

**In situ Charakterisierung von Präzisionsoptiken  
mittels Deflektometrie und adaptiver  
Bildverarbeitung**



Zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

dem Fachbereich Physik  
der Justus-Liebig-Universität Gießen  
vorgelegt

von  
**Sebastian Frederik Schiffner**

Gießen im April 2012

Ich erkläre:

Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

# Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. Thomas Sure, mit dem ich das interessante Projekt der „Entwicklung einer Laser-Zentriereinrichtung zur in situ Kontrolle des Zentrierzustandes bei der Linsenherstellung, LAKONZ“ bearbeiten durfte und Prof. Dr. Peter J. Klar, dass er sich bereit erklärte, mich ebenfalls zu betreuen. Dabei gestattete mir Prof. Dr. Sure das Labor weitestgehend nach meinen Wünschen auszurüsten und zu gestalten. Seine Betreuung war vorbildlich und ließ mir dennoch den nötigen Raum für eigene Ideen. Auch Prof. Dr. Klar förderte meine wissenschaftliche Weiterbildung, so kam ich gleich zu Beginn meiner Arbeit in den Genuss, die „Summerschool on Photonics Design“ besuchen zu dürfen. Die Dienstags-Seminare am I. Physikalischen Institut ermöglichten mir tiefe Einblicke in die modernen Festkörperphysik. Dabei boten die Seminare einen tollen Rahmen zur Präsentation der eigenen Ergebnisse und zur Diskussionen mit anderen Wissenschaftlern.

Bei Prof. Dr. Jens Hoffeld und Prof. Dr. Christian Heiliger möchte ich mich für die Bereitschaft bedanken, als Prüfer an meinem Dissertationsvorhaben mitzuwirken. Prof. Dr. Hoffeld danke ich außerdem für den Kontakt zu StudiumPlus in Wetzlar, an dem ich Lehrerfahrungen sammeln konnte.

Den Laboringenieuren Dipl.-Ing. Erhard Desch und Dipl.-Ing. Michael Neubert danke ich für die freundliche Aufnahme in das Team der Fachhochschulangestellten. Herr Dipl.-Ing. Neubert hat mir sehr bei organisatorischen Dingen geholfen und hatte stets anregende Fragen rund um das Thema Linux für mich. Für die Unterstützung bei der Durchführung des Messtechnikpraktikums und spannende Diskussionen über Chaostheorie bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Desch. Der Abteilung Optische Technologien der Firma Leica Microsystems danke ich für die Möglichkeit, meine theoretischen Überlegungen experimentell anwenden zu können, insbesondere möchte ich Herrn B.E. Slawa A. Merkel für die tatkräftige Hilfe bei allen Belangen betreffs der Justierdrehmaschine JDM 200 CNC danken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Frau Carla, die mich während der aufregenden Zeit meiner Dissertation stets unterstützte und mich immer wieder mit stilistischen Vorschlägen beglückte. Meinen Eltern Claus und Brigitte möchte ich für die Unterstützung während meines Studiums, ihre stets motivierenden Gespräche und dafür, dass sie mir positives Reframing beibrachten danken. Meiner Schwester Kathrin möchte für ihr ungebrochenes Interesse an der Physik danken, welches mich immer wieder selbst zum Nachdenken brachte. Zuletzt möchte ich mich noch bei meinem langjährigen Freund Dipl. Phys. Michael Mell bedanken, dessen kritische Anregungen und Ideen mich stets zu präzisen Formulierungen und exaktem Arbeiten motivierten.

## *Abstract*

The cross-industrial miniaturization of today's manufacturing processes requires continuous improvements in precision optics. In order to fulfill these demands, a machine was developed, which is able to achieve manufacturing tolerances smaller than a micron. The original alignment technique failed to achieve such tolerances for many lens types.

This problem could be solved with deflectometry and adaptive, digital image processing. Within the scope of this work, a software was developed, which made the manufacturing process on the machine faster, more accurate and usable for a broader spectrum of lenses. On the average tolerances of  $0,6\ \mu\text{m}$  were reached within 44 s with over 85% of the lenses of a well-known microscope manufacturer.

## *Zusammenfassung*

Die fortschreitende branchenübergreifende Miniaturisierung heutiger Fertigungsprozesse erfordert immer bessere Präzisionsoptiken. Um diesen Bedürfnissen gerecht zu werden, wurde eine Maschine entwickelt, die Toleranzen kleiner als ein Mikrometer beim Zentrierprozess von Optiken erreichen kann. Mit der ursprünglichen Technik konnten diese Toleranzen jedoch für viele Linsentypen nicht erreicht werden.

Dieses Problem konnte mit Hilfe der Deflektometrie und einer adaptiven Bildverarbeitung gelöst werden. Während dieser Arbeit entstand ein Programm, das den Fertigungsprozess im Industriealltag der Maschine schneller, exakter und für ein breiteres Spektrum an Linsen anwendbar machte. Im Mittel werden Toleranzen von  $0,6\ \mu\text{m}$  innerhalb von 44 s erreicht bei über 85% der Linsen eines namhaften Mikroskopherstellers.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>7</b>
2.1	Die Brechung von Licht . . . . .	7
2.2	Geometrische Optik und Gaußsches Linsengesetz . . . . .	9
2.3	Aberrationen sphärischer Linsen . . . . .	11
2.4	Asphärische Linsen . . . . .	13
2.5	Deflektometrie . . . . .	15
2.6	Aufbau von Präzisionsoptiken . . . . .	17
2.7	Auswirkung dezentrierter Linsen . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Charakterisierung von Linsen</b>	<b>23</b>
3.1	Aktuelle Verfahren . . . . .	23
3.2	Die Justierdrehmaschine JDM 200 CNC . . . . .	25
3.2.1	Justierfutter und Reflexbildgerät . . . . .	28
3.2.2	Halbschattensensor und Kamera . . . . .	30
3.2.3	Ablauf des Justier-Drehprozesses . . . . .	33
3.3	Analyse der Methodik . . . . .	34
3.3.1	Versuchsaufbau und Simulation . . . . .	34
3.3.2	Auswertung . . . . .	36
3.3.3	Analyse-Ergebnis . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Adaptive Bildverarbeitung</b>	<b>41</b>
4.1	Grundlagen Bildverarbeitung . . . . .	41
4.1.1	Bildvorverarbeitung: <i>Region-of-interest</i> (ROI) . . . . .	42
4.1.2	Segmentierung: SWK und Kantenerkennung . . . . .	42
4.1.3	Bildinterpretation: Schwerpunkt und Korrelation . . . . .	45
4.2	Adaptiver Algorithmus . . . . .	48
4.3	Leistungsanalyse . . . . .	49
4.3.1	Geschwindigkeit . . . . .	49
4.3.2	Test-Szenarien . . . . .	51

4.3.3	Analyse-Ergebnisse und Fazit . . . . .	53
4.4	Leistungsvergleich Sensor - Bilderkennung . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Das <i>FERMI</i>-Zentrierprogramm</b>	<b>67</b>
5.1	Alpha-Version . . . . .	67
5.1.1	Erstes Hardwarekonzept und Schlagalgorithmus . . . . .	68
5.1.2	Erste Ergebnisse . . . . .	70
5.1.3	Konsequenzen der Weiterentwicklung der JDM 200 . . . . .	72
5.2	Industrie-Version . . . . .	72
5.2.1	Benutzeroberfläche . . . . .	73
5.2.2	Adaptiver Zentrierprozess und neue Steuerung . . . . .	76
5.2.3	Erste Modifikation der Reflexbildgeräte . . . . .	78
5.3	Ergebnisse . . . . .	80
5.3.1	Mittlere Restablage und Zentrierdauer . . . . .	80
5.3.2	Verteilung und Einstufung der Zentriervorgänge . . . . .	82
5.3.3	Kritische Betrachtung der Erfolgsquote . . . . .	85
5.4	Weiterentwicklung und Ausblick . . . . .	88
5.4.1	Neuentwicklung der Reflexbildgeräte . . . . .	88
5.4.2	Modifikation des Bilderkennungsalgorithmus . . . . .	89
5.4.3	Ausblick Zentrieren von sphärischen Linsen . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>91</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	91
6.2	Ausblick Zentrieren von asphärischen Linsen . . . . .	93
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Anhang</b>	<b>99</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind Präzisionsoptiken und deren Grundkomponenten: optische Linsen. Aber warum befasst sich die Wissenschaft im 21. Jahrhundert noch mit Linsen, die schon zu Galileo Galileis Zeiten im ausgehenden 16. Jahrhundert über 1000 Jahre bekannt waren und die er so verfeinern konnte, um damit Fernrohre zu bauen, die letztendlich zur Entdeckung der Jupitermonde im Jahr 1610 führten [2, S. 183]?

Der Grund liegt in der immer weiter fortschreitenden Miniaturisierung, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie. So verdanken die Biologie und die Chemie viele ihrer jüngsten Erfolge immer noch der Mikroskopie<sup>1</sup>, aber auch viele Hightech-Produkte sind nur dank ausgefeilter Präzisionsoptiken herstellbar. Wie etwa der von der Firma Intel<sup>®</sup> entwickelte Prozessor Core<sup>™</sup> i7, welcher mit einer Strukturgröße von nur 45 nm produziert wird [9]. Diese Strukturen lassen sich mit Licht im sichtbaren Spektrum nicht mehr auflösen, daher sind die Ansprüche an die Genauigkeiten der Optiken die in dem Fertigungsprozess verwendet werden entsprechend hoch. So führt beispielsweise eine Verkippung um 2  $\mu\text{m}$  einer einzelnen Linse in einem Mikroskopobjektiv zu einem Versatz der Hell-Dunkel-Kante um 60 nm (vgl. Abschnitt 2.7 und [31]). Die Ausrichtung einzelner Linse entscheidet also über den Wert der Präzisionsoptik im Highend-Segment. In Kapitel 2 werden dazu die Grundlagen der Optik erläutert. Auf den in Abschnitt 2.3 gegebenen Überblick über die optischen Abbildungsfehler von sphärischen Linsen, den sogenannten Aberrationen, folgt die Beschreibung von asphärischen Linsen in Abschnitt 2.4. Aufgrund ihrer Form können diese im allgemeinen nicht mit einem einzelnen Reflex eindeutig charakterisiert

---

<sup>1</sup>So wurde der Chemienobelpreis im Jahr 2009 für die Studien zur Struktur und Funktion des Ribosoms verliehen, das mit Hilfe der Dunkelfeldmikroskopie 1940 erstmals entdeckt wurde. Heute wird u. A. die Cryoelektronenmikroskopie zur Strukturanalyse verwendet [42].

werden. Eine mögliche Lösung dieses Problems bietet die Deflektometrie, welche in Abschnitt 2.5 vorgestellt wird. Daran anschließend wird gezeigt wie sich die Lage, bzw. der Zentrierzustand von Linsen theoretisch beschrieben lässt und welchen Einfluss unterschiedliche Bauformen von Linsengruppen auf dessen Bestimmung haben. In dem oben erwähnten Beispiel wird deutlich, warum die Anforderungen an den Aufbau von Präzisionsoptiken, wie sie in Abschnitt 2.6 gezeigt werden, so hoch sind.

Es gibt eine Vielzahl von Messmethoden, um Präzisionsoptiken zu charakterisieren, eine Auswahl an aktuellen Techniken und eine kurze Bewertung inwiefern sie für die Bestimmung des Zentrierzustandes dienlich sind, leitet Kapitel 3 ein. Ein im Jahr 2007 abgeschlossenes Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) namens *FERMI* hatte zum Ziel, ein Bearbeitungszentrum für Mikrooptik-Baugruppen zu realisieren. Dieses vereinte erstmals den Messprozess des Zentrierzustands mit der Möglichkeit die Fassung der Linse ohne Umspannen automatisch mittels einer CNC-Maschine zu bearbeiten<sup>2</sup>. Dieser Schritt der Optikfertigung wurde überarbeitet, da ein Nachjustieren mit Hilfe von Schiebegliedern prinzipiell möglich ist, jedoch in Abhängigkeit der zu korrigierenden Ablage die Nichtlinearitäten in Abbildungsfehlern höhere Ordnung stark zunehmen [37].

Die Funktionsweise dieser Maschine ist in Abschnitt 3.2 dargestellt. Es zeigte sich jedoch, dass mit dieser Technik weniger als 60% der antizipierten Linsen zentriert werden konnten. Daher wurde im Jahr 2007 ein Nachfolgeprojekt mit dem Titel „Entwicklung einer Laser-Zentriereinrichtung zur in situ Kontrolle des Zentrierzustandes bei der Linsenherstellung *LAKONZ*“ ausgeschrieben, dessen Forschungsergebnisse den Kern dieser Arbeit darstellen. In der Konzeptphase, in der die in Abschnitt 3.3 beschriebene Methodik entwickelt wurde, zeigte sich allerdings, dass es sinnvoller ist, statt die Beleuchtung durch einen Lasers zu ersetzen, die verwendete Sensortechnik durch eine Bildverarbeitung zu substituieren.

Kapitel 4 gibt im ersten Abschnitt die Grundlagen der Bildverarbeitung wieder. Dabei werden zuerst gängige Algorithmen vorgestellt, gefolgt von für die Problematik des Linsenzentrierens entwickelten. In Abschnitt 4.3 werden die Ergebnisse eines Tests präsentiert, bei dem die vorgestellten Algorithmen in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit verglichen wurden. Damit soll sichergestellt werden, dass der favorisierte Algorithmus später möglichst universell einsetzbar und für ein breites Spektrum von Linsentypen geeignet ist. Aufgrund ihrer Bau-

---

<sup>2</sup>CNC steht für *computer numerical control* und bezeichnet allgemein Werkzeugmaschinen, die computergestützt arbeiten.



form erzeugen diese i. A. unterschiedliche Reflexbilder mit einem variierenden Anteil an Störungen. Das bisher verwendete Verfahren wird anschließend mit dem gewählten Algorithmus in Abschnitt 4.4 mit der in im vorherigen Kapitel erarbeiteten Methodik verglichen.

Die gewonnen Erkenntnisse wurden in einem mehrstufigen Prozess umgesetzt und zur Entwicklung eines umfassenden Programms verwendet, welches in Kapitel 5 vorgestellt wird. Dabei werden in Abschnitt 5.1.2 die ersten publizierten Ergebnisse angeführt [30], die mit der Alpha-Version des Programms erzielt werden konnten. Aus den Erfahrungen wurde unter Berücksichtigung eines Anforderungskatalogs eine industrietaugliche Software zum Zentrieren von Linsen programmiert (vgl. Abschnitt 5.2). Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit wurden in einer umfassenden Feldstudie über 7000 Zentriervorgänge im Industrieinsatz gewonnen. Die Details zu den dabei protokollierten Vorgängen, sowie eine anschließende Diskussion über die Bedeutung der Ergebnisse, finden sich in Abschnitt 5.3. Das Kapitel wird beendet mit anwendungsorientierten Vorschlägen zur Verbesserungen des neuen Prozesses auf dem Gebiet der Zentrierung sphärischer Linsen.

Das letzte Kapitel der Arbeit beinhaltet im Abschnitt 6.1 die Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse. Des Weiteren wird im Ausblick analysiert, ob es in Zukunft möglich sein könnte, auch asphärische Linsen mit dem neuen Algorithmus zentrieren zu können (vgl. Abschnitt 6.2). Es gibt eine Vielzahl von Vorteilen von asphärischen Linsen (vgl. Abschnitt 2.4), die bisherige Technik wird aber bisher ausschließlich mit sphärische Linsen angewandt. Gelänge es Asphären so zu zentrieren, könnten zukünftig viele Einzellinsen im Design von Präzisionsoptiken ersetzt werden und so die Produktionskosten bei gleich bleibender Genauigkeit reduziert werden. Dies ermöglicht potentiell auch die Herstellung von Systemen, die mit sphärischen Linsen bisher nicht realisierbar waren.



# Kapitel 2

## Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Linsen und deren Anwendung in Präzisionsoptiken erörtert. Die ersten Abschnitte handeln von einigen wichtigen Grundbegriffen und Prinzipien der Optik. Dazu zählen die Brechung von Licht in Abschnitt 2.1 und ein Überblick über die geometrische Optik in Abschnitt 2.2. Im darauf folgenden Abschnitt 2.3 wird gezeigt, welche Arten von Aberrationen außerhalb der paraxialen geometrischen Näherung bei sphärischen Linsen auftreten.

Daran schließt Abschnitt 2.4 an, der die Besonderheiten von asphärischen Linsen aufzeigt. Es wird erklärt, wie diese Linsen aufgebaut sind und wie sie charakterisiert werden. Des Weiteren wird gezeigt, warum sie im allgemeinen nicht so wie sphärische Linsen zentriert werden können. Dieses Problem führt über in Abschnitt 2.5 der die Grundlagen der Deflektometrie erklärt, mit deren Hilfe es prinzipiell möglich ist, sowohl sphärische, als auch asphärische Linsen zu zentrieren.

Im Abschnitt 2.6 wird der Stand der Technik von Präzisionsoptiken gezeigt. Neben dem Aufbau von Linsen wird erörtert, welchen Einfluss der Linsentyp und die Radien der Linsenflächen auf die Bestimmung des Zentrierzustands haben. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Beispiel, welches erläutert, wie sich die Dezentrierung einer Linse auf das gesamte optische System auswirken kann (vgl. Abschnitt 2.7).

### 2.1 Die Brechung von Licht

Wie kommt es, dass ein Löffel, der partiell in einem Wasser gefülltem Glas steckt, abgeknickt wirkt? Diese Frage wird im Verlauf dieses Abschnitts erläutert. Dabei handelt es sich um eine alte Frage, die schon Platon in seinem wohl bedeutendsten Werk *Politeia* ca. 370 v. Chr. erwähnte. Bis es zu einer

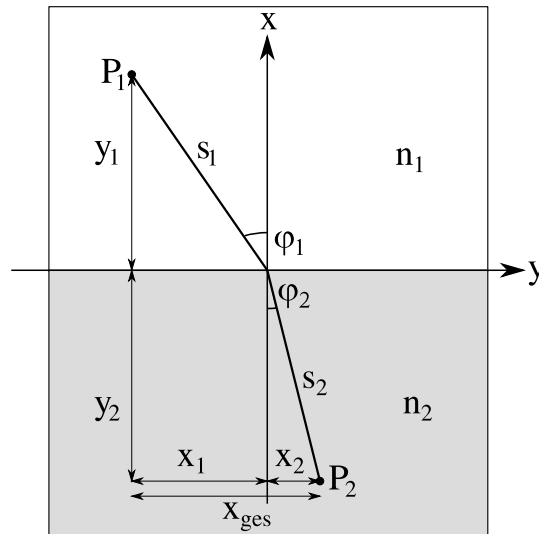


Abbildung 2.1: Veranschaulichung des Brechungsgesetzes: Ein Lichtstrahl ausgehend von  $P_1$  wird im optisch dichteren Medium ( $n_2 > n_1$ ) zum Lot hin zu Punkt  $P_2$  gebrochen.

empirischen Untersuchung durch den Astronom und Mathematiker Willebrord van Roijen Snell im Jahr 1621 kam, dauerte es noch fast 2000 Jahre<sup>1</sup>. Die Brechung von Licht lässt sich auf ein grundlegendes Konzept zurückführen, welches allgemein 1834 von William Hamilton formuliert wurde. Es besagt, dass sich physikalische Teilchen und Felder so verhalten, dass die Wirkung minimal (bzw. stationär) wird. Es ist das Prinzip der kleinsten Wirkung, mit dem die Euler-Lagrange-Gleichung hergeleitet werden konnte. Dieses Prinzip lässt bei geeigneter Wahl der Wirkung neben den Newtonschen Bewegungsgleichungen, den Maxwellgleichungen für die Elektrodynamik, den Einsteingleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie auch auf die Bewegungsgleichungen der Quantenmechanik anwenden (siehe [24, S. 122 ff], [5] und [13]).

