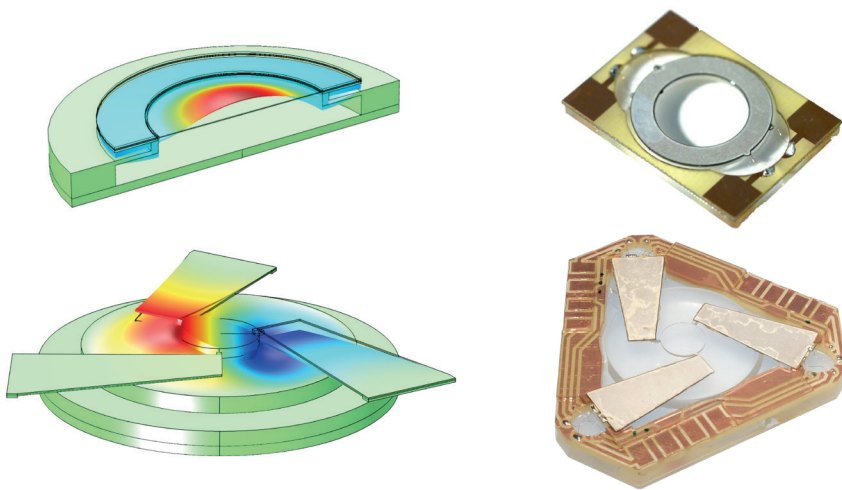


## Aberrationskorrigierende Linsen und adaptive Prismen mit integrierter Piezoaktorik



IMTEK, Universität Freiburg

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der  
Technischen Fakultät der  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

# **Aberrationskorrigierende Linsen und adaptive Prismen mit integrierter Piezoaktorik**

Florian Lemke

November 2020



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau  
Technische Fakultät  
Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK  
Professur für Mikroaktorik

Adresse: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK)  
Professur für Mikroaktorik  
Georges-Köhler-Allee 102  
79110 Freiburg

Dekan: Prof. Dr. Rolf Backofen

Gutachter: Prof. Dr. Ulrike Wallrabe  
Prof. Dr. Dennis Hohlfeld

Datum der Disputation: 01.02.2021

Titelbild: Simulierte Oberflächendeformationen (links) und funktionsfähige Prototypen (rechts) der in dieser Arbeit entwickelten und untersuchten adaptiven Linsen (oben) und Prismen (unten).

Microactuators – Design and Technology  
edited by Prof. Dr. Ulrike Wallrabe

Volume 19

**Florian Lemke**

**Aberrationskorrigierende Linsen und adaptive Prismen  
mit integrierter Piezoaktorik**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2021,

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7994-4

ISSN 2567-0921

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Zusammenfassung

In modernen Mikroskopen werden zum dreidimensionalen Scannen einer Probe häufig Translationstische oder eine Kombination aus verfahrbaren Linsen und Scanspiegeln verwendet. Aufgrund der mechanischen Trägheit der Tische und der Linsen ist die Geschwindigkeit solcher Aufbauten begrenzt und durch die reflektierenden Eigenschaften der Scanspiegel ist eine Realisierung auf kleinstem Raum als linearer Strahlengang nicht möglich. Soll darüber hinaus die Abbildungsqualität durch die Korrektur von Proben-induzierten Abbildungsfehlern (Aberrationen) verbessert werden, sind zusätzliche Bauteile, wie beispielsweise ein deformierbarer Spiegel oder räumlicher Lichtmodulator (SLM), notwendig, die das Gesamtsystem größer, komplexer und teurer machen.

Adaptive optische Elemente haben das Potential, derartige Aufgaben mit hoher Geschwindigkeit und auf kleinstem Raum zu realisieren. Zu diesem Zwecke wurden in dieser Arbeit zwei solcher Elemente entwickelt: Dies sind eine schnelle adaptive Linse zur Brechkraftmodulation und gleichzeitiger Aberrationskorrektur sowie ein biaxial scannendes Prisma.

