

# Inhalt

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Kurzfassung . . . . .                                                         | IX        |
| Abstract . . . . .                                                            | XI        |
| <b>1 Einleitung</b>                                                           | <b>1</b>  |
| <b>2 Zur mechanischen Modellierung und Simulation eines optischen Systems</b> | <b>7</b>  |
| 2.1 Übersicht . . . . .                                                       | 7         |
| 2.2 Mehrkörpersysteme . . . . .                                               | 9         |
| 2.3 Finite-Elemente-Methode . . . . .                                         | 11        |
| 2.4 Elastische Mehrkörpersysteme . . . . .                                    | 13        |
| 2.4.1 Modellreduktion . . . . .                                               | 15        |
| 2.4.2 Methode des mitbewegten Referenzsystems . . . . .                       | 18        |
| 2.4.3 Dynamische Spannungsanalyse . . . . .                                   | 20        |
| 2.5 Modalanalyse und Modaltransformation . . . . .                            | 21        |
| <b>3 Optik-Grundlagen für die Dynamik-Optik-Kopplung</b>                      | <b>23</b> |
| 3.1 Theoretische Grundlagen . . . . .                                         | 23        |
| 3.1.1 Geometrische Optik und Wellenoptik . . . . .                            | 24        |
| 3.1.2 Fourier-Optik . . . . .                                                 | 25        |
| 3.1.3 Grundlegende Eigenschaften von Objektiven . . . . .                     | 27        |
| 3.1.4 Zernike-Polynome . . . . .                                              | 29        |
| 3.2 Strahlverfolgung in dynamisch-optischen Systemen . . . . .                | 31        |
| 3.2.1 Strahlverfolgung in homogenen Medien . . . . .                          | 31        |
| 3.2.2 Freiform-Oberflächen . . . . .                                          | 37        |

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3    | Strahlverfolgung bei inhomogenem Brechungsindex . . . . .               | 41        |
| 3.3      | Analyse der Abbildungseigenschaften eines dynamisch-optischen Systems . | 44        |
| 3.3.1    | Bildfehler eines Einzelfelds . . . . .                                  | 45        |
| 3.3.2    | Bildfehler bei kreisförmigen Blenden . . . . .                          | 47        |
| 3.3.3    | Bildfehleranalyse bei Betrachtung des Vollfelds . . . . .               | 49        |
| 3.3.4    | Beugungsbegrenzung . . . . .                                            | 50        |
| 3.3.5    | Bildsimulation mit Hilfe der Fourier-Optik . . . . .                    | 51        |
| 3.3.6    | Belichtungssimulation . . . . .                                         | 53        |
| <b>4</b> | <b>Zur Berücksichtigung der Polarisierung bei Spannungen</b>            | <b>57</b> |
| 4.1      | Motivation . . . . .                                                    | 57        |
| 4.2      | Beschreibung der Polarisierung durch Jones-Vektoren . . . . .           | 58        |
| 4.3      | Besonderheiten bei der Strahlverfolgung . . . . .                       | 60        |
| 4.3.1    | Strahlteilung an der vorderen Oberfläche . . . . .                      | 60        |
| 4.3.2    | Anpassen der Polarisierung . . . . .                                    | 61        |
| 4.3.3    | Einzelpfadapproximation und Phasenverzögerung . . . . .                 | 62        |
| <b>5</b> | <b>Kopplung von dynamischen und optischen Simulationen</b>              | <b>65</b> |
| 5.1      | Grundlegende Gleichungen . . . . .                                      | 65        |
| 5.2      | Methodisches Vorgehen . . . . .                                         | 66        |
| 5.2.1    | Erzeugung von Schnittstellendaten in der mechanischen Simulation        | 67        |
| 5.2.2    | Berechnung der Bildfehler . . . . .                                     | 68        |
| 5.2.3    | Simulation eines belichteten Bildes . . . . .                           | 69        |
| 5.3      | Oberflächenkinematik von starren optischen Elementen . . . . .          | 71        |
| 5.3.1    | Absolutkinematik von optischen Oberflächen . . . . .                    | 71        |
| 5.3.2    | Relativkinematik für die optische Simulation . . . . .                  | 73        |
| 5.4      | Approximation von deformierten Oberflächen . . . . .                    | 75        |
| 5.4.1    | Definition des Referenzsystems einer elastischen Oberfläche . . . . .   | 77        |
| 5.4.2    | Polynomentwicklung von Oberflächen . . . . .                            | 79        |
| 5.4.3    | Auswahl der Polynome am Beispiel von Zernike-Polynomen . . . . .        | 81        |
| 5.4.4    | Schnittstellendaten für Zernike-Oberflächen . . . . .                   | 86        |

|                  |                                                                 |            |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.5            | Oberflächenapproximation mit B-Splines . . . . .                | 89         |
| 5.5              | Approximation der Brechungsindexvariation . . . . .             | 91         |
| <b>6</b>         | <b>Beispielanalysen von dynamisch-optischen Systemen</b>        | <b>97</b>  |
| 6.1              | Das Simulationswerkzeug OM-Sim . . . . .                        | 97         |
| 6.2              | Beispiel Lithographie-Objektiv . . . . .                        | 100        |
| 6.2.1            | Kinematisch-optische Untersuchungen . . . . .                   | 100        |
| 6.2.2            | Untersuchung von Transversalschwingungen im Frequenzbereich . . | 105        |
| 6.3              | Beispiel Einzelkomponente . . . . .                             | 107        |
| 6.3.1            | Modalanalyse . . . . .                                          | 108        |
| 6.3.2            | Zeitsimulation . . . . .                                        | 110        |
| <b>7</b>         | <b>Optimierung der Dynamik von Objektiven</b>                   | <b>117</b> |
| 7.1              | Aufstellen der Gütefunktion . . . . .                           | 118        |
| 7.2              | Beispiel Lithographie-Objektiv . . . . .                        | 119        |
| 7.3              | Experimentelles Beispiel . . . . .                              | 122        |
| <b>8</b>         | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                             | <b>129</b> |
| <b>Literatur</b> |                                                                 | <b>133</b> |
|                  | Formelzeichen und Notation . . . . .                            | 139        |