhängung des Filterrahmens weist die neutrale, zentrale Position auch nach zwei Initialisierungen Positionsabweichungen im Mikrometerbereich auf. Der Kontakt

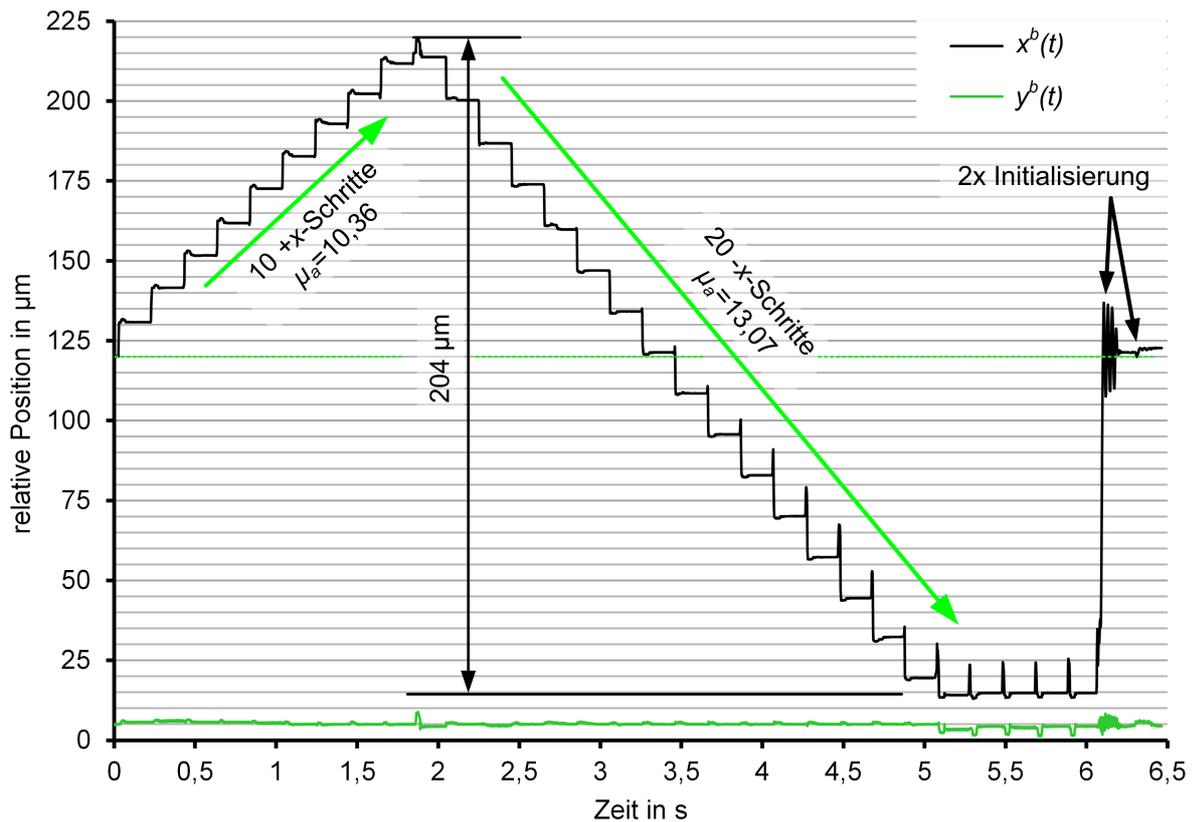


Abbildung 2.27: Relative Position des Blenden-Arrays beim Scannen des vollen Positionierbereichs mit dem einachsigen Mikroschrittaktor (OXFORD 1DA CHIP)

des Filtrerrahmens mit der unterliegenden Klemmelektrode hat zur Folge, dass die Reibkräfte eine hysteresefreie Zentrierung des Filtrerrahmens verhindern. Erkennbar ist in Abb. 2.27 die Abweichung anhand der Positionsdifferenz der Ausgangs- und Endlage des Blenden-Arrays, die 3 μm beträgt. Die oben vorgestellte Schrittsequenz macht die Abweichung der zentralen Position irrelevant, da der mechanische Rahmenanschlag die Definition der Startposition des Scanvorgangs übernimmt.

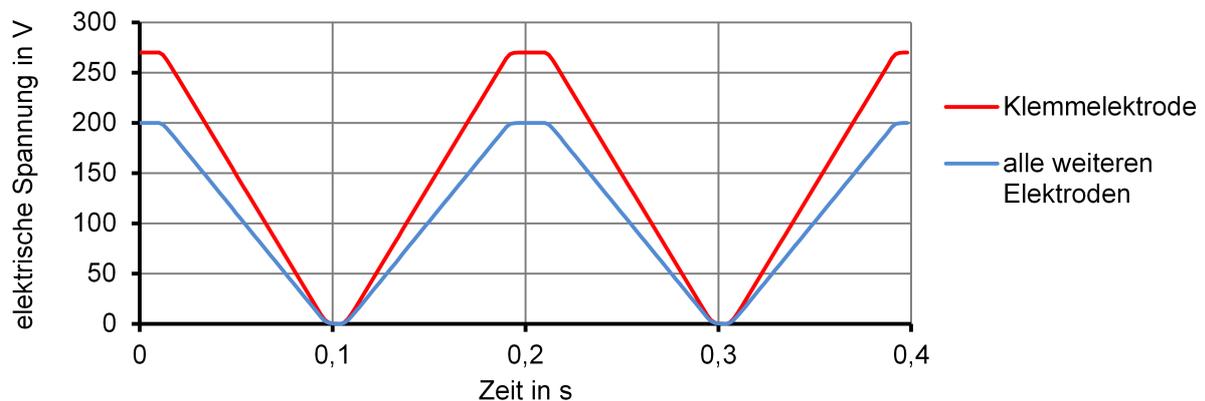


Abbildung 2.28: Steuersignale für die Initialisierung des einachsigen Mikroschrittaktors

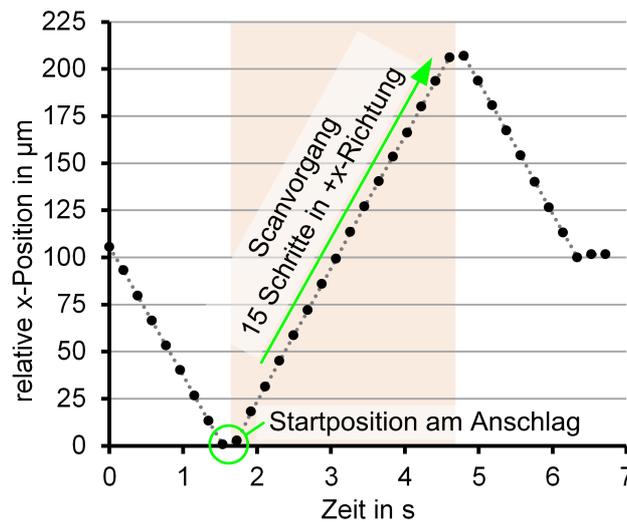


Abbildung 2.29: Schrittfolge für die Bestimmung der Schrittgröße in $+x$ -Richtung des einachsigen Mikroschrittaktors

Tabelle 2.10: Messergebnisse der Schrittgrößensmessung des einachsigen Mikroschrittaktors (STS 1DA CHIP)

	Antriebsrichtung	
	$+x$	$-x$
Mittelwert (μ_a)	13,6 μm	13,2 μm
Genauigkeit	$\pm 1,14 \mu\text{m}$	$\pm 0,73 \mu\text{m}$
max. Abweichung	1,75 μm	1,39 μm
Linearitätsfehler	1,6 %	1,2 %
Übersprechen	-0,43 %	0,03 %
Mittelwert der zentralen Initialposition $\pm 2\sigma$	(x) $-0,89 \pm 7,57 \mu\text{m}$	(y) $-0,05 \pm 1,16 \mu\text{m}$

2.5.4 Vermessung der Schrittgrößen des einachsigen Mikroschrittaktors

Um die Schrittgrößen und deren Genauigkeit zu charakterisieren, wird eine Messreihe bestehend aus 16 Messungen (2×8 in die jeweilige Richtung) am STS 1DA CHIP durchgeführt. Bei einer Messung wird die in Abb. 2.29 präsentierte Schrittsequenz verwendet. Die Schrittfrequenz f_a beträgt dabei 5,2 Hz. Für die Schrittgröße in $-x$ -Richtung wird die Schrittfolge umgedreht: am Anfang wird die Endposition in $+x$ -Richtung angefahren und die Schritte bis zum Anschlag in $-x$ -Richtung vermessen. Die wichtigsten Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 2.10 zusammengefasst. Die Linearität wird zusätzlich anhand des Mittelwertes und der Genauigkeit der relativen x -Positionen pro Schritt veranschaulicht, s. Abb. 2.30. Die maximale Abweichung von der linearen Charakteristik beträgt 3,2 μm und somit 1,6 % des gesamten Positionierbereichs. Anhand der berechneten Werte können die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Der Mittelwert μ_a der Schrittgrößen beträgt 13,4 μm und ist somit größer als entworfen. Bei einem Scanvorgang in $-x$ -Richtung würde der Füllfaktor $a_f = 90 \%$ erreichen.
- Die Genauigkeit von 0,73 μm (Zielwert $< 1 \mu\text{m}$) und die maximale Abweichung von 1,75 μm (Zielwert $< 3 \mu\text{m}$) verschlechtern die Auflösungshomogenität nur unwesentlich.

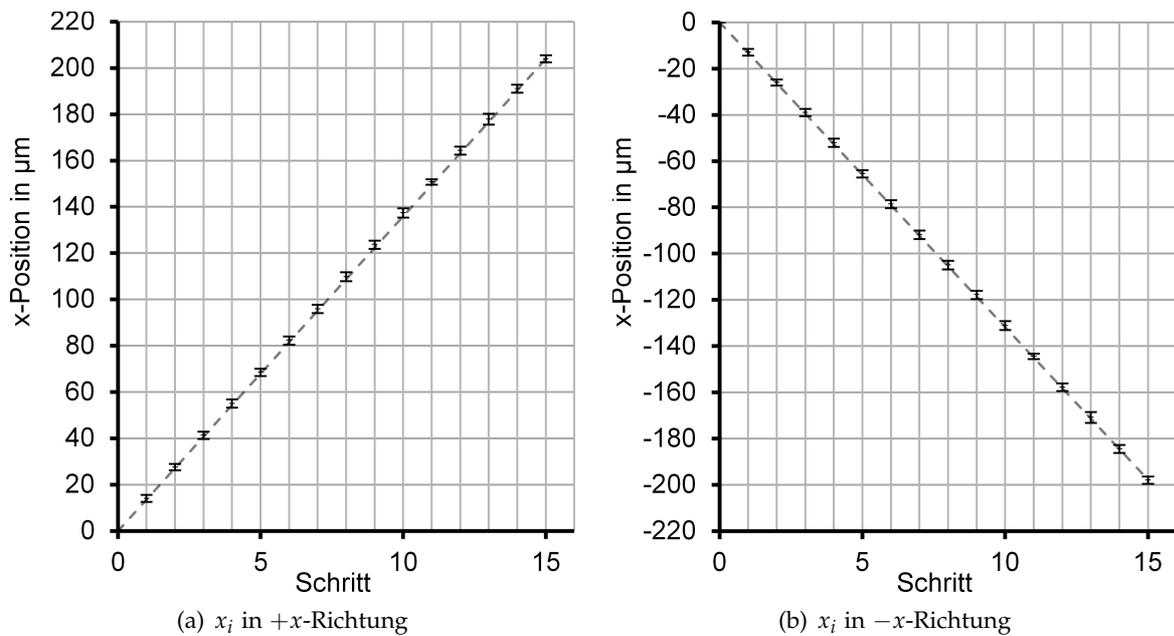


Abbildung 2.30: Die x -Positionen nach $Schritt_i$ (x_i) für die Beurteilung der Linearität. Die Fehlerbalken repräsentieren $\pm 2\sigma$ von x_i .

- Das Übersprechen erreicht gute Werte für ein unregelmäßiges System und erfüllt die definierten Anforderungen ($<1\%$).
- Die Linearität in $-x$ -Richtung ist $1,2\%$ und garantiert eine hohe Auflösungshomogenität des resultierenden Bildes.
- Die Genauigkeit der zentralen Initialposition ist schlechter als die der Schrittgröße und liegt in Betriebsrichtung bei $7,57\ \mu\text{m}$. Dieser Nachteil ist bei dem entworfenen Scanvorgang nicht mehr relevant, da sich die Startposition an einem der mechanischen Anschläge befindet (Abb. 2.29).

Wie die Verteilung der Schrittfehler aussieht, wird mit einem Histogramm in Abb. 2.31 veranschaulicht. Dabei repräsentieren die Klassen das oberste Limit. Zum Beispiel werden alle Messwerte mit einem Schrittfehler $\leq 0,1\ \mu\text{m}$ in der Klasse $0,1$ gezählt. Die Histogramme deuten auf eine Normalverteilung hin. Damit ist die Annahme bei der Berechnung der Genauigkeit begründet. Der gemessene Aktorchip zeigt eine leicht erhöhte Genauigkeit in $-x$ -Richtung als in $+x$ -Richtung. Somit ist die $-x$ -Richtung die präferierte Antriebsrichtung eines hyperspektralen Scanvorgangs.

Schrittgrößendifferenzen über den Positionierbereich

Die Schrittgrößemittelwerte pro Schritt μ_{ai} und deren Standardabweichung sind in Abb. 2.32 aufgezeichnet. Es lässt sich keine deutliche, tendenzielle Abweichung erkennen. Die Schrittgrößen und Abweichungen sind homogen über den Positionierbereich. Die Standardabweichungen in y -Richtung bleiben unter $\pm 1\ \mu\text{m}$. Die Schrittgrößen in $+x$ -Richtung fallen leicht ab ($1\ \mu\text{m}$) bis der Rahmenanschlag erreicht wird. Die große Auslenkung der Rahmenfeder hat demzufolge in Kombination mit dem entworfenen Schrittmechanismus und der Steuerung keine negative Auswirkung auf die Verteilung der Schrittgrößen über den Positionierbereich.

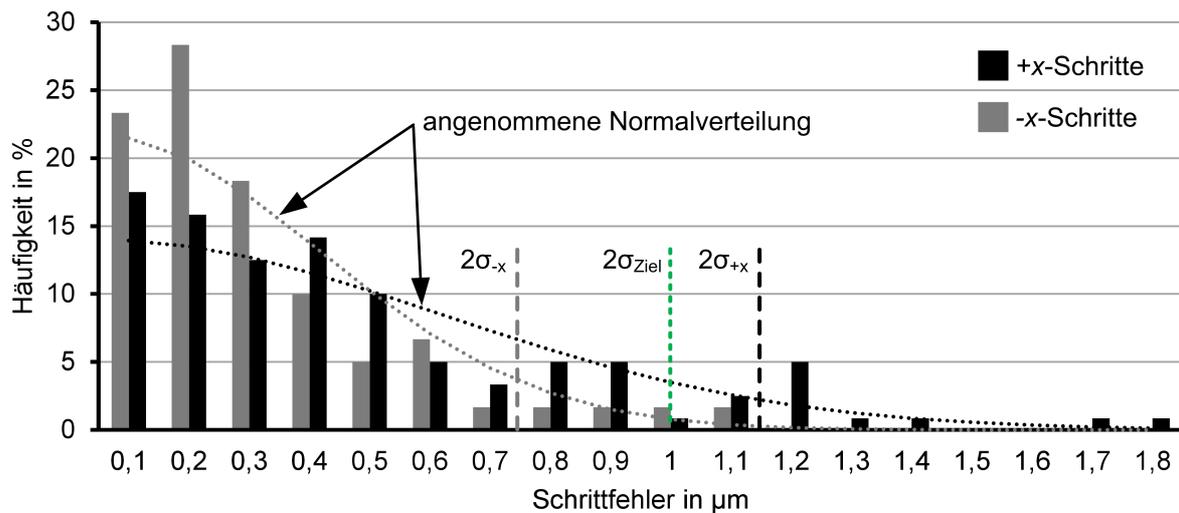


Abbildung 2.31: Prozentual berechnete Häufigkeit des Schrittfehlers in $+x$ -Richtung (Schwarz) und in $-x$ -Richtung (Grau). Die Genauigkeit der Schrittgröße ist für die jeweilige Richtung eingezeichnet ($2\sigma_{+x}$ und $2\sigma_{-x}$). Mit $2\sigma_{Ziel}$ ist die angestrebte $1\mu\text{m}$ Genauigkeit markiert. Die gepunkteten Linien stellen den Verlauf eines idealen, normal verteilten Histogramms dar.

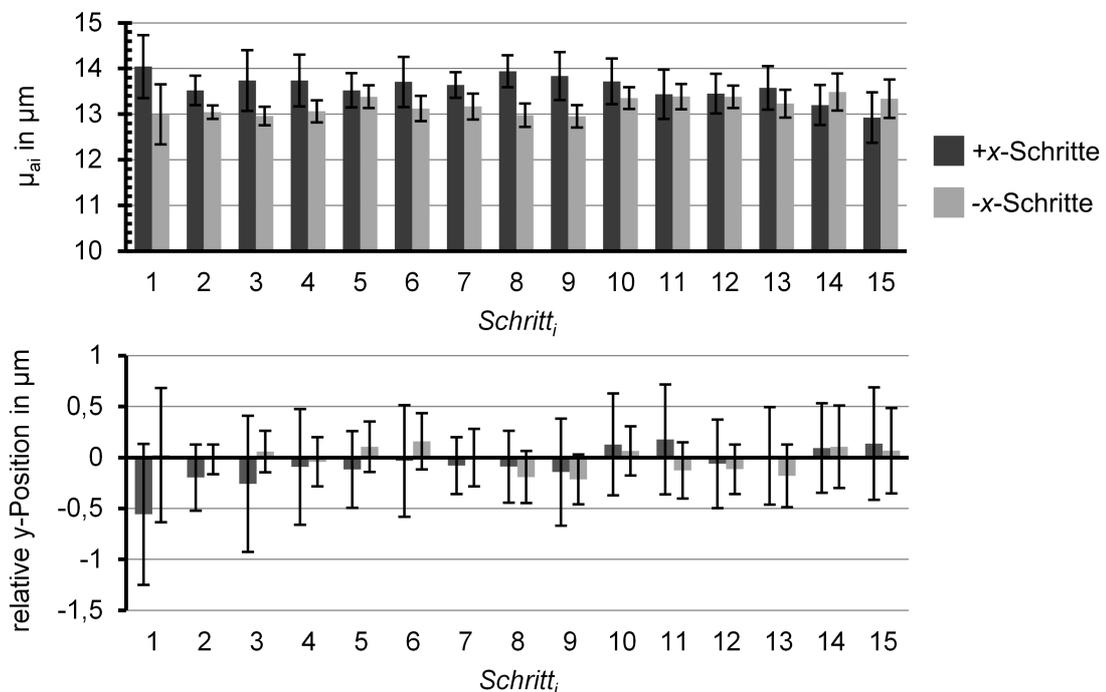


Abbildung 2.32: Mittelwert (μ_{ai}) und Standardabweichung der Schrittgrößen des einachsigen Mikroschrittaktors über den gesamten Positionierbereich

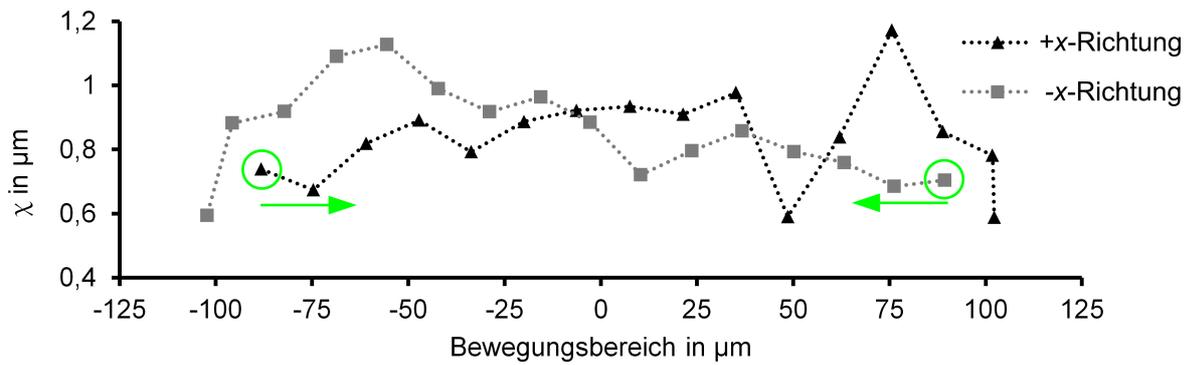


Abbildung 2.33: Die unidirektionale Reproduzierbarkeit χ der einzelnen Positionen

Reproduzierbarkeit der diskreten Blenden-Array-Positionen

Bei konventionellen, makroskopischen Schrittmotoren ist die Reproduzierbarkeit der einzelnen Positionen ausschlaggebend. Für die Anwendung im HAS ist dagegen die Homogenität der Schrittgrößen entscheidend (s. Abschnitt 1.2). Im Fall einer anderen Anwendung des einachsigen Mikroaktors kann die Reproduzierbarkeit von größerer Bedeutung sein und wird daher auch berechnet. Die Messungen für die Schrittgrößen lieferten die relativen Positionen mit Bezug auf den Koordinatenursprung. Wenn man die jeweiligen gemessenen Positionswerte bei den Messungen miteinander vergleicht, bekommt man die unidirektionale Reproduzierbarkeit: Wie genau man Pos_i ausgehend von der Startposition Pos_0 anfahren kann. Dabei wird die Unsicherheit der Startposition am Rahmenanschlag vernachlässigt. Die Reproduzierbarkeit der x -Positionen über den Positionierbereich wird in Abb. 2.33 dargestellt. Die mittlere Reproduzierbarkeit bezogen auf alle Positionen beträgt $\pm 0,85 \mu\text{m}$.

2.5.5 Versuche bei höheren Schrittfrequenzen

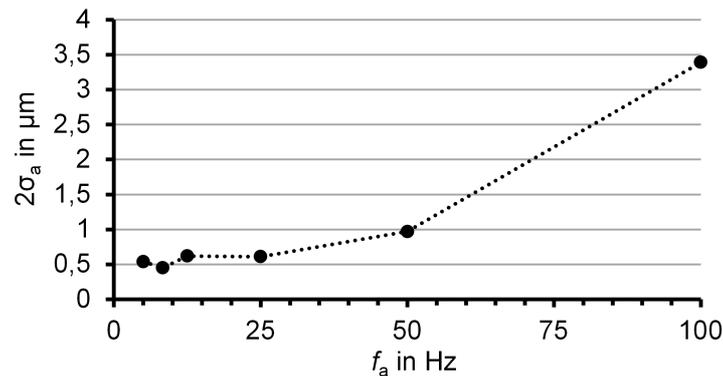
Um das dynamische Verhalten des einachsigen Mikroschrittaktors zu untersuchen, wird das Ansteuersignal graduell im Zeitbereich komprimiert. Die Messungen werden mit dem OXFORD 1DA CHIP durchgeführt. Das Ziel der Messreihe ist, die Wirkung der Schrittfrequenz auf die Genauigkeit der Schrittgröße einzuschätzen. Ein Messvorgang besteht aus 5 Schritten in $+x$ -Richtung und anschließender Initialisierung.

Die Messkurven sind im Anhang A aufgezeichnet. Es werden der Mittelwert und die Genauigkeit der gemessenen Schrittgrößen in einer Messung gebildet. Als Referenz dienen Messungen mit $f_a = 5 \text{ Hz}$, die 6-mal wiederholt wurden. Obwohl 5 Schritte statistisch gesehen wenig Stichproben sind, kann man die Tendenz in Abb. 2.34 erkennen.