Die adaptive Linse basiert auf zwei individuell ansteuerbaren Piezorringen, die mit einer Dünnglasmembran verklebt werden, unter der sich ein optisches Fluid befindet. Durch die Kontraktion des einen und die Expansion des anderen Piezorings kann die Membran kontrolliert gebogen werden, wodurch sich die Brechkraft der Linse einstellen lässt. Durch eine gleichzeitige Kontraktion beider Ringe wird dagegen ein Knicken der Membran erzielt, was einerseits die sphärischen Linseneigenschaften beeinflusst und andererseits den Brechkraftbereich der Linse erweitert. Eine Kombination aus beiden Ansteuerungsmodi ermöglicht die schnelle und simultane Regelung der Brechkraft und der sphärischen Aberration innerhalb eines durch die Aktorgeometrie vorgegebenen Arbeitsbereichs.

Für ein tief gehendes Verständnis und die Optimierung der Linse wurde eine FEM-Simulation entwickelt, welche abhängig von der Linsengeometrie die ansteuerbaren Brechkraft- und Asphärizitätsbereiche ermittelt. Um das vollständige nichtlineare piezoelektrische Verhalten zu berücksichtigen, wurden dafür der nichtlineare piezoelektrische Koeffizient  $d_{31}$ , die Hysterese und die Kriecheffekte des Piezomaterials gemessen und in der Simulation integriert. Die hergestellten Linsen mit freien Aperturen zwischen 14 mm und 10 mm erzielten mit der Simulation übereinstimmende Brechkraftbereiche zwischen rund  $\pm 4,5 \text{ m}^{-1}$  und bis zu  $\pm 9 \text{ m}^{-1}$ , wobei sich abhängig von der Aktorgeometrie die Korrekturbereiche für die sphärischen Aberrationen

einstellen ließen. Es konnten zudem schnelle Ansprechzeiten von  $< 0,4$  ms und Resonanzfrequenzen für kleine Aperturen von  $> 1$  kHz nachgewiesen werden.

Das adaptive Prisma, das zum lateralen Scannen eingesetzt werden soll, nutzt drei individuell ansteuerbare piezoelektrische Biegeaktoren, welche ein steifes Glasfenster biaxial verkippen. Die Verkipfung führt auch hier in Kombination mit einem Fluid zu einer Brechung des Lichtes, sodass dieses nach Durchlaufen des Prismas unter einem Scanwinkel austritt. Durch eine axiale Verschiebung des Glasfensters kann darüber hinaus eine Phasenverschiebung der Wellenfront erzielt werden. Auch für die Prismen wurde eine FEM-Simulation entwickelt, welche eine Vorhersage der maximal erreichbaren Scanwinkel in Abhängigkeit des exakten mechanischen Aufbaus ermöglichte und mit deren Hilfe der Scanbereich optimiert wurde.

Es wurden zwei unterschiedliche Prismendesigns mit einer freien Apertur von jeweils 7 mm evaluiert: Das erste, auf große Winkel optimierte Prisma mit einer Bauteilgröße von ca.  $58 \times 51$  mm<sup>2</sup> erzielte Scanwinkel von rund  $\pm 6,4^\circ$  bei Antwortzeiten von 2,5 ms. Das zweite, auf Kompaktheit optimierte Prisma mit einem deutlich reduzierten Durchmesser von 33 mm ermöglichte maximale Scanwinkel von etwa  $\pm 4^\circ$  mit Antwortzeiten von 4 ms. Mit Hilfe eines einfachen Ansteuerungsmodells zur Kontrolle von Scanwinkel und Scanrichtung wurde zudem die Linearität des Systems demonstriert.

Durch den Einsatz der in dieser Arbeit entwickelten Elemente können zukünftig einfachere und kompaktere 3D-Scansysteme, zum Beispiel für Konfokalmikroskope, mit hoher Geschwindigkeit und hoher optischer Qualität realisiert werden, wie für das axiale Scannen mit gleichzeitiger Aberrationskorrektur von unseren Forschungspartnern an der TU Dresden in der Gruppe von Prof. Czarske bereits demonstriert wurde.

# Abstract

In modern microscopes, translation stages or a combination of movable lenses and scanning mirrors are often used for three-dimensional scanning of a sample. Due to the inertia of the stages and the lenses, the speed of such setups is limited and due to the reflective properties of the scanning mirrors, it is not possible to realize them as a linear and compact beam path. If, in addition, the imaging quality needs to be improved by correcting specimen-induced imaging errors (aberrations), additional components, such as a deformable mirror or spatial light modulator (SLM), are required, which make the overall system larger, more complex and more expensive.