Abbildung 2.1 zeigt die Ausbreitung eines Lichtstrahls vom Punkt  $P_1$ , welcher vom optischen dünneren Medium mit dem Brechungsindex  $n_1$ , an der Grenzfläche zum optisch dichteren Medium mit dem Brechungsindex  $n_2 > n_1$  zum Lot gebrochen wird. Snellius fand heraus, dass das Verhältnis zwischen dem Sinus des Einfallswinkels  $\varphi_1$  und dem Sinus des Ausfallwinkels  $\varphi_2$ , gerade dem

<sup>1</sup>Heute ist bekannt, dass das Brechungsgesetz schon im 10. Jahrhundert von einem arabischen Physiker namens Ibn Sahl entdeckt wurde, dessen Wissen jedoch im Lauf der Zeit in Vergessenheit geriet [28].

umgekehrten Verhältnis der Brechungsindizes entsprach:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.1)$$

Dieses Gesetz gilt nicht nur für Licht im sichtbaren Bereich, sondern allgemein für elektromagnetische Wellen. Der Brechungsindex  $n$  wird ergibt sich aus der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  und der Geschwindigkeit der Welle im Medium:  $n = \frac{c_0}{c_{\text{Medium}}}$ . Es lässt sich aus dem fermatschen Prinzip herleiten, welches aus dem oben beschriebenen Hamiltonprinzip abgeleitet werden kann. Es besagt, dass die optische Weglänge zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  minimal ist.

## 2.2 Geometrische Optik und Gaußsches Linsengesetz

Bevor es Snellius gelang, empirisch das Brechungsgesetz herzuleiten, wurden zu Beginn des 17. Jahrhunderts einige der bedeutendsten optischen Systeme, wie zum Beispiel das Linsenfernrohr und das Mikroskop, erfunden. Mit Hilfe einfacher Abbildungsgesetze gelang es Galileo Galilei, Fernrohre aus selbstgeschliffenen Linsen herzustellen. Diese Abbildungsgesetze werden heute in so genannten *Raytracern* benutzt: dabei handelt es sich um Computerprogramme, die dazu verwendet werden, sehr realistische Computerbilder zu erzeugen<sup>2</sup> oder um Linsensysteme zu optimieren<sup>3</sup>.

Bei der paraxialen Näherung der geometrischen Optik wird die Annahme getroffen, dass die Wellenlänge des Lichts im Vergleich zu den Dimensionen der optischen Komponenten sehr klein ist. Physikalisch ist dies identisch mit der Annahme, die Wellenlänge gegen Null gehen zu lassen ( $\lambda \rightarrow 0$ ). Effekte, die auf der Wellennatur des Lichts basieren, wie z. B. die Interferenz oder die Beugung, lassen sich dann nicht mehr erklären.

Mit Hilfe des Brechungsgesetzes und folgenden Voraussetzungen lässt sich die Gaußsche Linsenformel, auch paraxiale Näherung erster Ordnung genannt, herleiten:

- Es wird nur der Teil des Lichts berücksichtigt, der sich nahe der optischen Achse unter kleinem Winkel ausbreitet.
- Die Linsen sind relativ zu ihrer Dicke nur schwach gekrümmt.

---

<sup>2</sup> Ein hervorragender freies Raytracingprogramm ist das quelloffene Povray erhältlich unter <http://www.povray.org>.

<sup>3</sup> Hierzu zählen unterem anderem OSLO, Tracepro und Zemax, die alle einen größeren Funktionsumfang besitzen und nicht nur mit der paraxialen geometrische Optik rechnen.

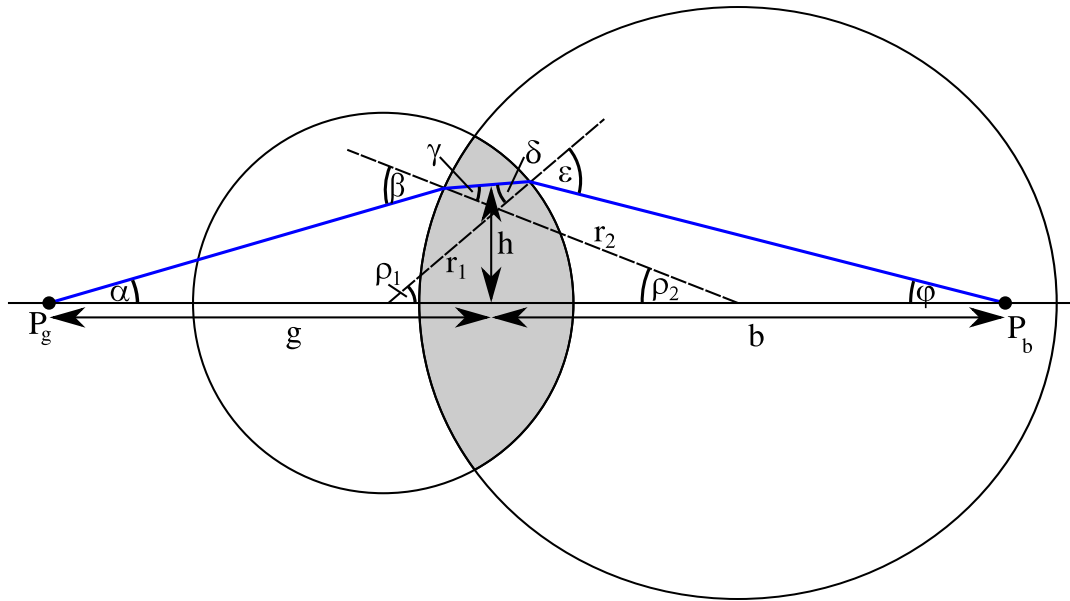


Abbildung 2.2: Herleitung des Gaußschen Linsengesetzes: Im Rahmen der paraxialen Näherung und der Annahme  $\lambda \rightarrow 0$  gehen sämtliche Lichtstrahlen von  $P_g$  durch die Linse und werden mit Hilfe des genäherten Brechungsgesetzes auf  $P_b$  abgebildet.  $g$  ist die Gegenstandsweite und  $b$  die Bildweite.

Die trigonometrischen Funktionen werden mit Hilfe der Reihenentwicklung genähert, so gilt für den Sinus beispielsweise:

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots \quad (2.2)$$

Unter Vernachlässigung von Termen 3. und höherer Ordnung ergibt sich:

$$\sin \varphi \approx \varphi, \quad \cos \varphi \approx 1 \quad \text{und} \quad \tan \varphi \approx \varphi.$$

Für die Herleitung des Gaußschen Linsengesetzes sei ein Lichtpunkt  $P_g$  gegeben, der sich auf der optischen Achse im Abstand  $g$  (der Gegenstandsweite) links einer dünnen Linse befindet (vgl. Abb. 2.2). Das Brechungsgesetz wird zu:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \approx \frac{\beta}{\gamma} \approx \frac{\varepsilon}{\delta},$$

wobei  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  und  $\varepsilon$  die in Abb. 2.2 angegebenen Winkel sind. In der Dreiecksrelation:  $\gamma + \delta = \rho_1 + \rho_2$  lässt sich nun  $\gamma$  durch  $\beta \cdot \frac{n_1}{n_2}$  und  $\delta$  durch  $\varepsilon \cdot \frac{n_1}{n_2}$  ersetzen und es folgt:

$$\frac{n_1}{n_2} (\beta + \varepsilon) = \rho_1 + \rho_2.$$

Unter Verwendung der Relationen:  $\beta = \alpha + \rho_2$  und  $\varepsilon = \varphi + \rho_1$  folgt

$$\frac{n_1}{n_2} ((\alpha + \rho_2) + (\varphi + \rho_1)) = \rho_1 + \rho_2.$$

Diese Winkel können mit der Näherung, die auch für den Tangens gilt, direkt durch die Streckenverhältnisse:  $\alpha = \frac{h}{g}$ ,  $\varphi = \frac{h}{b}$ ,  $\rho_1 = \frac{h}{r_1}$  und  $\rho_2 = \frac{h}{r_2}$  ersetzt werden. Einsetzen liefert:

$$h \cdot \frac{n_1}{n_2} \left( \frac{1}{g} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{b} + \frac{1}{r_1} \right) = h \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

was umgestellt und  $h$  gekürzt

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.3)$$

ergibt. Der rechte Term ist nur von den Radien der Linse und den Brechungsindizes abhängig und beschreibt die Brechkraft der Linse, welche antiproportional zur Brennweite  $f$  ist. Mit dem Brechungsindex  $n_1 \approx 1$  für Luft, ergibt sich die Linsenschleiferformel:

$$\frac{1}{f} = (n_2 - 1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.4)$$

Mit Hilfe dieser und Gleichung 2.3 folgt das Gaußsche Linsengesetzes für die paraxiale geometrische Optik:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (2.5)$$

Diese Gleichung sagt aus, dass die Summe der Kehrwerte aus Gegenstands- und Bildweite ( $g$  und  $b$ ) den Kehrwert der Brennweite ergeben. Es können damit für bekannte Linsen optische Systeme konstruiert werden, da mit diesem Gesetz iterativ für jede einzelne Linse die Bildweite bestimmt werden kann.

## 2.3 Aberrationen sphärischer Linsen

In diesem Abschnitt werden die typischen Abbildungsfehler sphärischer Linsen erklärt. Grundsätzlich wird zwischen monochromatischen und chromatischen Aberrationen unterschieden. Die chromatischen Aberrationen treten durch einen frequenzabhängigen Brechungsindex  $n(\omega)$  auf. Verwendet wird dieser Effekt beim Aufspalten von weißem Licht durch ein Prisma. Chromatische Aberrationen können durch den Einsatz von mehreren Einzellinsen korrigiert werden (vgl. Abschnitt 2.6). Die monochromatischen Aberrationen, auch *Seidelsche*

*Aberrationen* oder *Abbildungsfehler dritter Ordnung* genannt [12, S. 380 ff], ergeben sich aus der Vernachlässigung von Termen 5. und höherer Ordnung der Taylorentwicklung der trigonometrischen Funktionen (vgl. Formel 2.2):

$$\sin \varphi = \underbrace{\varphi - \frac{\varphi^3}{3!}}_{\text{Fehler 3. Ordnung}} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots$$

In der Praxis werden sämtliche Abweichungen höherer Ordnung nur dann berücksichtigt, wenn es notwendig ist. Dies trifft insbesondere für Mikroskopobjektive zu. Dabei können heutzutage Aberrationen bis zur elften Ordnung bei der Optimierung von Objektiven berücksichtigt werden<sup>4</sup>. Wie sich zeigen wird, muss eine Linse exakt ausgerichtet werden, damit keine Fehler dritter Ordnung auftreten. Die monochromatischen Aberrationen unterteilen sich: Es wird unterschieden, ob es sich um Bildverformungen oder eine Zunahme der Bildunschärfe handelt. Aberrationen, die zu Bildunschärfe führen, sind folgende:

- **Sphärische Aberration:** Diese entsteht, sobald einfallende Lichtstrahlen außerhalb des für die paraxiale Näherung gültigen Bereichs um die optische Achse einer sphärischen Linse liegen. Bei konvexen Linsen werden die Randstrahlen stärker gebrochen als die achsennahen, bei konkaven Linsen ergeben sich negative Aberrationen. Diese Aberrationen kann durch die geeignete Orientierung der Linsen (vgl. Abb. 2.3) und Blenden (vgl. Abb. 2.4a) reduziert werden. Der Einsatz von Blenden reduziert jedoch die Lichtausbeute.
- **Koma:** Bei Koma handelt es sich um einen Asymmetriefehler, der zunimmt, sobald das einfallende Licht nicht zentrisch und parallel zur optischen Achse auf die Linse trifft. Abbildung 2.4b zeigt, wie durch schräg einfallendes Lichts der Brennpunkt unscharf wird. Diese Aberration wird durch das exakte Ausrichten der optischen Achse minimiert (vgl. Abschnitt 2.7).
- **Astigmatismus:** Astigmatismus bedeutet nicht punktförmig. Die gekrümmten Linsenoberflächen bewirken, dass ein runder Lichtpunkt der außerhalb der optischen Achse auf eine sphärische Linse trifft hinter ihr elliptisch wird. Auch dieser Fehler nimmt für Objektpunkte mit dem Abstand zur optischen Achse zu.

Folgenden Aberrationen wirken sich auf die Form des Bildes aus:

<sup>4</sup>Die Software OSLO gibt bei der Analyse Zernike-Polynome mit 37 Termen zurück, der letzte entspricht den sphärischen Aberrationen 11ten-Grades [20, S. 123].



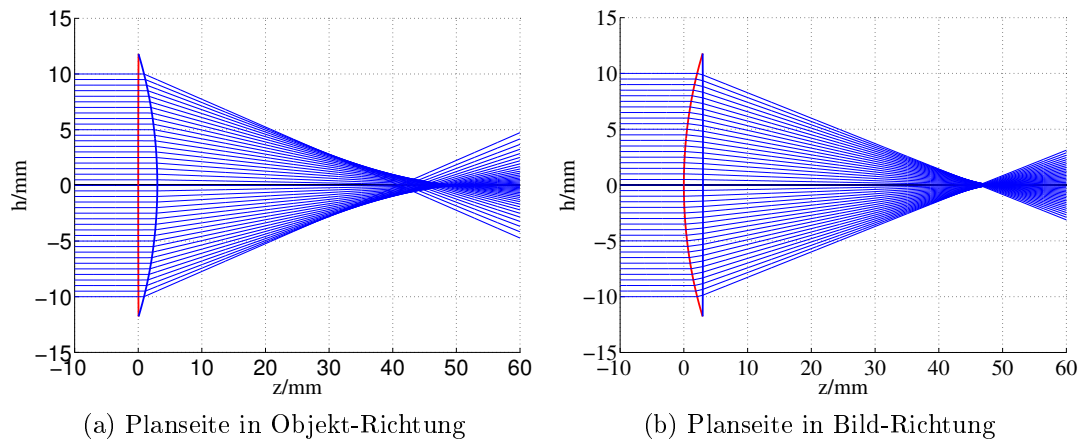


Abbildung 2.3: Je nach Ausrichtung der Linse variieren die sphärischen Aberration sichtbar. Die Planfläche in 2.3a ist für die Brechung wirkungslos.

- **Petzvalsche Bildfeldwölbung:** Gegeben sei ein System ohne die bisherigen Aberrationen, d. h. sämtliche Bildpunkte werden scharf von der Objektebene in die Bildebene übersetzt. Die Bildebene ist nur im paraxialen Gebiet annähernd eben. Wird die Ebenheit über einen größeren Öffnungswinkel betrachtet, so werden zu den Rändern Abweichungen sichtbar, die als Petzvalsche Bildfeldwölbung bezeichnet werden. Durch geschicktes Kombinieren mehrerer Linsen mit positiver und negativer Brechung lässt sich diese Aberration korrigieren.
- **Verzeichnung:** Unter Beachtung der dritten Ordnung der Winkelnäherung ergeben sich vom Abstand der optischen Achse abhängige Transversalvergrößerungen. Fehlen sämtliche anderen monochromatischen Aberrationen, so ist das Ergebnis eine Deformation des Gesamtbildes, die sogenannte Verzeichnung. Ist die Vergrößerung außerhalb der optischen Achse kleiner als auf ihr, so folgt eine kissenförmige Verzeichnung, ist es umgekehrt, so ergibt sich eine tonnenförmige Verzeichnung. Fehler dieser Art werden durch geeignetes Positionieren von Blenden korrigiert.

## 2.4 Asphärische Linsen

In diesem Abschnitt wird neben dem geometrischen Aufbau von asphärischen Linsen auch kurz erläutert, welcher wirtschaftliche Nutzen durch ihren Einsatz gewonnen werden kann. Zur kompletten Beschreibung asphärischer Linsen bedarf es mehrerer Parameter. Im Folgenden werden Asphären in Form von Pa-

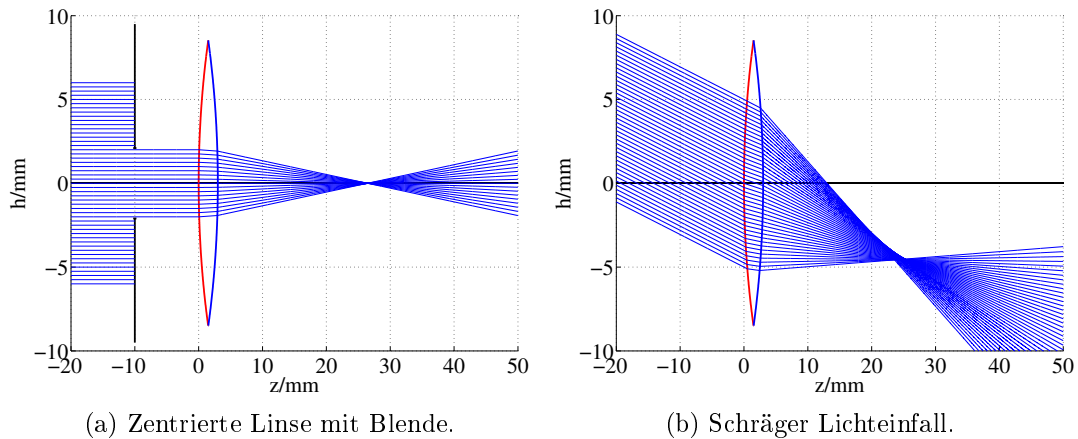


Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Koma von der Richtung: In (a) werden zusätzlich sphärische Aberrationen reduziert. In (b) ist die Koma sichtbar.

riabel, Hyperbel und Ellipse diskutiert<sup>5</sup>. Die optischen Vorteile solcher Linsen sind enorm, erforderten aber in der Vergangenheit sehr viel höhere Produktionskosten bei vergleichbarer optischer Güte als ihre sphärischen Pendanten. So lassen sich mit Asphären u. A. sphärische Aberrationen völlig vermeiden. Ob sich der Einsatz einer Asphäre rentiert, hängt davon ab, wie viele sphärische Linsen eingespart werden können und ob die Asphäre exakt zentriert werden kann. Neuere Fertigungsverfahren wie das *Abformen* und das *Ion-Milling* führten zu einer Angleichung der Fertigungskosten [41]. Beispielsweise beträgt der Preis einer typischen Asphäre 37€, während eine ähnliche sphärische Linse 29€ kostet<sup>6</sup>. Der Einbau einer solchen Asphäre ist rentabel, falls dadurch eine sphärische Linse eingespart werden kann.

Asphären zeichnen sich durch ihre Abweichung der Meridiankurve von einem Kreisbogen (mit dem Radius  $r_0$ ) aus und lassen sich in Polarkoordinaten einfach parametrisieren. Der Radius  $r$  berechnet sich aus:

$$r = r_0 + c_1 \cdot \varphi^4 + c_2 \cdot \varphi^6 + c_3 \cdot \varphi^8 + \dots \quad (2.6)$$

Dabei ist  $\varphi$  der Winkel zur optischen Achse und  $c_1, c_2, c_3, \dots$  sind die Asphärenkonstanten, die die gewünschte Form angeben. Eine andere Art der Darstellung ist die Parametrisierung in kartesischen Koordinaten, mit der optische Achse

<sup>5</sup>Für eine Beschreibung von Fresnellinsen, Schmittplatten und anderen asphärischen Freiformlinsen siehe [23, S. 142-154].

<sup>6</sup>Die Preise sind aus [27] für das Jahr 2012, die Asphäre hat die Bestellnummer: G317707000 auf Seite 376; die Sphäre G312332000, S. 343.

entlang der  $Z$ -Achse liegt. Die allgemeine Asphärengleichung in Abhängigkeit der Höhe  $h$  lautet:

$$z(h) = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{h^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)(h/r_0)^2}} + c_1 \cdot h^4 + c_2 \cdot h^6 + c_3 \cdot h^8 + \dots \quad (2.7)$$

Diese Darstellung hat den Vorteil, dass neben den bisherigen Konstanten um die Asphäre zu beschreiben, zusätzlich die Kegelschnittkonstante  $K$  eingeführt wird. Mit  $K = -1$  ergibt sich die Standardasphäre, der Paraboloid. Ist  $K > -1$  ungleich 0, so beschreibt Gleichung 2.7 ein Ellipsoid, mit  $K < -1$  ein Hyperboloid. Das in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren zur Zentrierung von sphärischen Linsen basiert auf der Annahme, dass die Abbildung einer Lichtquelle auf den eingesetzten Detektor eineindeutig (d. h. bijektiv) ist. Abbildung 2.5 zeigt, wie einfallende Lichtstrahlen (blaue Linien) an unterschiedlichen Stellen von der Asphäre reflektiert werden. Die Reflexe (rote Linien) überschneiden sich an zwei Stellen auf dem Schirm (schwarz gestrichelte Linie). Wird ein Reflex an diesen Punkten mit einem Sensor detektiert, der nicht die Richtung des einfallenden Lichts bestimmen kann, so ist nicht festzustellen, welcher Ort die Quelle ist. Somit kann die Position der Linse nicht eindeutig bestimmt werden. Weitere Informationen könnten zwar über einen Reflex der Rückseite gewonnen werden, allerdings sind diese bei Asphären in der Regel plan. Damit ließe sich nur eine Verkippung und kein lateraler Versatz detektieren. Um dieses Problem zu umgehen, kann die Linse mit einem Muster flächendeckend beleuchtet werden. Auch dies ist ein Beispiel der Deflektometrie (vgl. Abschnitt 2.5).