Bis zur 5-fachen Geschwindigkeit ($f_a = 25 \text{ Hz}$) bleibt die Genauigkeit bei ca. $0,6 \mu\text{m}$. Ab der 10-fachen Schrittfrequenz ist die Verschlechterung der Genauigkeit deutlich zu erkennen. Bei 50 Hz zeigt der Mittelwert der Schrittgröße zusätzlich eine merkbare Differenz von $1,33 \mu\text{m}$ im Vergleich zum Mittelwert bei 5 Hz . Wie beim Steuerkonzept erwähnt (vgl. Abschnitt 2.4), sind dafür die entstehenden Schwingungen der Komponenten verantwortlich. Wenn das Abklingen der Schwingungen (Seitenaktor, Federführung) abgewartet wird, kann eine hohe Genauigkeit von $\pm 0,6 \mu\text{m}$ gewährleistet werden. Mit weiterer Entwicklung der Steuersignale kann die Dauer

Tabelle 2.11: Positioniergenauigkeit bei höheren Schrittfrequenzen

f_a	μ_a	$\pm 2\sigma_a$
5 Hz	10,36 μm	$\pm 0,54 \mu\text{m}$
8,32 Hz	10,59 μm	$\pm 0,45 \mu\text{m}$
12,5 Hz	10,53 μm	$\pm 0,62 \mu\text{m}$
25 Hz	10,92 μm	$\pm 0,61 \mu\text{m}$
50 Hz	11,69 μm	$\pm 0,97 \mu\text{m}$
100 Hz	10,27 μm	$\pm 3,39 \mu\text{m}$

Abbildung 2.34: Standardabweichung der Schrittgrößen von 5 aufeinanderfolgenden Schritten in $+x$ -Richtung bei erhöhten Schrittfrequenzen

der Nachschwingung der Seitenelektroden reduziert und eine höhere Schrittfrequenz erreicht werden.

2.5.6 Bewertung der Messergebnisse des einachsigen Mikroschrittaktors

Die gemessene, gemittelte Schrittgröße fällt bei dem untersuchten Demonstrator aus der STS DRIE um ca. 3,2 bzw. 3,6 μm größer aus als entworfen. Dafür sind mehrere Ursachen bekannt: Unterätzung, Rezession der Lackmaske, Plasmaumgriff und Überätzung tragen stets zu einer Aufweitung der Strukturen bei (Abb. 2.16). Durch den -2° Ätzwinkel kommt es zum Punktkontakt an den oberen Kanten der mechanischen Anschläge. Somit treten lokal hohe Kräfte auf und können zu Ausbrüchen an der Oberkante führen, die wiederum die Schrittweite leicht erhöhen. Der Linearitätsfehler bleibt unter 1,6 % und die Genauigkeit der Schrittgrößen bei $\pm 1,14 \mu\text{m}$ in $+x$ bzw. $\pm 0,73 \mu\text{m}$ in $-x$ -Richtung.

Der berechnete a_f würde mit einer gemittelten Schrittgröße von 13,2 μm immer noch 90 % betragen. Die Schrittgröße lässt sich mit weiteren Anpassungen der lithographischen- und DRIE-Prozesse korrigieren, s. Unterabschnitt 2.3.3. Die anvisierte Schrittfrequenz von 50 Hz konnte erreicht werden. Die Genauigkeit verschlechtert sich zwar mit der Erhöhung der Aktorgeschwindigkeit, bleibt aber bis 50 Hz unter $\pm 1 \mu\text{m}$ bei dem untersuchten Demonstrator. Durch eine weitere Analyse der Feder-Masse-Systeme des Aktorchips können die Ansteuerungssignale auch bei höheren Frequenzen angepasst werden. Mit aktiver Dämpfung der Schwingungen durch elektrostatische Kräfte lässt sich die Genauigkeit bei schnellen Schrittfolgen beibehalten.

Die Kombination aus hoher Traglast, großem Positionierbereich und geringer Systemgröße ergab für die Federführung des Blenden-Arrays weiche Mäanderfedern. In z -Richtung senkt sich der

Filtterahmen daher bis zum Kontakt mit dem Handlelayer ab. Die zentrale Initialposition weist somit eine starke Streuung beim Lösen des Filtterahmens auf ($\pm 2\sigma = \pm 7,57 \mu\text{m}$). Als Startposition wurde ein Ende des Positionierbereichs genommen. Der mechanische Anschlag garantiert auf diese Weise eine gute Reproduzierbarkeit ($\chi < 1,2 \mu\text{m}$) der einzelnen Blenden-Array-Positionen. Die weiche Federführung bedingt, dass für einen zweiachsigen Betrieb das Entwurfskonzept geändert werden muss. Denn eine serielle Kopplung der Achsen würde die Federführung noch weicher und die Systemgröße weiter erhöhen.

Für das zweiachsige Positioniersystem wird daher eine parallele Kopplung der Achsen umgesetzt, wozu der Systementwurf deutlich überarbeitet wird. Die Vorstellung des Schritttaktors mit zwei orthogonalen Antriebsachsen findet im folgenden Kapitel 3 statt.

3 Zweiachsiger Mikroschrittaktor

In Kapitel 1 wurden die wichtigsten Eigenschaften des zu entwickelnden Schrittaktors definiert und in Kapitel 2 eine Lösungsalternative aufgezeigt, in der die Schrittbewegung auf eine Achse begrenzt wurde. Mit einer zweiachsigen Positionierung wird der Freiheitsgrad der Bewegung im Parameterfeld (Tabelle 1.1) erhöht. Der wichtigste Vorteil eines zweiachsigen Positioniersystems ist, dass die spektrale Auflösung des HAS durch einen höheren Rasterabstand der Blendenmatrix erhöht werden kann.

Um kompakte Chipabmessungen zu ermöglichen, wird ähnlich zum einachsigen Konzept eine dreidimensionale Elektrodenanordnung entworfen. Der Schrittmechanismus besteht aus 6 Teilschritten und ist in Abb. 3.1 skizziert und erklärt. Die Farben Schwarz und Rot (schraffiert) repräsentieren unterschiedliche elektrische Potentiale, die die notwendigen elektrostatischen Kräfte für die Bewegung erzeugen. Da das Blenden-Array für die zweiachsige Positionierung in x - und y -Richtung einen Positionierbereich von $200\ \mu\text{m}$ haben muss, kann das optische Element bei paralleler Kopplung der Antriebsachsen nicht mehr an der vertikalen Seitenfläche gegriffen werden. Die Funktion der Seitenaktoren übernimmt hier ein Rahmen, der sich über der Blenden-Array-Ebene befindet und das optische Element an der horizontalen Oberfläche greift.

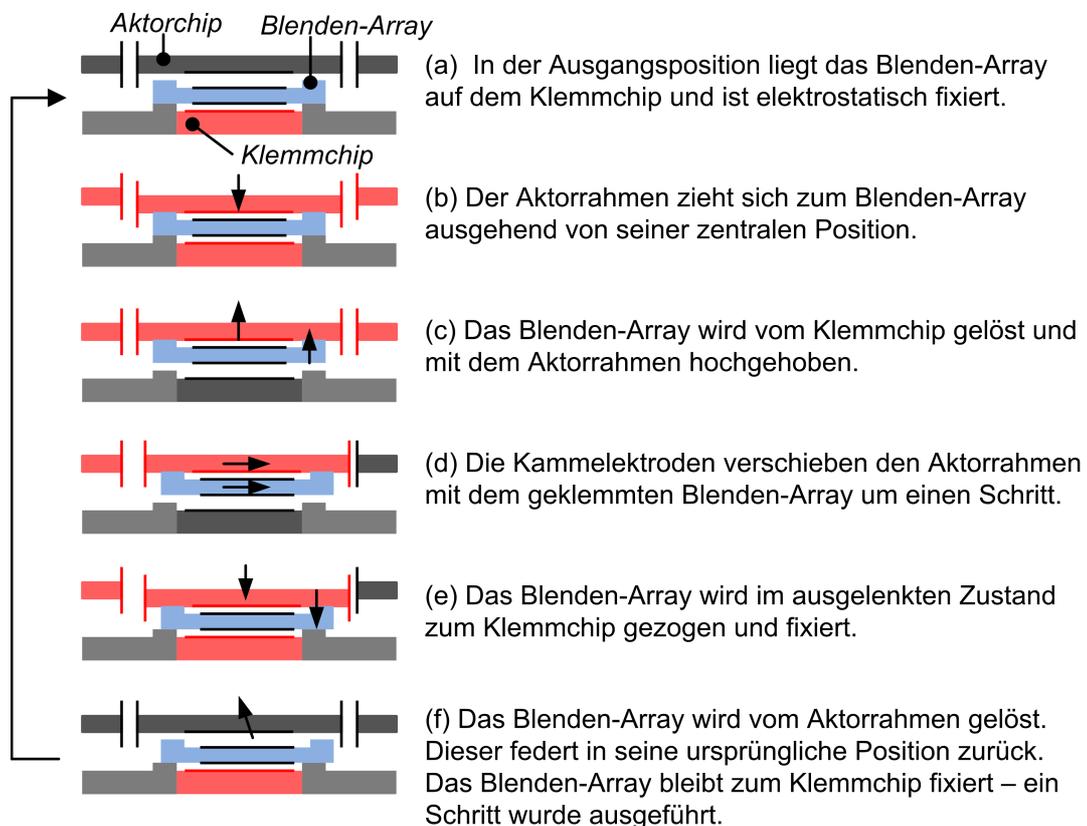


Abbildung 3.1: Bewegungskonzept des zweiachsigen Mikroschrittaktors

3.1 Dimensionierung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Beim einachsigen Mikroschrittaktor wurden bereits die technologischen Aspekte und Dimensionierungsmethoden von elektrostatischen Aktoren beschrieben, s. Abschnitt 2.2. Für den zweiachsigen Mikroschrittaktor werden lediglich die abweichenden Dimensionierungsaufgaben detaillierter vorgestellt.

Für die Umsetzung des Bewegungskonzeptes werden drei unterschiedliche Substrate kombiniert. Es werden bei der Herstellung

- ein SOI-Wafer für den Aktorchip,
- ein Borofloat33 Glassubstrat für das Blenden-Array bzw. Abstandshalter und
- ein beidseitig polierter (DSP) Si-Wafer für den Klemmchip verwendet.

Der Systementwurf in Abb. 3.2 zeigt, wie der zweiachsige Mikroschrittaktor aufgebaut ist.

Der Aktorchip besitzt einen Aktorraahmen, der in x - und y -Richtung um $\pm 10\ \mu\text{m}$ zwischen mechanischen Anschlägen bewegt werden kann. Symmetrisch angeordnete, elektrostatische Tangentialaktoren (Kammelektroden) ziehen den Aktorraahmen in die gewünschte Richtung. Zusätzlich kann der Aktorraahmen in z -Richtung $10\ \mu\text{m}$ durch integrierte Elektrodenflächen zum Blenden-Array bewegt werden.

Es befinden sich zwei zusätzliche, elektrisch isolierte Bereiche auf dem Aktorraahmen. Diese sind Grün in Abb. 3.2 markiert und setzen das gesamte Blenden-Array während der Teilschritte (b)–(e) auf ein definiertes Potential. Mit Rot ist die Elektrode gekennzeichnet, die vertikal das Blenden-Array zum Aktorraahmen klemmt. Das Blenden-Array selbst hat auf beiden Seiten außerhalb des optisch genutzten Bereichs eine vollflächig metallisierte Rahmenfläche, die als Gegenelektrode die Klemmung zum Klemmchip bzw. zum Aktorchip ermöglicht. Die Metallschichten auf Ober- und Unterseite des Blenden-Arrays sind elektrisch miteinander verbunden, sodass – abgesehen von den zwei elektrisch getrennten Kontaktpads auf der Aktorchipseite – das Blenden-Array auf ein Potential gesetzt werden kann. An den Ecken sind erhobene Auflageflächen vorgesehen (mit schwarzer Kontur gekennzeichnet), die den minimalen Abstand von 5 bis $10\ \mu\text{m}$ zwischen Aktorraahmen und den vertikalen Blenden-Array-Elektroden während der Teilschritte (b)–(e) definieren. Die grauen Kontaktpads sind elektrisch getrennt, liegen auf dem Aktorraahmen auf und verhindern somit den Kurzschluss.

Eine Federführung, die dauerhaft mit dem Blenden-Array verbunden ist, müsste durch den großen Positionierbereich sehr weich ausgelegt werden¹ und wird daher nicht umgesetzt. Der Positionierbereich wird durch Abstandshalter definiert, die gleichzeitig den vertikalen Abstand zwischen Aktor- und Klemmchip kontrollieren. Die Initialposition wird anhand einer Endlage definiert. Die Abstandshalter werden in unmittelbarer Nähe zum Blenden-Array aus dem gleichen Glaswafer gesägt, um somit den Einfluss der herstellungsbedingten Dickenschwankungen zwischen den einzelnen Substraten zu eliminieren. Die beidseitigen Erhebungen (Grau mit schwarzer Kontur) sichern den zusätzlichen Freiraum in z -Richtung für eine reibungsfreie laterale Verschiebung in Teilschritt (d).

Der Klemmchip sichert die Position des Blenden-Arrays zwischen zwei Schritten, bis der Aktorraahmen ausgeschwungen und in Ruhe ist, sodass der nächste Schritt ausgeführt werden kann.

¹Eine stabile Initialposition kann mit einer sehr weichen Federführung nicht sichergestellt werden (s. Unterabschnitt 2.2.2).

Der grüne, erhobene Kontaktbereich legt durch mechanischen Kontakt zum Blenden-Array das Potential des Blenden-Arrays fest, während es von der vertikalen Klemmchipelektrode (orange) fixiert wird. Die notwendige optische Apertur wird im Klemmchip durch einen DRIE-Prozess erzeugt.

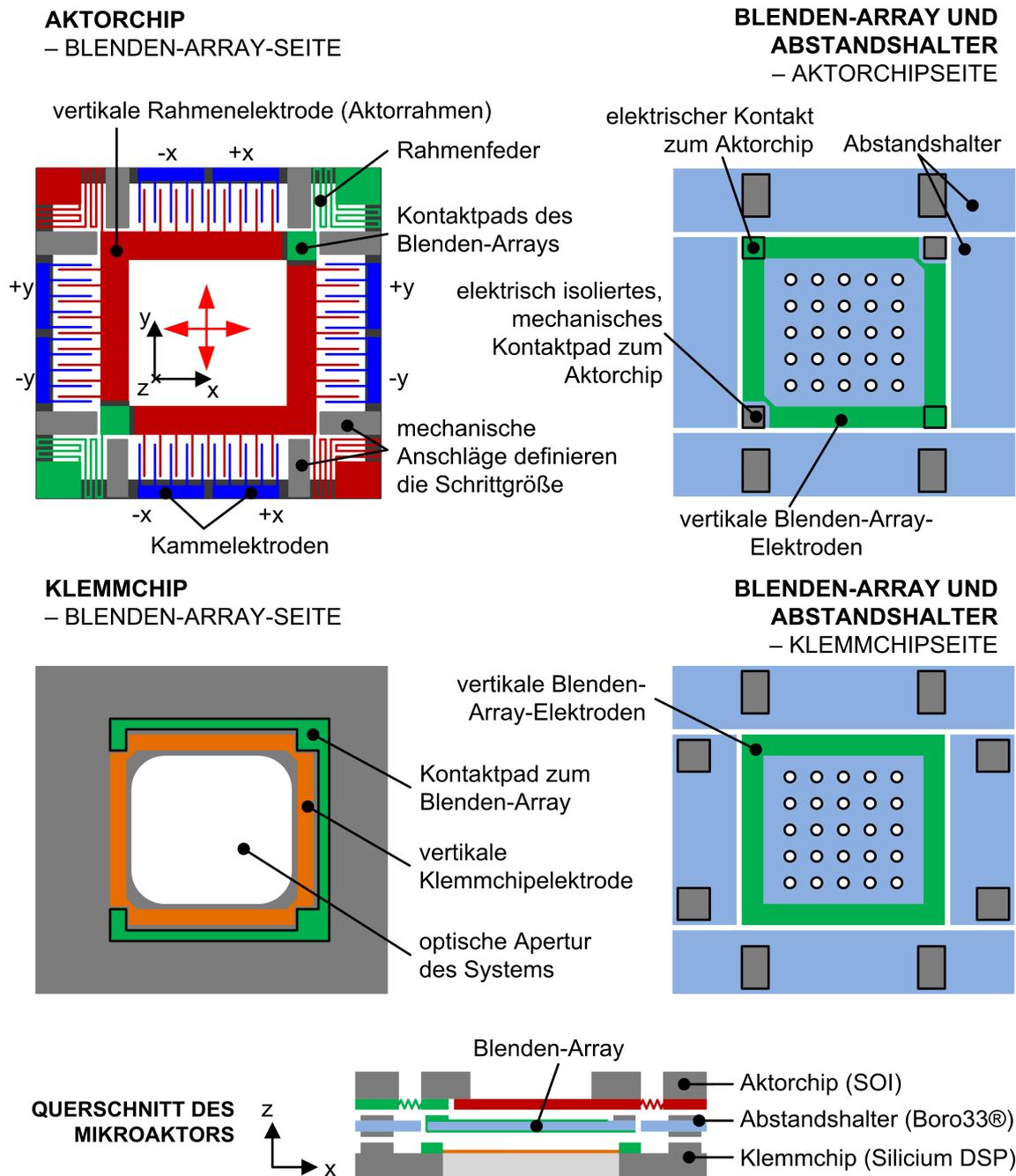


Abbildung 3.2: Konzeptioneller Aufbau des zweiachsigen Mikroschrittaktors. Die roten Pfeile zeigen die Antriebsrichtungen.

3.1.1 Dimensionierung der Elektroden und Federführungen des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Die Reduzierung der Strukturweite um $5\ \mu\text{m}$ erschien nach den Prozessdurchläufen des einachsigen Mikroschrittaktors mit der STS DRIE aus technologischer Sicht möglich, um eine höhere elektrostatische Kraftwirkung zu erreichen. Daher haben die Kammstrukturen des zweiachsigen Mikroaktors einen initialen Elektrodenabstand von $20\ \mu\text{m}$ bzw. $60\ \mu\text{m}$. Die Strukturbreiten betragen auch $20\ \mu\text{m}$. Damit sind die Strukturen um $5\ \mu\text{m}$ filigraner als beim einachsigen Aktor. Die höhere Kammdichte erzeugt bei gleichbleibender Betriebsspannung und Platzbedarf eine um den Faktor 2 erhöhte elektrostatische Kraft. Eine maximale Aktorspannung von $100\ \text{V}$ erscheint in Anbetracht der höheren Kammdichte umsetzbar und wird bei der Dimensionierung eingesetzt. Die Auslegung der Elektroden und Federgeometrien erfolgt analog zum einachsigen Mikroschrittaktor. Im ersten Schritt wird abgeschätzt, welche maximale Elektrodenfläche bei annehmbarem Platzbedarf integriert werden kann. Als Ergebnis werden insgesamt 42 Elektrodenfinger je Antriebsrichtung symmetrisch angeordnet. Die Geometrie der Kammelektroden ist in Abb. 3.3 aufgezeichnet. Die 42 Fingerpaare besitzen im unausgelenkten Zustand eine Kapazität von $1,9\ \text{pF}$. Die Kapazität der vertikalen Rahmen- und Blenden-Array-Elektrode beträgt ca. $6,5\ \text{pF}$. Die Geometrie der vertikalen Elektroden ist in Abb. 3.4 skizziert.

Die Federführungen werden anhand der erreichbaren, elektrostatischen Kräfte sowie des notwendigen Positionierbereichs ausgelegt. Dabei werden hohe Federraten angestrebt, um ein hochfrequentes und mechanisch stabiles Systemverhalten zu erhalten. Zusätzlich trägt eine hohe Federsteifigkeit zu einer sicheren Initialposition der Aktorraahmen in beliebiger Chiplage in Bezug auf die Richtung der Schwerkraft bei. Zu weiche Federn würden die Positionierung empfindlicher gegenüber der Chiplage machen und das System verlangsamen. Auf dieser Basis werden die Optimierungsziele für die Federsteifigkeiten gesetzt. Tabelle 3.1 listet die angestrebten Steifigkeitswerte und die mit der Optimierung erreichten Federkonstanten für vier, parallel geschaltete Rahmenfedern mit einem DRIE-Flankenwinkel von -2° auf. Bei der Dimensionierung der Strukturbreiten wird zusätzlich - aus der Erfahrung bei der Fertigung des einachsigen Mikroschrittaktors - eine Unterätzung der Lackmaske beim DRIE-Prozess (STS DRIE) von ca. $1\ \mu\text{m}$ einberechnet.

Das 3D-Modell für die FEM-Berechnung stellt Abb. 3.5 dar. Das Gewicht des Blenden-Arrays beträgt $19,7\ \text{mg}$ und das des Aktorrahmens $7,5\ \text{mg}$. Die resultierende vertikale Traglast beträgt $267\ \mu\text{N}$ in z -Richtung. Bei einer c_z von $300\ \frac{\text{N}}{\text{m}}$ besitzt der Aktorraahmen somit eine Durchhängung von $0,89\ \mu\text{m}$. Die translatorische Bewegung des Aktorrahmens bleibt demzufolge auch mit der

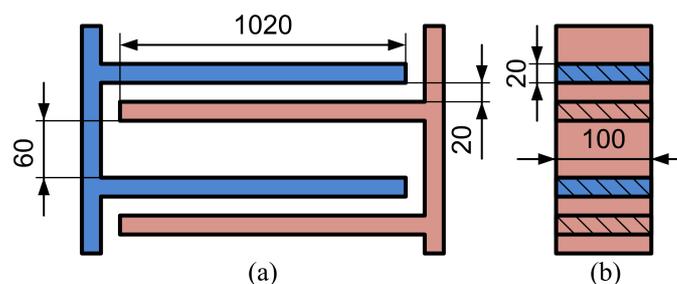


Abbildung 3.3: Dimensionen der Kammelektroden des zweiachsigen Mikroschrittaktors. In (a) die Draufsicht und in (b) ist der Querschnitt der Kammgeometrie abgebildet. (Maße in μm)

Tabelle 3.1: FEM berechnete Federraten der Mäanderfeder des zweiachsigen Mikroschrittaktors. Die Werte gelten für vier gleiche, parallel geschaltete Federn.

Richtung i	Zielwert	$c_i (-2^\circ)$	max. Auslenkung	Federkraft bei max. Auslenkung
x	$70 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$67,41 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	0,67 mN
y	$70 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$68,29 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	0,68 mN
z	$300 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$293,6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	max. $10 \mu\text{m}$	2,94 mN

Tabelle 3.2: Berechnete Resonanzfrequenzen des zweiachsigen Mikroschrittaktors (BA: Blenden-Array)

	Resonanzfall	$f_0 (-2^\circ)$
	Aktorrahmen in x -Richtung	476,7 Hz
	Aktorrahmen in y -Richtung	479,9 Hz
	Aktorrahmen in z -Richtung	944,9 Hz
	Aktorrahmen mit BA in z -Richtung	523,2 Hz

Belastung durch das Blenden-Array hysteresefrei. Für den Entwurf der Ansteuersignale ist es hilfreich die ungedämpften Resonanzfrequenzen mithilfe der Gl. 2.7 zu kalkulieren. Die Werte sind für Schwingungen entlang der drei orthogonalen Achsen berechnet und in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die folgenden Systemparameter sind funktional kritisch und werden daher im Maskenentwurf variiert, um fertigungsbedingte Abweichungen kompensieren zu können:

- Schrittgröße (Initialabstand zwischen Aktorrahmen und Anschlag): $8 \mu\text{m}$; $10 \mu\text{m}$; $12 \mu\text{m}$.
- Die Strukturbreite der Mäanderfedern: $20 \mu\text{m}$; $21 \mu\text{m}$; $22 \mu\text{m}$.

3.1.2 Finaler Entwurf des zweiachsigen Mikroschrittaktors

In Abb. 3.6 sind 3D-CAD Bilder des finalen Entwurfs des zweiachsigen Mikroschrittaktors dargestellt. Die zentralen Entwurfsgrößen des zweiachsigen Mikroschrittaktors sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Für die Präzisionsmontage der Chips sind jeweils Justagemarken vorgesehen. Die elektrischen Kontaktflächen sind für das manuelle Drahtbonds ausgelegt.

Tabelle 3.3: Eigenschaften des entworfenen zweiachsigen Mikroschrittaktors

Eigenschaft	Wert
Positionierbereich	$200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$
Schrittgröße	$\pm 10 \mu\text{m}$
Antriebsspannung	$< 100 \text{ V}$
Traglast	BA: $193 \mu\text{N}$, Aktorrahmen: $74 \mu\text{N}$
Größe des Positioniersystems	$14 \times 10,7 \times 1 \text{ mm}^3$
Gewicht des Positioniersystems	143 mg
Größe des Filters	$6 \times 7,5 \text{ mm}^2$
rechteckige Apertur	$5 \times 6,5 \text{ mm}^2$

Die Klebestellen sind strukturiert oder besitzen eine Vertiefung, um die Dosierung mit der Dosierkanüle zu vereinfachen und die Benetzung der Fläche zu unterstützen.