Adaptive optical elements have the potential to realize such tasks at high speed and in a small space. For this purpose, two such elements were developed in this thesis: A fast adaptive lens for focal power modulation with simultaneous aberration correction and a biaxial prism for lateral scanning.

The adaptive lens is based on two individually controllable piezo rings glued to a thin glass membrane under which an optical fluid is located. On the one hand, the contraction of one of the piezo rings and the expansion of the other piezo ring allows the membrane to bend in a controlled manner allowing to adjust the refractive power of the lens. On the other hand, the simultaneous contraction of both rings causes the membrane to buckle, which influences the spherical lens properties and additionally expands the refractive power range of the lens. A combination of both control modes allows simultaneous control of the refractive power and spherical aberrations within a working range defined by the actuator geometry.

For an in-depth understanding and optimization of the lens, an FEM simulation was developed, which determines the controllable focal power and aspherical tuning ranges depending on the lens geometry. In order to consider the complete nonlinear piezoelectric behavior, the nonlinear piezoelectric coefficient  $d_{31}$ , the hysteresis and the creep effects of the piezo material were measured and integrated into the simulation. The manufactured lenses with free apertures between 14 mm and 10 mm achieved refractive power ranges between about  $\pm 4.5 \text{ m}^{-1}$  and up to  $\pm 9 \text{ m}^{-1}$ , which were in agreement with the simulation. Thereby, the correction ranges for the spherical aberrations could be adjusted in dependence of the actuator geometry. Furthermore, fast response times of  $< 0.4 \text{ ms}$  and resonance frequencies for small apertures of  $> 1 \text{ kHz}$  have been demonstrated.

The adaptive prism for lateral scanning uses three individually controllable piezoelectric bending actuators, which biaxially tilt a rigid glass window. In combination with

a fluid, the tilting leads to a refraction so that light exits at a scanning angle after passing through the prism. In addition, an axial displacement of the glass window can achieve a phase shift of the wavefront. Also for the prisms, an FEM simulation was developed, which allowed a prediction of the maximum achievable scan angles depending on the exact mechanical construction and which was used for optimizing the scan range.

Two different prism designs with free apertures of 7 mm were evaluated: The first prism optimized for large angles with a component size of approx. 58 x 51 mm<sup>2</sup> achieved scan angles of around  $\pm 6.4^\circ$  with response times of 2.5 ms. The second prism optimized for a compact size with a significantly reduced diameter of 33 mm enabled maximum scan angles of approximately  $\pm 4^\circ$  with response times of 4 ms. Using a simple control scheme for the scan angle and scan direction, the system proved to be linear.

In the future, the optical elements developed in this work will allow simple and more compact 3D scanning systems with high speed and high optical quality, for example for confocal microscopes as has already been demonstrated for axial scanning and simultaneous aberration correction by our research collaborates at the TU Dresden in the group of Prof. Czarske.

# Nomenklatur

## Abkürzungen/Anglizismen

| Abkürzung       | Beschreibung                                                                             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Buckling</i> | Knicken (vergl. Eulerscher Knickstab)                                                    |
| <i>Bottom</i>   | Vorderseitenkontakt der unteren ( <i>bottom</i> ) Piezokeramik                           |
| <i>GND</i>      | Rückseitenkontakt der Piezokeramik ( <i>ground</i> )                                     |
| <i>Hatch</i>    | Schraffur - Großflächiger Materialabtrag durch einen Laser                               |
| <i>Top</i>      | Vorderseitenkontakt der oberen ( <i>top</i> ) Piezokeramik                               |
| CC200           | Polyurethan Crystal Clear 200                                                            |
| CF50            | Polyurethan Clear Flex 50                                                                |
| EWOD            | Elektrobenetzung auf Dielektrika ( <i>electro-wetting on dielectrics</i> )               |
| FEM             | Finite-Elemente-Methode (Simulation)                                                     |
| FR2             | Faserverbundwerkstoff aus Papier und Phenolharz (Hartpapier)                             |
| LC              | Flüssigkristalle ( <i>liquid crystals</i> )                                              |
| MEMS            | Mikro-elektromechanische Systeme ( <i>micro electro mechanical systems</i> )             |
| PCB             | Leiterplatte ( <i>printed circuit board</i> )                                            |
| PLA             | Polylactid (Kunststoff für 3D-Druck)                                                     |
| POM             | Polyoxymethylen (harter Kunststoff)                                                      |
| PZT             | Blei-Zirkonat-Titanat (Piezokeramik, $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ ) |
| SLM             | Räumlicher Lichtmodulator ( <i>spatial light modulator</i> )                             |