Eine asphärische Linse gilt immer dann als zentriert, wenn ihre Symmetrieachse mit der optischen Achse übereinstimmt. Für Asphären mit einer Planfläche wird, wie bei den sphärischen Linsen auch, der Radienaufpunkt von  $r_0$  als Bezugspunkt benutzt (vgl. Abb. 2.7). Eine Verkippung einer Fläche kann hier jedoch nicht als Versatz der zweiten Fläche betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.6).

## 2.5 Deflektometrie

Die Deflektometrie umfasst sämtliche Techniken, bei denen mittels optischer Verfahren Reflexe eines Prüfobjekts zu dessen Vermessung herangezogen werden<sup>7</sup>. Allgemein gilt für diese Systeme das Reflexionsgesetz:

$$\alpha_{\text{Reflex}} = \alpha_{\text{In}} + 2 \cdot \alpha_{\text{Lot}}. \quad (2.8)$$

<sup>7</sup> Untersuchungsergebnisse über die informationstheoretischen Grenzen deflektometrischer Systeme finden sich in [18].

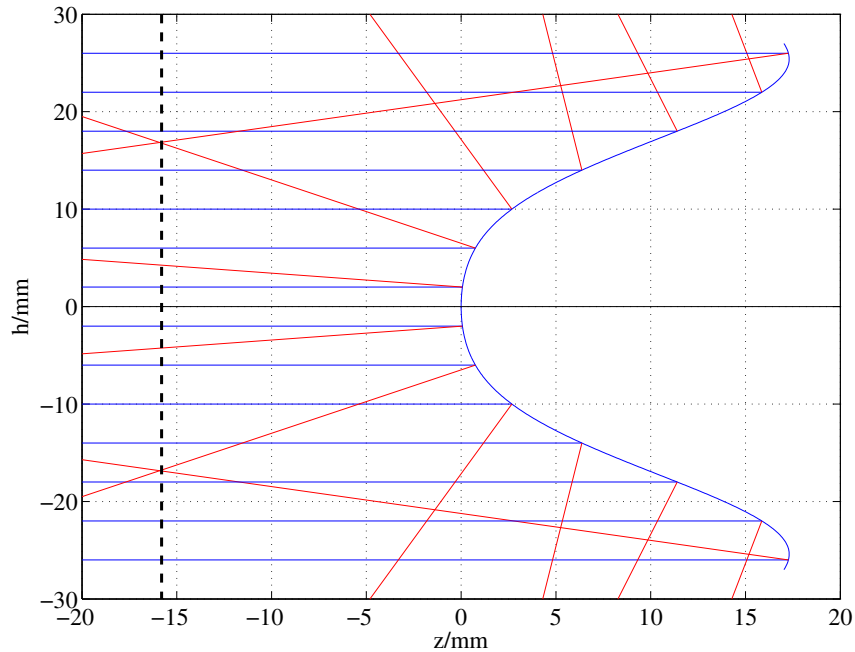


Abbildung 2.5: Einfallende Strahlen (blau) werden an einer Asphäre reflektiert (rot) und schneiden sich auf einem Schirm (schwarz gestrichelt).

Abbildung 2.6 verdeutlicht das Gesetz an einer konvexen Linse. Ein auf diesem Prinzip basierender Versuchsaufbau wird in Abschnitt 3.3.1 präsentiert (vgl. Abb. 3.8). Es handelt sich dabei um eine vereinfachte Version des Reflexbildgeräts der in Kapitel 3 vorgestellten Justierdrehmaschine. Ein Überblick über weitere Systeme, findet sich in Abschnitt 3.1.

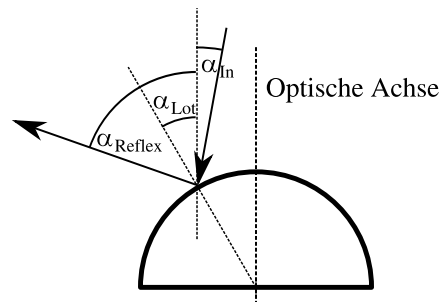


Abbildung 2.6: Einfluss der Neigung eines Objekts auf den reflektierten Strahl. Es gilt:  $\alpha_{\text{Reflex}} = \alpha_{\text{In}} + 2 \cdot \alpha_{\text{Lot}}$ .

Um mit Hilfe der Deflektometrie den Zentrierzustand einer Linse zu bestimmen, werden bei den in der Arbeit präsentierten Verfahren nicht die Oberflächen der Linse abgebildet, sondern deren Radien aufpunkte (vgl. P1 und P2 in Abb. 2.7).

Dazu wird die Linse um den Betrag des Radius in die Brennweite des abbildenden Systems verschoben, sodass ein vergrößertes virtuelles Bild entsteht. Mit der Dezentrierung einer Linsenfläche ist hier der Abstand des Radienaufpunkts zur optischen Achse gemeint, auch Ablage genannt. Beziehen sich Aussagen allgemein auf die Dezentrierung einer Linse, so ist im Folgenden das Maximum beider Einzelabstände, der Ablagen gemeint. In Abbildung 2.7 sind zwei Arten der Dezentrierung dargestellt: Teil a) zeigt eine reine Translation der Linse und Teil b) zeigt, dass für sphärische Linsen eine Rotation um einen der Radienaufpunkte (im Beispiel  $P_1$ ) gleichbedeutend ist mit einer Translation des anderen Aufpunktes. Ist keine Angabe über die Beziehung der beiden Ablagen zueinander vorhanden, so lässt sich nicht zwischen einer Translation oder einer Rotation der Linse unterscheiden. Dies wird bei der Berechnung der Toleranz berücksichtigt, da diese Phasenbeziehung in klassischen Systemen (vgl. Einleitung Abschnitt 3.2) nicht zur Verfügung steht. Wird die Linse bei der Messung um die Systemachse rotiert, so beschreibt der Reflex eine Kreisbahn dessen Radius der Ablage entspricht. Dieser Kreis wird Schlagkreis genannt, er ergibt sich aus den einzelnen detektierten Bildern, den Reflexbildern. Ein Verfahren wie der Radius des Schlagkreises bestimmt werden kann, wird in Abschnitt 3.3.2 vorgestellt.

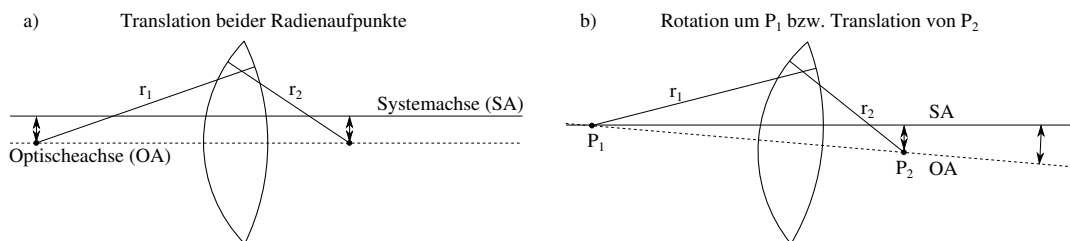


Abbildung 2.7: Verschiedene Lagen sphärischer Linsen: a) reine Translation zur optischen Achse. b) Rotation um einen Radienaufpunkt.

## 2.6 Aufbau von Präzisionsoptiken

Im Allgemeinen bestehen einfache Mikroskopobjektive heutzutage aus drei Baugruppen. Eine Baugruppe kann eine einzelne Linse sein oder aus mehreren zusammengesetzt werden. Einzellinsen werden entsprechend ihrer Form unterteilt in Konvex- und Konkavlinen, sowie Meniskuslinsen, die sowohl eine konkave, als auch eine konvexe Fläche besitzen (vgl. Abb. 2.9 links). Um chromatische Aberration zu korrigieren, werden Konvex- und Konkavlinse mit unterschiedlichen Brechungsindizes derart kombiniert, dass die Brennweiten für unterschiedliche Wellenlängen des Lichts gleich sind (vgl. Abschnitt 2.3). Werden zwei Wel-

lenlängen bzw. Farben korrigiert, ist die Baugruppe ein Achromat (*Doublet*). Das im nächsten Abschnitt vorgestellte Mikroskopobjektiv verwendet beispielsweise vier dieser Achromaten (vgl. Abb. 2.10a). Um alle Farben zu korrigieren, sind drei Glassorten nötig, die durch Kitten miteinander verklebt werden und einen Apochromat (*Triplet*) bilden.

Heutige Highend-Objektive besitzen mehr als 15 Baugruppen. Abbildung 2.8a zeigt ein solches Objektiv mit 17 Baugruppen der Firma Leica Microsystems, welches für den Einsatz im tiefen ultravioletten (DUV) Spektrum optimiert wurde. Ein Ausschnitt der Abstände einzelner Baugruppen und deren Toleranzen ist in Abb. 2.8b gezeigt. Neben der exakten Ausrichtung der Linse in der Fassung, sind für solche Objektive zusätzliche Justageschritte nötig, wie in [10] dargestellt.

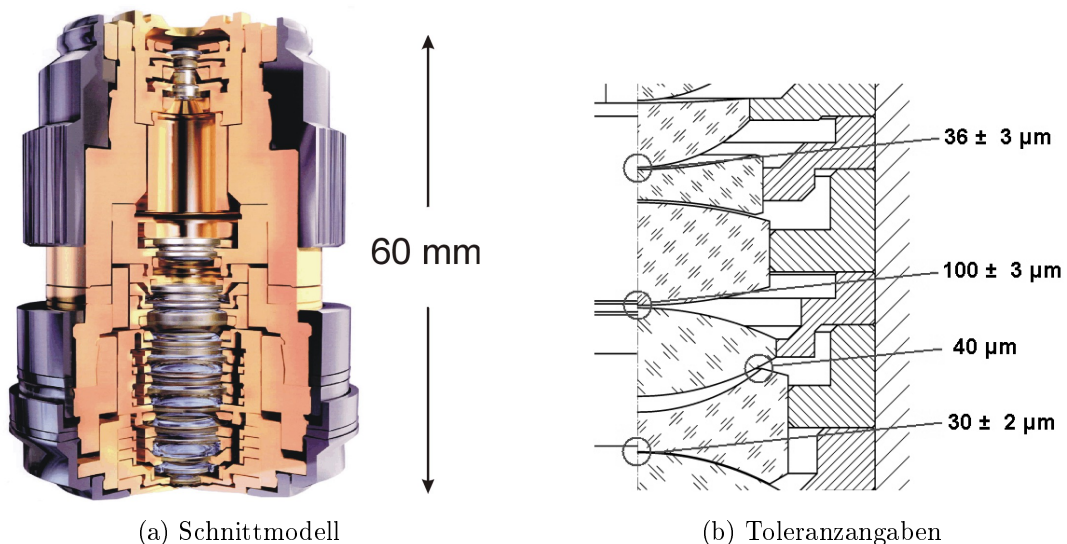


Abbildung 2.8: High-end DUV-Wasserimmersionsobjektiv der Firma Leica Microsystems mit zweihundertfacher Vergrößerung. Es besitzt 17 Linsen deren Toleranzen im Mikrometerbereich liegen.

Die verschiedenen Linsenoberflächenformen und deren Kombination beeinflussen das Reflexbild. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick, welche Bildstörungen durch die unterschiedlichen Bauformen hervorgerufen werden können. So wird bei Linsen, deren Radien aufpunkte dicht beieinander liegen (vgl. Abb. 2.9 rechts), neben dem gesuchten Reflex auch ein Reflex der anderen Oberfläche abgebildet. Dieser Störreflex ist dynamisch und kann dabei den Primärreflex vollständig überlagern (vgl. Abb. 4.9b). Diese Art der Bildstörung tritt auch bei gekitteten

Linse auf, wenn eine Toleranz für eine Grenzfläche innerhalb einer Linsengruppe eingehalten werden muss. Bei Linsen mit kleinem Radius wie z. B. Radius  $R_2$  in Abb. 2.9 rechts kann der Reflex des Radienaufpunkts von dem der Oberfläche überlagert werden, da er etwa der Dicke  $d$  der Linse entspricht. Dies führt zu einem so genannten stehenden Reflex, einer statischen Bildstörung.

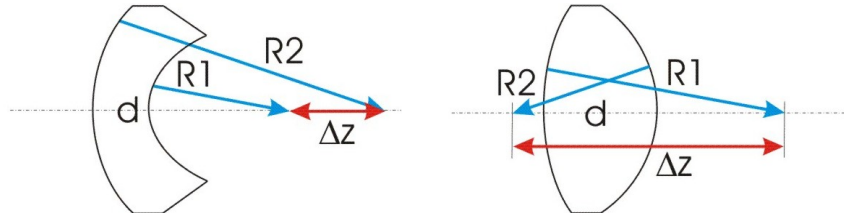


Abbildung 2.9: Abstand der Radienaufpunkte  $\Delta Z$  für Meniskuslinsen (links) und Bikonvexlinsen (rechts) der Dicke  $d$ .

Baugruppe	Art der Störung
Einzellinse mit $R \gg d$	keine
Einzellinse mit $R \approx d$	statischer Reflex
Meniskus mit $R_2 \approx R_1 + d$	dynamischer Reflex
Doublet/Triplet Toleranz für Randflächen	keine
Doublet/Triplet Toleranz für Innenfläche	dynamischer Reflex

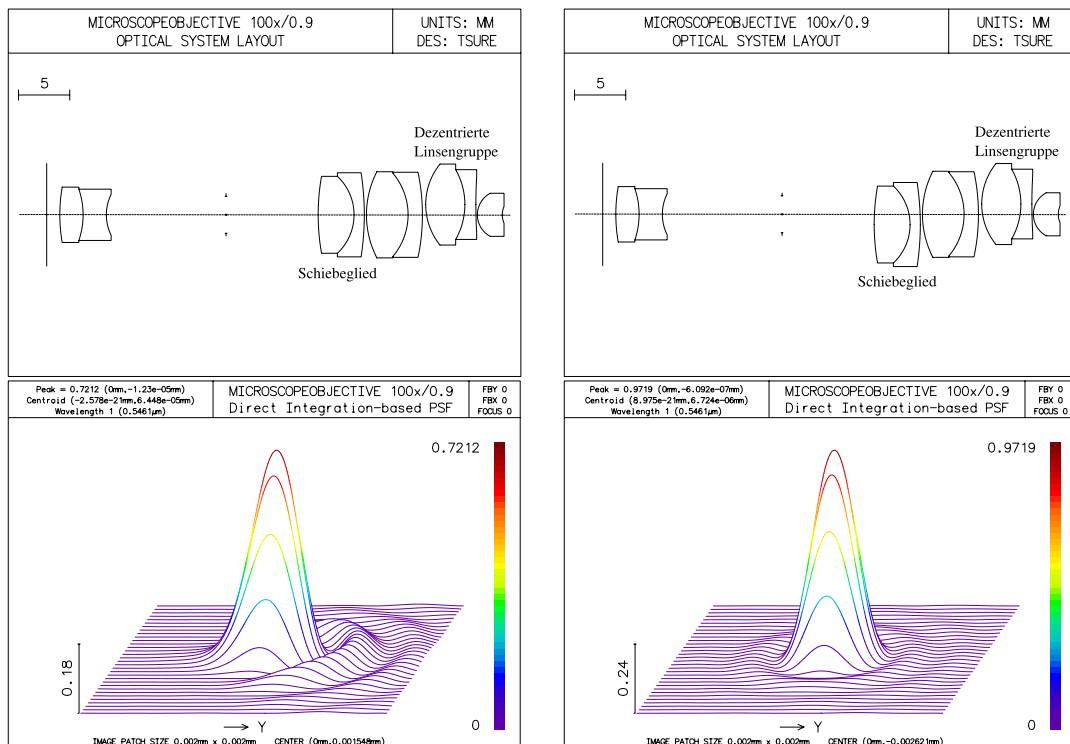
Tabelle 2.1: Störungen des Reflexbilds in Abhängigkeit der Bauform. Kombinationen sind möglich: ein Meniskus mit  $R_2 \approx d$  und kleinem  $R_1$  hat einen dynamischen und einen statischen Störreflex.

## 2.7 Auswirkung dezentrierter Linsen

In diesem Abschnitt soll modellhaft gezeigt werden, welchen quantitativen Einfluss die Dezentrierung einer gekitteten Baugruppe innerhalb einer Mikroskopobjektiv haben kann. Durch das Versetzen des Bauteils<sup>8</sup>, nimmt die Koma sichtbar zu. Abbildung 2.10a zeigt im oberen Teil ein Mikroskopobjektiv mit einhundertfacher Vergrößerung und einer numerischen Apertur (NA) von 0,9. Die vierte Linsengruppe ist durch eine Translation (nicht maßstabsgetreu) dezentriert worden. Darunter ist die sogenannte *Pointspreadfunction* (PSF) (dt. Punktbildfunktion) abgebildet. Die PSF ist die aufsummierte Lichtintensität der Lichtquelle, die durch das optische System in der Bildebene erzeugt wird.

<sup>8</sup> Dies entspricht einer Translation der optischen Achse der Linse (vgl. Abb. 2.7).

Durch den Einbau von Schiebegliedern, die beim Optikdesigns einkalkuliert werden, können Abbildungsfehler dezentrierter Linsengruppen bis zu einem gewissen Grad korrigiert werden (vgl. Abb. 2.10b). Allerdings wachsen mit zunehmenden Korrekturgrad die Nichtlinearitäten der Fehler höherer Ordnung, die dann die Abbildungsleistung reduzieren. In Abbildung 2.10b ist unten die, durch das Ausrichten des Schiebeglieds optimierte, PSF dargestellt. Durch diese Korrektur werden statt 72% in Abbildung 2.10a 97% der Lichtintensität, mit deutlich reduzierter Koma abgebildet: die nun sichtbare Aberration ist rotationssymmetrisch.



(a) Oben: Mikroskopobjektiv mit dezentrierter Linsengruppe (nicht Maßstabsgetreu). Unten: Durch die Translation entsteht Koma (Asymmetrie), die Punktbildfunktion (PSF) erreicht nur 72% der Intensität.

(b) Oben: Das Schiebeglied wird versetzt, um den Abbildungsfehler durch die dezentrierte Linsengruppe zu kompensieren. Unten: Durch die Korrektur kann die Koma deutlich reduziert werden.

Abbildung 2.10: Die Abbildung zeigt die Auswirkung einer dezentrierten Linsengruppe eines Mikroskopobjektivs auf dessen Punktbildfunktion (PSF). Die Intensität der PSF kann mit Hilfe des Schiebeglieds von 72% auf 97% gesteigert und die Koma nahezu eliminiert werden.



Die Auswirkungen auf die Abbildung, seien an folgendem Beispiel verdeutlicht [31]: Es soll der Ort einer Objektkante einmal mit einem gut gefertigtem Objektiv und ein zweites Mal mit dem gleichen Objektiv, aber mit einer um  $2\mu\text{m}$  dezentrierten Linsengruppe ermittelt werden. Das Einbringen einer Kante in den Strahlengang erzeugt ein Hell-Dunkel-Übergang mit einer Breite in der Größenordnung der Wellenlänge. Typischerweise wird daher der Punkt mit 50%-relativer Lichtintensität als Position der Kante definiert. Abbildung 2.11 zeigt zwei solcher berechneten Intensitätsverläufe. Die Position der Kante des Objektivs ohne Verkippung ist in rot dargestellt und liegt wie erwartet bei  $0\text{ mm}$ . Das Objektiv mit der um nur  $2\mu\text{m}$  dezentrierten Linsengruppe ergibt die blaue Kurve. Diese ist  $60\text{ nm}$  von der wahren Position der Kante entfernt. Mit dem zweiten Objektiv lässt sich die Kantenposition bei der Fertigung von Prozessoren, wie den in Kapitel 1 erwähnten Core™ i7, nicht mehr ausreichend genau bestimmen, da dieser mit seiner Strukturgröße von nur  $45\text{ nm}$  bei der Fertigung exakt ausgerichtet werden muss: Bei einer Unsicherheit von  $60\text{ nm}$  wird möglicherweise auf eine falsche Kante justiert.