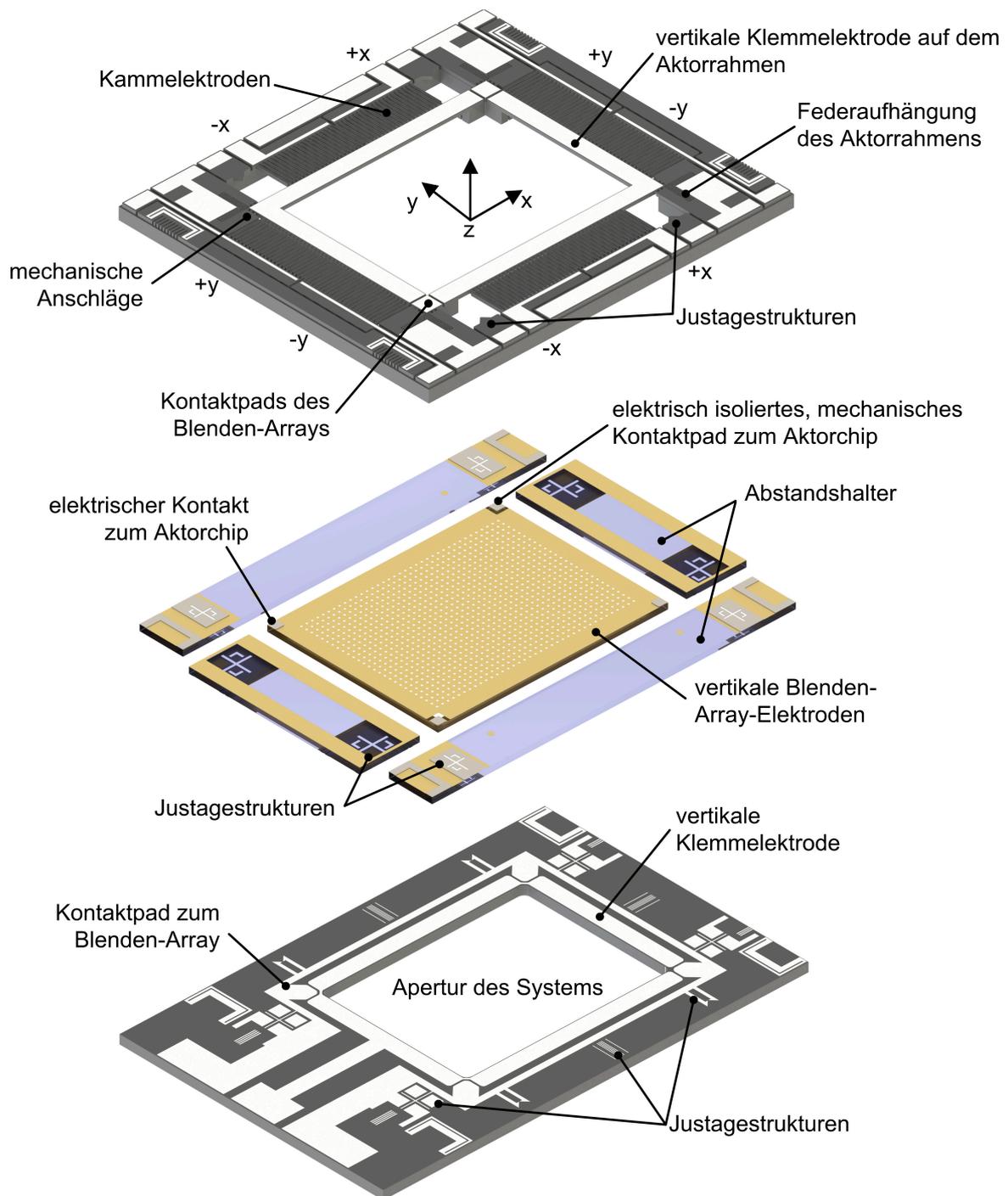


Abbildung 3.6: 3D-CAD-Modell des zweiachsigen Mikroschrittaktors

3.2 Herstellung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

In diesem Abschnitt werden die Fertigungstechnologien der einzelnen Systemebenen vorgestellt. Der Fertigungsablauf mit den wichtigsten Prozessen ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die Fertigung des zweiachsigen Mikroschrittaktors wird in vier wesentliche Schritte unterteilt:

- Fertigungsablauf des Aktorchips,
- Fertigungsablauf des Blenden-Arrays bzw. der Abstandshalter,
- Fertigungsablauf des Klemmchips,
- AVT und Präzisionsmontage.

Der Fertigungsablauf des Aktorchips unterscheidet sich, abgesehen von der verwendeten Lithographiemaske, nicht von dem des einachsigen Mikroaktors. Aus diesem Grund wird hier auf Unterabschnitt 2.3.1 verwiesen. Ein gefertigter Aktorchip ist in Abb. 3.8 dargestellt.

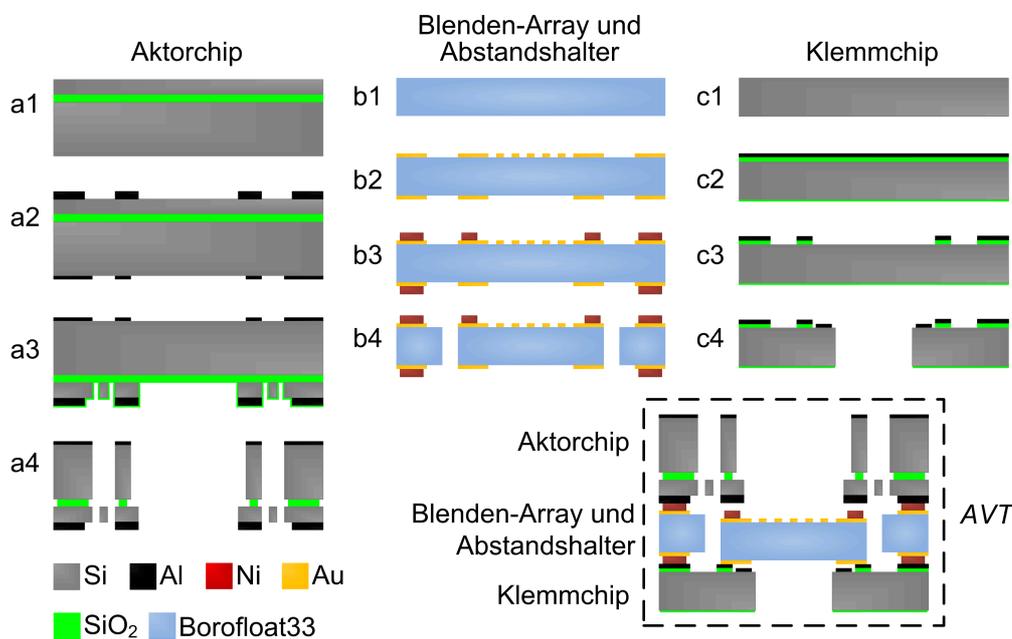


Abbildung 3.7: Vereinfachter Prozessablauf der Herstellung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

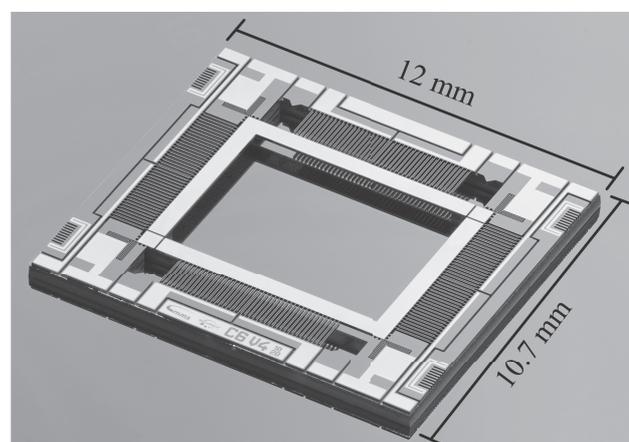


Abbildung 3.8: Aktorchip des zweiachsigen Mikroschrittaktors (Fokus-Stapelung-Foto)

3.2.1 Herstellung des Blenden-Arrays und der Abstandshalter

Die Qualität des verwendeten Glassubstrats spielt für den Aktor eine entscheidende Rolle. Um die vertikale Klemmung und horizontale Bewegung – wie konzipiert und berechnet – realisieren zu können, müssen Form- und Lagetoleranzen des Systementwurfs auch beim realen System umgesetzt werden. Wenn bspw. die Abstandshalter auf einer Seite einen Freiraum von $10\ \mu\text{m}$ in z-Richtung einstellen, darf auf der anderen Seite der Abstand durch eine geringere Dicke des Abstandshalters nicht auf $0\ \mu\text{m}$ abfallen. Ansonsten verklemmt sich das Blenden-Array bei der horizontalen Bewegung. Folglich soll die Dickenschwankung des Wafers möglichst gering sein und max. $10\ \mu\text{m}$ betragen. Es werden daher Substrate mit einem TTV² von unter $10\ \mu\text{m}$ verwendet. Beide Seiten des Borofloat33 Glassubstrats (b1) werden mit $40\ \text{nm}$ Cr und $200\ \text{nm}$ Au beschichtet und nasschemisch mit einer Lackmaske beidseitig nacheinander strukturiert (b2). In diesem Ätzprozess werden der Blendendurchmesser und Rasterabstand definiert. Die absorbierende Schicht des Blenden-Arrays vom einachsigen Mikroschrittaktor kann hier aus technologischen Gründen³ nicht eingesetzt werden: Mit rückseitiger Schutzbelackung und Au als Startschicht wird danach auf der Vorderseite eine ca. $10\ \mu\text{m}$ dicke Ni-Schicht galvanisch aufgetragen. Die Strukturen werden mit dem Negativlack AZ15nXT (entwickelt für galvanische Prozesse) definiert. Die Nickelpads dienen als elektrische und mechanische Kontaktfläche zur Aktorchipseite. Eine zweite galvanische Nickelschicht wird auch auf der Rückseite abgeschieden (b3). Die hier aufgetragene Strukturdicke (nur auf den Abstandshaltern) definiert den zusätzlichen Freiraum für die reibungsfreie Bewegung des Blenden-Arrays in den horizontalen Richtungen. Zum Schluss werden die Chips durch einen Standard-Sägeprozess vereinzelt (b4). Die Blenden-Arrays werden in einem 3D-gedruckten Halter an einer Ecke, auf dem das Ni-Pad elektrischen Kontakt zur Metallschicht hat, mit Au-Pd besputtert. Somit werden die vertikalen Blenden-Array-Elektroden an der Ober- und Unterseite miteinander elektrisch verbunden.

Die Au-Cr-Schichtabscheidung, die nasschemische Strukturierung sowie die Nickelgalvanik mit Au-Startschicht sind etablierte mikrotechnische Prozesse. Obwohl das Blenden-Array die Aufgabe der Maskierung im HAS erfüllt, ist die hohe Reflektivität des Cr-Au-Schichtaufbaus für die räumliche Maskierung nicht vorteilhaft. Die störenden Reflexionen können aber mit innovativen Lösungen im optischen System herausgefiltert werden, [Hil+15].

3.2.2 Herstellung des Klemmchips

Der Technologieablauf des Klemmchips beginnt mit der thermischen Oxidation, um eine elektrische Isolationsschicht hoher Güte für die Trennung der zweiten Elektroden Ebene zu erzeugen. Danach wird die $1,5\ \mu\text{m}$ dicke, thermische Oxidschicht auf der Vorderseite mit $5\ \mu\text{m}$ ICPCVD-Oxid verstärkt. Damit ist die Auflagefläche für das Blenden-Array im Initialzustand isoliert und in die gewünschte Höhe gebracht. Für den elektrischen Kontakt sorgt eine gesputterte Aluminiumschicht, s. Abb. 3.7(c2). Die Strukturierung der Metallschicht erfolgt nasschemisch. Die SiO_2 -Schicht wird mit der gleichen Maske mittels RIE⁴ bis zum Silicium abgetragen (c3). Die nasschemisch geätzte, zweite Al-Schicht bildet die Klemmelektrode für das Blenden-Array.

²TTV: engl. total thickness variation, gesamte Dickenschwankung

³Der geplante Galvanikprozess erfordert eine Goldschicht mit hoher elektrischer Leitfähigkeit und Schichtqualität als Startschicht zum Nickelwachstum.

⁴RIE: engl. reactive ion etch, reaktives Ionenätzen

Anschließend wird die optische Apertur von der Rückseite mit Fotolackmaskierung mittels DRIE freigeätzt und dabei die Klemmchips im gleichen Prozess vereinzelt (c4).

3.2.3 Aufbau- und Verbindungstechnik, Präzisionsmontage

Der zweiachsige Mikroaktor wird aus sieben einzelnen Chips zusammen montiert. Der Ablauf der Montage ist in Abb. 3.9 veranschaulicht.

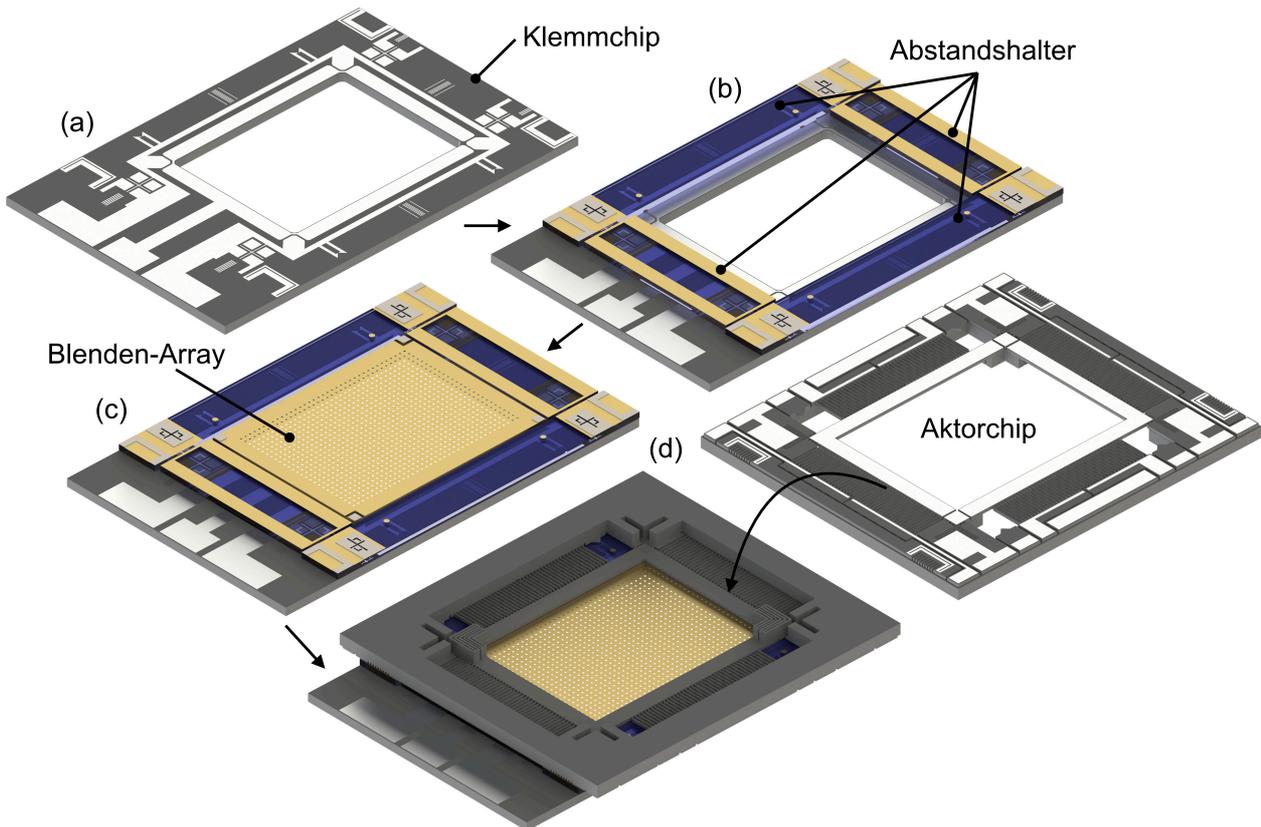


Abbildung 3.9: Die Montageschritte des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Die Montage ist der kritischste Punkt des Fertigungsprozesses. Die hier erreichten Genauigkeiten legen die finalen Eigenschaften des Positioniersystems fest. Eine ungenaue Justierung führt zu einem unzuverlässigen Betrieb oder totalen Ausfall. Der Entwurf lässt Positionsabweichungen vom Idealwert bis $25\ \mu\text{m}$ zu. Innerhalb dieses Bereichs ist die Funktionsfähigkeit des Mikroaktors gewährleistet. Die Initialposition des Blenden-Arrays wird durch die begrenzenden Abstandshalter eingestellt (s. auch Abschnitt 3.3). Deswegen ist die präzise Positionierung mit dem geringst möglichen Winkelfehler der Abstandshalter wichtig.

REM-Analysen, Weißlichtinterferenz- und Lichtmikroskopieuntersuchungen werden verwendet, um zueinander passende Chipsets zusammenzustellen. Dabei werden die Chips auf Fertigungsfehler, Verunreinigungen, Höhenprofile und Abstand der mechanischen Anschläge (Abb. 2.18) geprüft. Nach der Zusammenstellung von Chipsets wird die AVT mit einem ARTEOS TOMM 1 Mikromontagegerät (MMG) (Abb. 3.10) mit zusätzlichen manuellen Linear- und Drehachsen durchgeführt. Mit der vorhandenen Dosierkanüle können kleinste Mengen an Kleber genau

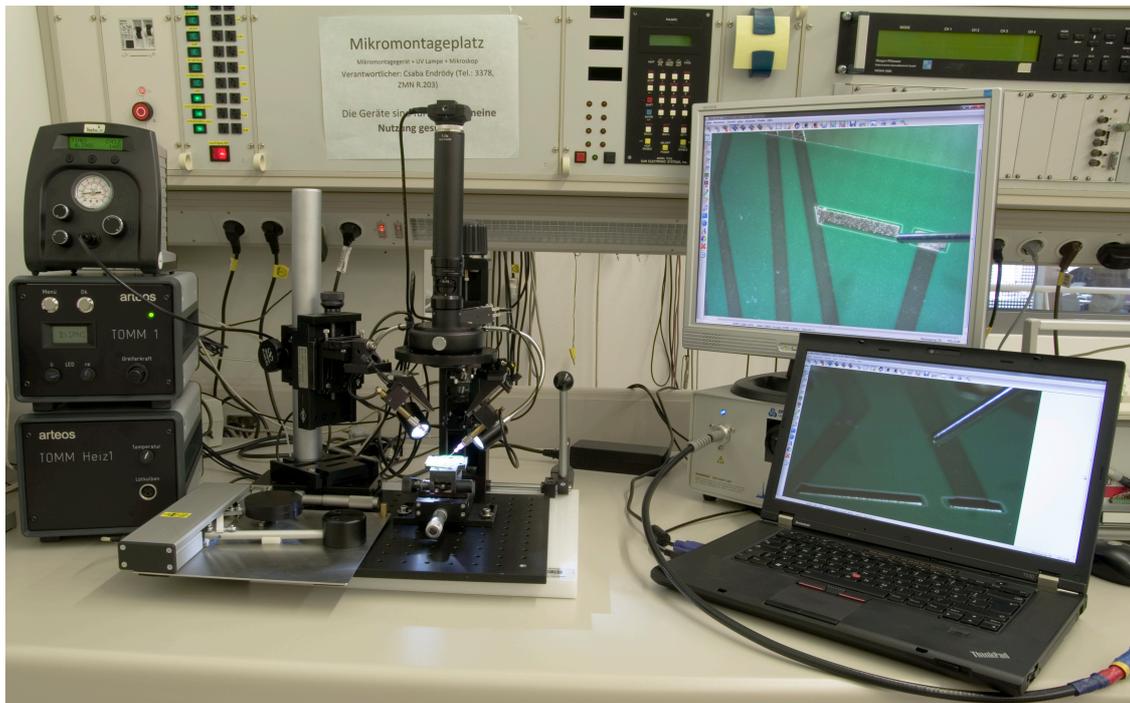


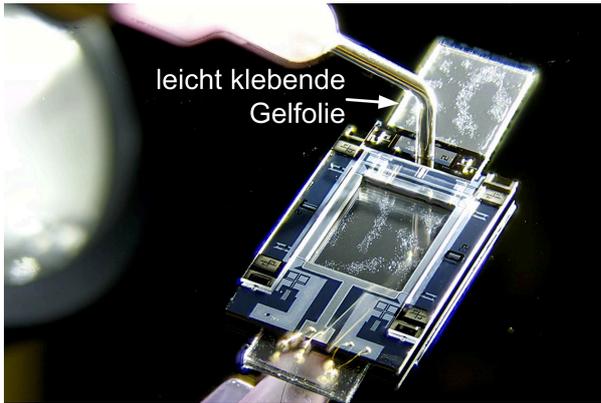
Abbildung 3.10: Mikromontagegerät mit zusätzlichen Präzisionsachsen für die Präzisionsmontage des zweiachsigen Mikroschrittaktors

positioniert aufgebracht werden. Ein Vakuumgreifer lässt das Aufnehmen und Platzieren von Chips präzise zu.

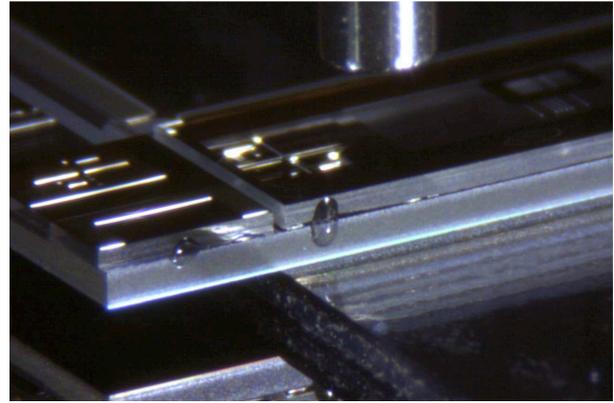
Die Präzisionsmontage des zweiachsigen Mikroschrittaktors besteht aus den folgenden Schritten:

1. Mittels Drahtbonden werden Golddrähte auf dem Klemmchip platziert, die die spätere elektrische Verbindung zur Leiterplatte ermöglichen.
2. Die Abstandshalter werden zum Klemmchip ausgerichtet und mit UV-Kleber (Dymax 429, Gel) fixiert, s. Abb. 3.11(a) und 3.11(b).
3. Das Blenden-Array wird mit den galvanischen Kontaktpads nach oben auf dem Klemmchip zwischen den Abstandshaltern eingesetzt.
4. Der Positionierbereich wird mit einem Mikroskop kontrolliert (Abb. 3.12(a)). Das Höhenprofil wird mit einem optischen Oberflächenprofilometer erfasst und damit der Freiraum des Blenden-Arrays überprüft (Abb. 3.12(b)).
5. Der Aktorchip wird mit der Handle-Seite nach oben mit dem Vakuumgreifer auf den Abstandshaltern nach der Ausrichtung abgelegt (Abb. 3.11(c)) und mit UV-Kleber befestigt (Abb. 3.11(d)).
6. Auf der Leiterplatte wird ein Klebepunkt an einer Ecke mit leitfähigem, thermisch härtendem Kleber (Loctite 3880) zur Kontaktierung des Handlelayers gesetzt.
7. Das montierte System wird mit dem Aktorchip nach unten auf die Leiterplatte gesetzt. Die bereits angebrachten Golddrähte am Klemmchip werden über die Leiterplatte geführt.
8. Der leitfähige Kleber wird bei 110 °C für 20 min ausgehärtet. Der Aktorchip wird danach entlang der Seitenfläche des Handlelayers zur Leiterplatte zusätzlich mit UV-Kleber fixiert.
9. Die Elektroden werden mit Au-Drähten an der jeweiligen Leiterbahn festgebondet (Abb. 3.13).