## Griechische Buchstaben

| Symbol                        | Beschreibung                                        | Einheit                            |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|
| $\alpha$                      | Kippwinkel des Glasfensters des Prismas             | $^\circ$                           |
| $\alpha_0 / \dots / \alpha_4$ | Fitparameter der Oberflächenmessung                 | $\text{m} / \dots / \text{m}^{-3}$ |
| $\alpha_{\text{Glas}}$        | Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Glases       | $\mu\text{m}$                      |
| $\alpha_{\text{Piezo}}$       | Thermischer Ausdehnungskoeffizient der Piezokeramik | $\mu\text{m}$                      |
| $\alpha_{1,x} / \alpha_{1,y}$ | Verkipfung (Steigung) entlang der x/y-Richtung      | mm                                 |
| $\alpha_x / \alpha_y$         | Kippwinkel entlang der x/y-Achse                    | mm                                 |
| $\beta$                       | Scanwinkel des Prismas                              | $^\circ$                           |
| $\Delta w$                    | Weglängendifferenz im Fluid                         | nm                                 |
| $\delta$                      | Einfalls-/Ausfallswinkel                            | $^\circ$                           |
| $\Delta_{\text{opt}}$         | Optische Pfaddifferenz                              | nm                                 |

|                                        |                                                           |                      |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|
| $\delta_{\text{Phase}}$                | Phasenverschiebung                                        | rad                  |
| $\epsilon$ ( $\epsilon_{\text{rem}}$ ) | Mechanische Dehnung (remanente Dehnung)                   | –                    |
| $\gamma$                               | Piezoelektrischer Kriechkoeffizient                       | –                    |
| $\gamma_{1,2}$                         | Dämpfungsrate                                             | Hz                   |
| $\kappa$                               | Konische Konstante                                        | –                    |
| $\lambda$                              | Wellenlänge                                               | nm                   |
| $\nu$                                  | Poissonzahl (Querkontraktionszahl)                        | –                    |
| $\phi$                                 | Angelegte Phase bei der el. Ansteuerung der Prismen       | rad                  |
| $\tau$                                 | Zeitkonstante für einen exponentiellen Spannungsverlauf   | $\frac{1}{\text{s}}$ |
| $\theta$                               | Kipprichtung                                              | rad                  |
| $\theta_1/\dots/\theta_4$              | Hilfswinkel zur Beschreibung von Einfalls-/Ausfallswinkel | °                    |
| $\theta_k$                             | Kritischer Winkel für Totalreflexion                      | °                    |
| $\zeta$                                | Dämpfung                                                  | –                    |