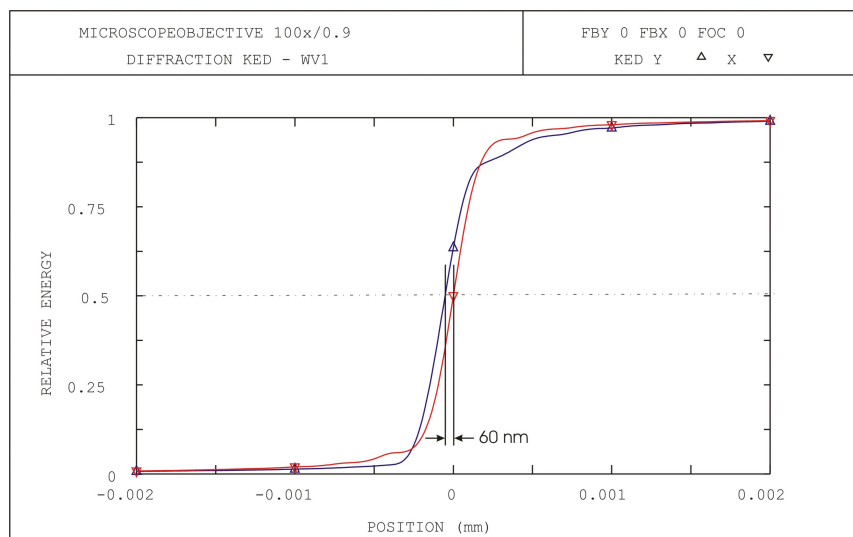


Abbildung 2.11: Intensitätsverlauf einer Hell-Dunkel-Kante bei Position 0. Die rote Kurve spiegelt das Ergebnis eines gut zentrierten Objektivs wieder, während für die blaue Kurve eine Linsengruppe des Objektivs um  $2\mu\text{m}$  dezentriert wurde, wodurch ein Versatz von  $60\text{ nm}$  entsteht.



# Kapitel 3

## Charakterisierung von Linsen

In diesem Kapitel werden zunächst Verfahren vorgestellt, mit denen Linsen und andere Objekte genau vermessen werden können (Abschnitt 3.1). Diese werden danach bewertet, wie schnell und präzise sie den Zentrierzustand von Linsen ermitteln können. Im anschließenden Abschnitt 3.2 wird die Funktionsweise der Justierdrehmaschine JDM 200 CNC erläutert. Diese im BMBF Verbundprojekt „Automatisierte Höchstpräzisions-Fertigungstechnologie für Mikrooptik-Baugruppen - *FERMI*“ [37] entwickelte Maschine der Firma OptoTech, stellt den aktuellen Stand der Technik dar. Die Details zur Funktionsweise, der im folgenden als JDM 200 bezeichneten Maschine, werden in den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.3 beschrieben. Die Methodik, mit der sich Bildverarbeitungssysteme vergleichen lassen, wird in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Die darin erarbeiteten Bewertungskriterien werden im späteren Verlauf der Arbeit verwendet, um Algorithmen auf ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Eine Zusammenfassung der Kriterien sowie die Ergebnisse der Analyse sind im Abschnitt 3.3.3 zusammengefasst.

### 3.1 Übersicht aktueller Verfahren

In diesem Abschnitt werden mehrere Techniken vorgestellt, wie Präzisionsoptiken charakterisiert werden können. Zur Untersuchung von Oberflächentopographien eignen sich mehrere Messverfahren. So lassen sich u. a. mit modernen Rastertunnelmikroskopen (RTM) einzelne Atome untersuchen. Dies geschieht über das exakte Halten eines festen Abstandes zwischen Tastspitze und der zu vermessenden Oberfläche. Dabei wird die äußerst fein geätzte Tastspitze über Piezoaktuatoren so gesteuert, dass durch eine elektrische Rückkopplung der dort anliegende Tunnelstrom konstant gehalten wird. Durch das als *Scannen* bezeichnete Abrastern, der zu untersuchenden Probe wird die Gesamtgeome-

trie rekonstruiert. Nachteilig ist der Zeitaufwand des Scannens und der limitierte Untersuchungsbereich. Dieser beträgt bei einem typischen RTM maximal  $0,04 \text{ mm}^2$  [7, S. 563-564].

Ein weiteres berührungsloses Verfahren ist die Interferometrie. Grundlegend wird bei allen interferometrischen Verfahren der optische Weg vom Messobjekt mit einer Referenz verglichen. Sind die Weglängen bis auf wenige  $\mu\text{m}$  gleich, so entstehen Interferenzmuster durch die Überlagerung des kohärenten Lichts. Dabei unterscheiden sich die Messsysteme durch den Kohärenzgrad und die Anzahl der verwendeten Wellenlängen.

Eine Variante dieser Technik ist das Mirau-Interferometer [36, Abschnitt 5]. Der optische Referenzweg wird mit dem Strahlteiler direkt in das Mikroskopobjektiv eingebaut, welches das Messobjekt beleuchtet. Dadurch erreicht es eine hohe Stabilität und kann aufgrund der kompakten Bauform im industriellen Fertigungsalltag eingesetzt werden. Da der größtmögliche Kontrast des Interferenzmusters bei Übereinstimmung zwischen Referenz- und Objektweg erzielt wird, ist der Messabstand auf einige Millimeter begrenzt. Dies birgt das Risiko der Beschädigung oder Zerstörung des Objektivs bzw. der zu untersuchenden Linse.

Als Alternative zu dieser Bauart existiert ein Interferometer der Firma FOGALE nanotech [43]. Der entwickelte Sensor basiert auf einem Glasfaseraufbau und einer superlumineszenten Diode. Statt den Abstand zwischen Sensorkopf und Linse zu verändern, wird bei diesem System ein Spiegel kontrolliert im Referenzarm verschoben. Mit diesem System ist es möglich, mit einer Messung den Abstand sämtlicher Grenzflächen einer Linsenbaugruppe zu erhalten. Es werden Genauigkeiten im Bereich von  $\pm 100 \text{ nm}$  für die einzelnen Abstände erreicht, wenn die Brechungsindizes der Linsengläser bekannt sind.

Ein weiteres System ist ein von der Firma Lumphos entwickeltes Mehrwellenlängeninterferometer. Dieses ist in der Lage, über einen Messbereich von mehreren Zentimetern eine Auflösung von  $\pm 50 \text{ nm}$  zu erzielen [26]. Hierbei wird durch die Überlagerung mehrerer Wellenlängen eine künstliche Wellenlänge erzeugt, um einen großen Eindeutigkeitsbereich zu erhalten. Die hohe Genauigkeit wird durch die Auswertung der Reflexe der einzelnen Wellenlängen erzielt.

Die Deflektometrie ist eine weitere Technik, die zum Vermessen von Oberflächentopographien eingesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 2.5). Ist der Beleuchtungswinkel bekannt, so lässt der Winkel, unter dem das Licht detektiert wird, Rückschlüsse auf die Neigung zu (vgl. Formel 2.8). Bei einer großflächigen Beleuchtung kann so die Topographie rekonstruiert werden.

Die Firma Photonic Metrology setzt dieses Verfahren bei ihrem Produkt *Ray-*

*Sense* ein. Es ist in der Lage, innerhalb einer Minute die 3D-Messung durchzuführen [3]. Dabei werden durch das Messen der reflektierten Strahlen an zwei verschiedenen Orten die Reflexionswinkel rekonstruiert und damit die Oberfläche des Messobjekts als eine Punktwolke berechnet.

Das an der Universität Erlangen entwickelte System *FlyTri* ist ebenfalls ein deflektometrisches System. Mit Hilfe des handgeführten Sensors ist das System in der Lage dreidimensionale Topographiedaten mit einer Auflösung von bis zu 30  $\mu\text{m}$  zu berechnen [1]. Weitere in Erlangen konstruierten Systeme verwenden mehrere Kameras [17] oder einen telezentrischen Aufbau und eine Richtungscodierung [32], um den Reflexionswinkel eindeutig zu bestimmen. Dabei werden Genauigkeiten im Submikrometerbereich erzielt und Messgeschwindigkeiten von einigen Sekunden erreicht.

Die Bestimmung des Zentrierzustands von Linsen wird bei ihrer Justage mehrfach ausgeführt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Je schneller ein System misst, desto schneller kann damit die Linse zentriert werden. Bei dem im Folgenden vorgestellten Verfahren werden einige hundert Messungen benötigt: scannende Systeme und solche, bei denen die Messung länger als einige Sekunden dauert, sind daher ungeeignet, die gewünschten zeitlichen Anforderungen zu erzielen (vgl. Abschnitt 3.2). Einzig die letzten beiden vorgestellten deflektometrischen Systeme messen schnell und präzise genug. Ihre Stärke liegt in der Beschreibung der gesamten Messfläche ( $3 \times 3 \text{ mm}^2$  für [17]), für die Justage ist die Topographie jedoch zweitrangig. Ein System, welches wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, die Ablage der Linsenoberfläche schneller bestimmen kann ist daher vorzuziehen.

## 3.2 Die Justierdrehmaschine JDM 200 CNC

Der bei dem Projektpartner Leica Microsystems CMS GmbH in Wetzlar stehende Prototyp der Justierdrehmaschine JDM 200 CNC<sup>1</sup> der Firma Opto-Tech wurde im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Er wurde mit den damaligen Projektpartnern LINOS Photonics GmbH, dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH realisiert. Er vereint erstmals alle nötigen Messverfahren in einem CNC-Bearbeitungszentrum, um gefasste Linsen automatisch zu zentrieren und dann zu bearbeiten [37]. Das Zusammenspiel der Komponenten des in Abbildung 3.1 dargestellten betriebsbereiten Prototyps wird in diesem Abschnitt näher erläutert.

---

<sup>1</sup> Diese wird im Folgenden als JDM 200 bezeichnet.



Abbildung 3.1: Der fertige Prototyp der Justierdrehmaschine JDM 200 CNC bei der Firma Leica Microsystems CMS GmbH in Wetzlar. Im mittleren Sichtfenster ist das obere Reflexbildgerät sowie die Rückseite einer der Schlaghämmer zu sehen. Der an der Maschine angebrachte Computer regelt nur den CNC-Prozess, ist jedoch nicht in der Lage die Linse zu zentrieren. Die dafür nötige Elektronik und der Messcomputer stehen auf dem linken Tisch.

Klassisch wird das Problem des Linsenzentrierens mit einer modifizierten Drehbank gelöst<sup>2</sup>. Diese besitzt gegenüber einer herkömmlichen Drehbank ein bewegliches Futter und ein optisches System, um den Zentrierzustand der gefassten Linse überprüfen zu können. Bei diesen Klingelbänken handelt es sich um Spitzdrehbänke. Im Futter wird die gefasste Linse so fixiert, dass sie durch Schläge auf das Futter sowohl translatorisch zur Drehachse, als auch rotatorisch bewegt werden kann. Die Optik besteht aus einem auf die Drehachse kollimierten Lichtstrahl der von der Linsenoberfläche reflektiert wird und auf einen Schirm abgebildet wird, sodass eine Verkippung, bzw. ein Versatz der Linse zu einer Kreisbahn des Lichtstrahls führen (vgl. Abschnitt 2.5). Nach manueller Justage wird die Fassung mit Hilfe von einem Drehmeißel nachbearbeitet.

Ein Nachteil des klassischen Systems ist die lange Justagedauer, da nicht gleich-

<sup>2</sup>Ein auf dem gleichen Prinzip basierender Konzeptaufbau ist in Abbildung 3.8 im Abschnitt 3.3.1 dargestellt.

zeitig beide Radienaufpunkte beobachtet werden können. Daher müssen beide im Wechsel justiert werden, wozu die Optik jeweils neu fokussiert werden muss. Um diesen Bearbeitungsschritt zu beschleunigen, wurden schon früh Konzepte und Ideen entwickelt. Bereits im Jahr 1995 wurde ein Patent angemeldet, dass diesen Prozess mittels eines Sensors und elektromechanischen Justierstellgliedern automatisieren sollte [22]. Erst 2007 wurde dann mit der Konstruktion der JDM 200 ein ähnliches Konzept umgesetzt. Um den immer höheren Anforderungen der Halbleiterindustrie, der Biologie und der Medizin an Mikroskopobjektive gerecht zu werden, wurden für diese die in Tabelle 3.1 aufgeführten Toleranzen formuliert. Diese basieren auf Rechnungen, wie der in Abschnitt 2.7 durchgeführten. Für das Einhalten dieser Toleranzen waren u. a. die Entwicklung hydrostatischer Führungen, sowie eine hydrostatische Werkstückspindel mit einer Rundlaufgenauigkeit  $< 0,5 \mu\text{m}$  nötig. Als Schwingungsdämpfer wurde die Basis als Granitportalstativ realisiert, was zu einem Gesamtgewicht von ca. 5500 kg führte.

Fassungstoleranzen	typisch	mit Aufwand	neues Ziel
Mittelpunktsablage	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
Planschlag Fassung	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
Rundlauf Fassung	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
$\phi$ -Fassung $< \phi$ -Hülle	10 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
Scheitelposition			$< 1 \mu\text{m}$
Justagedauer	7 min	5 min	3 min

Tabelle 3.1: Überblick der Toleranzanforderungen für Untergruppen, wie sie vor der Realisierung der JDM 200 bei der Optikproduktion typisch, bzw. mit Aufwand realisierbar waren.

Nach der Konstruktion der Maschine, wurde neben den zu erreichenden Toleranzen, noch ein weiteres Bewertungskriterium eingeführt. So sollte die Maschine möglichst universell einsetzbar sein, d. h. einen möglichst umfassenden Teil der verschiedenen Baugruppentypen der Firma Leica Microsystems zentrieren können. Dazu wurde eine Abschätzung erstellt, wie „schwierig“ die einzelnen Baugruppen bisher manuell zu zentrieren waren und welchen Anteil diese am Gesamtsortiment<sup>3</sup> haben. Die Grundlage für den Schwierigkeitsgrad waren die Reflexbilder und die dabei sichtbaren Störungen (vgl. Abschnitt 2.6, Tab. 2.1).

---

<sup>3</sup> Der Anteil ist nicht auf die zu produzierende Menge bezogen, sondern auf die Gesamtzahl der Typen.

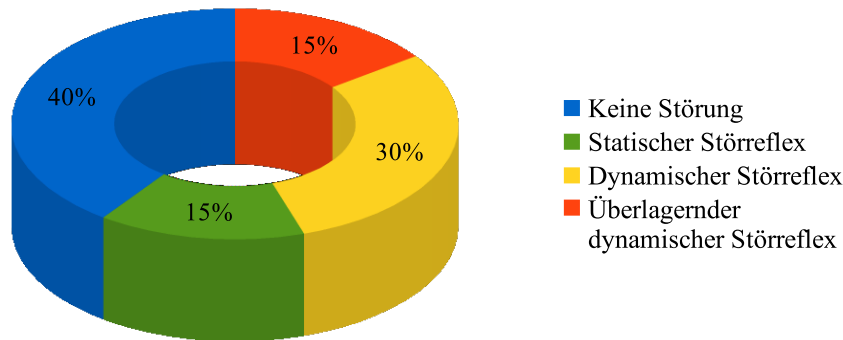


Abbildung 3.2: Verteilung der Baugruppentypen in die Störklassen (vgl. Tab. 2.1). Ein wichtiges Ziel der Entwicklung ist es, so viele Typen wie möglich mit der JDM 200 zentrieren zu können.

### 3.2.1 Justierfutter und Reflexbildgerät

Die JDM 200 wurde gegenüber dem klassischen Konzept des Justiersdrehens an mehreren Stellen optimiert. Um den Prozess vollständig zu automatisieren, wurde ein neuartiges Justierfutter zur Ausrichtung der Linsen und eine Optik konzipiert, um den Lichtreflex mit mehreren Sensoren auszuwerten. Im Folgenden werden diese Komponenten näher erläutert.

Es wurde ein Magnetfutter entwickelt, um die Anforderungen an die Toleranz und Zentrierdauer zu erfüllen. Statt eines Zwei-Kalottenfutters, welches durch Adapter auf den Radius der zu zentrierenden Linsen eingestellt werden muss [34], wurde ein Planlager mit einem Kalottenfutter kombiniert. In Abbildung 3.3 ist das neue Futter abgebildet. Hammer 2 ist für die Translationsbewegung, während mit Hammer 1 das Futter im oberen Teil gekippt werden kann. Die Linse wird oberhalb des Futters auf wechselbare Gewindeadapter geschraubt und kann durch die Innenbohrung auch von der Unterseite vermessen werden. Die Elektromagneten im Futter ermöglichen eine dynamische Haltekraft. Diese wird während des Justierens reduziert, während sie bei der Bearbeitung der Linse das Futter festhalten. Die zwei Stoßhammer bestehen aus einer Beschleunigungs- und einer Rückzugspule und arbeiten mit einer Frequenz von bis zu 20 Hz bei einer maximalen Stoßkraft von 1600 N. Sie sind für eine Lebensdauer von über 10 Millionen Hübe ausgelegt. Der Stick-Slip-Effekt<sup>4</sup> ermöglicht dabei reproduzierbare Schrittweiten im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich [11].

<sup>4</sup>Dieser meist störende Effekt tritt auf, wenn die Haftreibung größer ist als die Gleitreibung. In diesem Fall wird die gedämpfte Kopplung der Lager des Futters gezielt genutzt, um dieses durch die Stöße der Hämmer minimal zu verschieben.



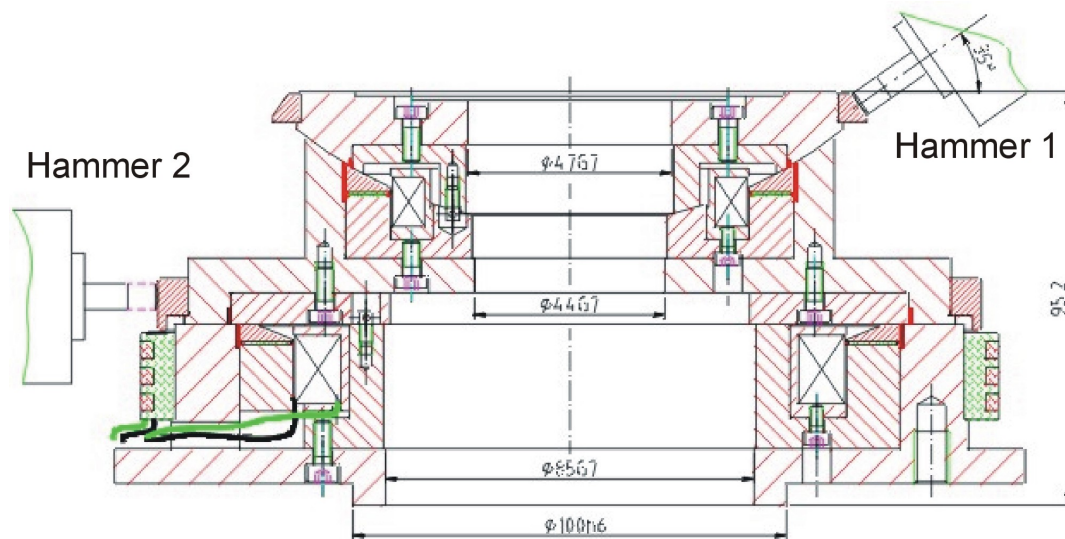


Abbildung 3.3: Schnitt durch das für die JDM 200 entwickelte Magnetfutter. Mit Hammer 1 wird die Neigung des Kalottenfutters variiert, während Hammer 2 für die Translationsbewegung sorgt. Deutlich zu erkennen ist die Innenbohrung, die die Montage eines zweiten Reflexbildgerätes unter dem Futter erlaubt [37].

Für die JDM 200 wurden zwei verschiedene Reflexbildgeräte (RBG) entwickelt. Während bei Jenoptik und LINOS ein RBG mit Zoomoptik entwickelt wurde, um große Linsen mit entsprechenden Radien bearbeiten zu können, fokussiert sich die Anforderung bei Leica und des hier vorgestellten Designs auf Linsen mit kleinen Durchmessern für Mikroskopobjektive. Das in Abb. 3.4 dargestellte RBG beinhaltet die Beleuchtungsoptik, sowie die Detektoren. Die Beleuchtung ist eine Köhler'sche-Beleuchtung, die die Messfeldblende auf die Linse abbildet. Als Messfeldblende wurde ein Pinhole mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet, welches über das Loch ein Haar gespannt hatte. Dieses erzeugt eine scharfe Kante im Reflexbild zur einfacheren Fokussierung. Entgegen dem in der Abbildung gezeigtem Design, wurden in die RBG bei Leica statt einem drehbaren Strahlteiler zwei Strahlteilerwürfel eingebaut und bei der CCD das gleiche Abbildungsverhältnis von 4:1 wie bei der Photodiode gewählt. Damit können die Digitalkamera und die Photodiode im gleichen Arbeitsbereich und simultan verwendet werden. Durch den Einbau einer  $\lambda/4$ -Platte hinter der letzten Linse des Objektivs lassen sich die Rückreflexe der Linsen des Objektivs vermeiden. Bei geeigneter Abstimmung der Polarisation zwischen den RBG wird zusätzlich das einfallende Licht des gegenüber liegenden gefiltert. Um ein größeres Spektrum an Linsen bearbeiten zu können, wurden bei diesem Layout

optionale Vorsatzoptiken berücksichtigt. Die eingebaute Digitalkamera diente ursprünglich nur dazu, manuell den Fokus nachjustieren zu können und das Zentrierergebnis visuell abzuschätzen.