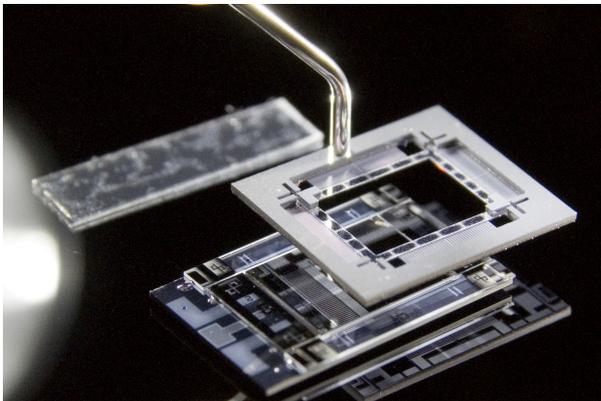
In Abb. 3.13 ist ein zweiachsiger Mikroschrittaktor nach der AVT auf der Leiterplatte abgebildet. Im Abschnitt 3.4 wird die Charakterisierung hergestellter Demonstratoren vorgestellt.



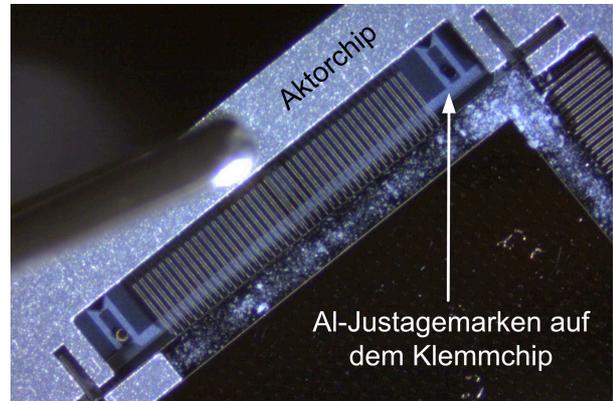
(a) Positionierung eines Abstandshalters über dem Klemmchip



(b) Seitlich gesetzte Klebepunkte am Abstandshalter



(c) Der Aktorchip wird mit Devicelayer nach unten auf die Abstandshalter gesetzt



(d) Ausrichtung des Aktorchips zum Klemmchip

Abbildung 3.11: Mikromontage der Abstandshalter und des Aktorchips

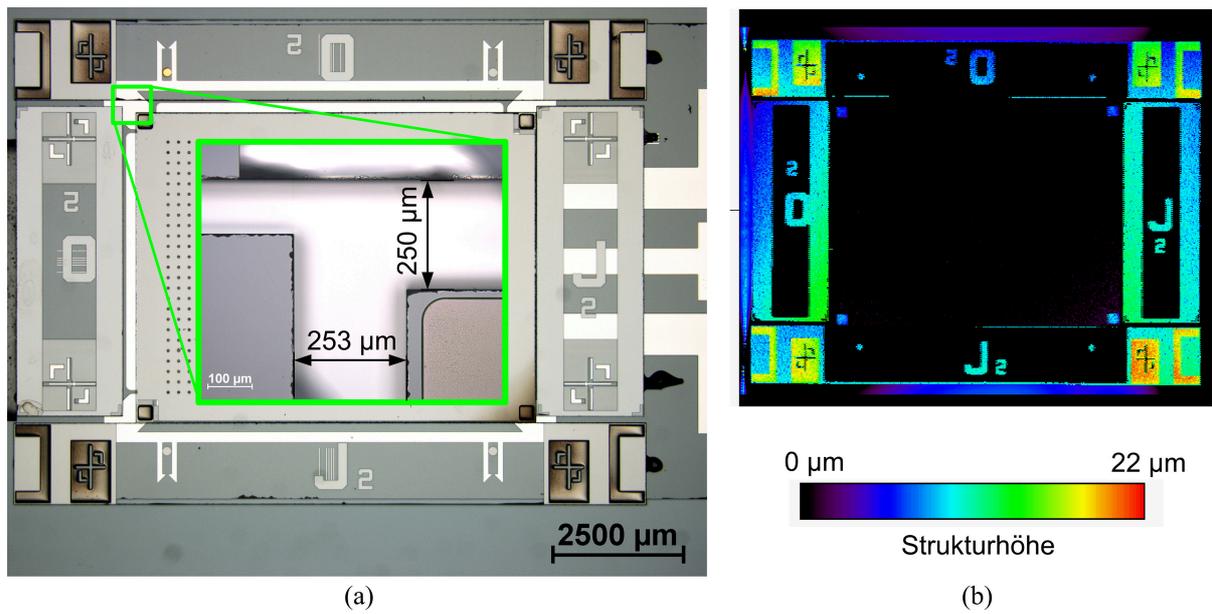


Abbildung 3.12: Nach der Montage der Abstandshalter und des Blenden-Arrays: (a) Kontrolle des Positionierbereichs bzw. Parallelität und (b) Vermessung des Höhenprofils

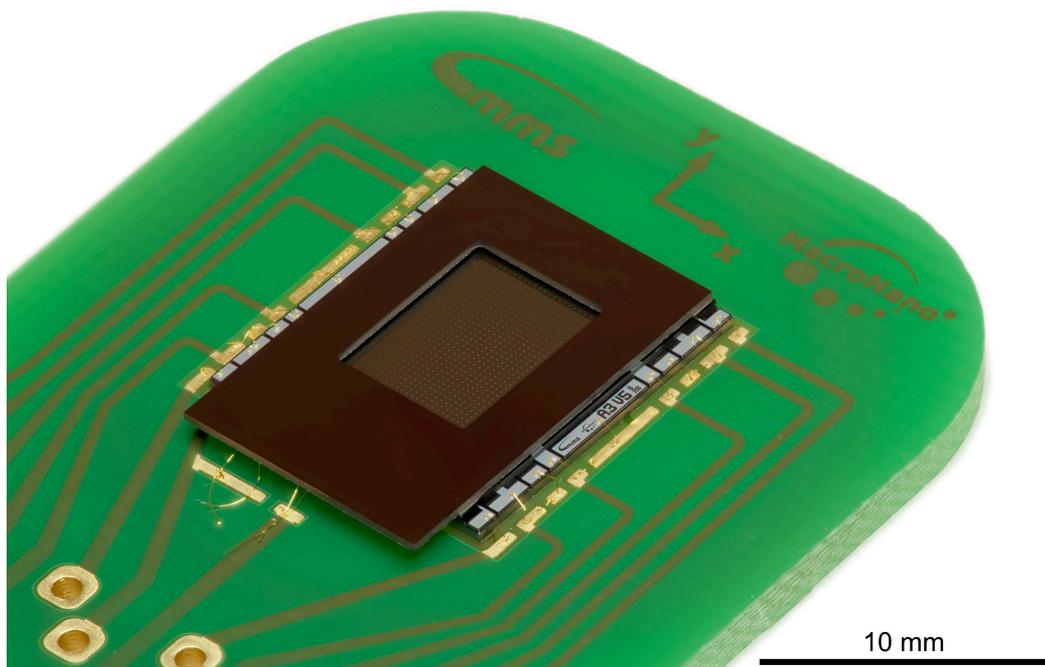


Abbildung 3.13: Der zweiachsige Mikroschrittaktor auf der Leiterplatte montiert (Fokus-Stapelung-Foto)

3.3 Entwurf der Steuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Das Steuerkonzept ist mit dem in Abschnitt 2.4 vorgestellten Konzept für den einachsigen Aktor vergleichbar. Unterschiede gibt es nur im LabViewTM Steuerprogramm:

1. Es gibt aufgrund der zwei Antriebsachsen 7 aktive Kanäle, die getrennt angesteuert werden.
2. Für einen automatischen Ablauf eines Scanvorgangs wird eine Befehlsreihe zusammengesetzt, die sich aus den 4 Antriebsrichtungen zusammensetzt.

Der genaue Verlauf der Steuersignale wird basierend auf dem Bewegungskonzept entworfen und experimentell mit anschließender Bewegungsanalyse weiter optimiert. Im Folgenden werden diese angepassten Steuersignale in zwei Unterabschnitten erklärt. Im Unterabschnitt 3.4.1 wird ähnlich zum einachsigen System eine *dynamische*⁵ Steuerung vorgestellt, wobei die Ansteuerfrequenzen unterhalb der Resonanzfrequenzen des Systems liegen. Im Unterabschnitt 3.4.2 wird die Ansteuerung auf die resonanten Eigenschaften des Aktors zurückgreifen, um damit bei höheren Federsteifigkeiten eine schnelle Schrittbewegung anzuregen. Dies ist notwendig, da mit dem optimierten Ätzprozess an der OXFORD DRIE die Federsteifigkeiten höher ausfallen als die berechneten Werte bei der Dimensionierung mit dem Flankenwinkel der STS DRIE (s. Unterabschnitt 2.3.3).

3.3.1 Dynamische Ansteuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Die Spannungsverläufe für einen Schritt sind in Abb. 3.14 aufgezeichnet. Das Potential des Blenden-Arrays (grün) bleibt über den gesamten Schrittverlauf konstant und hat bezogen auf die Gerätemasse der Steuerung eine Spannung von 60 V. Alle weiteren hier genannten Spannungswerte beziehen sich auf das Potential des Blenden-Arrays. Im Ausgangszustand (a) fixiert die Klemmelektrode das Blenden-Array mit einer Spannung von -60 V auf dem Klemmchip. Durch die erhobenen Kontaktpads auf dem Klemmchip bekommt die Fläche des Blenden-Arrays das Referenzpotential. Im Teilschritt (b) wird die Spannung der vertikalen Rahmenelektrode auf 60 V erhöht. Dadurch zieht sich der Aktorraahmen aus seiner zentralen Position an das Blenden-Array heran. Die Spannung der Klemmelektrode (Klemmchip) wird im nächsten Schritt auf 0 V reduziert. Das Blenden-Array wird dadurch vom Klemmchip gelöst und mit der Rahmenelektrode hochgehoben. Das Blenden-Array wird durch die elektrisch getrennten Kontaktpads am Aktorraahmen mit dem Referenzpotential gehalten. Im Teilschritt (d) wird der eigentliche Schritt zur Positionierung des Blenden-Arrays in x - oder y -Richtung ausgeführt. Dazu wird die Spannung der entsprechenden Kammelektroden auf -60 V gesenkt. Der zentrale Rahmen mit dem Blenden-Array bewegt sich bis zum mechanischen Anschlag im Devicelayer des Aktorchips. Im Teilschritt (e) wird das Blenden-Array noch am Rahmen hängend zur Klemmelektrode (Klemmchip) gezogen und dort mit -60 V festgehalten. Danach wird die Spannung der Rahmenelektrode gesenkt, der Aktorraahmen löst sich vom Blenden-Array und kehrt in seine Initialposition zurück. Die Spannungen der Kammelektroden werden ebenfalls auf 0 V gesetzt.

Auf diese Weise wird der Schritt unabhängig von den resonanten Eigenschaften des Aktors ausgeführt und eine robuste, einfache Anregung geschaffen. Nachteilig sind die notwendig hohen

⁵Die Bezeichnung *dynamisch* wird hier verwendet, um die Ansteuerungsmethode von der resonanten Ansteuerung eindeutig zu unterscheiden. In beiden Fällen handelt es sich aber aus mechanischer Sicht um einen dynamischen Vorgang.

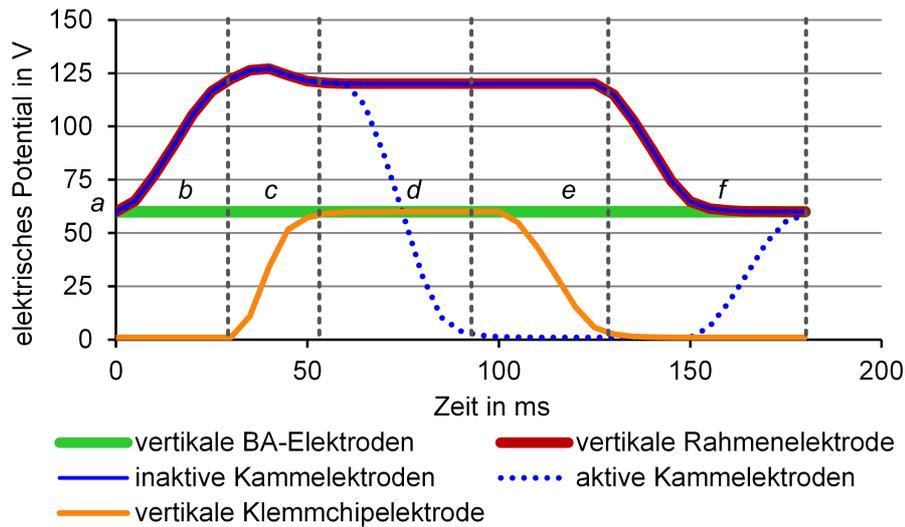


Abbildung 3.14: Spannungsverlauf der Elektroden für einen Schritt mit einer Länge von 180 ms

Betriebsspannungen, wenn das System hohe Federsteifigkeiten ausweist. Ein Schritt dauert 180 ms (Schrittfrequenz 5,56 Hz). Damit ist der Aktor relativ langsam, über 90 % des Zeitintervalls stehen aber für die Bilderfassung zur Verfügung. Um eine Ansteuerungsalternative für steifere Federn und evtl. höhere Elektrodenabstände zu schaffen, wird im nächsten Unterabschnitt eine resonante Ansteuerung entworfen.

3.3.2 Resonante Ansteuerung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Der zentrale Rahmen ist an vier Mäanderfedern aufgehängt und bildet in sich bzw. mit dem Blenden-Array ein einfaches Feder-Masse-System, wobei die umgebende Luft als Dämpfer agiert. Die Dämpfung wird bei den nachfolgenden Berechnungen vernachlässigt, ähnlich zum einachsigen Mikroaktor, s. Unterabschnitt 2.2.2). Das System weist Resonanzfrequenzen auf, die abhängig von der Anregungsrichtung sind. Bei diesen Frequenzen lassen sich relativ große Auslenkungen der Aktorraahmen bei niedrigen Elektrodenspannungen realisieren.

Die resonante Ansteuerung wird für den Chip optimiert, der mit dem weiterentwickelten DRIE-Prozess an der OXFORD DRIE hergestellt wurde (s. Unterabschnitt 2.3.3). Hier sind die Aufhängungsfedern mit senkrechten Seitenwänden und ohne Notching bzw. Maskenunterschnitt deutlich steifer als die vom ursprünglichen DRIE-Prozess mit -2° Seitenwandwinkel und ca. $1\ \mu\text{m}$ Maskenunterschnitt. Die Federn wurden bei der Dimensionierung mit Rücksicht auf die Eigenschaften des STS DRIE-Prozesses ausgelegt. Folglich konnte der Chip mit den *dynamischen* Ansteuersignalen nicht betrieben werden.

Die Resonanzfrequenzen werden experimentell bestimmt. Mit einem kurzen, elektrostatischen Impuls wird der Aktorraahmen in die jeweilige Richtung zur Schwingung angeregt, die Bewegung mit der HGK erfasst und ausgewertet. In Tabelle 3.4 sind die theoretisch kalkulierten Werte neben den gemessenen Resonanzfrequenzen aufgelistet. Die Werte für einen rechteckigen und $20\ \mu\text{m}$ breiten Querschnitt nähern sich erwartungsgemäß besser den gemessenen Resonanzfrequenzen. Der Teilschritt (d) – der eigentliche Schritt für das Blenden-Array – kann und wird immer noch ohne eine resonante Anregung ausgeführt, um Schäden an den mechanischen Anschlägen zu vermeiden. Die Signale für die Auslenkungen in z-Richtung beim Teilschritt (b) und (e) werden

Tabelle 3.4: Gemessene (Oxford DRIE) und theoretische Resonanzfrequenzen des zweiachsigen Mikroschrittaktors. Der angegebene Winkel ist für die Federmodellierung verwendeter DRIE-Flankenwinkel.

Schwingungsrichtung und -bedingung	f_0 , gemessen	f_0 (0°), berechnet	f_0 (-2°), berechnet
Aktorrahmen in x -Richtung	798 Hz	654,5 Hz	476,7 Hz
Aktorrahmen in y -Richtung	-	674,9 Hz	479,9 Hz
Aktorrahmen in z -Richtung	1334 Hz	1283,2 Hz	994,9 Hz
Aktorrahmen mit BA in z -Richtung	694 Hz	674,8 Hz	523,2 Hz

mithilfe von sinusförmigen Signalabschnitten um die jeweiligen Resonanzfrequenzen⁶ unterstützt. Die Signale werden später parallel zur Bewegungsanalyse im Unterabschnitt 3.4.1 detailliert vorgestellt. Die resonante Anregung wird als Dreiecksfunktion definiert, wobei der Tiefpassfilter⁷ bei 2500 Hz den Spannungsverlauf leicht abrundet. Die resonante Anregung ermöglicht im Gegensatz zur dynamischen Anregung ($f_a = 5,56$ Hz) eine deutlich höhere, maximale Schrittfrequenz von 13,5 Hz. Ein Schritt kann innerhalb von 74 ms ausgeführt werden. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass die notwendigen Frequenzen individuell auf den Chip angepasst werden müssen, da bedingt durch die Fertigungstechnologie die Federraten des Aktorchips voneinander abweichen.

3.4 Vermessung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Die aufgebauten, zweiachsigen Mikroschrittaktoren werden im Folgenden charakterisiert und die erreichte Positionierleistung den Anforderungen gegenübergestellt. Die Messvorrichtung gleicht der des einachsigen Mikroschrittaktors, abgesehen vom angepassten Koordinatensystem und davon, dass sich das Positioniersystem unterhalb der Leiterplatte befindet, s. Abb. 3.15. Somit liegt das Blenden-Array beim Abschalten der Steuerung auf dem Klemmchip auf. Die Charakterisierung erfolgt in drei Schritten:

1. Bewegungsanalyse mit der resonanten Ansteuerung (Unterabschnitt 3.4.1)
2. Vermessung des Positionierbereichs (Unterabschnitt 3.4.2)
3. Charakterisierung der Schrittgrößen und Genauigkeiten (Unterabschnitt 3.4.3)

Zwei Demonstratoren werden untersucht:

1. STS 2DA CHIP: Zweiachsiger Mikroschrittaktor mit einem Aktorchip in der STS DRIE geätzt. Die Schrittgröße beträgt 10 μm laut Entwurf.
2. OXFORD 2DA CHIP: Zweiachsiger Mikroschrittaktor mit einem Aktorchip in der OXFORD DRIE geätzt. Die Schrittgröße beträgt 8 μm laut Entwurf.

⁶(b): 1334 Hz, (e): 694 Hz

⁷Digitaler BUTTERWORTH-Filter erster Ordnung

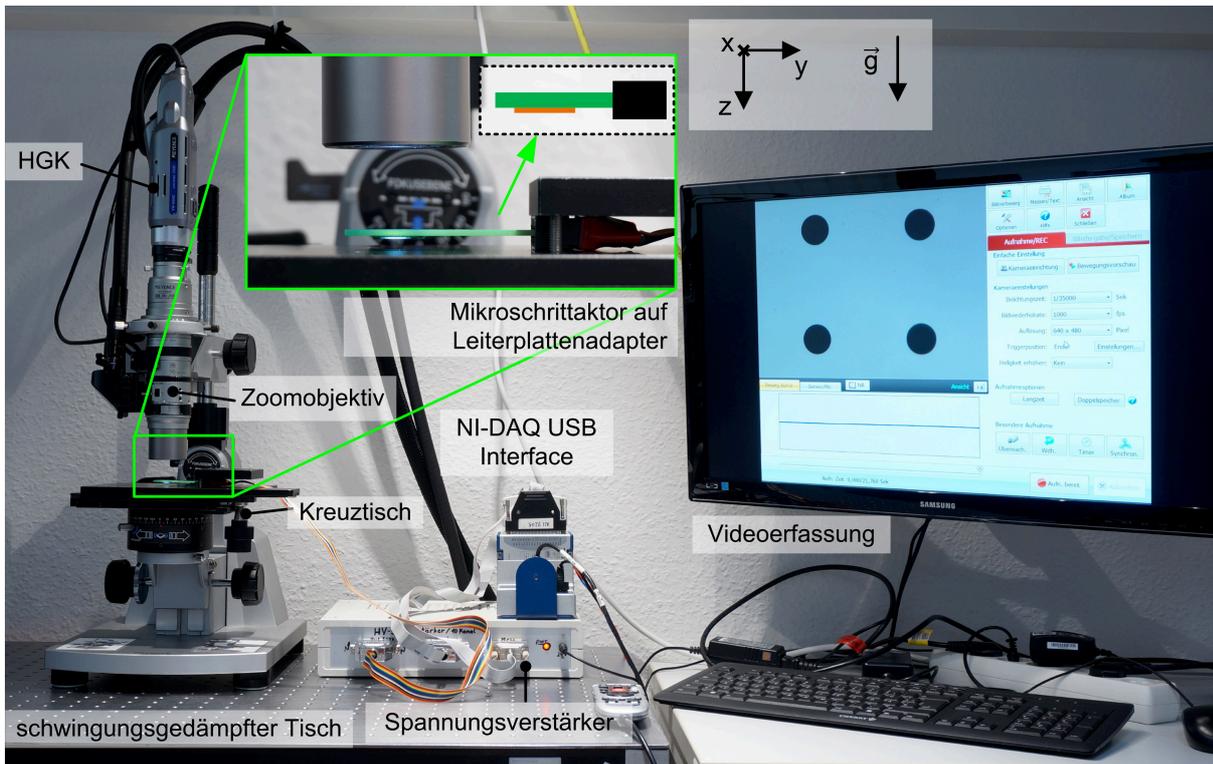


Abbildung 3.15: Messaufbau zur Charakterisierung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

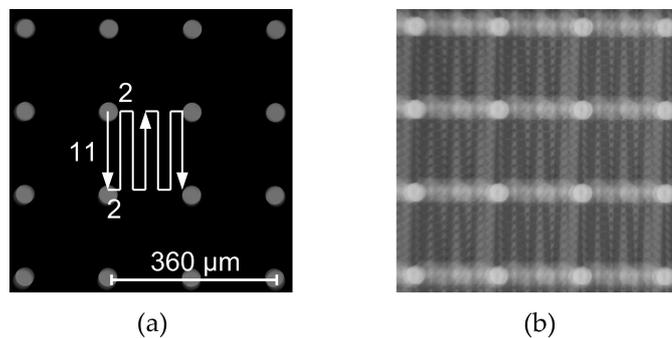


Abbildung 3.16: (a) Statisches Blenden-Array, (b) gescanntes Blenden-Array beleuchtet von der Rückseite, fotografiert mit einer Belichtungszeit von 20 s (STS 2DA CHIP). Das Blenden-Array hat dabei eine Fläche von ca. $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$ in 18 s mit 89 Schritten (11×7 in y -Richtung und 6×2 in $+x$ -Richtung) abgescannt. Die Schrittzahl in die jeweilige Richtung ist in der Abb. eingezeichnet.

Der erreichte Füllfaktor mit dem gescannten Blenden-Array des STS 2DA Chips wird mit einer Langzeitbelichtung visualisiert, s. Abb. 3.16. Dabei wird eine rückseitige Beleuchtung eingesetzt. Die Aufnahme zeigt die vollflächige Ausleuchtung der Sensorfläche, folglich die 100%ige Erfassung der auf dem Blenden-Array projizierten Zwischenbildebene. Der Blendendurchmesser beträgt $40 \mu\text{m}$ und der Rasterabstand $180 \mu\text{m}$. Eine 100%ige Ausleuchtung mit kleinerem Blendendurchmesser ist ebenfalls möglich, solange die maximale Schrittgröße die Hälfte des Durchmessers nicht übersteigt.

3.4.1 Bewegungsanalyse des resonant angesteuerten zweiachsigen Mikroschrittaktors

Es wird eine redundante Messreihe durchgeführt, um alle Bewegungen des Mikroschrittaktors parallel zu den Steuersignalen aufzeichnen zu können. Für die Bewegungsanalyse wird der OXFORD 2DA CHIP eingesetzt. Es wird dreimal dasselbe Steuersignal für einen $-x$ -Schritt vorgegeben und jedes Mal an einer anderen Stelle die Bewegung mit der HGK erfasst⁸:

1. Die Bewegung des Blenden-Arrays entlang der x - und y -Achsen wird mit senkrechter Sicht auf die Bewegungsebene erfasst (Abb. 3.17(a)).
2. Die Handle-Seite des Aktorrahmens wird mit senkrechter Sicht auf die Bewegungsebene erfasst (Abb. 3.17(b)).
3. Die optische Achse der HGK wird um 45° gekippt und auf die Kante zwischen Blenden-Array und Rahmenelektrode gerichtet (Abb. 3.17(d) und 3.17(c)), damit deren Bewegungen in z -Richtung erfasst werden können. Die relative z -Position wird bei der Datenverarbeitung mit dem Faktor $\frac{\sqrt{2}}{2}$ geteilt, um die Verzerrung durch den Kamerawinkel zu kompensieren.