## Lateinische Buchstaben

| Symbol               | Beschreibung                                                     | Einheit                       |
|----------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $a$                  | Biegekoeffizient/Fitparameter                                    | $\text{V}^{-1}/-$             |
| $A/A_{\text{max}}$   | (Max.) Amplitude bei der el. Ansteuerung der Prismen             | V                             |
| $a_{\text{Gelenk}}$  | Gelenklänge (Abstand zw. Aktor und Glasfenster)                  | mm                            |
| $a_{\text{Piezo}}$   | Abstand zwischen den neutralen Fasern der Piezoringe             | $\mu\text{m}$                 |
| $A_{\text{Stab}}$    | Querschnittsfläche eines Stabes                                  | $\text{m}^2$                  |
| $b$                  | Knickkoeffizient/Fitparameter                                    | $(\text{mV})^{-1/2}/-$        |
| $b_{\text{fixiert}}$ | Breite des Aktors am geklebten Ende (am Glasrahmen)              | mm                            |
| $b_{\text{frei}}$    | Breite des Aktors am freien Ende (im Zentrum)                    | mm                            |
| $b_{\text{Gelenk}}$  | Breite des in die Fluidkammer integrierten Gelenks               | mm                            |
| $b_{\text{Kante}}$   | Breite der Klebekante                                            | $\mu\text{m}$                 |
| $C$                  | Kapazität                                                        | nF                            |
| $D$                  | Durchmesser                                                      | m                             |
| $d$                  | Dicke/Schichtdicke/Elektrodenabstand der Piezokeramik            | mm                            |
| $D_{\text{außen}}$   | Außendurchmesser Piezoring                                       | mm                            |
| $d_{\text{Glas}}$    | Glasdicke                                                        | $\mu\text{m}$                 |
| $D_{\text{innen}}$   | Innendurchmesser Piezoring                                       | mm                            |
| $d_{\text{Kleber}}$  | Dicke der Klebeschicht                                           | $\mu\text{m}$                 |
| $D_{\text{Piezo}}$   | Außendurchmesser des Spiral-Piezoaktors                          | mm                            |
| $d_{\text{Piezo}}$   | Dicke der Piezokeramik                                           | $\mu\text{m}$                 |
| $d_{\text{PZT}}$     | Piezoelektrischer Koeffizient (allgemein)                        | $\frac{\text{pm}}{\text{V}}$  |
| $d_{31}$             | Piezoelektrischer Koeff. (orthogonal zur Polarisierungsrichtung) | $\frac{\text{pm}}{\text{V}}$  |
| $d_{33}$             | Piezoelektrischer Koeff. (parallel zur Polarisierungsrichtung)   | $\frac{\text{pm}}{\text{V}}$  |
| $E$                  | Elektrisches Feld                                                | $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ |
| $E_0$                | Benötigtes el. Feld für Knickzustand                             | $\frac{\text{mm}}{\text{kV}}$ |

|                      |                                                                |                                 |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $E_C/E_S$            | Koerzitivfeldstärke/Sättigungsfeldstärke                       | $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$   |
| $E_{\text{max}}$     | Maximal erlaubtes elektrisches Feld                            | $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$   |
| $E_{\text{min}}$     | Minimales (also maximal negatives) erlaubtes elektrisches Feld | $\frac{\text{mm}}{\text{kV}}$   |
| $f$                  | Brennweite der Linse                                           | mm                              |
| $F/F_{\text{krit}}$  | Kraft/Kritische Knicklast                                      | N                               |
| $f^{-1}$             | Brechkraft                                                     | $\frac{1}{\text{m}}$            |
| $f_0$                | Eigenfrequenz                                                  | Hz                              |
| $f_1/f_2$            | Resonanzfrequenzen                                             | Hz                              |
| $h$                  | Auslenkung an der Spitze (Biegewandler)                        | mm                              |
| $h_{\text{Gelenk}}$  | Höhe des in die Fluidkammer integrierten Gelenks               | mm                              |
| $h_{\text{Kante}}$   | Höhe der Klebekante                                            | $\mu\text{m}$                   |
| $I$                  | Flächenträgheitsmoment                                         | $\text{m}^4$                    |
| $K$                  | Plattenfestigkeit                                              | N m                             |
| $L$                  | Länge                                                          | m                               |
| $l (l_0)$            | Piezolänge (Länge zu Beginn)                                   | mm                              |
| $l_{\text{Gelenk}}$  | Gelenklänge unterhalb des Aktors (Klebefläche)                 | mm                              |
| $l_{\text{Piezo}}$   | Länge des Piezoaktors                                          | mm                              |
| $n$                  | Brechungsindex                                                 | –                               |
| $N_{\text{krit}}$    | Kritische Streckenlast                                         | $\frac{\text{N}}{\text{m}}$     |
| $P$                  | Polarisierung/Polarisierungsrichtung                           | $\frac{\text{Å s}}{\text{m}^2}$ |
| $P_{\text{rem}}/P_S$ | Remanente Polarisierung/Sättigungspolarisierung                | $\frac{\text{Å s}}{\text{m}^2}$ |
| $R$                  | Radius/Krümmungsradius                                         | m                               |
| $R_1/R_2$            | Kugelradius der Linsenvorder- und Linsenrückseite              | m                               |
| $r_{\text{außen}}$   | Außenradius Piezoring                                          | mm                              |
| $r_{\text{Glas}}$    | Glasfensterradius des Prismas                                  | $\mu\text{m}$                   |
| $r_{\text{innen}}$   | Innenradius Piezoring                                          | mm                              |
| $r_{\text{max}}$     | Evaluierungsradius für sphärischen Zernike-Koeffizienten       | mm                              |
| $s$                  | Lateraler Strahlversatz beim Prisma                            | $\mu\text{m}$                   |
| $S (S_{x,y,z})$      | Mechanische Dehnung (entlang einer bestimmten Achse)           | –                               |
| $s^E$                | Elastizitätskonstante bei konstanter elektrischer Feldstärke   | $\frac{\text{m}^2}{\text{N}}$   |
| $T$                  | Mechanische Spannung                                           | $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$   |
| $t$                  | Zeit                                                           | s                               |
| $t_s$                | Zeitkonstante für piezoel. Kriechverhalten                     | s                               |
| $T_C$                | Curie-Temperatur                                               | °C                              |
| $U$                  | Elektrische Spannung                                           | V                               |
| $U_{\text{off}}$     | Offset-Spannung bei der el. Ansteuerung der Prismen            | V                               |
| $U_{\text{ss}}$      | Spitze-Spitze-Spannungsbereich (el. Ansteuerung der Prismen)   | V                               |
| $U_{n+}/U_{n-}$      | Spannung an oberer(+)/unterer(–) Piezoschicht von Balken $n$   | V                               |
| $Y$                  | E-Modul ( <i>Young's modulus</i> )                             | MPa                             |
| $z(r)$               | Oberflächenform im Abstand $r$ vom Linsenzentrum               | mm                              |
| $Z_0^0$              | Zernike-Koeffizient                                            | $\mu\text{m}$                   |