Im Verlauf der Dissertation wurden die verwendeten Messfeldblenden der RGB ausgetauscht (vgl. Abschnitt 5.2.3). Außerdem führten die Erkenntnisse dieser Arbeit zu einer Weiterentwicklung dieser Geräte (vgl. Abschnitt 5.4).

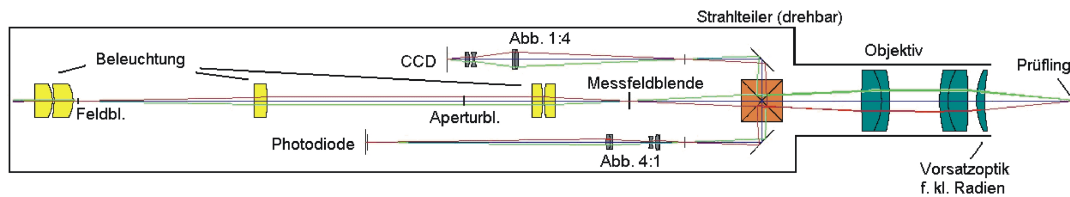


Abbildung 3.4: Design des Reflexbildgeräts der Firma Leica. In der Endfassung wurden statt eines drehbaren Strahlteilers zwei polarisationsabhängige Strahlteiler verwendet.

### 3.2.2 Halbschattensensor und Kamera

Um den Lichtreflex der zu zentrierenden Linse auswerten zu können, wurden in die Reflexbildgeräte Silizium Photodioden der Firma Hamamatsu eingebaut (Typ: S1227-1010BR). Mit einer Fläche von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  sind sie so dimensioniert, dass die auf ihnen abgebildete Messfeldblende vierfach vergrößert einen Durchmesser von 4 mm hat.

Für die Dimensionierung wurde errechnet, dass eine Linse mit einem Flächenradius von  $r = 500 \text{ mm}$  bei einer Anfangsdezentrierung mit einem Kippwinkel von  $1/6^\circ$  und einem Versatz von knapp 1,5 mm einen Schlagkreis mit einem Durchmesser von ca. 8 mm auf der Diode erzeugen würde. Dies deckt die Anwendung für Mikroskopobjektivlinsen ausreichend ab, da diese i. A. einen um eine Größenordnung kleineren Radius besitzen.

Zur Messung des Zentrierzustands, wird die Hälfte der Sensorfläche abgedeckt, so dass ein Halbschattensensor (HS) entsteht. Ist die Linse nicht zentriert, so rotiert ihr Lichtreflex um das Zentrum auf der Sensorfläche, wie in Abbildung 3.5 links dargestellt. Über einen Lock-In-Verstärker wird das so entstehende periodische Signal ausgewertet. Die Amplitude des Signals ist proportional zur Dezentrierung und zur Helligkeit des Reflexbildes. Um eine Umrechnung zwischen der Ausgangsspannung der Lock-In-Verstärker und der Ablage zu erhalten, müsste für jede Baugruppe der Proportionalitätsfaktor  $\eta$  bestimmt und

gespeichert werden. Stattdessen wurde für jeden Baugruppentyp beim Einrichten experimentell eine Grenzspannung festgelegt. Nach abgeschlossenem Zentriervorgang wurde die Linse mit einem Prüfgerät vermessen und diese Spannung iterativ so lange angepasst, bis das Ergebnis innerhalb der Toleranz lag. Die Phaseninformation der Lock-In-Verstärker wird genutzt, um die Schlagzeitpunkte der Ausrichthämmer zu berechnen. Ist die Linse ausgerichtet, so wie in Abbildung 3.5 rechts dargestellt, liefert die Photodiode nur noch eine Gleichspannung, aus der der Lock-In-Verstärker ein Signal unter der Grenzspannung erzeugt, woraufhin mit dem Drehprozess begonnen werden kann.

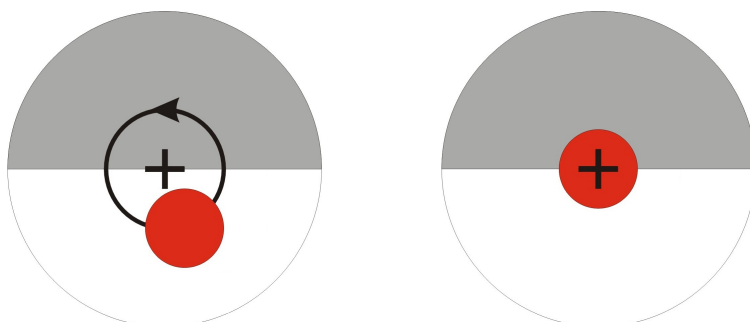


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Halbschattensensors (HS). Die graue Fläche ist abgedeckt, der Lichtreflex ist rot. Links: Der Reflex einer dezentrierten Linse rotiert um den Mittelpunkt der Maschinen-Achse (+). Rechts: Die Linse ist zentriert, optische und Maschinen-Achse liegen auf einem Punkt.

Die in dem oberen und unteren Reflexbildgerät eingesetzten Schwarzweißkameras CF 8/5 MX werden von der Firma Kappa opto-electronics GmbH produziert [16]. Sie haben einen 1/2-Zoll *Interline Transfer CCD*-Sensor mit einer Fläche von  $(6,4 \times 4,8)$  mm<sup>2</sup>. Der Framegrabber (Matrox Meteor II) wandelt das Videosignal mit 50 Hz um und errechnet alle 40 ms ein 8 bit Graustufen-Bild mit  $768 \times 576$  Pixel. Die größte Einschränkung der Kameras ist der CCD-Sensor, der das Bild nicht wie bei einem *Global Shutter*-Verfahren über die gesamten Sensorfläche aufbaut, sondern erst alle ungeraden und dann alle geraden Zeilen des Chips ausliest (*Zeilensprungverfahren* bzw. *interlacing*). Diese Technik ist für einfache Anzeigeräte wie Röhrenmonitore bzw. alte Fernseher optimiert, die das Bild ebenfalls interlaced aufbauen. In Kombination mit dem Framegrabber führt dies allerdings dazu, dass bewegte Objekte, wie der Reflex der RBG der JDM 200, auseinander gezogen werden wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Bei einer Neuentwicklung der Reflexbildgeräte, wurden die Kameras aus diesem Grund ausgetauscht (vgl. Abschnitt 5.4).

Die reguläre Spindeldrehzahl der JDM 200 beträgt 400 Umdrehungen pro Mi-

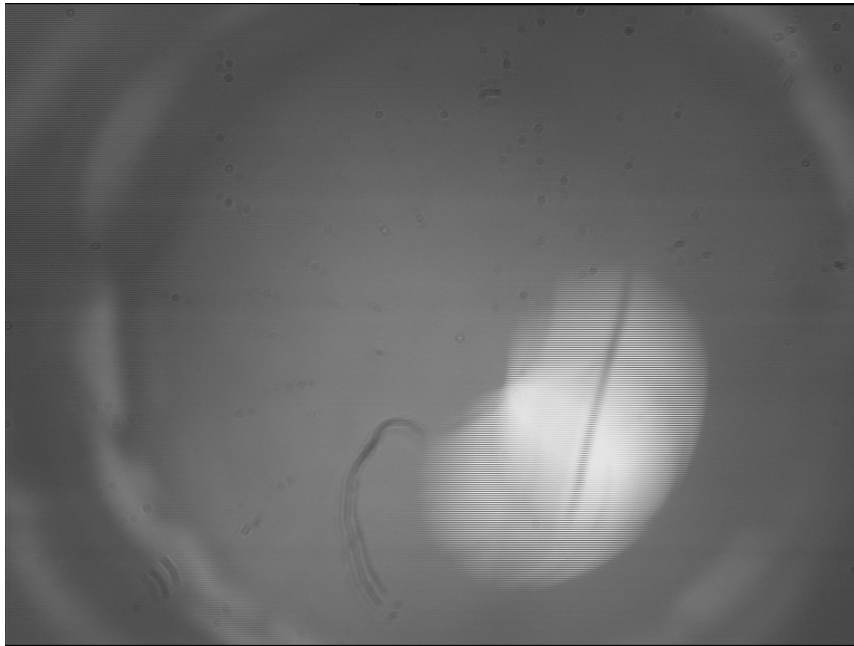


Abbildung 3.6: Durch *Interlacing* auseinander gezogener Reflex. Er rotiert mit 400 Umdrehung pro Minute um das Zentrum, dies entspricht  $48^\circ$  zwischen den 20 ms der Halbbilder.

nute entsprechend einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = 2,4 \cdot 10^3 \text{ }^\circ/\text{s}$ . Zwischen zwei Halbbildern (20 ms) ergibt sich demnach ein Winkelversatz von  $48^\circ$ . Bei dieser Drehzahl werden Reflexe mit einem Durchmesser von 100 Pixel durch eine Dezentrierung von 135 Pixel vollständig getrennt. Um dieses Problem zu umgehen wurden die Bilder in „Viertelbilder“ umgewandelt. Dazu wurde ein neues Bild angelegt, welches nur jede zweite Zeile der Kamerabilder (also ein Halbbild) enthält. Um die Bildproportionen zu erhalten, wurde zusätzlich jedes zweite Pixel in  $x$ -Richtung übersprungen, so dass das resultierende Bild nur ein Viertel der Originalgröße besitzt.

Das Abbildungsverhältnis und der Porportionalitätsfaktor der RGB wurde mit einer Messung überprüft. Dazu wurde mittels des Schrittmotors der JDM 200 ein stehender Reflex um eine definierte Strecke verfahren<sup>5</sup> und dabei aufgezeichnet. Die einzelnen Position des Reflexes wurde mit dem Schwellwertverfahren (vgl. Abschnitt 4.1.2) ermittelt. Es ergab sich für ein Vorsatzobjektiv mit einer Brennweite von  $f = 110 \text{ mm}$  ein Verhältnis von  $\eta = 0,56 \pm 0,01 \text{ Pixel}/\mu\text{m}$ . Mit der Pixelgröße von  $8,33 \times 8,33 \mu\text{m}^2$ , die sich aus der Kameradokumenta-

<sup>5</sup>Der Schrittmotor kann die Linse in  $x$ -Richtung bewegen und wird im Normalfall dazu verwendet die Linse an den Drehmeißel zu fahren; er eignet sich nicht dazu die Linse zu zentrieren.

tion [16] errechnen lässt, ergibt sich für das normale Objektiv ( $f = 130$  mm) eine Vergrößerung von:

$$\eta \cdot 8,33 \mu\text{m}/\text{Pixel} \cdot \frac{110}{130} = 3,95 \pm 0,07 \quad (3.1)$$

Das Ergebnis entspricht dem vorgesehenen Abbildungsverhältnis von 4:1 im Rahmen des einfachen Fehlerintervalls.  $\eta < 1$  bedeutet für die zukünftigen Algorithmen, dass für diese Kamera-RBG-Kombination für die Auflösung eines Mikrometers, eine Subpixelgenauigkeit nötig ist. Für die Viertelbilder mit normalen Objektiv ergibt sich  $\eta_{1/4} = 0,23 \text{ Pixel}/\mu\text{m}$ .

### 3.2.3 Ablauf des Justier-Drehprozesses

Um eine Linse mit der JDM 200 zu zentrieren sind folgende Schritte nötig:

1. Eine gefasste Linse (vgl. Abb. 3.7a) wird in das Schraubgewinde des Justierfutters eingespannt.
2. Die Linsenparameter werden geladen, so dass die JDM 200 die Reflexbildgeräte in dem richtigen Abstand zu den auszurichtenden Linsenflächen positioniert.
3. Sind die Bilder scharf auf den Kontroll-Monitoren der Kameras zu sehen, wird die Spindel in Rotation versetzt und der Zentrierprozess gestartet.
4. Die Hämmer (vgl. Abb. 3.3), kontrolliert vom Messcomputer, richten die optische Achse der Linse entsprechend der mechanischen Achse aus.
5. Die Software informiert den Bediener, dass die Grenzspannung unterschritten ist und die Linse nun bearbeitet werden kann.
6. Nach manueller Bestätigung, misst die Maschine die Scheitelhöhe der Linse und deren Fassung in Maschinenkoordinaten<sup>6</sup> und sperrt dann das Magnetfutter.
7. Die Drehzahl wird erhöht und die Außenmaße der Linsenfassung (in Abb. 3.7b grün dargestellt) werden im Drehprozess mit dem Meißel bearbeitet.
8. Das Ergebnis ist eine den optischen und fertigungstechnischen Toleranzen entsprechend gefasste Linse, die fertig bearbeitet vom Bediener aus der Maschine geholt werden kann.

Mit der neuen Industrie-Version, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, werden Schritt 5 und 6 automatisiert (vgl. Abschnitt 5.2.2).

<sup>6</sup> Dazu wird die in Abschnitt 3.1 vorgestellte Lösung von FOGALE verwendet.

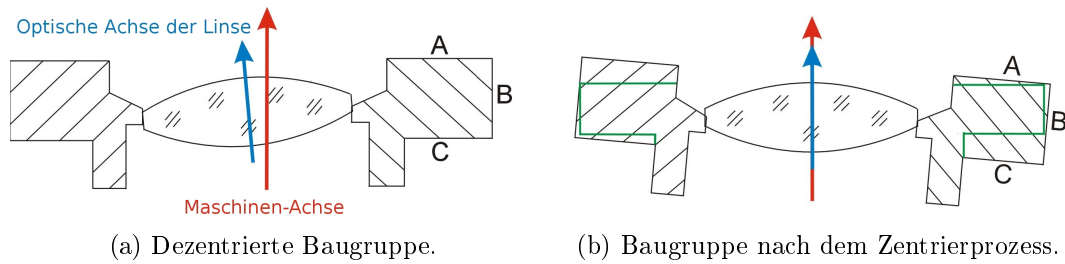


Abbildung 3.7: Der Zentrierprozess richtet die Optische Achse zur Maschinen-Achse aus. Anschließend werden die Flächen A, B und C (in grün), durch den Drehprozess abgenommen. Die Abbildungen sind nicht maßstabsgetreu.

### 3.3 Analyse der Methodik

In diesem Abschnitt werden drei verschiedene Methoden vorgestellt, die der Untersuchung von Signalen zur Linsenjustage dienen. Es soll gezeigt werden, dass sich diese Methoden eignen, um quantitative Aussagen über die Güte von Bilderkennungssystemen und des HS zu erhalten.

#### 3.3.1 Versuchsaufbau und Simulation

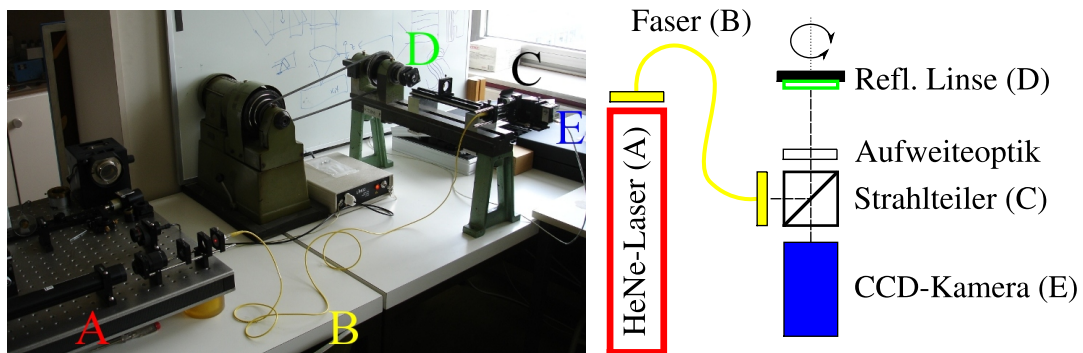


Abbildung 3.8: Versuchsaufbau (vereinfachte Klingelbank): Das Licht eines Lasers (A) wird über eine Faser (B) auf den Strahlteilerwürfel (C) geführt und von dort auf die drehbar gelagerte Linse (D) geworfen. Der Reflex wird von einer Digitalkamera (E) detektiert.

Der zur Analyse verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 3.8 dargestellt. Es handelt sich dabei um eine vereinfachte Klingelbank, die kein Justagefutter besitzt und statt einer Köhlerschen-Beleuchtung einen Laser verwendet. Die Spindelachse hat eine Rundlaufgenauigkeit kleiner  $5\ \mu\text{m}$  und wird über einen

Gummiriemen von einem Drehstrommotor angetrieben. Die verwendete Digitalkamera besitzt einen 1/1,8 Zoll monochromen CMOS-Chip mit einer Auflösung von  $1280 \times 1024 = 1,3$  Megapixel und nimmt bis zu 15 Bilder pro Sekunde mit 8 bit-Graustufen auf.

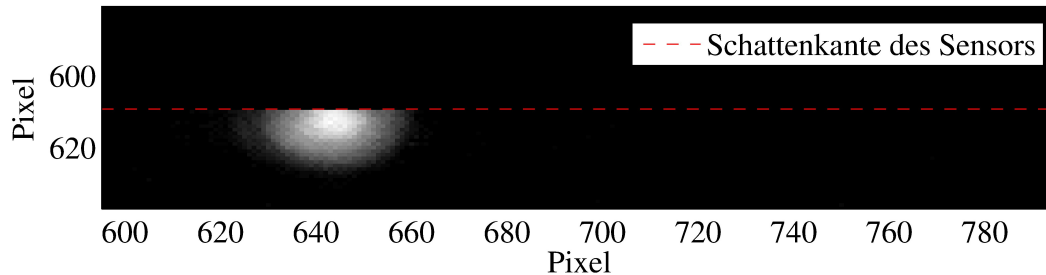


Abbildung 3.9: Ausschnitt des Kamerabildes des Versuchsaufbaus. Mittels Software wurde der obere Teil des Bildes geschwärzt, um den Halbschattensensor zu simulieren. Die Sensorkante wurde auf die Höhe des Kreismittelpunktes gelegt, den die Lichtreflexe der Einzelbilder beschreiben.

	Einzelreflex		Doppelreflex	
	Simulation	Experiment	Experiment	Simulation
Fall	A	B	C	D

Tabelle 3.2: Übersicht über die vier verschiedenen Reflex-Typen (A-D).

Getestet wurden die Methoden mit vier unterschiedlichen Typen von Reflexen. Diese unterteilen sich in zwei simulierte (theoretische) Reflex-Typen (A, D) und zwei mit dem Versuchsaufbau gemessene (B, C) (vgl. Tab. 3.2). Es wurde jeweils ein einzelner Reflex und ein Doppelreflex benutzt, um den Einfluss von dynamischen Störungen (vgl. Abschnitt 2.7) zu untersuchen.

Das softwaretechnisch erzeugte Reflexbild für den einzelnen Reflex (A) wurde an die Parameter des gemessenen Reflexes (B) angepasst. Sein Durchmesser beträgt 30 Pixel bei 5%-Helligkeit bei einer Ablage von 50 Pixel und einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 300 Umdrehungen pro Minute (RPM).

Für alle vier Typen wurde eine Serie von 100 Bildern aufgenommen und als Film gespeichert. Dieser wurde mit einer Routine ausgewertet, die den HS (vgl. Abschnitt 3.2.2) nachbildet. Diese schwärzt den oberen Teil des Bildes durch eine Matrixmultiplikation (vgl. Abb. 3.9) und summiert anschließend die Helligkeit sämtlicher Pixel. Im Gegensatz zu dem in der JDM 200 verwendeten HS kann und wurde mit dieser Technik die Helligkeit zur besseren Vergleichbarkeit normiert.