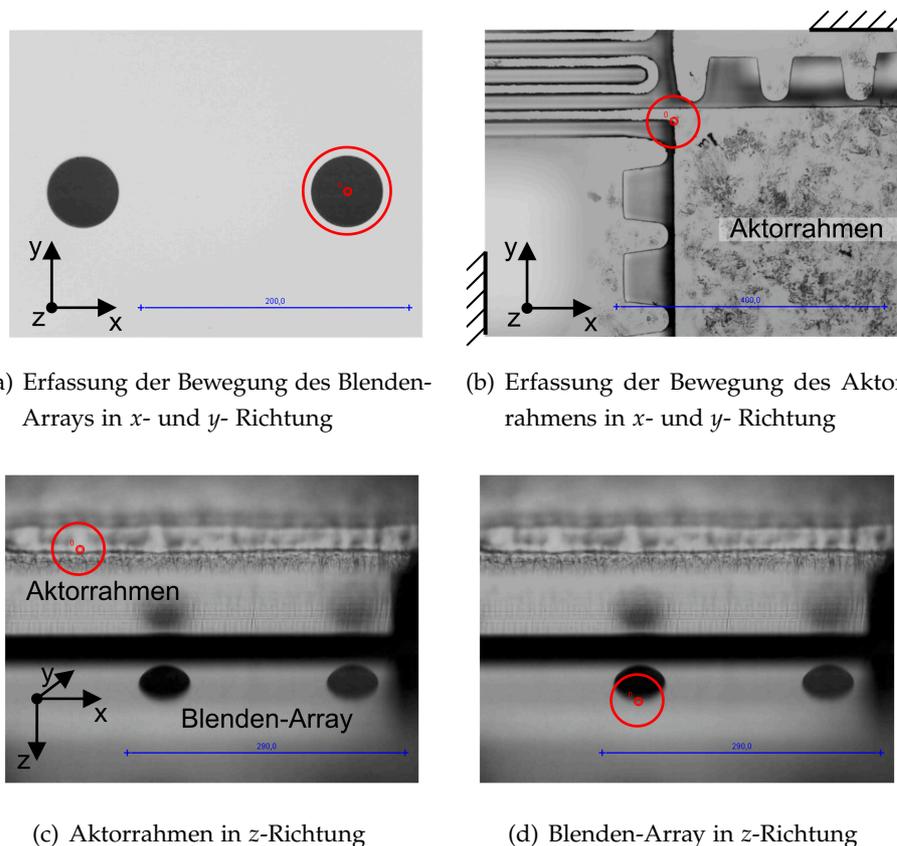


Abbildung 3.17: Kameraansichten zur dreidimensionalen Bewegungsanalyse des Schrittmechanismus des zweiachsigen Mikroschrittaktors

⁸Aufgrund der hohen Vergrößerung und des unterschiedlichen Betrachtungswinkels können nicht alle zu analysierenden Punkte gleichzeitig erfasst werden.

Das Ergebnis der Videoanalyse parallel zu den Ansteuersignalen ist in Abb. 3.18 dargestellt. Die relativen Positionen sind im Koordinatensystem des Chips aufgezeichnet (z-Richtung ist gleichgerichtet mit der Schwerkraft). Die Bewegung und der Signalverlauf werden im Folgenden auf die Teilschritte bezogen erklärt.

- a) In der Ausgangs- und Endposition ist das Blenden-Array zum Klemmchip mit 50 V fixiert.
- b) Die vertikale Klemmelektrode (Aktorrahmen) wird mit einem Dreieckssignal (1350 Hz, 95 V Amplitude und ca. 60 V Offset) in Schwingung gebracht. Dabei überwindet der Aktorraahmen 10 μm Abstand und berührt das Blenden-Array.
- c) In diesem Moment wird die Klemmspannung abgeschaltet und der Aktorraahmen hebt das Blenden-Array vom Klemmchip hoch. Das aufgegriffene Blenden-Array schwingt in z-Richtung mit dem Aktorraahmen mit.
- d) Der Aktorraahmen mit dem Blenden-Array wird in $-x$ -Richtung mit einer Spannung von 105 V versetzt und in dieser Position festgehalten. Das Blenden-Array legt einen Weg in $-x$ -Richtung von ca. 8,2 μm zurück, der Aktorraahmen ca. 400 nm weniger. Der Unterschied kann durch ein Verrutschen des Blenden-Arrays am Aktorraahmen beim Stoß am Anschlag zustande kommen.
- e) Das am Aktorraahmen geklemmte Blenden-Array wird mit der vertikalen Klemmchipelektrode zum Schwingen gebracht (694 Hz, ca. 95 V Amplitude). Es wird von der vertikalen Rahmenelektrode losgelöst und am Klemmchip fixiert. Die Schwingungsamplitude hat in diesem Teilschritt nicht ausgereicht, um das Blenden-Array ohne eine „fliegende“ Phase (kein mechanischer und elektrischer Kontakt zur Umgebung vorhanden) am Klemmchip abzulegen. Dies kann zu Abweichungen in der Schrittgröße führen. Grund für die zu kleine Amplitude kann die nicht genau getroffene Resonanzfrequenz, die Reibung des Aktorraahmens am mechanischen Anschlag bzw. das zu kurze Anregungssignal sein.
- f) Alle elektrischen Potentiale und damit die relativen Positionen werden langsam in ihren ursprünglichen Zustand zurückgeführt, um starke Schwingungen des Aktorraahmens zu vermeiden.

Auf die beschriebene Weise ist es möglich, den Mikroschritttaktor auch mit steiferen Federn anzusteuern als bei der Dimensionierung berechnet wurde. Ein Schritt wird innerhalb von 74 ms ausgeführt, was eine maximale Schrittfrequenz von 13,5 Hz ermöglicht. Die dynamische Ansteuerung (Unterabschnitt 3.3.1) führt grundsätzlich, abgesehen von den erzielten Schwingungen in z-Richtung, dieselbe Schrittbewegung wie die resonante Ansteuerung aus. Eine separate Bewegungsanalyse mit der dynamischen Ansteuerung wird somit nicht durchgeführt.

Auswertung der Bewegungsanalyse

Die angestrebte maximale Schrittfrequenz von 50 Hz wird mit dem zweiachsigen System nicht erreicht. Die Aktorgeschwindigkeit ist aber nur ein Faktor, der zur Verbesserung der Aufnahme-frequenz beiträgt. Neben der Schrittfrequenz beeinflussen auch weitere Faktoren die Aufnahme-geschwindigkeit des HASs, wie in Tabelle 1.1 in Abschnitt 1.2 dargestellt wurde.

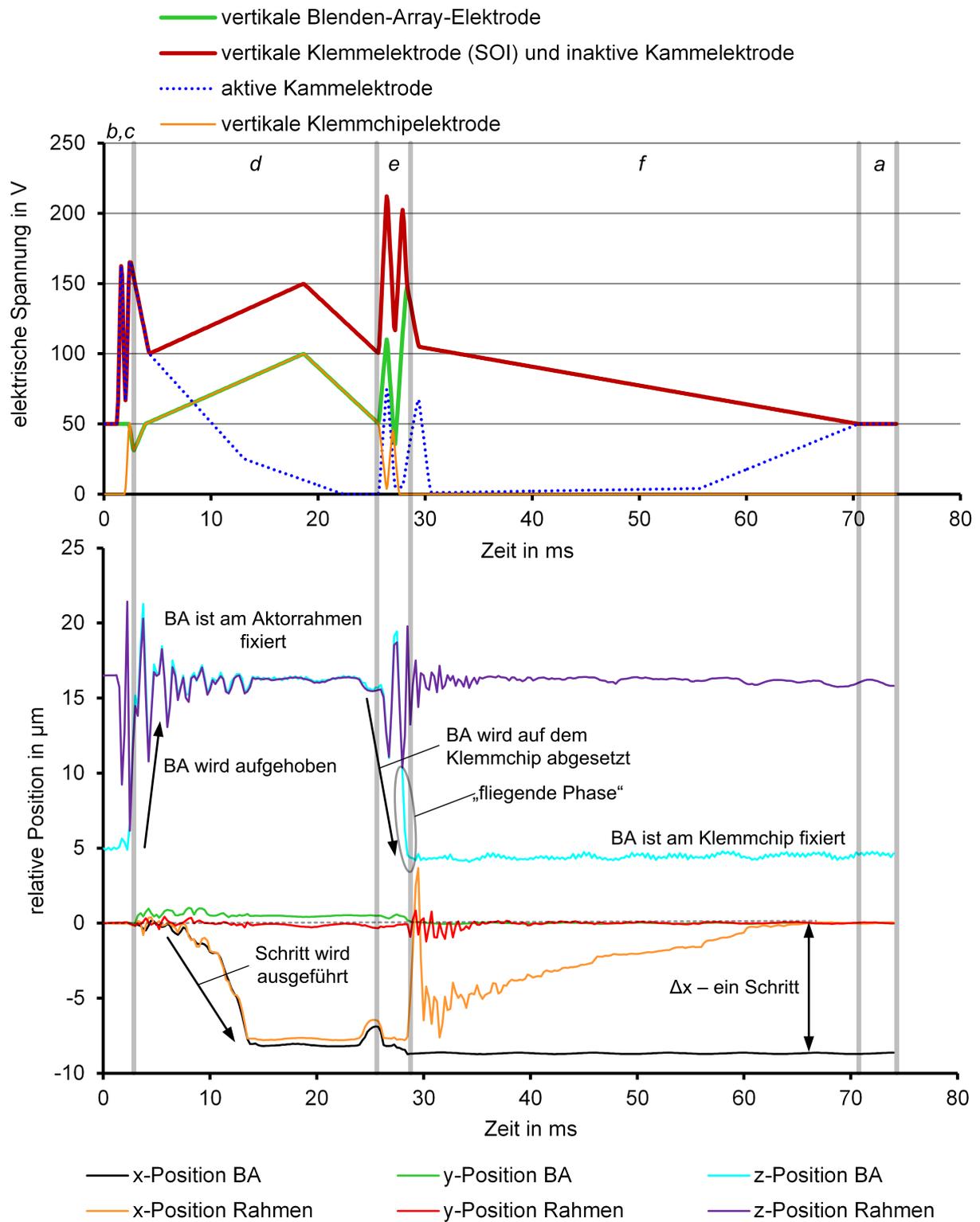


Abbildung 3.18: Dreidimensionale Bewegungsanalyse des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Bezüglich der Dynamik des HASs müssen auch die Aspekte der Bilderfassung berücksichtigt werden. Der eingesetzte Sensor kann zwar maximal mit 50 Hz Bildrate arbeiten, die beleuchtungs-technischen Randbedingungen für eine schnelle Bildaufnahme Frequenz sind aber meistens nicht gegeben. Durch die spektrale Filterung kommt auf dem Bildsensor eine geringe Lichtintensität⁹ an. Damit steigt die notwendige Belichtungszeit für eine rauscharme Bilderfassung und die Schrittfrequenz ist nicht mehr der geschwindigkeitsbegrenzende Faktor.

Als Beispiel besteht die mit Langzeitbelichtung erfasste Schrittsequenz in Abb. 3.16 (b) aus 89 Schritten und dauerte 19,135 s. Wenn man den Vorgang für 16 spektrale Kanäle durchführt, ergibt sich eine Gesamtaufnahmezeit von ca. 306 s. Mit der resonanten Steuerung (74 ms Schrittzeit) würde die Aufnahme 105 s dauern. Eine weitere, deutliche Verbesserung der Dynamik des Aktors kann nur mit einer Gewichtsreduzierung des Blenden-Arrays erreicht werden.

3.4.2 Charakterisierung des Positionierbereichs des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Die Abstandshalter liegen wegen des manuellen Montageprozesses nicht an ihrer ideal vorgesehenen Stelle. Somit kann der Positionierbereich vom Entwurfswert um ca. $\pm 25 \mu\text{m}$ abweichen (vorgesehene Justagetoleranz, s. Unterabschnitt 3.2.3). Wie der Positionierbereich umgesetzt werden konnte, wird im Folgenden vermessen.

Das Blenden-Array wird an den Grenzen des mechanisch zugelassenen Bewegungsbereichs mit manueller Steuerung entlang geführt. Der somit erzeugte Pfad ergibt den maximal möglichen Stellweg, s. Abb. 3.19. Der grüne Kreis ist die Startposition, während die Pfeile die Bewegungsrichtung zeigen. Die ausgewerteten Positionswerte sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Der Positionierbereich beträgt beim STS 2DA CHIP min. $169 \mu\text{m}$ und beim OXFORD 2DA CHIP min. $212 \mu\text{m}$. Der geforderte Stellweg konnte mit dem OXFORD 2DA CHIP erfüllt werden. Abweichungen sind in der manuellen AVT und der begrenzten Genauigkeit des Sägeprozesses begründet.

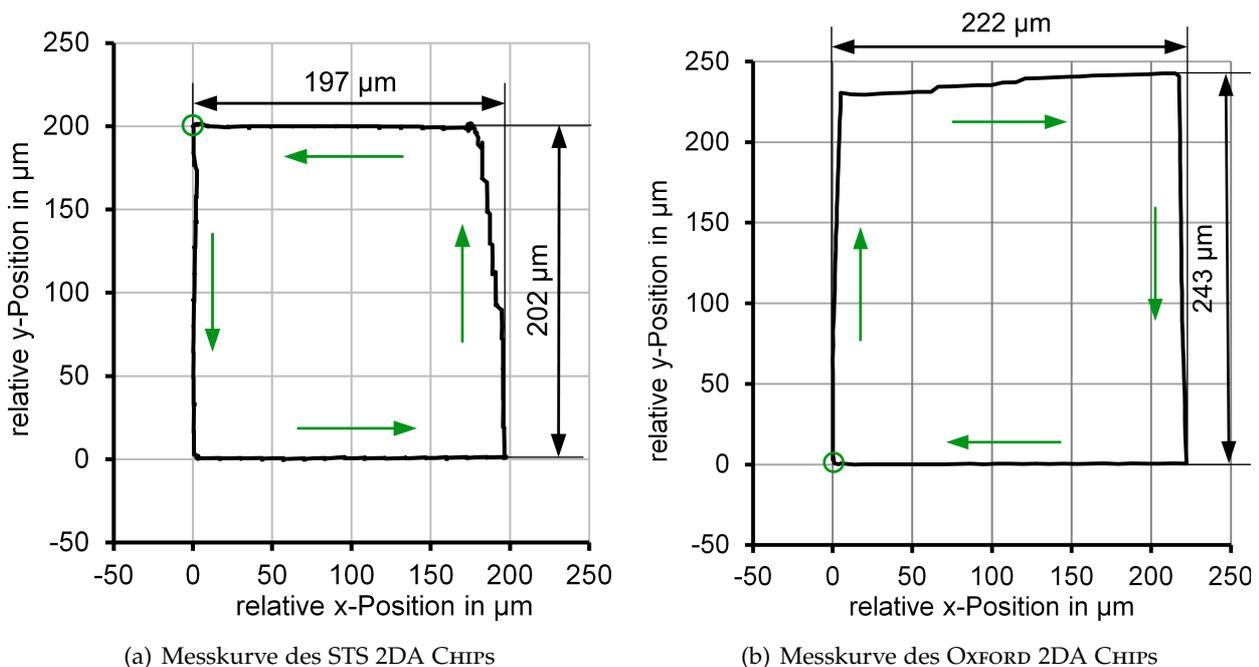


Abbildung 3.19: Vermessung des maximalen Positionierbereichs der aufgebauten Demonstratoren

⁹Die Lichtintensität ist gering im Vergleich zu einer spektral ungefilterten Abbildung.

Tabelle 3.5: Vermessener Positionierbereich des STS 2DA und OXFORD 2DA CHIPS

Exemplar	Eigenschaft	Antriebsrichtung	
		x	y
STS 2DA CHIP	mittlerer Positionierbereich	185 μm	198 μm
	min. Positionierbereich	169 μm	197 μm
	max. Positionierbereich	197 μm	202 μm
OXFORD 2DA CHIP	mittlerer Positionierbereich	217 μm	236 μm
	min. Positionierbereich	212 μm	229 μm
	max. Positionierbereich	222 μm	243 μm

3.4.3 Charakterisierung der Schrittgrößen des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Um die Leistungsfähigkeit der umgesetzten zweiachsigen Mikroschrittaktoren bezüglich Schrittgröße und Wiederholgenauigkeit zu charakterisieren, werden im Folgenden Messreihen mit beiden Demonstratoren durchgeführt. Die Schrittgrößen werden – wie beim einachsigen Konzept – durch mechanische Anschläge definiert. Im Gegensatz dazu treten hier keine Kräfte abhängig von der aktuellen Position des Blenden-Arrays auf, da auf eine dauerhafte Verbindung mit der Federführung verzichtet wurde. Die Positioniergenauigkeit wird durch die Güte der gefertigten Aktorgeometrie (symmetrische Federsteifigkeiten), Oberflächenqualität (galvanische Kontaktpads) und die implementierte, elektrische Ansteuerung wesentlich beeinflusst. Eine separate Betrachtung der Schrittgrößen abhängig von der Blenden-Array-Position ist daher nicht notwendig.

Charakterisierung der Schrittgrößen des STS 2DA Chips

Die Schrittgrößen werden mit einem Scanvorgang gemessen, s. Abb. 3.20. Der Chip wird mit der *dynamischen* Ansteuerung bei $f_a = 5,6$ Hz betrieben. Der Vorgang besteht aus 10 $+x$ bzw. $+y$ und 10 $-x$ bzw. $-y$ Schritten und wird zweimal wiederholt. Somit wird die Schrittgröße 20-mal je Antriebsrichtung vermessen. Die Berechnung der Werte erfolgt identisch zu Abschnitt 2.5. Die Auswertung der Schrittgrößen findet in Tabelle 3.6 statt.

Tabelle 3.6: Messergebnisse der Schrittgrößenmessung des zweiachsigen Mikroschrittaktors (STS 2DA CHIP)

	Antriebsrichtung			
	$+x$	$-x$	$+y$	$-y$
Mittelwert	12,8 μm	14,6 μm	16,1 μm	18,1 μm
Genauigkeit	$\pm 0,48$ μm	$\pm 1,00$ μm	$\pm 0,67$ μm	$\pm 1,78$ μm
max. Abweichung	0,96 μm	1,77 μm	1,52 μm	3,25 μm
Linearitätsfehler	0,19 %	2,39 %	0,61 %	0,78 %
Übersprechen	0,52 %	-1,70 %	-1,83 %	0,61 %

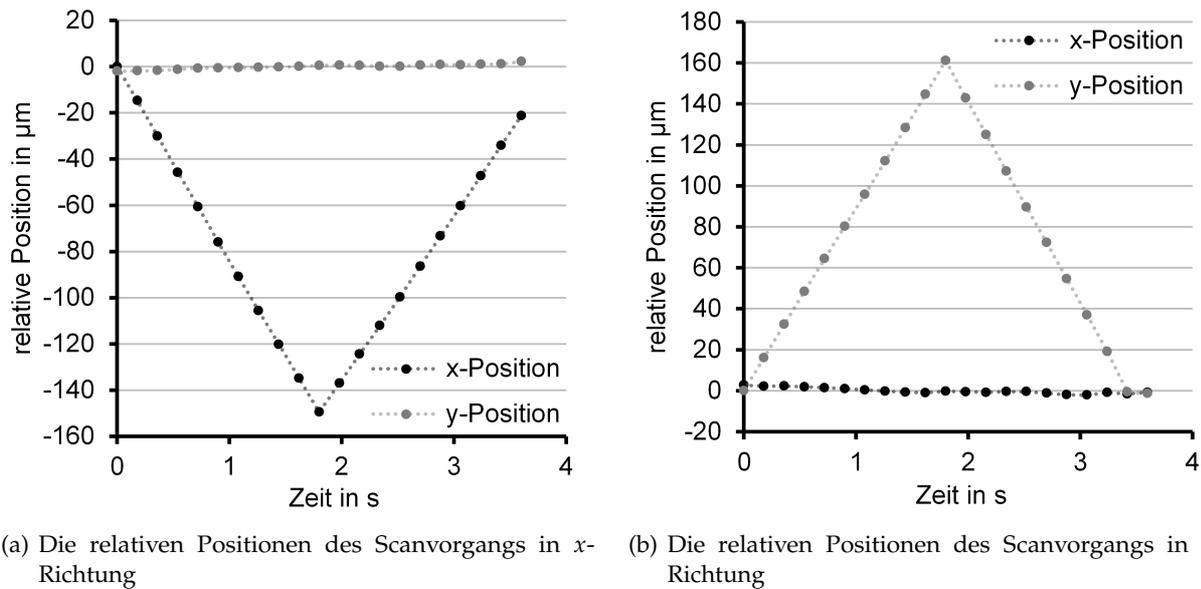


Abbildung 3.20: Messvorgang der Schrittgrößen und Genauigkeiten des zweiachsigen Mikroschrittaktors am Beispiel des STS 2DA CHIPS

Tabelle 3.7: Messergebnisse der Schrittgrößenmessung des zweiachsigen Mikroschrittaktors (OXFORD 2DA CHIP)

	Antriebsrichtung			
	+x	-x	+y	-y
Mittelwert	8,39 μm	8,6 μm	9,02 μm	8,8 μm
Genauigkeit	$\pm 1,05 \mu\text{m}$	$\pm 0,41 \mu\text{m}$	$\pm 1,46 \mu\text{m}$	$\pm 1,41 \mu\text{m}$
max. Abweichung	4,41 μm	1,14 μm	3,72 μm	4,52 μm
Linearitätsfehler	-3,31 %	-1,54 %	-3,47 %	5,24 %
Übersprechen	-0,55 %	-0,53 %	-1,03 %	4,13 %

Charakterisierung der Schrittgrößen des Oxford 2DA Chips

Die Schrittgrößen werden mit einem ähnlichen Scanvorgang gemessen wie beim STS 2DA CHIP in Abb. 3.20. Der Demonstrator wird mit der resonanten Steuerung bei einer $f_a = 13,5 \text{ Hz}$ betrieben. Der Vorgang wird hierbei dreimal wiederholt und es werden 25 Schritte je Antriebsrichtung durchgeführt, da die erwartete Schrittgröße nur 8–9 μm beträgt. Somit werden für jede Richtung 75 Einzelschritte zu einem Ergebnis verrechnet. Die Berechnung der jeweiligen Werte erfolgt identisch zu Abschnitt 2.5. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Diskussion und Auswertung der Schrittgrößenmessung

Abb. 3.21 stellt die Schrittgrößenmittelwerte und Abweichungen aus den Tabellen 3.6 und 3.7 dar. Zusätzlich ist das Übersprechen (hier als Absolutwert und nicht relativ zur Schrittgröße) in der nicht angesteuerten Richtung und dessen zweifache Standardabweichung in die jeweilige Richtung berücksichtigt. Dadurch wird sichtbar, wenn der Aktor einen Schritt tendenziell schräg, das heißt, mit deutlichem Übersprechen ausführt. Die Koordinaten der Datenpunkte sind so berechnet, dass diese die durchschnittliche Positionsänderung bei dem jeweiligen Schritt repräsentieren.