# Inhaltsverzeichnis

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Zusammenfassung</b>                                                  | <b>i</b>   |
| <b>Abstract</b>                                                         | <b>iii</b> |
| <b>Nomenklatur</b>                                                      | <b>v</b>   |
| <br>                                                                    |            |
| <b>Vorwort und Projekteinordnung</b>                                    | <b>1</b>   |
| <br>                                                                    |            |
| <b>I Adaptive aberrationskorregierende Glasmembran-Linsen</b>           | <b>5</b>   |
| <br>                                                                    |            |
| <b>1 Einleitung und Grundlagen</b>                                      | <b>7</b>   |
| 1.1 Überblick . . . . .                                                 | 7          |
| 1.2 Stand der Technik . . . . .                                         | 10         |
| 1.2.1 Adaptive Linsen zur Fokussierung . . . . .                        | 10         |
| 1.2.2 Adaptive Linsen zur Aberrationskorrektur . . . . .                | 18         |
| 1.2.3 Alternative optische Elemente zur Aberrationskorrektur . . . . .  | 20         |
| 1.3 Zielsetzung . . . . .                                               | 20         |
| <br>                                                                    |            |
| <b>2 Entwicklung und Optimierung der adaptiven Linsen</b>               | <b>23</b>  |
| 2.1 Theoretische Grundlagen . . . . .                                   | 23         |
| 2.1.1 Piezokeramiken . . . . .                                          | 23         |
| 2.1.2 Mechanik . . . . .                                                | 28         |
| 2.1.3 Optik . . . . .                                                   | 29         |
| 2.2 Existierendes Linsenkonzept (Vorarbeiten) . . . . .                 | 34         |
| 2.3 Weiterentwicklung des Designs . . . . .                             | 36         |
| 2.4 Analytische Betrachtung . . . . .                                   | 37         |
| 2.4.1 Biegen . . . . .                                                  | 37         |
| 2.4.2 Knicken . . . . .                                                 | 39         |
| 2.5 Simulation: Optimierung durch Geometrievariation . . . . .          | 40         |
| 2.5.1 Simulationsmodell . . . . .                                       | 40         |
| 2.5.2 Berücksichtigung der piezoelektrischen Nicht-Linearität . . . . . | 41         |
| 2.5.3 Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen . . . . .               | 43         |
| 2.5.4 Simulationsstrategie und Optimierung . . . . .                    | 43         |
| 2.5.5 Vergleich mit anderen Simulationen . . . . .                      | 44         |