### 3.3.2 Auswertung

#### Dynamik des Signalverlaufs

Aus dem (normierten) Signalverlauf der Helligkeit lässt sich nicht direkt ableiten, wie hoch das Signal zu Rausch-Verhältnis (SNR) ist, da es vom Zentrierzustand des Reflexes abhängt. Für den simulierten Einzelreflex ist der Dynamikumfang maximal, weil der Reflex ausreichend dezentriert ist: das Zentrum des Reflexes rotiert mit einem Radius von 50 Pixel um den Mittelpunkt des Bildes, bei einem Reflexdurchmesser von 30 Pixel. Bei einer Ablage dieses Reflexes von 7,5 Pixel betrage die Dynamik beispielsweise nur 30%. Statische Störungen wie z. B. ein heller Bildhintergrund und ein Reflex der nicht die maximale Helligkeit hat, können zum gleichen Ergebnis führen. So betrug die Dynamik im Fall (B) 70% (vgl. Tab. 3.3). Dieser Wert wurde erreicht, indem die HS-Kante manuell auf die Höhe des Spindelmittelpunktes bei Pixel 609 gelegt wurde, um die Dynamik zu maximieren.

Für die Fälle (C) und (D) wird der periodische Verlauf durch einen zweiten dynamischen Reflex gestört. Im Experiment (C) wurde dies durch das Versetzen der Vorsatzoptik (vgl. Abb. 3.8) realisiert, sodass ein Reflex der hinteren Linsenfläche sichtbar wurde. In der Simulation (D) wurde ein zweiter Reflex mit halber Helligkeit generiert. Der Signalverlauf des Doppelreflexexperimentes ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Reduktion der Dynamik und die Amplitudenmodulation durch den zweiten Reflex ist erkennbar, aber mit dieser Untersuchungsmethode alleine nicht quantifizierbar.

#### Störanalyse mittels Fouriertransformation

Die durch Mehrfachreflexe erzeugten Störungen im Reflexbild lassen sich gut mit der Fouriertransformation (FT) des Signalverlaufs analysieren. Die Höhe des Peaks im Spektrum ist dabei ein direktes Maß für die Amplitude des Signalverlaufs und unterliegt damit den selben Einschränkungen wie dessen direkte Analyse (vgl. Abb. 3.11). Periodische Störungen die sich als Nebenpeak äußern können gut quantifiziert und mit dem Hauptpeak verglichen werden.

In Abb. 3.11 ist links die FT des Experiments und rechts die FT des simulierten Doppelreflexes zu sehen. Trotz der experimentellen Störung ist kein ausgeprägter Nebenpeak zu sehen. Der Peak bei 1,7 Hz erreicht eine relative Höhe von einem Drittel zum Hauptpeak<sup>7</sup> und hängt nicht direkt vom zweiten Reflex ab. Für die Simulation des Doppelreflexes wurde die Drehzahl halbiert und damit die effektive Abtastrate verdoppelt. Dies war nötig um das Shannon'sche Abtasttheorem  $f_{\text{Abtast}} > 2f_{\text{Max}}$  zu erfüllen [33]. Der frequenzverdoppelte Ne-

<sup>7</sup>Der entsprechende Nebenpeak beim Einzelreflex beträgt 0,25 (vgl. Tab. 3.3).



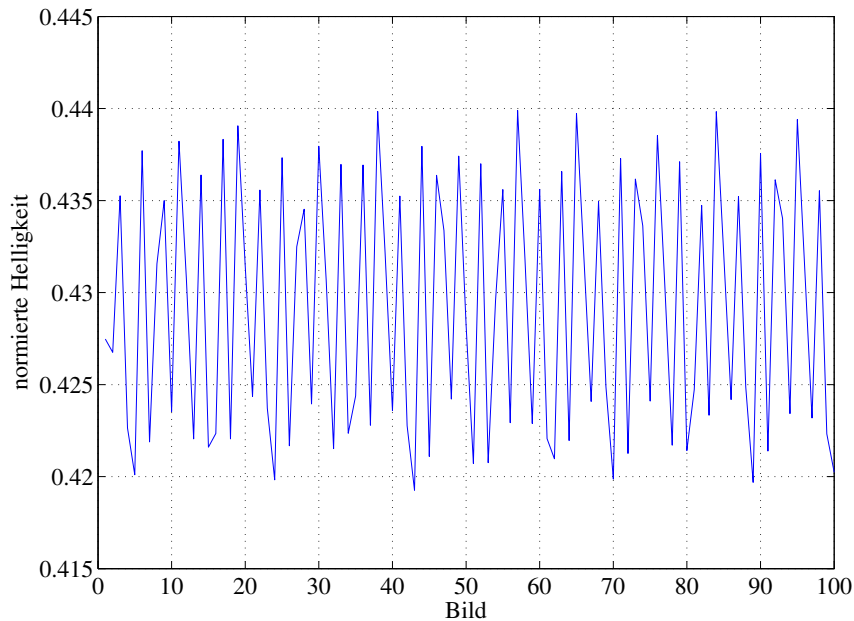


Abbildung 3.10: Der normierte Helligkeitsverlauf einer dejustierten Linse, um Doppelreflexe zu untersuchen (Fall D). Die Dynamik erreicht max. 2% Helligkeit (vgl. Tab. 3.3).

benpeak resultiert nicht aus einer von der Grundfrequenz abweichenden Rotationsgeschwindigkeit des Zweitreflexes, sondern aus dessen Positions- und Winkelversatz. Dadurch entstand annähernd ein Rechtecksignal, welches in der FT zu dem Nebenpeak führt. Frequenzverdopplungen sind für Lock-In-Verstärker unproblematisch, so dass auch diese Reflexbilder zentriert werden können. Probleme beim Linsenzentrieren werden also nur dann auftreten, wenn die Frequenz der Störung zur Grundfrequenz verstimmt ist. Dies trat bei Versuchen an der JDM 200 auf (vgl. Abschnitt 4.4 bzw. Abb. 4.13b).

### Berechnung des Kreisfit und der Standardabweichung $\sigma_{r_x}$

Die Messgenauigkeit eines Systems hängt davon ab, wie reproduzierbar dessen Ergebnisse sind. Es muss eine höhere Auflösung/Stabilität gewährleistet werden, als die Toleranzen, die damit sichergestellt werden sollen. Der entscheidende Parameter in den Messungen zur Charakterisierung der Linsenposition ist die Ablage des Reflexes.

Die HS-Technik erzeugt den Schlagkreis, dessen Radius die gesuchte Ablage darstellt, normalerweise durch die Amplitude und die Phase des Lock-In-Verstärkers. Bei den simulierten HS wird die „Position“ des Reflexes dadurch

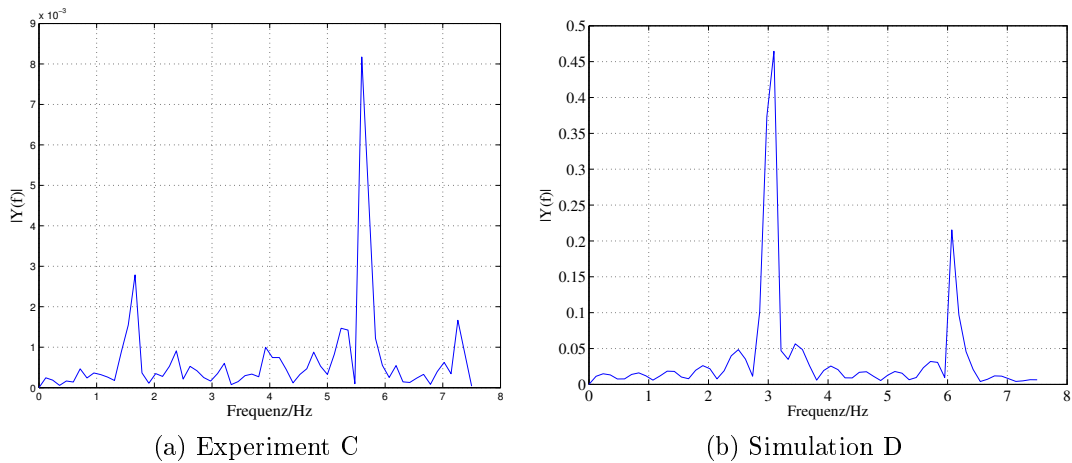


Abbildung 3.11: Fouriertransformation des Signalverlaufs eines Reflexbildes mit dynamischer Störung in Form eines Doppelreflexes. Beide Signale produzieren keine Störungen im Ausgang eines Lock-In-Verstärkers.

gewonnen, dass die Reflexbilder doppelt abgeschattet werden, d. h. die Bilder werden getrennt in  $y$  und  $x$ -Richtung untersucht. Der Signalverlauf der Helligkeit wird somit vergleichbar mit einer tatsächlichen Abbildung des Reflexes auf der CCD-Kamera.

Abbildung 3.12 zeigt wie ein Kreisfit mit Hilfe der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate das Zentrum des Kreises und dessen Radius  $r_4$  berechnet wurde. Der Index des Radius steht dabei für die Anzahl der Schwerpunkte, die zu dessen Berechnung benutzt wurden.

Ein solcher Kreisfit wurde an jeweils 4 konsekutiven Bildern der 100 Reflexbilder durchgeführt. Dabei wurden die Schwerpunkte mehrfach verwendet, so dass 97 Radien berechnet werden konnten<sup>8</sup>. Über die ermittelten Radien  $r_4$  der Fits, wird dann die Standardabweichung  $\sigma_{r_4}$  bestimmt. Allgemein gilt:

$$\sigma_{r_X} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_{X_i} - \bar{r}_X)^2} \quad \text{mit} \quad \bar{r}_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{X_i}. \quad (3.2)$$

Dabei steht das  $X$  für die Anzahl an Mittelungspunkten für den Kreisfit. Der Mittelwert  $\bar{r}_X$  ist für den HS das nicht geeichte Maß für die Dezentrierung der Linse (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$  ist somit ein Maß für die Genauigkeit des eingesetzten Verfahrens zur Bestimmung der Ablage, da es angibt, wie sicher sich der Radius, also die Dezentrierung bestimmen lässt.

<sup>8</sup>Für die Kreisfits wurden also die Reflexbilder 1-4, 2-5, ..., 97-100 verwendet.

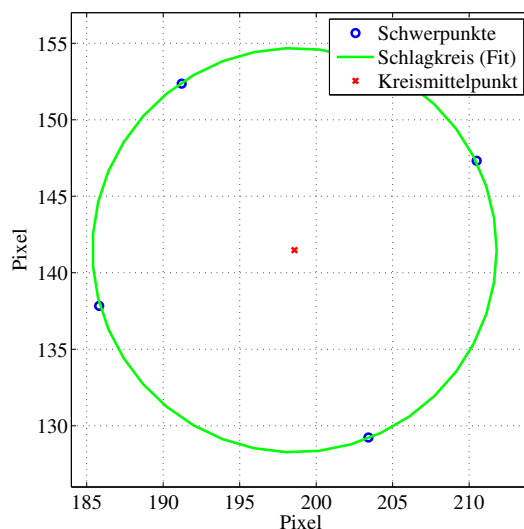


Abbildung 3.12: Berechneter Kreisfit über 4 Reflexschwerpunkte. Der daraus ermittelte Schlagkreisradius  $r_4$  wird zur Stabilitätsanalyse mit weiteren berechneten Radien verglichen.

### 3.3.3 Analyse-Ergebnis

Fall	Einzelreflex		Doppelreflex	
	Simulation A	Experiment B	Experiment C	Simulation D
norm. Dynamik	1	0,7	0,02	1
Peak-Höhe (PH)	0,5	0,32	0,008	0,46
Frequenz / Hz	5,12	5,42	5,60	3,04
Relative 2.-PH	0	0,25	0,33	0,46
norm. $\sigma_{r_4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 3.3: Übersicht über die Ergebnisse gegliedert nach Methode. Die Peak-Höhen der FT sind in normierter Helligkeit angegeben.

Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht, über die mit den einzelnen Methoden gefundenen Messwerte bei der Untersuchung der vier Reflex-Typen (A-D). Es hat sich gezeigt, dass die Untersuchung der Dynamik des Signalverlaufs auf Probleme der Beleuchtung hinweisen kann. Da der Helligkeitsverlauf jedoch auch davon abhängt, wie sehr die Linse dezentriert ist, kann aus einer geringen Dynamik nicht eindeutig auf eine schlechte Beleuchtung, bzw. störendes Hintergrundlicht geschlossen werden. So ist der Helligkeitsverlauf einer exakt zentrierten Linse eine Gerade.

Aus dem Maximum des nicht normierten Verlaufs kann auf die Helligkeit des Reflexes, bzw. auf den Reflexionsgrad der Linse geschlossen werden, jedoch beeinflussen Störungen diesen Wert gleichermaßen. Streulicht und periodische Störungen sind also erkennbar, ohne Kenntnis der Ablage jedoch nicht quantifizierbar. Die niedrigste gemessene Dynamik von 2% des Doppelreflex-Experiments reicht dem Lock-In-Verstärker noch zur Zentrierung der Linse.

Die ermittelten normierten Peak-Höhen der FT in Tab. 3.3 zeigen eine Abhängigkeit von der Dynamik des Signals. Dies gilt auch für die Doppelreflexuntersuchungen, deren Peaks um etwas mehr als einen Faktor 2 kleiner sind als die Dynamik. Dieser Zusammenhang kann durch weitere Nebenpeaks weiter reduziert werden, dies lässt sich aber berücksichtigen, so dass eine gesonderte Auswertung der Dynamik nicht nötig ist.

Es ist zu beobachten, dass  $\sigma_{r_4}$  mit zunehmender Höhe des Zweitpeaks wächst und somit zwischen den beiden ein Zusammenhang besteht.

Die ermittelten Standardabweichungen  $\sigma_{r_4}$  in Tab. 3.3 steigen bei zunehmender Störung an. Die Schwankungen des Radius eines simulierten Reflexes (A), sind über 3 Größenordnungen kleiner, als die eines künstlich gestörten Reflexbildes (D). So deutlich trat die Abhängigkeit bei den Experimenten (B) und (C) nicht auf. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen wurde (B) durch Streulicht gestört und zum anderen war der Störreflex in (D) sehr schwach<sup>9</sup>.

Dies zeigt, dass die Bestimmung von  $\sigma_{r_x}$  auch für nicht geeichte Systeme einen klar quantifizierbaren Wert ergibt, der geeignet ist, unterschiedliche Reflexbilder und verschiedene Verfahren miteinander zu vergleichen. Da auch  $\sigma_{r_x}$  von der Dezentrierung der Linse abhängt, muss der Vergleich unterschiedlicher Techniken mit identischen Reflexbildern durchgeführt werden.

Die Analyse der verschiedenen Methoden zeigt, dass sich die FT hervorragend dafür eignet, die Reflexbilder bzw. deren Signalverlauf auf dynamische Störungen zu untersuchen. Mit ihrer Hilfe kann erklärt werden, warum der HS nicht alle Linsen zentrieren kann (vgl. Abschnitt 4.4). Die Untersuchung der Standardabweichung  $\sigma_{r_x}$  zeigte, dass diese ein gutes Maß für die Variationen von Reflexbildserien ist. Es wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit dazu verwendet, Bildverarbeitungsalgorithmen zu vergleichen und deren Leistungsfähigkeit zu analysieren (vgl. Abschnitt 4.3).

---

<sup>9</sup>Die Helligkeit des realen Störreflexes (C) betrug weniger als 10%, die des simulierten hingegen 50%.

# Kapitel 4

## Adaptive Bildverarbeitung

Im Abschnitt 4.1 werden grundlegende Techniken zur Bildverarbeitung und deren Anwendung vorgestellt. Dabei wird Bezug zur späteren Anwendung in der JDM 200 genommen. Darauf folgt im Abschnitt 4.2 ein adaptiver Algorithmus, um noch schneller Linsen zentrieren zu können. Im anschließenden Teil des Kapitels werden die vorgestellten Algorithmen auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft (Abschnitt 4.3). Dabei wird die Rechengeschwindigkeit der einzelnen Techniken in Unterabschnitt 4.3.1 untersucht und deren Tauglichkeit für ein weites Anwendungsspektrum in Abschnitt 4.3.2 getestet. Die Ergebnisse der Analyse sind tabellarisch im Abschnitt 4.3.3 zusammengefasst. Die aus der Leistungsanalyse gewonnen Erkenntnisse werden zur abschließenden Beurteilung direkt mit den bisherigen Verfahren der JDM 200 in Abschnitt 4.4 verglichen. Dabei werden die in Abschnitt 3.3 favorisierten Methoden angewandt, um eine Antwort auf die Frage: „Welches Verfahren ist das universellere?“ zu finden.

### 4.1 Grundlagen digitaler Bildverarbeitung

Die Ursprünge der digitalen Bildverarbeitung basieren auf einer Kombination der Telegrafen<sup>1</sup> und der Fotografie. Zum eigenständigen Forschungsgebiet wurde die digitale Bildverarbeitung Anfang der 60er Jahre mit dem Aufkommen der ersten Großrechenanlagen. Diese waren in der Lage, die gesamte Bildinformation in digitaler Form zu speichern und zu verarbeiten [35].

Die digitale Bildverarbeitung lässt sich, wie die elektronische Datenverarbeitung, in die drei Bereiche Aufnahme (bzw. Eingabe), Verarbeitung und Ausgabe einteilen. Dabei ist es wünschenswert, eine Rückkopplung zwischen der Verarbeitung und der Aufnahme zu besitzen, um die Qualität der Aufnahme

---

<sup>1</sup>Die Telegrafen wurden Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelt.

zu optimieren. Im Fall der JDM 200 ist dies allerdings nicht gegeben, da weder die Kamera noch die Beleuchtung in geeigneter Weise vom Messcomputer steuerbar sind.

#### 4.1.1 Bildvorverarbeitung: *Region-of-interest* (ROI)

Zu den Aufgaben der Bildvorverarbeitung gehören u. a. Filteroperationen (wie zum Beispiel der Medianfilter), Kontraststärkung, sowie das Auswählen eines Bildausschnitts auch *Region-of-interest* (ROI) genannt. Eine ROI ist eine globale Filterfunktion, die durch eine Matrixmultiplikation ausgeführt werden kann<sup>2</sup>. Die schwarzweiße (binäre) Filtermatrix<sup>3</sup> enthält Einsen in dem interessanten Bereich und Nullen überall sonst. Der Bereich der ROI kann manuell oder automatisch ermittelt werden. In Abbildung 4.1 sind die Schritte eines Algorithmus dargestellt, der für die Applikation des Linsenzentrierens automatisch die ROI wählt.

#### 4.1.2 Segmentierung: Schwellwert und Kantenerkennung

Nach der Bildvorverarbeitung wird die Bildsegmentierung durchgeführt. Sie dient dazu, die gesuchten Objekte hervorzuheben, d. h. sie vom Hintergrund zu trennen. Zwei Algorithmen, die dies bewerkstelligen, sind die Schwellwertkonvertierung (SWK) und die Kantenerkennung. Die aus der Segmentierung gewonnene Information wird meistens binär repräsentiert, es ist aber auch möglich, mehrere Unterteilungen zu generieren, das Prinzip bleibt dabei identisch.

##### Schwellwertkonvertierung

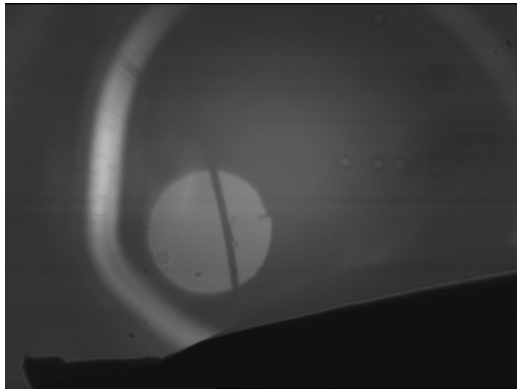
Ein einfaches, globales Schwellwertverfahren zur Konvertierung eines Bildes, lässt sich mathematisch wie folgt formulieren:

$$I_{x,y} = \begin{cases} 1 & \text{falls } I_{x,y} \geq \text{Schwellwert} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.1)$$

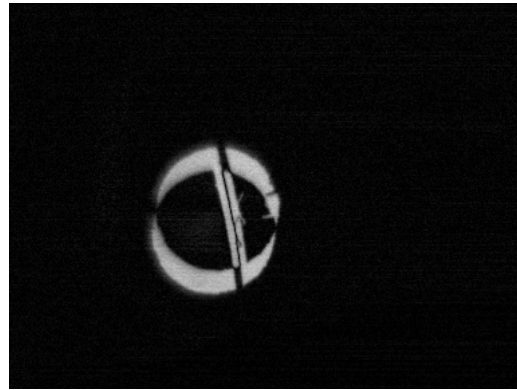
Dabei ist  $I_{x,y}$  die Intensität, bzw. die Helligkeit des Pixels  $(x, y)$ . Nach der Konvertierung ist das Bild binär. Eine globale SWK führt diese Fallunterscheidung für alle Pixel einmalig durch und ist in der Konsequenz schneller als die meisten anderen Segmentierungsverfahren. Die Wahl des Schwellwerts ist ausschlaggebend für die Qualität der Segmentierung. Für die in Abbildung 4.1a gezeigte

<sup>2</sup>Für Schwarzweißbilder kann sie durch eine logische Addition berechnet werden.