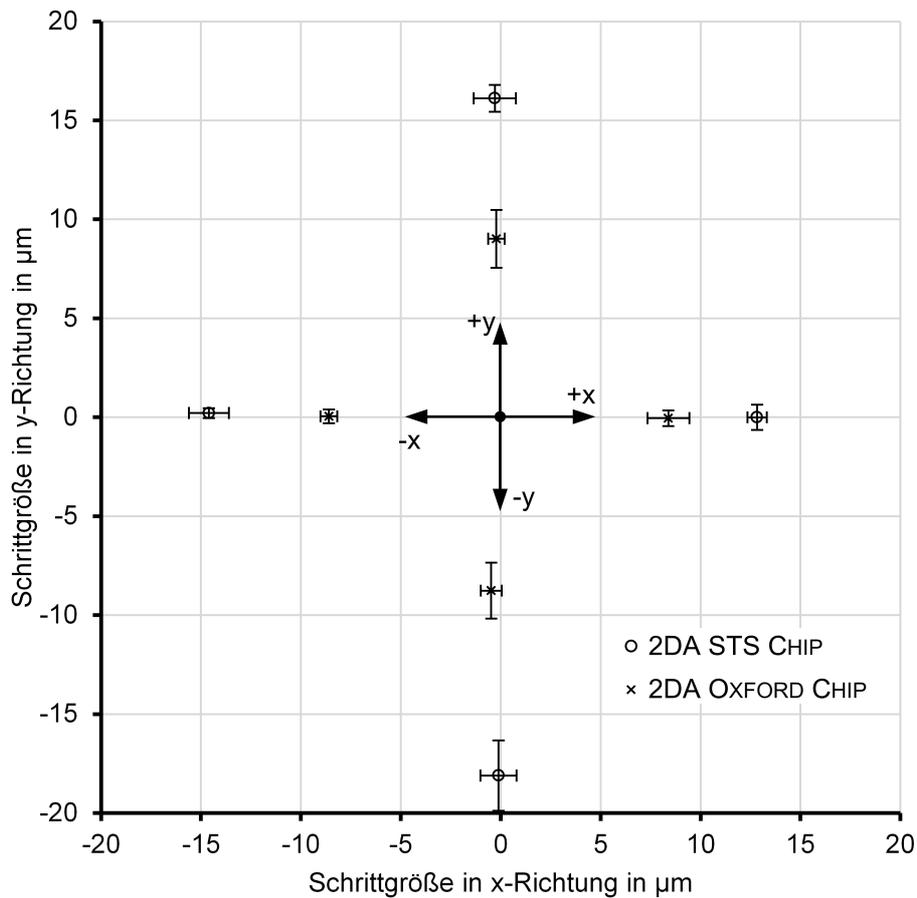


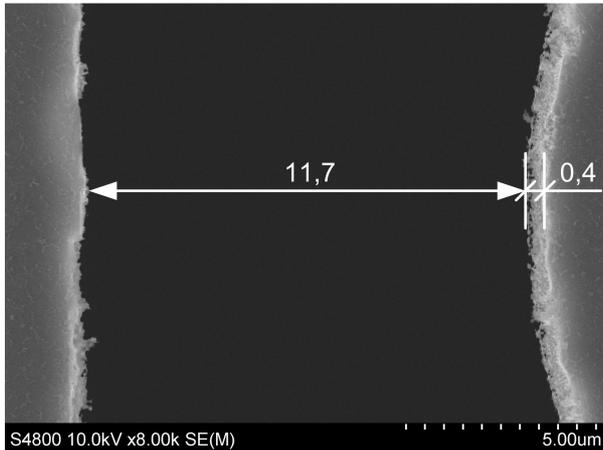
Abbildung 3.21: Gemessene Schrittrichtungen bzw. -größen und Wiederholgenauigkeiten

Die aufgezeichneten Werte liegen aufgrund des Übersprechens nicht exakt auf der Achse der theoretischen Schrittrichtung, sondern knapp neben der jeweiligen Achsenlinie. Die Fehlerbalken entsprechen der jeweiligen Genauigkeit der Haupt- und Querrichtung. Somit entsteht ein visueller Eindruck, wie genau der Schrittaktor positionieren kann. Zum Übersprechen können parasitäre Kapazitäten, ungleichmäßige Elektrodenabstände oder asymmetrische Federkonstanten führen. Zusätzlich verursachen zu niedrige elektrische Spannungen eine nicht ausreichende Auslenkung des Filtrerrahmens, wodurch eine undefinierte Übergabe des Blenden-Arrays erfolgt (vgl. Abschnitt 3.4.1). Wenn das Blenden-Array nicht immer geklemmt übergeben wird, kann der Schritt von der mechanisch definierten Größe abweichen. Die gemittelte Genauigkeit¹⁰ beträgt bei dem OXFORD 2DA CHIP $\pm 1,17 \mu\text{m}$ und ist leicht über dem angesetzten Zielwert von $1 \mu\text{m}$. Die maximalen Abweichungen übersteigen auch teilweise den angestrebten $3 \mu\text{m}$. Aus den vorher genannten Gründen kann hier eine weitere Optimierung der Steuersignale die Genauigkeit verbessern. Der größte Unterschied zwischen den beiden vermessenen Chips liegt in der umgesetzten Schrittgröße, s. Tabelle 3.8. Durch den optimierten DRIE-Prozess wurden die Strukturen ohne deutliche Über- und Unterätzung bis zum BOX-Layer geätzt. Somit beträgt die durchschnittliche Schrittgröße $8,69 \mu\text{m}$. Diese ist ca. 9 % größer als die entworfene von $8 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu ist die mittlere Schrittgröße des STS 2DA CHIPS ca. 54 % größer als geplant. Die gemittelte Genauigkeit

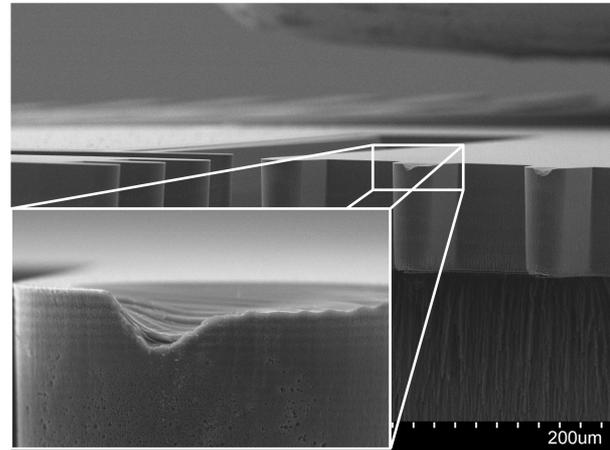
¹⁰Gemittelte Genauigkeit: Mittelwert der geometrisch berechneten Genauigkeiten in jede Antriebs- sowie Querrichtung $(2\sqrt{\sigma_{+x} \cdot \sigma_y} + 2\sqrt{\sigma_{-x} \cdot \sigma_y} + 2\sqrt{\sigma_{+y} \cdot \sigma_x} + 2\sqrt{\sigma_{-y} \cdot \sigma_x})/4$.

Tabelle 3.8: Vergleich zwischen STS 2DA 2DA CHIP und OXFORD 2DA CHIP anhand gemittelter Messwerte

	STS 2DA CHIP	OXFORD 2DA CHIP
Mittelwert der Schrittgrößen	15,41 μm	8,69 μm
Abweichung der Schrittgröße vom Entwurf	54 %	8,7 %
gemittelte Genauigkeit	$\pm 1,27 \mu\text{m}$	$\pm 1,17 \mu\text{m}$



(a) Durch Plasmaumgriff überätzter, mechanischer Anschlag



(b) Ausbruch am mechanischen Anschlag des STS 2DA CHIPS

Abbildung 3.22: REM-Aufnahmen von den mechanischen Anschlägen, die technologisch bedingt zu größeren Schritten führen (Bemaßungen in μm)

ist beim OXFORD 2DA CHIP leicht geringer. Die Differenzen der Schrittgrößenmittelwerte je Richtung sind beim OXFORD 2DA CHIP deutlich geringer. Der Chip gewährleistet somit eine bessere Abtasthomogenität der Objektebene bei einem Scanvorgang als der STS 2DA CHIP, was durch den optimierten DRIE-Prozess begründet ist.

Beim STS 2DA CHIP können die Abweichungen der Schrittgröße aus technologischer Sicht durch die inhomogene Ätzrate des DRIE-Prozesses erklärt werden (vgl. Unterabschnitt 2.5.4). Beispiele beim STS 2DA CHIP für Überätzung und Ausbrüche wegen Punktkontakt (HERTZsche Pressung) sind in Abb. 3.22 dargestellt.

Wenn der Aktorraahmen im Teilschritt (d) beim Anstoßen an den mechanischen Anschlag das Blenden-Array nicht stark genug fixiert, kann es weiterhin zum Verrutschen des Blenden-Arrays kommen, s. Unterabschnitt 3.4.1. Diese Fehlerquellen lassen sich mit weiterer Optimierung der Steuersignale und mit der Anpassung der Elektroden- und Federgeometrie beheben.

4 Zusammenfassung

Anschließend werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Dissertationsschrift zusammengefasst. Zusätzlich werden Forschungsmöglichkeiten aufgezeigt, die für die Weiterentwicklung bzw. für andere Anwendungsfälle der Mikroschrittaktoren eine wichtige Rolle spielen.

4.1 Ergebnisse der Arbeit

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein einachsiger und ein zweiachsiger Mikroschrittaktor mit großem Stellweg für eine optische Anwendung entworfen. Es konnten die geforderten Eigenschaften an das Positioniersystem innovativ und erfolgreich umgesetzt werden. Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit werden im Folgenden vorgestellt.

Ein chromatisch-konfokales Abbildungssystem sollte mithilfe des diskret positionierten Blenden-Arrays hyperspektrale Aufnahmen mit hoher räumlicher und spektraler Auflösung ermöglichen, [Gre+13]. Durch den angestrebten maximalen Abbildungsmaßstab (1:1) des Blenden-Arrays auf den Bildsensor fiel die Größe des Arrays makroskopisch (ca. $5 \times 6,5 \times 0,2 \text{ mm}^3$) aus. Auf Basis des optischen Entwurfs des hyperspektralen Abbildungssystems wurde ein minimaler Blendendurchmesser von $\varnothing 20 \mu\text{m}$ und ein maximaler Rasterabstand von $200 \mu\text{m}$ festgelegt. Basierend auf diesen Kenngrößen des Blendenarrays wurden die Entwurfsziele für Traglast (17–20 mg), Positionierbereich ($\pm 100 \mu\text{m}$), Schrittgröße ($10 \mu\text{m}$) und Schrittfrequenz (bis 50 Hz) des Mikroschrittaktors abgeleitet. Bisherige, mikrosystemtechnisch umgesetzte Schrittaktoren zeigen nicht den notwendigen Funktionsumfang, besonders bezüglich der Schrittgröße und Traglast. Die geforderte, rechteckige Apertur ($5 \times 6,5 \text{ mm}^2$) für den optischen Einsatz bei kleinstmöglicher Baugröße und Integrierbarkeit erweist sich als ein weiteres Alleinstellungsmerkmal des Vorhabens.

Die Erfassung der Objektebene mit einer einachsigen Bewegung wurde mit einer zur Bewegungsrichtung um 18° geneigten Anordnung des Blenden-Arrays ($\varnothing 10 \mu\text{m}$ Pinholedurchmesser, $65 \mu\text{m}$ Rasterabstand) ermöglicht. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit zuerst ein einachsiger Mikroschrittaktor mit elektrostatischer Krafterzeugung und durch die *Inchworm*-Bewegung inspirierter Schrittmechanismus gezeigt. Das Entwurfskonzept, sowie der Schrittmechanismus und das hergestellte Mikrosystem sind in Abb. 4.1 gezeigt. Die Eckdaten des einachsigen Systemdesigns sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Als Fertigungsplattform diente die bei Beschleunigungssensoren etablierte SOI-Technologie mit anisotropem Silicium-Tiefätzen (DRIE) und Freistellung im HF-Dampf. Das Blenden-Array wurde durch Verwendung eines Glassubstrats mit einer neuartigen, absorbierenden Al-Schicht (totale Reflexion $< 10\%$) umgesetzt.

Das Blenden-Array (vertikale Traglast $198 \mu\text{N}$) konnte über $200 \mu\text{m}$ mit einer Schrittgröße von $13,2 \mu\text{m}$ in $-x$ -Richtung und einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,73 \mu\text{m}$ positioniert werden.

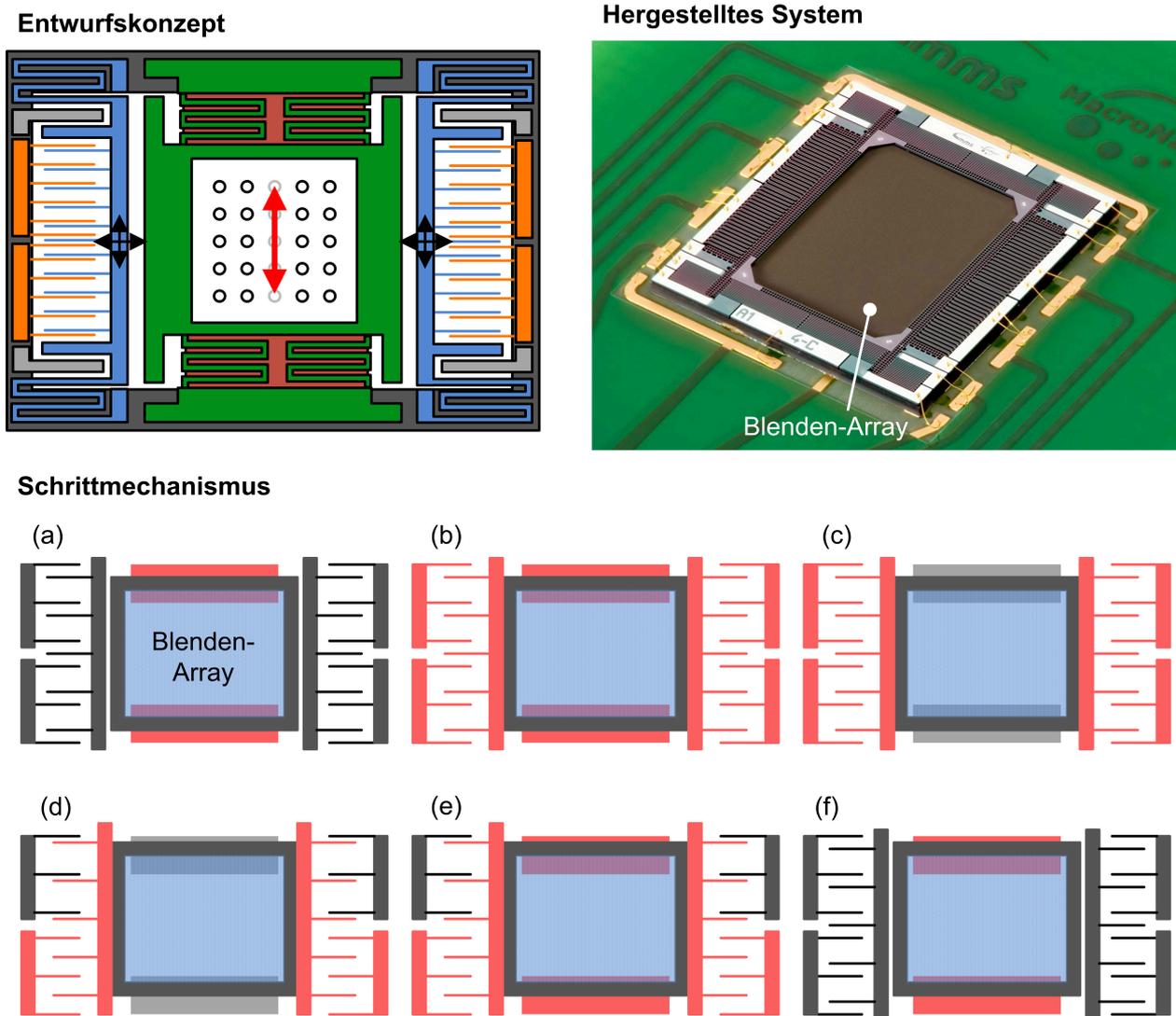


Abbildung 4.1: Entwurfskonzept, Schrittmechanismus und Umsetzung des einachsigen Mikroschritttaktors

Tabelle 4.1: Eigenschaften des entworfenen einachsigen Mikroschritttaktors

Eigenschaft	Wert
Positionierbereich	$\pm 100 \mu\text{m}$
Schrittgröße	$10 \mu\text{m}$
Antriebsspannung	$< 200 \text{ V}$
Traglast (Filterrahmen+Blenden-Array)	$198 \mu\text{N}$
Größe des einachsigen Systems	$10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$
Gewicht des einachsigen Systems	54 mg
Größe des Filters	$5,5 \times 7 \text{ mm}^2$
rechteckige Apertur	$5 \times 6,5 \text{ mm}^2$

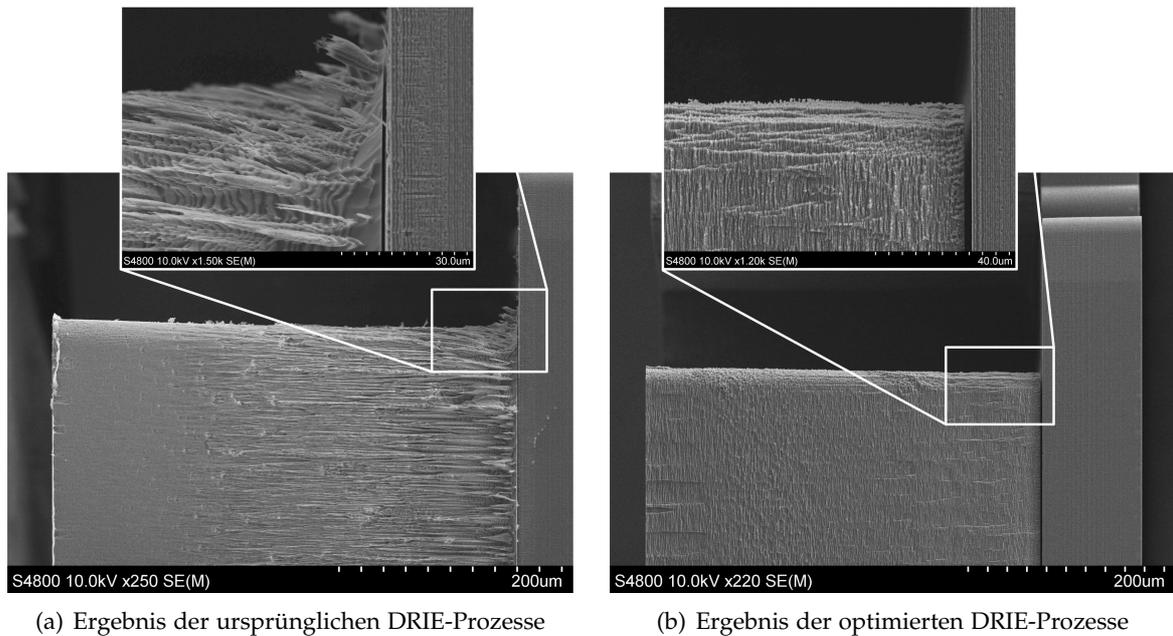


Abbildung 4.2: Vergleich der REM-Aufnahmen von Ätzflanke und -boden des Handlelayers mit nasschemisch freigestelltem Devicelayer (zweiachsiger Mikroschrittaktor)

Die Schrittgröße fällt durch technologisch bedingte Abweichungen größer als die angestrebten $10\ \mu\text{m}$ aus. Durch die Optimierung des DRIE-Prozesses konnte die Schrittgröße bei einem zweiten Demonstrator auf $10,4\ \mu\text{m}$ reduziert werden. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Messergebnisse ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Der Mikroaktor wurde bei Schrittfolgen von 5-100 Hz getestet. Eine Schrittfolge von 25 Hz mit einer Standardabweichung von $0,3\ \mu\text{m}$ konnte erreicht werden. Ab 50 Hz hat sich die Wiederholgenauigkeit verschlechtert.

Tabelle 4.2: Messergebnisse der Schrittgrößenmessung des einachsigen Mikroschrittaktors

	Antriebsrichtung	
	+x	-x
Mittelwert	$13,6\ \mu\text{m}$	$13,2\ \mu\text{m}$
Genauigkeit	$\pm 1,14\ \mu\text{m}$	$\pm 0,73\ \mu\text{m}$
max. Abweichung	$1,75\ \mu\text{m}$	$1,39\ \mu\text{m}$
Linearitätsfehler	1,6 %	1,2 %
Übersprechen	-0,43 %	0,03 %
Mittelwert der zentralen Initialposition $\pm 2\sigma$	(x) $-0,89 \pm 7,57\ \mu\text{m}$	(y) $-0,05 \pm 1,16\ \mu\text{m}$

Der DRIE-Prozess wurde an einem OXFORD INSTRUMENTS PLASMAPRO 100 ESTRELAS DEEP SILICON ETCH SYSTEM für bessere Strukturtreue und saubere Ätzwände optimiert. Damit wurde eine stabile elektrische Trennung der Elektroden bzw. des Device- und Handlelayers sowie die notwendige Strukturtreue erreicht, s. Abb. 4.2.

Tabelle 4.3: Eigenschaften des zweiachsigen Mikroschritttaktors

Eigenschaft	Wert
Positionierbereich	200 μm \times 200 μm
Schrittgröße	10 μm
Antriebsspannung	<100 V
Traglast	BA: 193 μN , Aktorraahmen: 74 μN
Größe des Positioniersystems	14 \times 10,7 \times 1 mm^3
Gewicht des Positioniersystems	143 mg
Größe des Filters	6 \times 7,5 mm^2
rechteckige Apertur	5 \times 6,5 mm^2

Mit einem zweiachsigen Schritttaktor lässt sich der Abstand zwischen zwei Blendenöffnungen beim festgelegten Positionierbereich von 65 μm (rotierte Anordnung) auf 200 μm erhöhen und damit die spektrale Auflösung steigern. Die Abb. 4.3 zeigt das Entwurfskonzept, den entwickelten Schrittmechanismus und das hergestellte Mikrosystem. Die elektrostatische Krafterzeugung und das *Inchworm*-Bewegungsprinzip wurden für das zweiachsige Systemdesign übernommen. Die Erfahrungen mit dem einachsigen Mikroaktor zeigten, dass das Blenden-Array nicht zwangsläufig eine permanente Federführung besitzen muss. Die Startposition eines Scanvorgangs wurde so mit dem Anfahren eines Anschlags definiert. Es wurde ein Schrittmechanismus entworfen, der eine parallele Kopplung der zwei orthogonalen, linearen Achsen bietet, kompakt aufgebaut werden kann und auf eine permanente Federführung des Blenden-Arrays verzichtet. Um das Blenden-Array-Element trotzdem als Elektrode für die elektrostatische Krafterzeugung kontaktieren zu können, wurde eine mehrstufige Elektrodenanordnung mit drei Systemebenen ausgearbeitet. In Kombination mit der entwickelten Fertigungstechnologie übernahm die Isolation der Elektroden an jeder Stelle ein Luftspalt (außer die BOX-Layer im SOI-Substrat). Während des Schrittmechanismus berühren sich keine Elektroden und damit wurde das Risiko elektrischer Durchbrüche deutlich reduziert. Die wesentlichen technischen Merkmale des zweiachsigen Mikroschritttaktors sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Mittels einer resonanten Ansteuerung für den mit dem optimierten DRIE-Prozess gefertigten Chip konnte die Schrittfrequenz von 5,56 Hz (*dynamische* Ansteuerung) auf 13,5 Hz gesteigert werden. Somit war es möglich mit den vom Entwurf abweichenden, steiferen Aufhängungsfedern die Schrittbewegung ausüben zu können. Die maximale Aktorspannung wurde dabei unter 200 V gehalten. Die angestrebte Schrittfrequenz von 50 Hz konnte mit dem zweiachsigen System nicht erreicht werden. Da typische Belichtungszeiten durch die spektrale Filterung die erreichbare Bildrate herabsetzen, ist davon auszugehen, dass eine Schrittfrequenz von 13,5 Hz für zahlreiche Anwendungen ausreichend ist. Die Tabelle 4.4 zeigt die gemessenen Schrittgrößen und weitere Positionierungseigenschaften des resonant angesteuerten Aktorsystems. Vergleichbar kompakte, siliciumbasierte Mikroschritttaktoren existierten bis Abschluss dieser Arbeit nicht. Die Ergebnisse wurden vom Autor bei mehreren wissenschaftlichen Tagungen, national sowie international ([End+14a; End+14b; End+15c]) und in wissenschaftlichen Zeitschriften ([End+15b; End+15a]) veröffentlicht. Der einachsige Mikroaktor konnte auch in konfokal-chromatischen Matrixsensoren für Abstandsmessung mit deutlichem Neuheitswert punkten und für eine erhöhte räumliche Auflösung sorgen, [Hil+15].