|           |                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3</b>  | <b>Fertigungsprozess</b>                                       | <b>45</b>  |
| 3.1       | Laserschneiden . . . . .                                       | 45         |
| 3.2       | Abformprozesse . . . . .                                       | 49         |
| 3.3       | Glas-Piezo-Membran (Aktor) . . . . .                           | 50         |
| 3.4       | Klebprozesse und Kontaktierung . . . . .                       | 53         |
| 3.5       | Befüllen . . . . .                                             | 54         |
| 3.6       | Funktionsfähige Prototypen . . . . .                           | 55         |
| 3.7       | Gehäuse . . . . .                                              | 55         |
| <b>4</b>  | <b>Ergebnisse</b>                                              | <b>57</b>  |
| 4.1       | Charakterisierung des optischen Fluids . . . . .               | 57         |
| 4.2       | Arbeitsbereich: Brechkraft und sphärischer Parameter . . . . . | 58         |
| 4.2.1     | Angelegte Spannungen . . . . .                                 | 58         |
| 4.2.2     | Charakterisierung von Brechkraft und asphär. Verhalten . . . . | 60         |
| 4.2.3     | Messung der Linsen und Vergleich mit der Simulation . . . . .  | 61         |
| 4.2.4     | Einfluss von herstellungsbedingten Parametern . . . . .        | 72         |
| 4.3       | Abschätzung von Abbildungsfehlern . . . . .                    | 75         |
| 4.4       | Dynamische Messungen . . . . .                                 | 76         |
| 4.4.1     | Sprungantworten . . . . .                                      | 77         |
| 4.4.2     | Resonanzverhalten . . . . .                                    | 80         |
| <b>5</b>  | <b>Nicht-rotationssymmetrische Aberrationskorrektur</b>        | <b>83</b>  |
| 5.1       | Konzept der segmentierten Elektroden . . . . .                 | 83         |
| 5.2       | Simulationsergebnisse . . . . .                                | 84         |
| 5.3       | Nachweis mittels Messdaten . . . . .                           | 87         |
| <b>6</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                            | <b>89</b>  |
| 6.1       | Zusammenfassung . . . . .                                      | 89         |
| 6.2       | Ausblick . . . . .                                             | 91         |
| <b>II</b> | <b>Adaptive Prismen</b>                                        | <b>93</b>  |
| <b>7</b>  | <b>Einleitung und Grundlagen</b>                               | <b>95</b>  |
| 7.1       | Überblick . . . . .                                            | 95         |
| 7.2       | Stand der Technik . . . . .                                    | 98         |
| 7.2.1     | Adaptive Prismen aus der Literatur . . . . .                   | 98         |
| 7.2.2     | Scanspiegel als Konkurrenztechnologie . . . . .                | 104        |
| 7.3       | Zielsetzung . . . . .                                          | 107        |
| <b>8</b>  | <b>Entwicklung und Optimierung der adaptiven Prismen</b>       | <b>109</b> |
| 8.1       | Theoretische Grundlagen . . . . .                              | 110        |
| 8.2       | Aktuierungs-Konzept und Aufbau . . . . .                       | 114        |