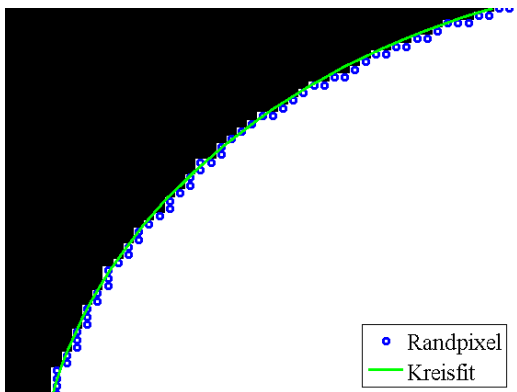
<sup>3</sup>Die Filtermatrix wird auch binäre Maske genannt.



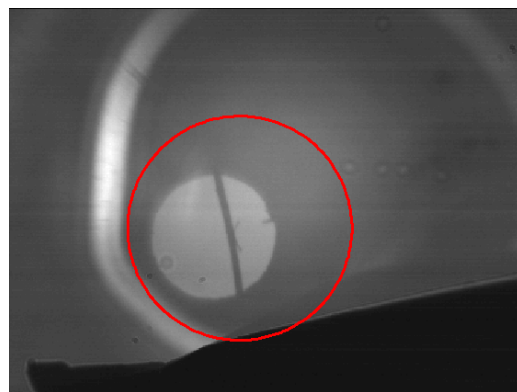
(a) Reflexbild eines Achromaten, dessen Kittfläche zentriert werden soll (vgl. Abschnitt 2.6); das Streulicht ist heller als der Reflex. Es wird eine Serie von Bildern über mehrere Umdrehungen aufgenommen.



(b) Pixelweise wird der Differenzbetrag von konsekutiven Bildern berechnet. Es entstehen Bilder bei denen alle sich unterscheidenden Pixel hell dargestellt werden.



(c) Für große und kleine Dezentrierungen kann es notwendig sein eingeschlossene schwarze Flächen zu füllen, bevor an die Randpixel ein Kreis gefittet wird.



(d) Der Radius des gefundenen Kreises wird um 20% (Erfahrungswert) vergrößert. Dies ist nötig, da die Dezentrierung der einzelnen Linsenflächen beim Zentrieren temporär zunehmen kann (vgl. Abb. 5.2). Die endgültige ROI ist der rote Kreis im Bild.

Abbildung 4.1: Erläuterung der wichtigsten Schritte des Algorithmus zur automatischen Bestimmung einer ROI vor der Linsenzentrierung.

Aufnahme gibt es keinen globalen SW, um den Reflex von der Störungen zu trennen. Die Verwendung einer ROI verbessert die Positionsbestimmung daher deutlich (vgl. Abschnitt 4.3). In Abschnitt 4.2 wird gezeigt, wie für das Problem des Linsenzentrierens ein optimales Verfahren inklusive Schwellwert automatisch gefunden werden kann.

### Kantenerkennung

Neben der SWK gehören Kantenerkennungsalgorithmen zum Standardrepertoire der Bildsegmentierung. In der Programmiersprache MATLAB sind bereits sechs verschiedene Kantenerkennung-Algorithmen implementiert<sup>4</sup>. Sie basieren, wie in der Signaltechnik [15] darauf, die Ableitung des Signals zu berechnen. Bei Bildern ist das Signal diskret und zweidimensional, daher kann statt der Ableitung die Differenz benachbarter Pixel verwendet werden. Ein an das Problem der Reflexerkennung angepasster Algorithmus beginnt mit der Berechnung des Betrags der Gradienten in zwei Richtungen:

$$g(x, y) = \sqrt{(\Delta_x b(x, y))^2 + (\Delta_y b(x, y))^2}. \quad (4.2)$$

Dabei ist  $b(x, y)$  die Helligkeit eines Pixel des Eingangsbilds am Punkt  $(x, y)$  und  $g(x, y)$  das resultierende „Gradienten“-bild. In Abbildung 4.2 ist das der Betrag  $g(x, y)$  als blaues Overlay eingezeichnet. An der geschlossenen Kante ist zu erkennen, dass es nicht nötig ist, die diagonalen Richtungen mit zu berechnen. Zur anschließenden Segmentierung wird das am weitesten links, rechts, oben und unten liegende Kantenpixel gesucht (gelbe Kreise) und dann ein Kreisfit durchgeführt (grün). Eine Segmentierung kann nun mit Hilfe des Kreises durchgeführt werden und das Zentrum des Kreisfits kann gleich als Mittelpunkt<sup>5</sup> gespeichert werden. Die Kantenerkennung wurde innerhalb der roten ROI ausgeführt, da die Kante der statischen Störung links (A) und die Kante an der Abschattung im unteren Teil des Bildes (B) steiler war als die des Reflexes (vgl. Abb. 4.2). Dies zeigt, dass auch die Kantenerkennung nicht immer global einsetzbar ist, obwohl es Fälle gibt, bei denen mit einem manuellen Kantenschwellwert zwei unterschiedlich scharfe Reflexe segmentiert werden können [31].

<sup>4</sup>Diese sind Sobel, Prewitt und Roberts, die richtungsabhängig sind [40], der Canny-Algorithmus, der sich besonders für schwache Kanten eignet [4] und ein Algorithmus, der auf dem Laplace-Operator basiert, der auf einen Gauß-Filter angewandt wird [6].

<sup>5</sup>Der Mittelpunkt des Reflexes muss für die Schwellwertkonvertierung zusätzlich berechnet werden (vgl. Abschnitt 4.1.3).



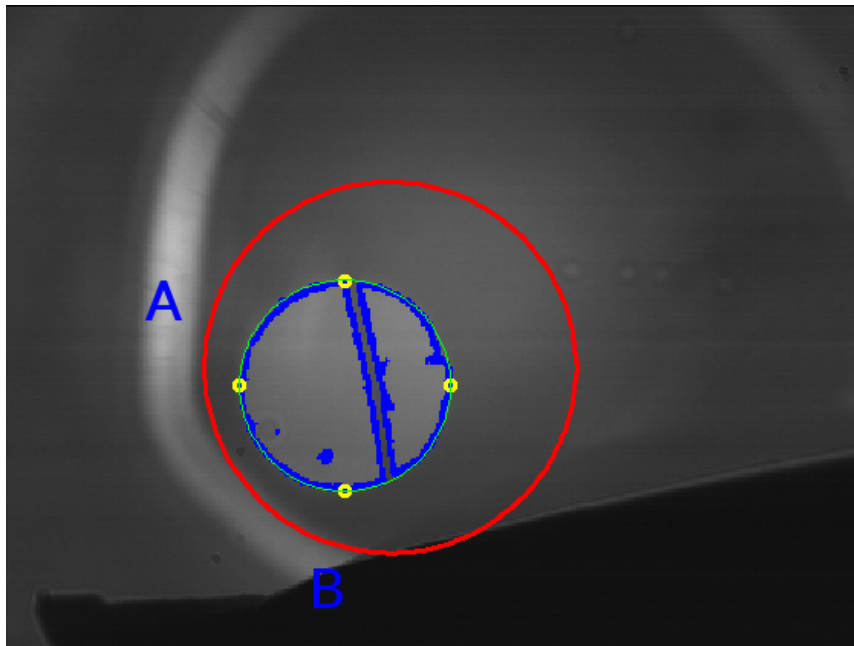


Abbildung 4.2: Reflexbild der JDM 200 (vgl. 4.1a). Das Ergebnis der Kanten-erkennung ist blau dargestellt, die innerhalb der ROI (rot) ausgeführt wurde, um die Gradienten im Bereich A und B auszuschließen. Anschließend wurden die gelben Randpunkte als die Ecken der Kantenerkennung bestimmt und mit ihnen der grüne Kreisfit zur Segmentierung berechnet.

### 4.1.3 Bildinterpretation: Schwerpunkt und Korrelation

Der letzte Schritt in dem Prozess der digitalen Bildverarbeitung ist die Bildinterpretation. Hier werden i. A. a priori Informationen über die gesuchten Objekte verwendet, um z. B. deren Lage, Größe oder auch Häufigkeit bestimmen zu können. Zum Zentrieren der Linsen wird die exakte Position des Reflexes benötigt. Diese kann über eine Kreuzkorrelation oder aus den segmentierten Bildern bestimmt werden.

#### Schwerpunktbestimmung

Für allgemeine Objekte eignet es sich, den Schwerpunkt als die Position des Objekts festzulegen. Der Schwerpunkt eines Bildes lässt sich über die Aufsummierung sämtlicher Pixelpositionen und der anschließenden Mittelung unter Berücksichtigung der Pixelhelligkeit berechnen. Dies führt bei einem Grauwertbild zu einer (linearen) Gewichtung der Helligkeit. Die Positionsfindung für ein segmentiertes Schwarzweißbild (im Folgenden `bwBild`) lässt sich elegant

in MATLAB formulieren:

```
[pixelposy pixelposx] = find(bwbild);
centerx = sum(pixelposx)/length(pixelposx);
centery = sum(pixelposy)/length(pixelposy);
```

Der `find()`-Befehl liefert als Rückgabewert sämtliche Pixelpositionen, deren Wert ungleich Null ist. Über diese Punkte wird dann gemittelt<sup>6</sup>, wobei `sum()` die Positionswerte aufsummiert und `length()` die Anzahl der enthaltenen Elemente zurück gibt.

### Kreuzkorrelation

Allgemein ist die Korrelation  $R_{xy}$  zweier Funktionen (oder Signalreihen) ein Maß dafür, wie ähnlich sich Ursprungs- und Vergleichsfunktion sind. Somit kann damit ein Muster innerhalb eines Bildes gesucht werden. Die Korrelation zweier Funktionen  $x(t)$  und  $y(t)$  welche um eine Zeit  $\tau$  verzögert wurde lautet in dem Zeitfenster  $T$ :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot y(t + \tau) dt. \quad (4.3)$$

In der Bildverarbeitung wird in der Regel eine 2D-Kreuzkorrelation verwendet. Bei der Berechnung der Korrelation treten Probleme auf, wenn ein Bild eine inhomogene Helligkeit aufweist. Ein heller Punkt im Vergleichsbild kann dann einen höheren Wert liefern als das gesuchte abgedunkelte Muster [21]. Um dies zu vermeiden, wird i. A. die Kreuzkorrelation normiert, wie bei der in MATLAB implementierten Funktion `normxcorr2`:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2}}. \quad (4.4)$$

Dabei ist  $f(x, y)$  das Bild und  $t(x - u, y - v)$  das Muster.  $\bar{t}$  ist der Mittelwert des Musters und  $\bar{f}_{u,v}$  der Mittelwert des Bildes im Bereich des Musters.

In der Anwendung wird die `normxcorr2` mit einem Reflexbild und einem (ausgeschnittenen) Reflex als Eingangsmuster verwendet. Die in Abbildung 4.3 gezeigte Korrelationsmatrix zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung. Die Matrix ist ( $96 \times 96$  Pixel) größer, als das Ursprungsbild (vgl. Abb. 4.1a), weil der

<sup>6</sup>Der in MATLAB integrierte Befehl `mean()` mittelt auch, dabei wird aber zusätzlich die Dimensionen der Eingangsdaten überprüft, weswegen er nicht so performant ist.

Algorithmus bei der Berechnung die Kanten des Bildes halb mit dem Muster überdeckt.

Beim Vergleich der Position des Korrelationsmaximums mit anderen Verfahren, wie der SWK oder der Kantenerkennung muss daher die halbe Mustergröße in jeder Dimension subtrahiert werden. Beispielsweise hat die Kantenerkennung für das Bild das Zentrum bei Pixel (152 126,5) errechnet, das verschobene Maximum der Kreuzkorrelation liegt bei Pixel (152 129). Das Verschieben um die halbe Mustergröße setzt voraus, dass das Zentrum des Musters auch das Zentrum des Reflexes ist. Der für die Positionsbestimmung ausreichende Korrelationsgrad von 65% ergibt sich in dem Beispiel durch die Verwendung eines ungestörten Reflexes als Muster. Um eine höhere Korrelation zu erreichen, kann der Musterreflex jeweils aus den zu untersuchenden Reflexbildern entnommen werden, dies erhöht jedoch den Aufwand und reduziert die Universalität der Technik. Diese benötigt i. A. im Vergleich zu den anderen Verfahren nämlich keine angepassten Schwellwerte. Das Maximum der Korrelation lässt sich auf ein Pixel genau bestimmen.

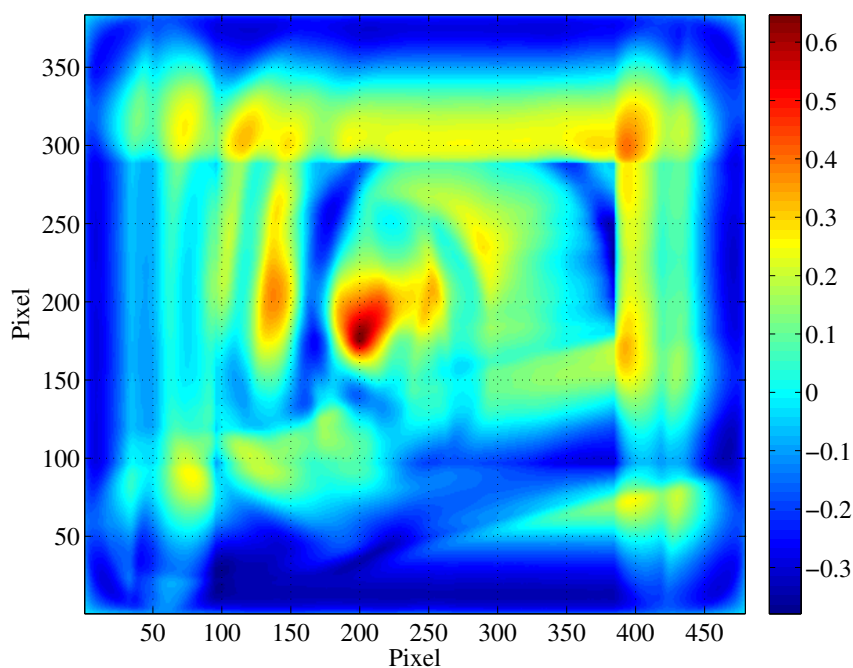


Abbildung 4.3: Berechnete Kreuzkorrelation für Bild 4.1a und einem Musterreflex. Das erreichte Korrelationsmaximum von ca. 65% liegt bei Pixel (200 177).

## 4.2 Adaptiver Algorithmus

Eine Projektanforderung an die Software war es, die Linsen möglichst schnell zu zentrieren (vgl. Abschnitt 3.2). Gäbe es diese Auflagen nicht, so könnte für jede Linse eine ROI bestimmt werden. Da dieser Vorgang ca. 10 s Zeit beansprucht, wurde ein Verfahren entwickelt, das beim Erstrüsten eines Linsentyps bzw. einer Baugruppe auf der JDM 200 den bestmöglichen Algorithmus zum Zentrieren automatisch wählt.

Das Verfahren basiert auf der Idee, zuerst den Schwellwert so lange zu verändern, bis maximal zwei Flächen<sup>7</sup> nach der Segmentierung vorhanden sind. Anschließend wird untersucht, ob diese Flächen innerhalb von  $(200 \times 200)$  Pixel liegen (dies ist die normale Größe der Reflexe). Ist dies der Fall, so wird der ermittelte Schwellwert und die Information, dass keine ROI nötig ist, gespeichert<sup>8</sup>. Sollten die Flächen größer sein oder war es nicht möglich, ein Level zu finden, bei dem weniger als drei Flächen vorhanden sind, so wird automatisch eine ROI bestimmt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Da sich die ROI von Linse zu Linse unterscheiden, wird nur gespeichert, dass der ROI-Algorithmus verwendet werden muss. Abschließend wird innerhalb der ROI erneut ein Schwellwert gesucht. Der Schwellwert ist universeller als der Ort der ROI, da er nicht davon abhängt, wie groß die anfängliche Dezentrierung der Linse ist. Sollte ein Wert gefunden werden, wird er als Referenz für diesen Linsentyp gespeichert. Wird innerhalb der ROI kein Schwellwert gefunden, so war ursprünglich angedacht, die Kantenerkennung zu verwenden. Da allerdings auch hier ein Grenzwert gefunden werden muss, um den Reflex zu segmentieren und dieser nicht so universell ist, wie der der SWK, wird nun statt dessen der Bediener aufgefordert, manuell einen Schwellwert festzulegen.

Die Suche des passenden Schwellwerts, basiert auf einem so genannten binären Suchverfahren [19, S. 409-426]. Dabei wird die Suche bei mittlerer Helligkeit<sup>9</sup> begonnen. Sind zu viele Flächen sichtbar, wird der Schwellwert um die Hälfte der momentanen Schrittweite erhöht, andernfalls um die Hälfte reduziert. Dies wird so lange wiederholt, bis die Anzahl der gefundenen Flächen mit der gewünschten Anzahl (zwei) übereinstimmt. Durch dieses Verfahren sind in diesem Fall maximal acht Schwellwertkonvertierungen und Vergleiche nötig. Häufig stimmt die Anzahl der gefundenen Flächen aber schon nach sechs Konvertierungen mit der gewünschten überein, was einen zusätzlichen Geschwindigkeitsgewinn bedeutet. Es existieren auch statistische Verfahren um einen optimalen Schwellwert zu finden [25]. Das hier vorgestellte Verfahren benutzt a priori-

---

<sup>7</sup>Durch das Haar in der Messfeldblende war es nötig zwei Flächen zu detektieren.

<sup>8</sup>Die Speicherung dieser Information geschieht in der Linsendatei, die für jede Baugruppe angelegt wird (vgl. Abschnitt 5.2.1).

<sup>9</sup>Bei den verwendeten 8 bit Graustufen entspricht dies dem Helligkeitswert 128.

Informationen (die Anzahl der Flächen und die Größe des Reflexes ist bekannt) und ist daher zu bevorzugen.

## 4.3 Leistungsanalyse

Um eine abschließende Beurteilung abzugeben, welcher Algorithmus sich am besten für das Problem des Linsenzentrierens eignet, wurden mehrere verschiedene Szenarien untersucht. In diesem Abschnitt werden daher die vorhergehend erläuterten Algorithmen direkt miteinander verglichen, vor allem unter den zwei Aspekten der Geschwindigkeit und der Präzision bzw. der maximal erreichbaren Messgenauigkeit.

### 4.3.1 Geschwindigkeit

Die im Folgenden präsentierten Zeitmessungen wurden auf einem Intel® Core™2 Q6600-Prozessor mit 4 GByte Arbeitsspeicher ausgeführt. Benutzt wurde dabei ein 32 bit-MATLAB: damit entsprach dieser Computer annähernd der PC-Konfiguration des Messcomputers der JDM 200. Alle Algorithmen hatten die Aufgabe, die gleichen Bilder eines aufgezeichneten Films der JDM 200 zu analysieren. Es wurde ein Film gewählt, wie er später in der Anwendung typisch ist, wobei sich zeigte, dass die Auswahl des Bildmaterials keinen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Algorithmen hat. Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis für die Rechenzeit pro Bild für eine Messung über 500 Bilder, wobei alle Algorithmen mit Viertelbildern ( $384 \times 288$  Pixel vgl. Abschnitt 3.2.2) arbeiteten. Die Zeit für die Bestimmung der ROI wurde bei dem Algorithmus SWK mit ROI nicht mit verrechnet. Die durchgezogenen Linien stellen die Mittelwerte der Berechnungszeit für den jeweiligen Algorithmus dar. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse inklusive Standardabweichung dargestellt.