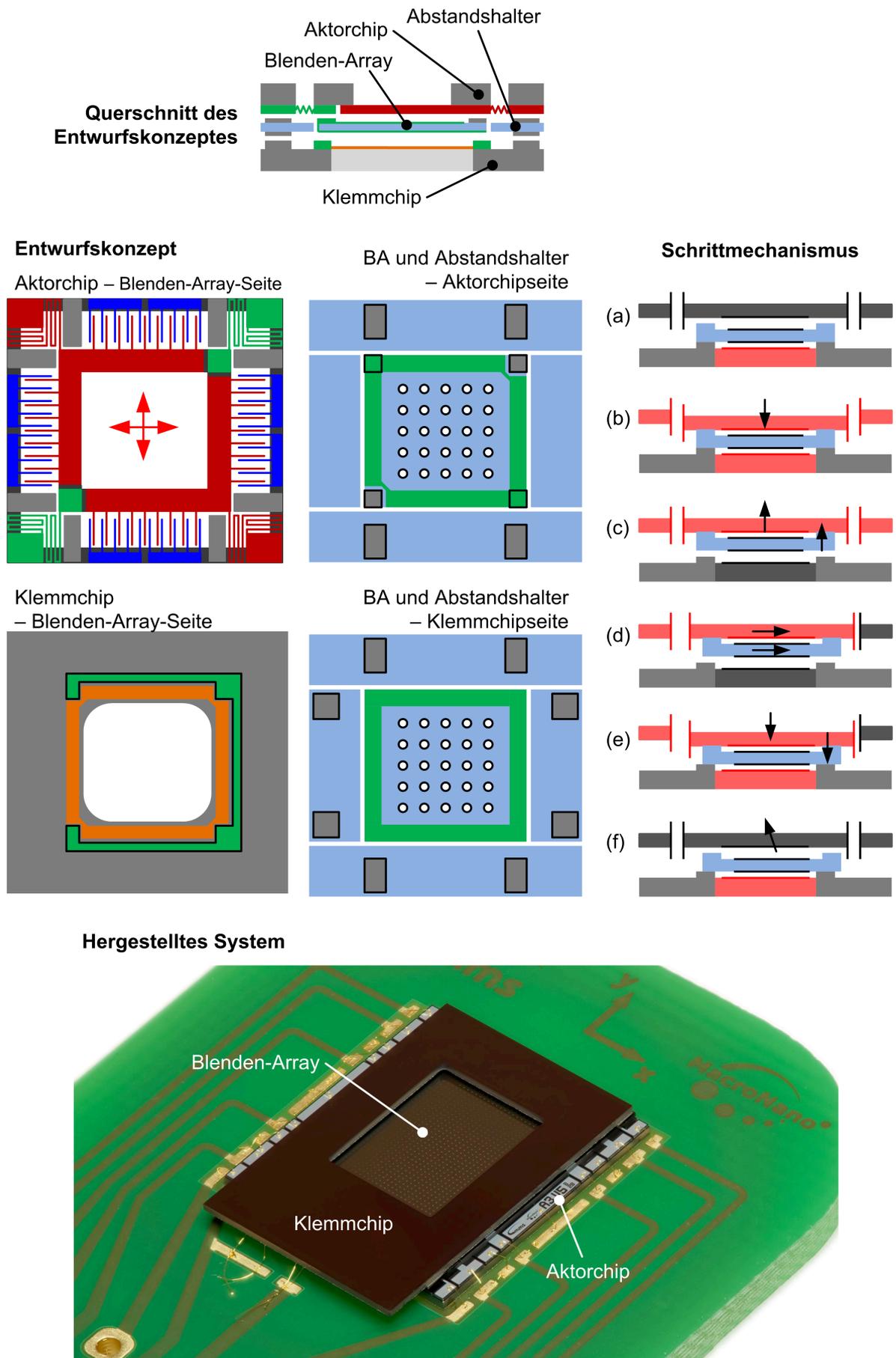


Abbildung 4.3: Entwurfskonzept, Schrittmechanismus und Umsetzung des zweiachsigen Mikroschrittaktors

Tabelle 4.4: Messergebnisse der Schrittgrößenmessung des zweiachsigen Mikroschrittaktors (optimierter DRIE-Prozess)

	Antriebsrichtung			
	+x	-x	+y	-y
Mittelwert	8,39 μm	8,6 μm	9,02 μm	8,8 μm
Genauigkeit	$\pm 1,05 \mu\text{m}$	$\pm 0,41 \mu\text{m}$	$\pm 1,46 \mu\text{m}$	$\pm 1,41 \mu\text{m}$
max. Abweichung	4,41 μm	1,14 μm	3,72 μm	4,52 μm
Linearitätsfehler	-3,31 %	-1,54 %	-3,47 %	5,24 %
Übersprechen	-0,55 %	-0,53 %	-1,03 %	4,13 %
Gemittelte Werte	Schrittgröße		8,69 μm	
	gemittelte Genauigkeit		$\pm 1,17 \mu\text{m}$	
	Positionierbereich in x-Richtung		217 μm	
	Positionierbereich in y-Richtung		236 μm	

4.2 Weitere Forschungsmöglichkeiten

An erster Stelle wird hier der optimierte DRIE-Prozess mit den sich daraus ergebenden Entwurfsmöglichkeiten erwähnt. Durch die Vermeidung von Notching beim Überätzen und durch die senkrechten Seitenwänden kann ein Neuentwurf der Elektrodenabstände und Federn eine bessere Aktorleistung und niedrigere Betriebsspannungen bewirken. Es sind aus technologischer Sicht mehrere kritische Prozessschritte, die die Wiederholgenauigkeit der entwickelten Mikroschrittaktoren beeinflussen. Trotz der gerätetechnischen Einschränkungen haben mehrere Prozesse weiteres Optimierungspotential und bieten die Möglichkeit, dadurch die Mikrosysteme homogener und genauer herzustellen:

- HF-Dampf: bessere Homogenität der Unterätzung der Device-Strukturen
- Nickelgalvanik: homogenere Abscheiderate
- Glassägen: Reduzierung der Ausbrüche
- Lithografie für die Nickelgalvanik (AZ15nXT): bessere Strukturtreue und Lösbarkeit beim Entlacken

Die relativ hohe Masse des bewegten optischen Elements begrenzt die Dynamik des Schrittmechanismus und auch den mobilen Einsatz des Mikrosystems. Die technologische Prozessentwicklung für die Fertigung des Blenden-Arrays bietet Raum die Schrittfrequenz des Aktors weiter zu steigern. Mit dünneren Substraten oder membranbasierten Lösungen würde das Gewicht des Blenden-Arrays reduziert und die Dynamik gesteigert werden. Einen möglichen Schichtaufbau zeigt dazu die Abb. 4.4. Das Gewicht des bewegten Elements ist aus Sicht der mechanischen Stabilität ein ebenso wichtiger Punkt. MEMS-Chips sind im Allgemeinen robust und langlebig, weil die

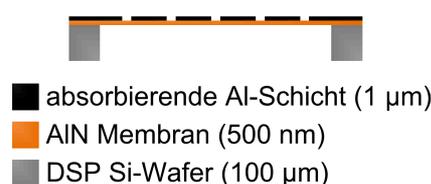


Abbildung 4.4: Schichtaufbau eines membranbasierten Blenden-Arrays

Komponenten hermetisch verschlossen sind, ein geringes Gewicht haben und keine großen Auswirkungen bei externen Krafteinwirkungen (impulsartige Beschleunigungen oder auch „Schocks“) auftreten. Die in dieser Arbeit entwickelten Mikroschrittaktoren haben die Besonderheit, dass diese eine relativ hohe Masse von 17–20 mg positionieren können. Im Zusammenspiel mit der zu realisierenden Schrittgröße und dem Positionierbereich entsteht ein mechanisch empfindliches System, bei dem externe Beschleunigungen während des Betriebs vermieden werden müssen. Da das HAS Belichtungszeiten über mehrere Sekunden hat, ist eine stabile Aufstellung des optischen Systems samt Mikroaktor für scharfe Aufnahmen notwendig. Beim Transport kann in beiden Aktorsystemen das Blenden-Array mit elektrostatischen Kräften stromlos geklemmt und somit das Risiko einer Beschädigung minimiert werden.

Eine weitere Möglichkeit die Schrittfrequenz sowie die Wiederholgenauigkeit zu steigern, ist die Weiterentwicklung der Ansteuerungssignale. Mit der Analyse der Resonanzen des Systems sowie der aktorischen Kräfte und elektrischen Kapazitäten ist es möglich, die Totzeiten zu reduzieren, unerwünschte Schwingungen zu dämpfen und die mechanische Belastung an den Anschlüssen zu verringern.

Die Evaluierung des hyperspektralen Abbildungssystems mit den entwickelten Komponenten

- hybride, diffraktiv-refraktive Alvarez-Lohmann Linsen[Gre+],
- verstimmbare fluidische Linse [CuN+13] und
- dem resonanten Wellenleitergitter [Ste+12]

wurde durchgeführt. Im Rahmen einer Masterarbeit¹ am FG QS wurden erste Messungen mit dem in das HAS integrierten einachsigen Mikroschrittaktor durchgeführt, s. Abb. 4.5. Die erhöhte Bildinformation durch das bewegte Blenden-Array ist in Bild 4.5(d) im Vergleich zu (b) gut sichtbar. Die Spektren werden mittels einer optimierten, hybriden, diffraktiv-refraktiven ALVAREZ-LOHMANN Linsengruppe separiert, s. Abb 4.5(c) und (d). Eine automatische Bildverarbeitung, die für eine systematische Auswertung des HASs mit den verschiedenen Blenden-Arrays und Mikroaktoren notwendig wäre, wurde bislang nicht umgesetzt. Die programmiertechnische Umsetzung der Bildverarbeitung war nicht Teil dieser Dissertation und kann in späteren Arbeiten auf den hiermit erlangten Grundlagen erfolgen.

Das Design der Mikroschrittaktoren lässt innerhalb der entwickelten, technologischen Möglichkeiten (Aspektverhältnis im DRIE-Prozess) die Anpassung der Schrittgröße für verschiedene Anwendungen leicht zu: Die Schrittgröße kann ohne größere Veränderungen der Geometrie und Fertigungstechnologie zwischen 3–16 μm eingestellt werden. Die untere Grenze ist durch den DRIE-Prozess gesetzt, die obere durch den Initialabstand der Kammelektroden. Eine Anpassung des Positionierbereichs und der Tischgröße sind ebenfalls möglich. Die Größe des Chips wird aber damit maßgeblich beeinflusst und erfordert gleichzeitig eine erhebliche Anpassung des Layouts.

¹Peter Mainhardt: Aufbau und Programmierung eines Demonstrators zur hyperspektralen Bildaufnahme

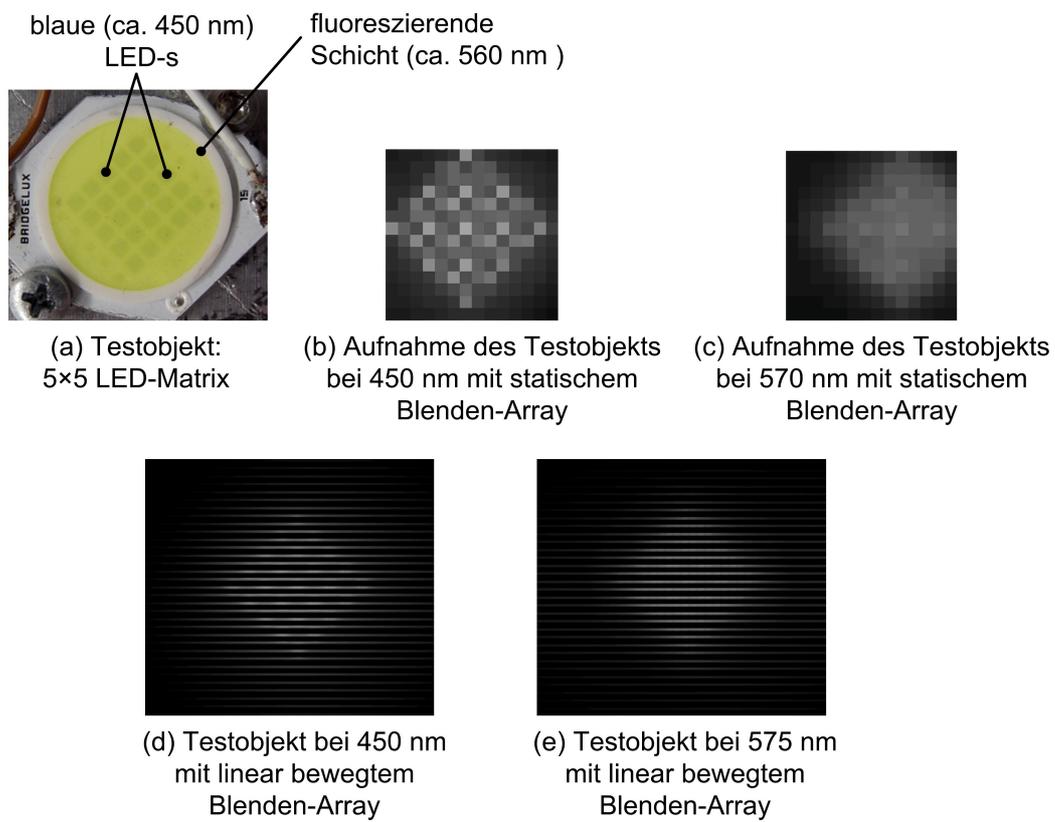


Abbildung 4.5: Testbilder mit dem HAS bestehend aus Hyperchomat, diffraktivem ALVAREZ-LOHMANN Linsenpaar, Blenden-Array mit $40\ \mu\text{m}$ Lochdurchmesser und $120\ \mu\text{m}$ Rasterabstand. Die einachsige Aktuierung besitzt eine Schrittgröße von ca. $12\ \mu\text{m}$.

Danksagung

Als allererstes möchte ich mich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Hoffmann für seine Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen bedanken. Ein weiterer Dank geht an Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger für die Leitung des Projektes OPMISEN, bei dem ich die Möglichkeit bekommen habe meine Arbeiten in eine Dissertation zu fassen.

Ein großer Dank geht an meine Kollegen am FACHGEBIET MIKROMECHANISCHE SYSTEME und FACHGEBIET TECHNISCHE OPTIK, die mich während meiner Arbeit durchgängig fachlich sowie persönlich unterstützt haben: Hannes Mehner, Dr.-Ing. Boris Goj, Adrian Grewe, Dr.-Ing. Matthias Hillenbrand, Sebastian Gropp, Christoph Weigel, Dr.-Ing. Steffen Leopold, Lothar Dressler, Sarah Günther, Lars Dittrich und Lutz Müller.

Diese Arbeit wäre nicht ohne die tatkräftigen und immer hilfsbereiten Technologen zustande gekommen: Tobias Remdt, Jutta Uziel, David Venier, Joachim Döll, Ilona Marquardt und Birgitt Hartmann.

Ich danke allen Mitarbeiter des INSTITUTS FÜR MIKRO- UND NANOTECHNOLOGIE und insbesondere Dr. Arne Albrecht, Kirsti Schneider, Sabine Jahn, Renate Röhner, Frank Bucke, Torsten Sändig und Prof. Dr. Jens Müller dafür, dass sie die finanziellen und technischen Möglichkeiten des Forschungszentrums für meine Arbeit zugänglich gemacht haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden bedanken, die während meiner Arbeit immer an meiner Seite standen und mir damit geholfen haben, diese Dissertation abzuschließen.

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
Δ	Differenz	
d	Differential	
∂	Partielle Ableitung	
δ	Infinitesimale Differenz	
$[x^b, y^b, z^b](t)$	Relative Position des Blenden-Arrays	m
$[x^r, y^r, z^r](t)$	Relative Position der Filterrahmen	m
$[x^r, y^r, z^r]_i(t)$	Relative Position der Filterrahmen in $i = Pos_i$	m
$[x^{se}, y^{se}, z^{se}](t)$	Relative Position der Seitenelektrode	m
$[x^s, y^s, z^s](t)$	Verschiebungen am Ende einer Feder	m
β	Abbildungsmaßstab	
ϵ_0	Permittivität des Vakuums	$\frac{F}{m}$
ϵ_r	Relative Permittivität	
λ	Wellenlänge	m
μ_a	Mittelwert aller Schrittgrößen in einer Messreihe	m
μ_{ai}	Mittelwert der Schrittgrößen beim <i>Schritt_i</i> in einer Messreihe	m
σ	Standardabweichung	
σ_{+x}, σ_{-x}	Standardabweichung der Schrittgröße in die jeweilige Richtung	m
σ_a	Standardabweichung der Schrittgröße	m
δt	Diskretes Zeitintervall für numerische Berechnung	s
δ_w	Wiederholgenauigkeit	m
\vec{F}	Kraftvektor	N
\vec{F}^e	Elektrostatische Kraft	N
\vec{F}^s	Federkraft	N
\vec{g}	Erdbeschleunigung	m/s ²
$\vec{r}_s(t)$	Ortsvektor	m
A	Oberfläche	m ²
A_{CCD}	Für die Bilderfassung benutzte Fläche des Kamerasensors	m ²
A_{exp}	Beleuchtete Sensorfläche bei statischem Blenden-Array	m ²
A_e	Aktive Elektrodenoberfläche	m ²
a_f	Füllfaktor	

a_i	Schrittgröße	m
A_t	Tischfläche eines Positioniersystems	m ²
b	Vorauslenkung des Filterrahmens in x -Richtung	m
b_x	Bewegungsbereich in x -Richtung	m
b_y	Bewegungsbereich in y -Richtung	m
c_x^r, c_y^r, c_z^r	Federkonstanten der Rahmenfedern	$\frac{N}{m}$
$c_x^{se}, c_y^{se}, c_z^{se}$	Federkonstanten der Seitenfedern	$\frac{N}{m}$
c_x, c_y, c_z	Federkonstanten in die jeweilige Richtung	$\frac{N}{m}$
d_e, d_{e2}	Elektrodenabstände	m
f_0	Erste Resonanzfrequenz	Hz
f_a	Schrittfrequenz	Hz
i	Positive, ganze Zahl: $i \in \mathbb{Z}^+$	
m_t	Traglast	kg
n	Anzahl an Elementen bzw. Stichproben	
Pos_i	Die Position des Blenden-Arrays	
R	Spektrale Auflösung	
$Schritt_i$	Der Vorgang, den Filterrahmen von Pos_{i-1} zu Pos_i zu versetzen	
t	Zeit	s
t_d	Tischdicke eines Positioniersystems	m
U	Elektrische Spannung	V
U_{max}	Maximale Betriebsspannung	V
U_{pp}	Peak-to-peak Amplitude eines elektrischen Signals	V
v_x^{se}	Geschwindigkeit der Seitenelektrode in x -Richtung	m
$x(t), y(t), z(t)$	Relative Position oder Verschiebung	m
x^r	x -Position des Filterrahmens	m
AVT	Aufbau und Verbindungstechnik	
BA	Blenden-Array	
CAD	Rechnerunterstütztes Konstruieren (engl.: computer-aided design)	
CCD	Ladungsgekoppeltes Bauelement (engl.: charge-coupled device)	
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung (engl.: chemical vapour deposition)	
DRIE	Tiefes reaktives Ionenätzen (engl.: deep reactive-ion etching)	
FEM	Finite-Elemente-Methode	
FFT	Schnelle Fourier-Transformation (engl.: fast fourier transform)	
FG	Fachgebiet	
HAS	Hyperspektrales Abbildungssystem	
HF	Fluorwasserstoff, Fluorwasser (engl.: hydrogen fluoride)	
HGK	Hochgeschwindigkeitskamera	

HSB	Hyperspektrale Bildgebung
ICP	Induktiv gekoppeltes Plasma (engl.: inductively coupled plasma)
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme
n.m.	Nicht messbar
NI.	Nichtlinearität
OpMiSen	Optische Mikrosysteme für die hyperspektrale Sensorik
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (engl.: plasma enhanced chemical vapour deposition)
QS	Qualitätssicherung
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFMEMS	engl. radio frequency micro-electromechanical system
RGB	Rot-Grün-Blau
RIE	Reaktives Ionenätzen (engl.: reactive-ion etching)
SOI	Silicium auf Isolator (engl.: silicon-on-insulator)
SSP	Einseitig poliert (engl.: single-side polished)
theo.	Theoretisch
TO	Technische Optik
TU	Technische Universität
ZMN	Zentrum für Mikro- und Nanotechnologie

Literatur

- [AG] Schott AG. *Borosilikatglas BOROFLOAT® - Optische Produkteigenschaften, SCHOTT AG*. URL: <http://www.schott.com/borofloat/german/attribute/optical/index.html> (besucht am 23.05.2016).
- [Akb+12] Hamed Akbari u. a. „Hyperspectral imaging and quantitative analysis for prostate cancer detection“. In: *Journal of biomedical optics* 17.7 (2012), S. 076005. ISSN: 1560-2281. DOI: 10.1117/1.JBO.17.7.076005.
- [Bac+88] R. Bacon u. a. „The integral field spectrograph TIGER.“ In: *Very Large Telescopes and their Instrumentation*. Bd. 2. Okt. 1988, S. 1185–1194. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1988vlti....2.1185B>.
- [BKO97] M. Baltzer, T. Kraus und E. Obermeier. „A linear stepping actuator in surface micro-machining technology for low voltages and large displacements“. In: *International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*. Juni 1997, S. 781–784. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635216.
- [BSD08] P. Beverly, G. Sivakumar und T. Dallas. „Two-Axis Microstage System“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 17.4 (2008), S. 863–868. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.921713.
- [BSN06] A. Bodkin, A. Sheinis und A. Norton. „Hyperspectral imaging systems“. US20060072109 A1. Apr. 2006. URL: <https://www.google.com/patents/US20060072109>.
- [Che+03] Che-Heung Kim u. a. „Silicon micro XY-stage with a large area shuttle and no-etching holes for SPM-based data storage“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 12.4 (2003), S. 470–478. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2003.809960.
- [CSK00] Pierre Cusin, Takuhiko Sawai und Satoshi Konishi. „Compact and precise positioner based on the Inchworm principle“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 10.4 (2000), S. 516–521. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/10/4/305.
- [CuN+13] Phuong-Ha Cu-Nguyen u. a. „Tunable hyperchromatic lens system for confocal hyperspectral sensing“. In: *Optics express* 21.23 (2013), S. 27611–27621. ISSN: 1094-4087.
- [CuN+14] Phuong-Ha Cu-Nguyen u. a. „Compact tunable hyperspectral imaging system“. In: *IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. IEEE, 2014, S. 1167–1170. DOI: 10.1109/MEMSYS.2014.6765854.
- [Dan+96] M. J. Daneman u. a. „Linear microvibromotor for positioning optical components“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 5.3 (1996), S. 159–165. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/84.536622.

- [deB+04] M. P. deBoer u. a. „High-Performance Surface-Micromachined Inchworm Actuator“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 13.1 (2004), S. 63–74. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2003.823236.
- [End+14a] Csaba Endrödy u. a. „2D stepping microdrive for hyperspectral imaging“. In: *OMN 2014 proceedings*. Hrsg. von José Luis Sánchez-Rojas und Riccardo Brama. Piscataway, N.J.: IEEE, 2014, 95170K. ISBN: 978-0-9928-4140-9. DOI: 10.1117/12.2178867.
- [End+14b] Csaba Endrödy u. a. „Two-dimensional stepping drive for hyperspectral systems“. In: *MME 2014 - Micromechanics and Microsystems Europe Conference*. Istanbul, Turkey, 2014.
- [End+15a] Csaba Endrödy u. a. „2D stepping drive for hyperspectral systems“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 25.7 (2015), S. 74002. ISSN: 0960-1317.
- [End+15b] Csaba Endrödy u. a. „Linear micromechanical stepping drive for pinhole array positioning“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 25.5 (2015), S. 55009. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/25/5/055009.
- [End+15c] Csaba Endrödy u. a. „Zweiachsiger Mikroschrittaktor mit großem Stellweg für die Positionierung von Blenden-Arrays“. In: *MikroSystemTechnik Kongress 2015*. VDE Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8007-4100-7.
- [Eri+08] M. A. Erismis u. a. „A Low-Voltage Large-Displacement Large-Force Inchworm Actuator“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 17.6 (2008), S. 1294–1301. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.2004852.
- [Eri+09] Mehmet A. Erismis u. a. „Saw-tooth vernier ratchets for electrostatic inchworm actuators“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 156.1 (2009), S. 66–71. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2009.02.017.
- [GDH13] B. Goj, L. Dressler und M. Hoffmann. „Resonant probing system comprising a high accurate uniaxial nanoprobe and a new evaluation unit“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23.9 (2013), S. 095012. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/23/9/095012.
- [GHS13] Adrian Grewe, Matthias Hillenbrand und Stefan Sinzinger. „Hyperspectral imaging sensor systems using tunable lenses“. In: *Photonik* 8 (2013), S. 2–5. ISSN: 1432-9778.
- [Goj15] Boris Goj. „Entwicklung eines dreiachsigen taktilen Mikromesssystems in Silicium-Technologie“. Diss. Ilmenau, Deutschland: Technische Universität Ilmenau, 2015. URL: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=25600> (besucht am 21.12.2015).
- [Gre+] Adrian Grewe u. a. „Advanced phase plates for confocal hyperspectral imaging systems“. In: *Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology*, AW1B.2. DOI: 10.1364/AIO.2013.AW1B.2.
- [Gre+13] Adrian Grewe u. a. „Opto-mechanical microsystems for hyperspectral imaging sensors“. In: *Von Bauelementen zu Systemen*. Berlin und Offenbach: VDE-Verl., 2013, S. 52–53. ISBN: 978-3-8007-3555-6.
- [Gu+06] Lei Gu u. a. „Single-wafer-processed nano-positioning XY-stages with trench-sidewall micromachining technology“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.7 (2006), S. 1349–1357. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/16/7/032.