|           |                                                                 |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3       | Designvarianten . . . . .                                       | 115        |
| 8.3.1     | Design 1: Gerade Aktoren für maximale Winkel . . . . .          | 116        |
| 8.3.2     | Design 2: Spiralförmige Aktoren für kompakte Bauform . . . . .  | 117        |
| 8.3.3     | Design 3: Knick-Aktoren als alternatives Aktorkonzept . . . . . | 118        |
| 8.4       | Analytische Betrachtung . . . . .                               | 120        |
| 8.4.1     | Prismen mit Biegewandler-Aktor . . . . .                        | 120        |
| 8.4.2     | Prismen mit Knick-Aktor . . . . .                               | 121        |
| 8.5       | Simulation . . . . .                                            | 123        |
| 8.5.1     | Prismen mit Biegewandler-Aktoren . . . . .                      | 123        |
| 8.5.2     | Prismen mit Knickaktoren . . . . .                              | 133        |
| <b>9</b>  | <b>Fertigungsprozess</b>                                        | <b>135</b> |
| 9.1       | Laserschneiden . . . . .                                        | 135        |
| 9.2       | Abformprozesse . . . . .                                        | 140        |
| 9.3       | Piezo-Bimorph-Balken (Aktor) . . . . .                          | 141        |
| 9.4       | Klebprozesse und Kontaktierung . . . . .                        | 142        |
| 9.5       | Befüllen . . . . .                                              | 143        |
| 9.6       | Funktionsfähige Prototypen . . . . .                            | 144        |
| 9.7       | Gehäuse . . . . .                                               | 145        |
| <b>10</b> | <b>Ergebnisse und Vergleich</b>                                 | <b>147</b> |
| 10.1      | Oberflächenverkipfung und Arbeitsbereich . . . . .              | 148        |
| 10.1.1    | Ansteuerungsspannungen . . . . .                                | 148        |
| 10.1.2    | Prismen mit geraden Aktoren . . . . .                           | 152        |
| 10.1.3    | Prismen mit spiralförmigen Aktoren . . . . .                    | 161        |
| 10.1.4    | Simulationsergebnisse der alternativen Designs . . . . .        | 165        |
| 10.2      | Charakterisierung der Glasoberfläche . . . . .                  | 170        |
| 10.3      | Optische Messungen . . . . .                                    | 171        |
| 10.3.1    | Scanwinkel . . . . .                                            | 171        |
| 10.4      | Dynamische Messungen . . . . .                                  | 173        |
| 10.4.1    | Sprungantworten . . . . .                                       | 173        |
| 10.4.2    | Resonanzverhalten . . . . .                                     | 177        |
| <b>11</b> | <b>Ansteuerungsmodell</b>                                       | <b>181</b> |
| 11.1      | Ansteuerung einer Scanrichtung . . . . .                        | 182        |
| 11.2      | Ansteuerung einer Scanamplitude . . . . .                       | 183        |
| 11.3      | Ansteuerung einer vertikalen Verschiebung . . . . .             | 185        |
| <b>12</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                             | <b>189</b> |
| 12.1      | Zusammenfassung . . . . .                                       | 189        |
| 12.2      | Ausblick . . . . .                                              | 191        |
|           | <b>Projektzusammenfassung</b>                                   | <b>193</b> |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>Anhang</b>                                            | <b>197</b> |
| <b>A Messaufbau und Datenauswertung</b>                  | <b>197</b> |
| A.1 Messaufbau: Profilometer . . . . .                   | 197        |
| A.1.1 Verwendete Sensoren . . . . .                      | 197        |
| A.1.2 Oberflächenmessungen . . . . .                     | 199        |
| A.2 Datenerfassung und -auswertung . . . . .             | 200        |
| A.2.1 Analyse der Oberflächenbewegung . . . . .          | 201        |
| A.2.2 Sprungantworten . . . . .                          | 201        |
| A.2.3 Resonanzmessungen . . . . .                        | 202        |
| A.3 Fehlerrechnung und Wiederholgenauigkeit . . . . .    | 202        |
| A.3.1 Adaptive Linsen . . . . .                          | 202        |
| A.3.2 Adaptive Prismen . . . . .                         | 203        |
| <b>B Ergänzende Details</b>                              | <b>205</b> |
| B.1 Analytische Herleitung des Kippwinkels . . . . .     | 205        |
| B.2 Technische Umsetzung der Simulation . . . . .        | 206        |
| B.2.1 Adaptive Linsen . . . . .                          | 206        |
| B.2.2 Adaptive Prismen mit Biegewandleraktoren . . . . . | 208        |
| B.2.3 Adaptive Prismen mit Knickaktoren . . . . .        | 210        |
| B.3 Alternative Optimierungsansätze (Linse) . . . . .    | 213        |
| <b>C Laserparameter und Werkstoffe</b>                   | <b>215</b> |
| <b>Eigene Veröffentlichungen</b>                         | <b>217</b> |
| Journal . . . . .                                        | 217        |
| Konferenzbeiträge . . . . .                              | 217        |
| <b>Betreute Abschlussarbeiten</b>                        | <b>219</b> |
| Masterarbeiten . . . . .                                 | 219        |
| Bachelorarbeiten . . . . .                               | 219        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                              | <b>221</b> |
| <b>Danksagung</b>                                        | <b>235</b> |