- [GYM06] Yuval Garini, Ian T. Young und George McNamara. „Spectral imaging: Principles and applications“. In: *Cytometry Part A* 69A.8 (2006), S. 735–747. ISSN: 1552-4922. DOI: 10.1002/cyto.a.20311.
- [HG11] S. Hansen und H. H. Gatzert. „Development and Fabrication of Linear and Multi-Axis Microactuators“. In: *Design and Manufacturing of Active Microsystems*. Hrsg. von Stephanus Büttgenbach, Arne Burisch und Jürgen Hesselbach. Microtechnology and MEMS. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 225–244. ISBN: 978-3-642-12902-5. DOI: 10.1007/978-3-642-12903-2_13.
- [HGS12] Matthias Hillenbrand, Adrian Grewe und Stefan Sinzinger. „Parallelized chromatic confocal systems enable efficient spectral information coding“. In: *SPIE Newsroom* (2012). ISSN: 18182259. DOI: 10.1117/2.1201301.004642.
- [Hil+12] M. Hillenbrand u. a. „Chromatic information coding in optical systems for hyperspectral imaging and chromatic confocal sensing“. In: *SPIE Optical Systems Design*. SPIE Proceedings. SPIE, 2012, S. 85500D. DOI: 10.1117/12.981147.
- [Hil+13a] Matthias Hillenbrand u. a. „Parallelized chromatic confocal sensor systems“. In: *SPIE Optical Metrology 2013*. Hrsg. von Peter H. Lehmann, Wolfgang Osten und Armando Albertazzi. SPIE Proceedings. SPIE, 2013, S. 87880V. DOI: 10.1117/12.2020334.
- [Hil+13b] Matthias Hillenbrand u. a. „Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing“. In: *Optics letters* 38.22 (2013), S. 4694–4697. ISSN: 1539-4794. DOI: 10.1364/OL.38.004694.
- [Hil+15] Matthias Hillenbrand u. a. „Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays“. In: *Applied Optics* 54.15 (2015), S. 4927. ISSN: 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.54.004927.
- [HNK10] Matthew A. Hopcroft, William D. Nix und Thomas W. Kenny. „What is the Young’s Modulus of Silicon?“ In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19.2 (2010), S. 229–238. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2039697.
- [Jud06] Jack W. Judy. „Microactuators“. In: *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*. Hrsg. von Jan G. Korvink und Oliver Paul. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 751–803. ISBN: 978-3-540-21117-4. DOI: 10.1007/978-3-540-33655-6_14.
- [Kim+05] Sang-Ho Kim u. a. „High-resolution inchworm linear motor based on electrostatic twisting microactuators“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15.9 (2005), S. 1674–1682. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/15/9/009.
- [Kit95] C. R. Kitchin. *Optical astronomical spectroscopy*. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 1995. ISBN: 9780750303460.
- [Kla+13] K. Klaus u. a. „Verfahren und Anordnung zur schnellen, orts aufgelösten, flächigen, spektroskopischen Analyse, bzw. zum Spectral Imaging oder zur 3D-Erfassung mittels Spektroskopie“. DE 10 2006 007 172. Jan. 2013. URL: <http://google.com/patents/DE102006007172B4?cl=de>.
- [Kwo+03] Ho Nam Kwon u. a. „Design and characterization of a micromachined inchworm motor with thermoelastic linkage actuators“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 103.1-2 (2003), S. 143–149. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/S0924-4247(02)00308-4.

- [Kwo+06] Ho Nam Kwon u. a. „MicroXY stages with spider-leg actuators for two-dimensional optical scanning“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 130-131 (2006), S. 468–477. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2005.10.037.
- [Lae+] F. Laerme u. a. „Bosch deep silicon etching: improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications“. In: *Technical Digest - IEEE International MEMS 99 Conference*. S. 211–216. DOI: 10.1109/MEMSYS.1999.746812.
- [Lai+05] Shouliang Lai u. a. „Notch reduction in silicon on insulator (SOI) structures using a time division multiplex etch processes“. In: *MOEMS-MEMS Micro & Nanofabrication*. Hrsg. von Mary-Ann Maher und Harold D. Stewart. SPIE Proceedings. SPIE, 2005, S. 33–38. DOI: 10.1117/12.582764.
- [Las+10] Karolina Laszczyk u. a. „A two directional electrostatic comb-drive X–Y micro-stage for MOEMS applications“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 163.1 (2010), S. 255–265. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2010.06.020.
- [Lee13] Benjamin Lee. *DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology*. Dallas, Texas 75243 USA, Okt. 2013. URL: <http://www.ti.com/lit/pdf/dlpa008> (besucht am 13.04.2016).
- [LHM00] C.S.B. Lee, S. Han und N. C. MacDonald. „Single crystal silicon (SCS) XY-stage fabricated by DRIE and IR alignment“. In: *IEEE Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Jan. 2000, S. 28–33. DOI: 10.1109/MEMSYS.2000.838485.
- [LS93] F. Laermer und A. Schilp. „Method of anisotropically etching silicon“. Patent US5501893 A (US). Nov. 1993. URL: <http://www.google.de/patents/US5501893>.
- [Lyo+02] Robbe C. Lyon u. a. „Near-infrared spectral imaging for quality assurance of pharmaceutical products: Analysis of tablets to assess powder blend homogeneity“. In: *AAPS PharmSciTech* 3.3 (2002), S. 1–15. ISSN: 1530-9932. DOI: 10.1007/BF02830615.
- [Meh+15] H. Mehner u. a. „A passive microsystem for detecting multiple acceleration events beyond a threshold“. In: *Microelectronic Engineering* 145 (2015), S. 104–111. ISSN: 01679317. DOI: 10.1016/j.mee.2015.03.023.
- [Mit+03] M. Mita u. a. „A micromachined impact microactuator driven by electrostatic force“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 12.1 (2003), S. 37–41. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2002.802906.
- [Nak+95] K. Nakamura u. a. „An observation of breakdown characteristics on thick silicon oxide“. In: *Power Semiconductor Devices and ICs, 1995. ISPSD '95., Proceedings of the 7th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. Mai 1995, S. 374–379. DOI: 10.1109/ISPSD.1995.515066.
- [Nat] National Instruments. *NI 9264 Datasheet*. URL: http://www.ni.com/pdf/manuals/374404a_02.pdf (besucht am 05.06.2016).
- [Olf+13] Mohammad Olfatnia u. a. „Large range dual-axis micro-stage driven by electrostatic comb-drive actuators“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23.10 (2013), S. 105008. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/23/10/105008.

- [PB13] I. Penskiy und S. Bergbreiter. „Optimized electrostatic inchworm motors using a flexible driving arm“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23.1 (2013), S. 015018. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/23/1/015018.
- [Sar+10] Edin Sarajlic u. a. „High-Performance Shuffle Motor Fabricated by Vertical Trench Isolation Technology“. In: *Micromachines* 1.2 (2010), S. 48–67. ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi1020048.
- [SB00] J. J. Sniegowski und M. P. de Boer. „IC-Compatible Polysilicon Surface Micromachining“. In: *Annual Review of Materials Science* 30.1 (2000), S. 299–333. ISSN: 0084-6600. DOI: 10.1146/annurev.matsci.30.1.299.
- [Shu+04] M. V. Shutov u. a. „Electrostatic inchworm microsystem with long range translation“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 114.2-3 (2004), S. 379–386. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2003.12.022.
- [Sin15] Stefan Sinzinger. *Optische Mikrosysteme für ultrakompakte hyperspektrale Sensorik : Op-MiSen: Teilvorhaben: Systemintegration und Anwendung, Abschlussbericht zum Verbundprojekt*. Ilmenau, 2015. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb16/845130021.pdf> (besucht am 22.04.2016).
- [Son03] Sony Corporation, Hrsg. *ICX415AL Sony CCD-Sensor*. 1. Dez. 2003. URL: www.npk-photonica.ru/images/icx415al.pdf (besucht am 21.05.2016).
- [Ste+12] Stefan Steiner u. a. „Angular bandpass filters based on dielectric resonant waveguide gratings“. In: *Optics express* 20.20 (2012), S. 22555–22562. ISSN: 1094-4087.
- [Tas+03] N. R. Tas u. a. „Design, fabrication and testing of laterally driven electrostatic motors employing walking motion and mechanical leverage“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13.1 (2003), N6–N15. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/13/1/402.
- [TE] Risaku Toda und Eui-Hyeok Yang. „Zero-power latching, large-stroke, high-precision linear microactuator for lightweight structures in space“. In: *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, S. 726–729. DOI: 10.1109/MEMSYS.2006.1627902.
- [Tex] Texas Instruments Incorporated. *DLP-Produkte & MEMS: Überblick über die TI DLP-Technologie*. URL: http://www.ti.com/lscds/ti_de/analog/dlp/overview.page (besucht am 14.04.2016).
- [Til+] Adam K. Tilling u. a. „Remote Sensing to Detect Nitrogen and Water Stress in Wheat“. In: *Proceedings of the 13th ASA Conference*. URL: http://www.regional.org.au/au/asa/2006/plenary/technology/4584_tillingak.htm (besucht am 12.11.2014).
- [Tip87] Paul Allen Tipler. *College physics*. New York, NY: Worth Publishers, 1987. ISBN: 9780879012687.
- [TY07] Risaku Toda und Eui-Hyeok Yang. „A normally latched, large-stroke, inchworm microactuator“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.8 (2007), S. 1715–1720. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/17/8/039.
- [YHP02] R. Yeh, S. Hollar und K.S.J. Pister. „Single mask, large force, and large displacement electrostatic linear inchworm motors“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 11.4 (2002), S. 330–336. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2002.800937.

Anhang A – Messreihe des linearen Mikroschrittaktors mit schnellen Ansteuersignalen

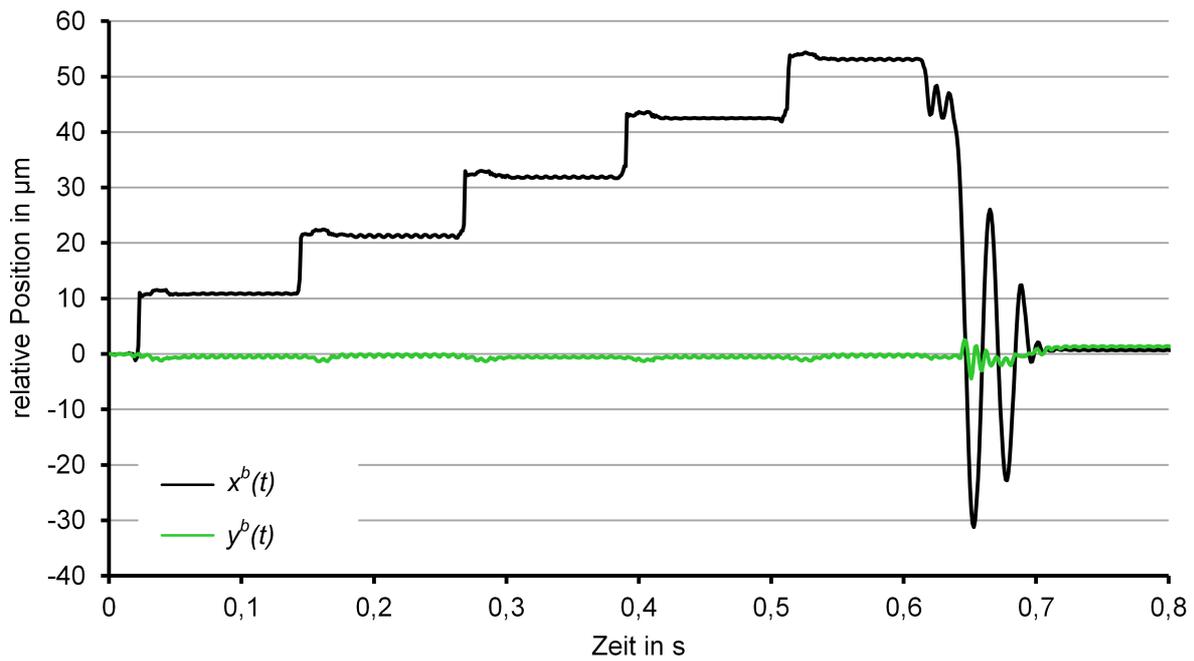


Abbildung A.1: $f_a = 8,32 - 5$ Schritte in $+x$ -Richtung und einmalige Initialisierung

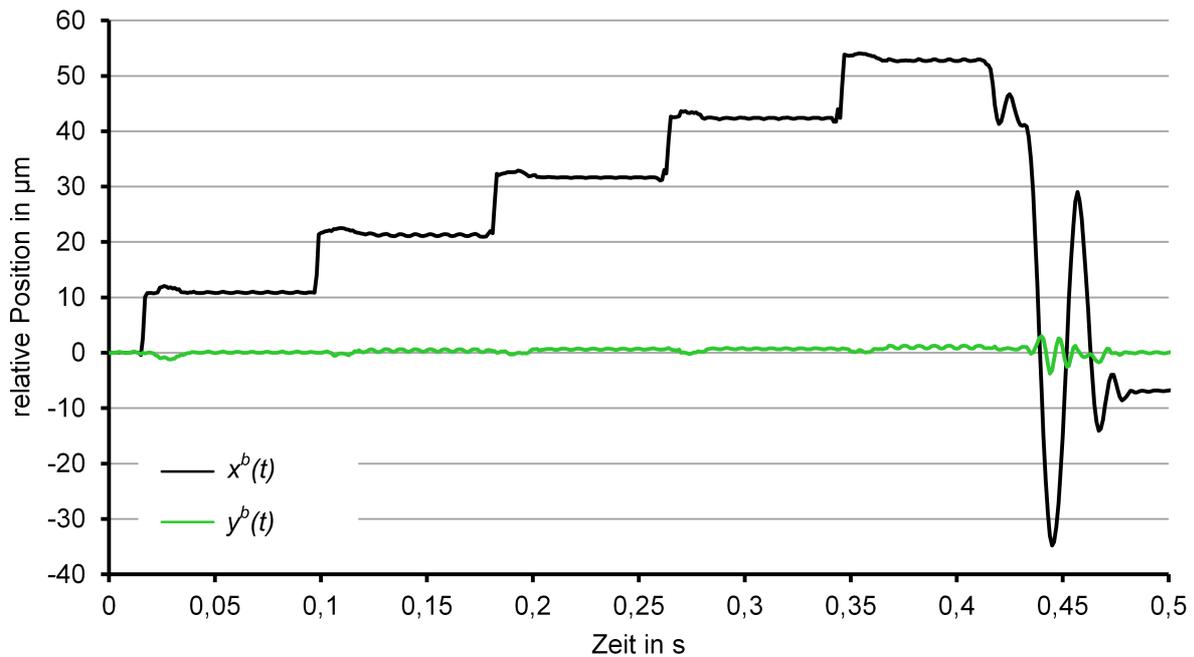


Abbildung A.2: $f_a = 12,5 - 5$ Schritte in $+x$ -Richtung und einmalige Initialisierung

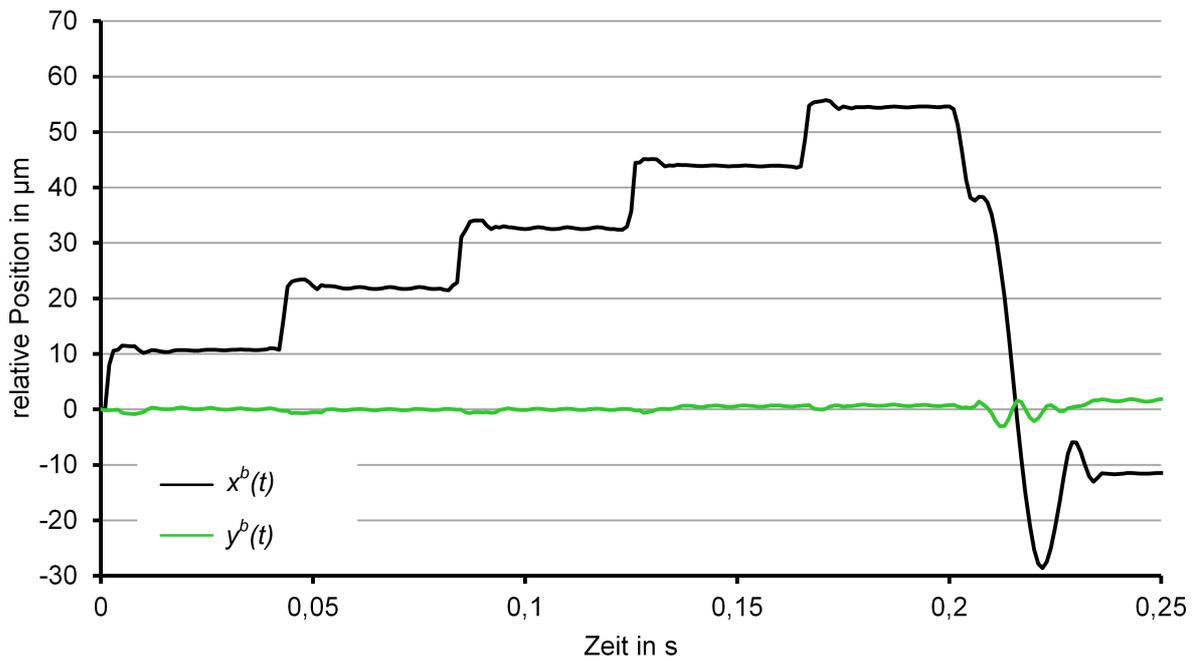


Abbildung A.3: $f_a = 25 - 5$ Schritte in $+x$ -Richtung und einmalige Initialisierung

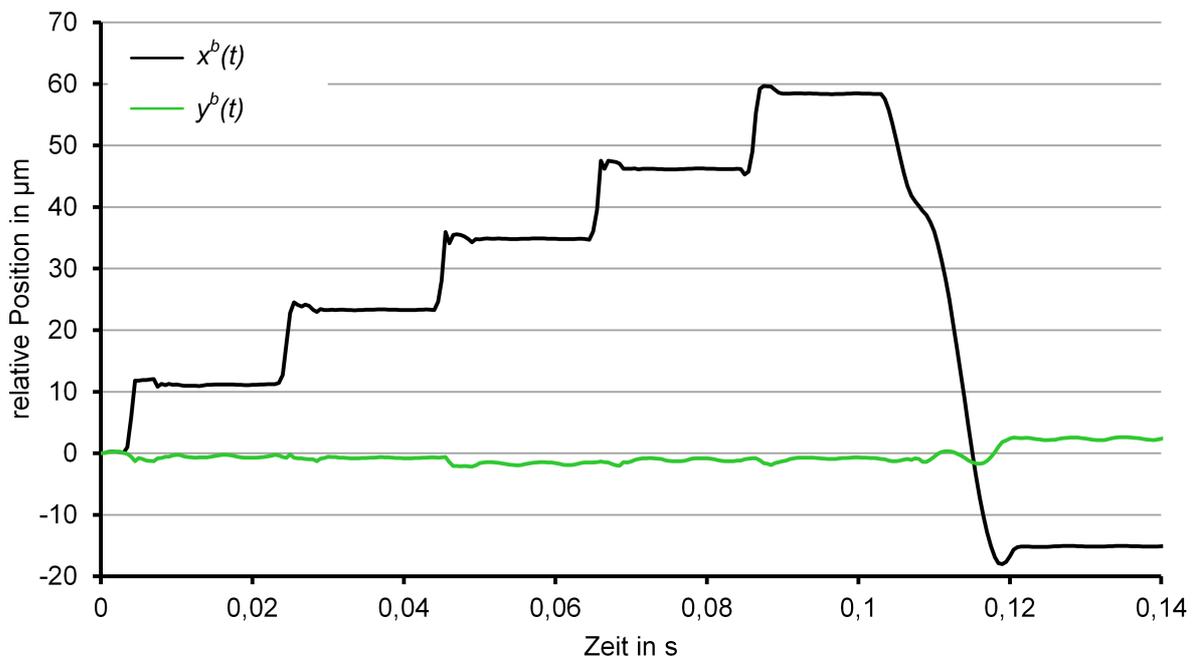


Abbildung A.4: $f_a = 50 - 5$ Schritte in $+x$ -Richtung und einmalige Initialisierung

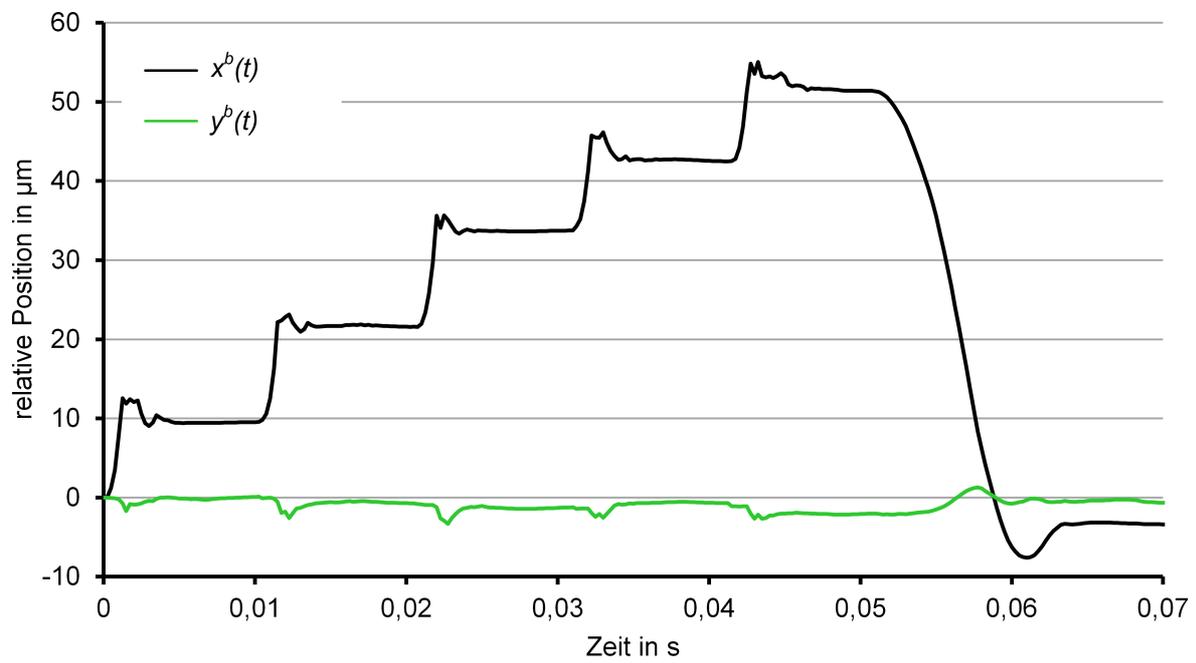


Abbildung A.5: $f_a = 100 - 5$ Schritte in $+x$ -Richtung und einmalige Initialisierung

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung der Technischen Universität Ilmenau

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

1. HANNES MEHNER: FEM-Berechnung der Federstrukturen, Entwicklung des beidseitigen Lithographieprozesses für Nickelgalvanik.
2. BORIS GOJ: Übertragung der SOI-Technologie, FEM-Berechnung der Federstrukturen.
3. PETER MAINHARDT: Programmierung der Ansteuerung des HAS.
4. ADRIAN GREWE: Entwurf des optischen Systems, Übermittlung der optischen Anforderungen.
5. MATTHIAS HILLENBRAND: Entwurf des optischen Systems, Übermittlung der optischen Anforderungen.
6. ROBERT WEISS: Charakterisierung linearer Mikroschrittaktoren, Idee der gedrehten Blenden-Array-Anordnung.
7. LOTHAR DRESSLER: Entwurf und Umsetzung der Spannungsverstärker für die Ansteuerung der Aktoren.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Ilmenau, 21. Dezember 2016

Csaba Endrődy