Algorithmus	Dauer/s	Farbe in Abb. 4.4
SWK	$0,0012 \pm 0,0001$	Blau
SWK mit ROI	$0,0021 \pm 0,0003$	Gelb
Kantenerkennung	$0,033 \pm 0,005$	Grün
Kreuzkorrelation	$0,19 \pm 0,02$	Rot

Tabelle 4.1: Berechnungsdauer für ein Einzelbild des jeweiligen Algorithmus.

Bei dieser Untersuchung zeigt sich die Überlegenheit der SWK in Bezug auf die Rechengeschwindigkeit sehr deutlich. Die SWK ohne ROI ist mehr als zwei Größenordnungen schneller als die Kreuzkorrelation und fast 30 mal schneller als

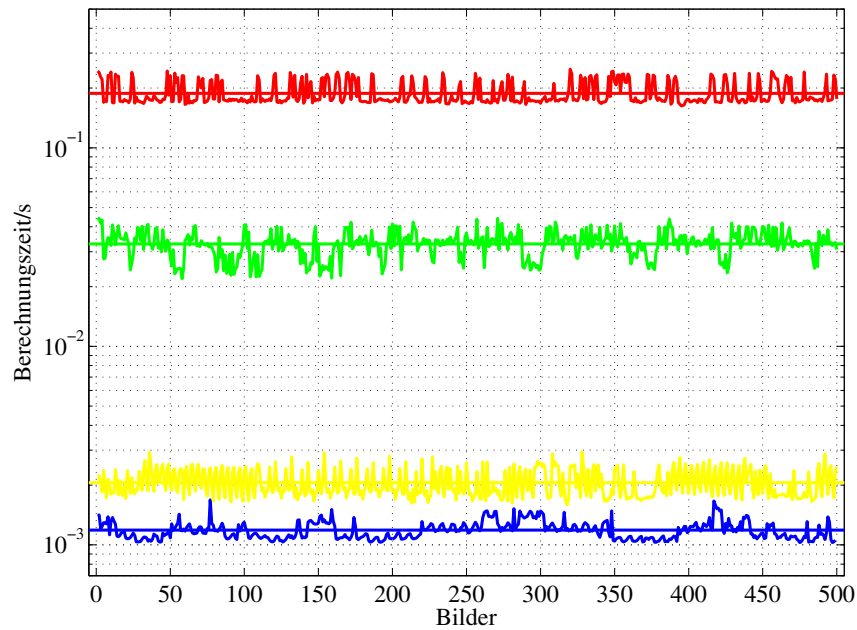


Abbildung 4.4: Berechnungsdauer der Reflexposition der Algorithmen. Blau: Schwellwertkonvertierung (SWK), gelb: SWK mit ROI (ohne Bestimmung), grün: Kantenerkennung und rot: Kreuzkorrelation.

die Kantenerkennung. Die Kantenerkennung liegt mit der verwendeten Implementierung und Hardware an der Grenze der Tauglichkeit für ein Echtzeitsystem. Es ist geringfügig schneller als die Kameras der JDM 200 die pro Bild 40 ms (entspricht 25 FPS) benötigen. Beim Einsatz von zwei Kameras lässt es sich nur dann verwenden, wenn es gelingt, die Auswertung zu parallelisieren und damit das Potential der verwendeten Multicore-CPU zu nutzen. Dies war für das sequentielle Abarbeiten der Einzelbilder für die Zeitmessung keine Option. Das Berechnen der normierten Kreuzkorrelation über die gewählte Auflösung ist in dieser Konfiguration bei einer Kamera zu langsam, da es nur fünf Bilder pro Sekunde verarbeiten kann. Der Zeitverlust durch die Verwendung einer ROI basiert im Falle der SWK auf der Verdoppelung der Matrixoperationen<sup>10</sup>. Moderne Kameras sind in der Lage ROIs auf Hardware-Ebene umzusetzen. Damit ließe sich die Bildrate der Kameras erhöhen und die Rechenzeit der Algorithmen reduzieren. Die Notwendigkeit des Bestimmens der ROI am Anfang bleibt davon unberührt.

<sup>10</sup> Daher benötigt die Berechnung der SWK mit ROI auch ca. das doppelte.

### 4.3.2 Test-Szenarien

Zur Analyse der vorgestellten Algorithmen wurden vier Szenarien, d. h. aufgezeichnete Filme von Reflexbildern der JDM 200 gewählt. Die ersten drei Filme repräsentieren Baugruppen mit unterschiedlichen Störungen, der letzte Film zeigt eine mit dem Halbschattensensor zentrierte Linse.

(1) Gemäß der Linsenverteilung in Abbildung 3.2 auf Seite 28, gehört die erste Linse zu den Baugruppen ohne Störung, dies sind ca. 40% des Sortiments bei Leica Microsystems. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Einzellinsen mit  $R \gg d$  (vgl. Abschnitt 2.6), die mit der bisherigen Sensortechnik ohne Einschränkung zentrierbar sind.

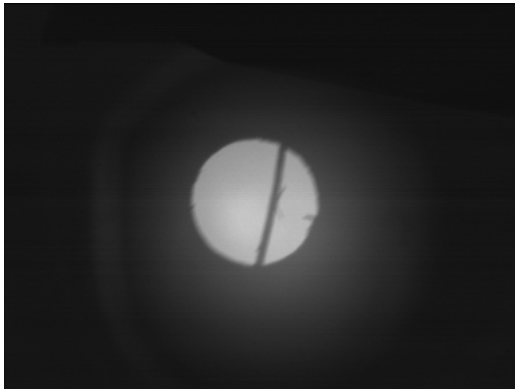
(2) In Szenario 2 werden Baugruppen mit einem hellen Hintergrund und schwachem Reflex, d. h. einer statischen Störung getestet. Dazu gehören Baugruppen mit kleinen Radien und Linsen, die auf Kittflächen zentriert werden müssen, deren Einzelradien sich deutlich unterscheiden. Es wird der schon mehrfach gezeigte Film eines Achromaten verwendet (vgl. Abschnitt 4.1.1 Abb. 4.1a und Abschnitt 4.1.2 Abb. 4.2), auf eine erneute Präsentation wurde daher in der Übersicht 4.5 verzichtet. Zirka 20% des Sortiments gehören zu diesem Typ, die mit dem HS meistens zentriert werden konnten.

(3) In Szenario 3 wird eine Baugruppe mit dynamischen Störreflexen präsentiert. Die Linse hat einen sehr kleinen Radius, der Störreflex trat daher möglicherweise durch eine Reflexion an der gegenüberliegenden Linsenoberfläche auf. Dynamische Reflexe treten etwa zu 45% in unterschiedlicher Intensität und Problematik auf, wobei diese Art von Störung maximal 5% der Gesamtheit ausmacht. Besonders Problematisch sind Baugruppen mit dynamischen Reflex immer dann, wenn der gesuchte Reflex nicht von der Störung segmentiert werden kann. In Abbildung 4.5c sind zwei aufeinander folgende Bilder dargestellt, um die Störung zu verdeutlichen.

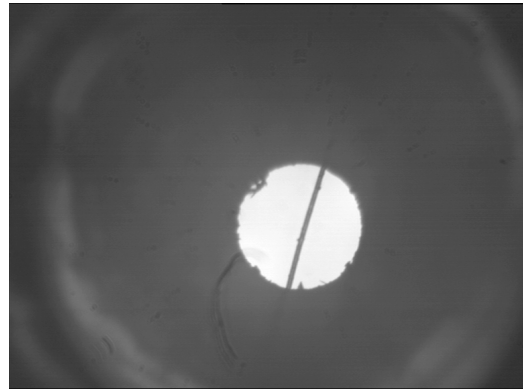
(4) Das Szenario 4 verwendet eine Linse, die zuvor mit dem HS auf weniger als  $1 \mu\text{m}$  zentriert wurde. Es soll damit gezeigt werden, wie genau die unterschiedlichen Algorithmen arbeiten. Dazu wird die Standardabweichung der Kreisfits über eine variierende Anzahl an Mittelungspunkten betrachtet (vgl. Abschnitt 3.3.2 Methode 3) um zu zeigen, bis zu welcher Dezentrierung die Algorithmen zuverlässig arbeiten.

Die Auswertung der Daten erfolgte nach folgendem Schema:

1. Auswahl geeigneter Parameter des jeweiligen Algorithmus: Schwellwert für die SWK, automatische ROI, Schwellwert für die Kantenerkennung und Auswahl eines Musters.



(a) Szenario 1: Reflexbild ohne Störungen.



(b) Szenario 4: Reflexbild einer zentrierten Linse zum Testen der Auflösung.

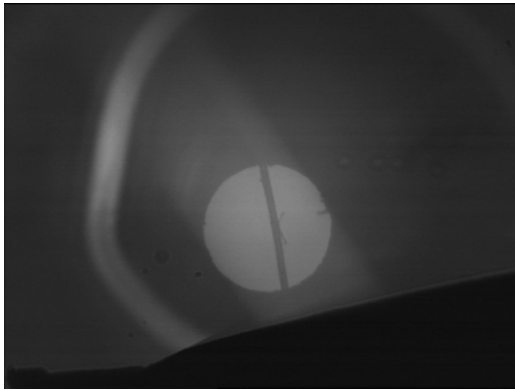
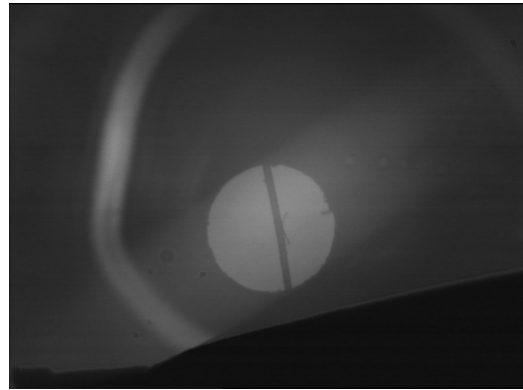
(c) Szenario 3: Dynamischer Störreflex zwei konsekutiver Bilder. Die Störungen rotiert mit der Spindeldrehzahl, d. h. mit ca.  $96^\circ$ /Bild.

Abbildung 4.5: Übersicht über die Reflexbilder der Testszenarien. Szenario 2 bezieht sich auf Bilder mit schwachem Reflex (vgl. Abb. 4.1a und Abb. 4.2)

2. Bestimmung der einzelnen Reflexpositionen über sämtliche Bilder der Filme mit allen Algorithmen.
3. Berechnung der Schlagkreise über alle Positionen. Diese Möglichkeit besteht während des Zentrierprozesses nicht, da sich der Radius immer weiter verkleinert. Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse dieses Schritts.
4. Berechnung der Fouriertransformation der Positionsdaten. Die Ergebnisse werden in Tabelle 4.2 präsentiert.
5. Zur Analyse der Messgenauigkeit wurde die Abhängigkeit der Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$  von der Anzahl an Mittelungspunkten  $X$  untersucht.



Der Film von Szenario 1 umfasste eine Serie von 128 Bildern. Die verwendeten Schwellwerte sind in Tabelle 4.2 verzeichnet. Dabei sind sowohl die Helligkeitsschwellwerte für die SWK mit und ohne ROI und die Steilheit der Kante relative Schwellwerte. Das heißt, es wird für jedes Bild die maximale Helligkeit bzw. Steilheit berechnet und darauf der Schwellwert angewandt. Dies hat den Vorteil, dass Helligkeitsschwankungen während des Prozesses und Verschmutzungen einzelner Linsen einer Baugruppe das Ergebnis nicht negativ beeinflussen. Für Szenario 2 wurden 500 Bilder analysiert, bei deren Auswertung die SWK mit ROI eine Standardabweichung  $\sigma_{r_x}$  von  $0,5 \mu\text{m}$  erst nach über 30 Mittelungspunkten erreichte. Daher wurden die Schwellwert modifiziert, um eine möglichst geringe Standardabweichung zu erzielen. Daraus ergab sich das in Tabelle 4.2 gezeigte Szenario 2'. Wie in Abschnitt 4.1.2 erläutert, ist für die Kantenerkennung in diesem Szenario eine ROI notwendig.

Zur Untersuchung von dynamischen Störungen in Szenario 3 standen 500 Bilder zur Verfügung. Die Abschattung im unteren Teil der Reflexbilder (vgl. Abb. 4.5c) machte auch in diesem Szenario den Einsatz einer ROI für die Kantenerkennung notwendig.

Für den zentrierten Reflex in Szenario 4 wurden 200 Bilder aufgenommen. Bei diesem Szenario wurden die Werte der SWK nur geringfügig vom Standard geändert (SWK mit und ohne ROI:  $0,5$ ), die Kantenerkennung arbeitete mit dem Standardwert ( $0,25$ ) und ohne ROI.

### 4.3.3 Analyse-Ergebnisse und Fazit

In Abbildung 4.6 sind die gemessenen Reflexpositionen der einzelnen Algorithmen für die vier verschiedenen Szenarien gezeigt. Zusätzlich sind der Kreisfit und der damit bestimmte Mittelpunkt eingezeichnet. Dies entspricht der Analyse des Signalverlaufs im Ortsraum (vgl. Abschnitt 3.3.2). Der so ermittelte Radius ergibt die Dezentrierung in Tabelle 4.2, die Genauigkeit der Messung wurde über die Standardabweichung der Mittelung  $\sigma_{r_{30}}$  (vgl. Formel 3.2) über jeweils 30 Bilder bestimmt. In der Zeile darunter findet sich die relative Differenz der Messung zu den anderen Algorithmen, dabei wurde der Wert der SWK mit ROI als Bezugspunkt gewählt. Die Fouriertransformation (FT) des Signalverlaufs (der Position in  $y$ -Richtung), ist für Szenario 3 und 4 in Abbildung 4.7 aufgetragen. Die FT der ersten beiden Szenarien lieferte keine relevanten Nebenpeaks. In Abbildung 4.8 ist die Standardabweichung  $\sigma_{r_x}$  in Abhängigkeit der Anzahl an Mittelungspunkten für die vier Szenarien aufgetragen. Die Werte für  $\sigma_{r_4}$  und  $\sigma_{r_8}$  sind außerdem in der Tabelle 4.2 aufgeführt, da dies die Anzahl an Messpunkten ist, mit der die neue Zentriersoftware (vgl. Abschnitt 5.2) arbeitet.

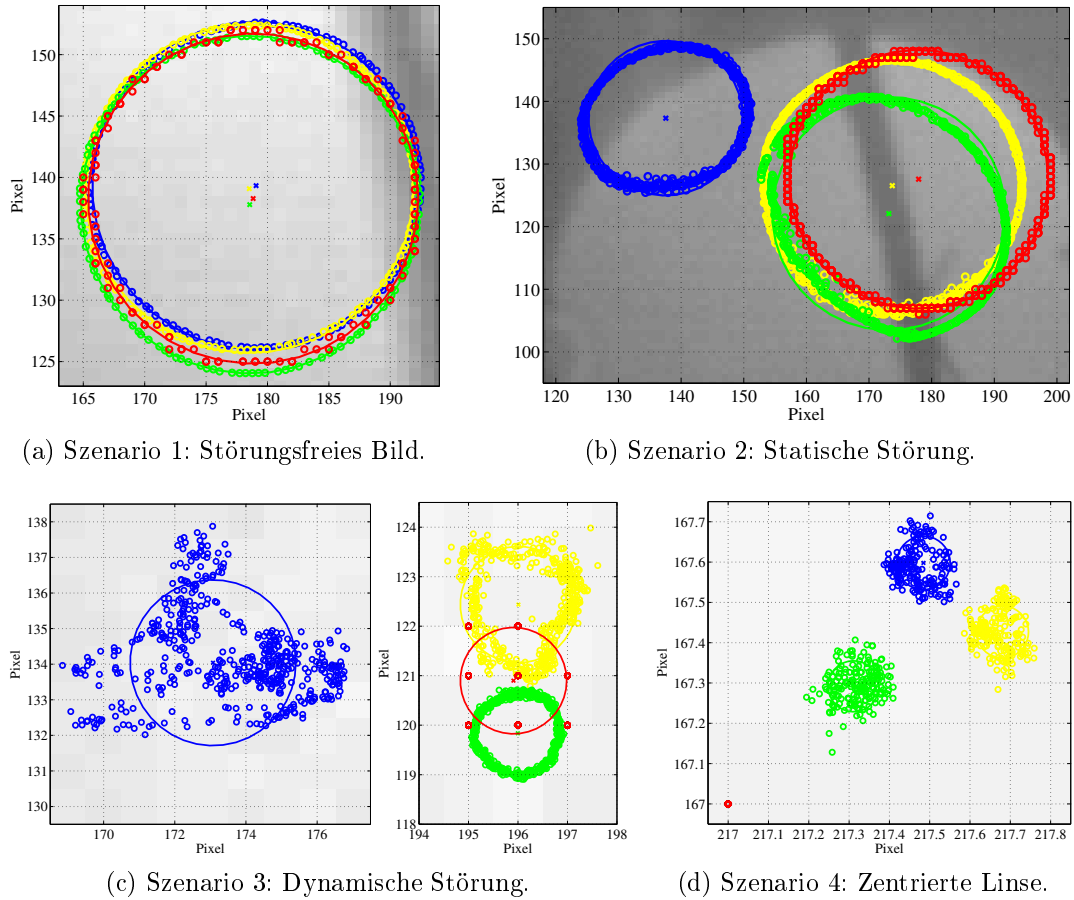


Abbildung 4.6: Übersicht über die ermittelten Position der Algorithmen. Blau: SWK, gelb: SWK mit ROI, grün: Kantenerkennung und rot: Kreuzkorrelation.

Szenario 1 zeigt, dass die Algorithmen für einfache Reflexe mit und ohne ROI zuverlässig arbeiten. Zum einen ist die Standardabweichung  $\sigma_{r_8}$  aller Algorithmen unter  $0,5 \mu\text{m}^{11}$ , zum anderen unterscheidet sich die ermittelte Dezentrierung maximal um 3%. Die im Anhang gezeigte FT (Abb. 1a) weist für alle Verfahren einen nahezu identischen Peak ohne Störungen bei der Frequenz von 6,8 Hz auf. Abbildung 4.8a zeigt die erwartete Abnahme der Standardabweichung mit zunehmender Anzahl an Mittelungspunkten. Die Kreuzkorrelation weist die höchsten Werte für die Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$  auf. Dies lässt sich bei genauer Betrachtung von Abbildung 4.6a erklären: Die einzelnen, auf ganze Pixelpositionen beschränkten Messpunkte weichen deutlich stärker vom Kreisfit ab, als es die Reflexpositionen der anderen Algorithmen tun.

<sup>11</sup>Dieser Wert ist für eine Ablage von ca.  $60 \mu\text{m}$  sehr gut.

In Abbildung 4.6b wird die Auswirkung des Einsatzes einer ROI für Szenario 2 gezeigt: Dadurch, dass eine globale Segmentierung unmöglich ist, reduziert sich die Dynamik des Signals der SWK und somit die gemessene Dezentrierung. Sie liegt fast 40% unter dem Wert der SWK mit ROI und resultiert in dem deutlichen Versatz des Schlagkreiscentrums, der jedoch für die Bildverarbeitung unerheblich ist, da das Zentrum immer neu berechnet wird. Die Reduktion in der Dynamik zeigt sich auch in der im Anhang abgebildeten FT (Abb. 1b): So beträgt die Amplitude der SWK ohne ROI wie erwartet ebenfalls 40% im Vergleich zur SWK mit ROI. Allgemein beträgt die Amplitude des Hauptpeaks der FT für Signale ohne Störung in etwa 1/10 der Dezentrierung. Abbildung 4.8b zeigt, dass die Standardabweichung der SWK mit ROI über den anderen Verfahren bei etwa  $0,5\ \mu\text{m}$  über sämtliche Mittelungspunkte bleibt. Um dies zu korrigieren und den Einfluss des Schwellwerts auf die Standardabweichung zu verdeutlichen, wurde mit Hilfe eines Algorithmus<sup>12</sup> der Schwellwert so modifiziert, sodass die Grenze von  $0,5\ \mu\text{m}$  bereits für  $\sigma_{rs}$  erreicht wurde (vgl. Tab. 4.2 Sz. 2', SWK + ROI). Das Optimieren führte zu einer Reduktion der Schwellwerte, wodurch neben dem Reflex auch Streulicht zur Positionsbestimmung beitrug. Dadurch trat der gleiche Effekt auf, wie für die SWK: die gemessene Dezentrierung nahm über 50% ab (vgl. Tab. 4.2<sup>13</sup>). Dies zeigt, wie bereits in Abschnitt 4.1.2 erwähnt, dass die Schwellwert basierten Verfahren nur dann eine absolute Dezentrierung berechnen können, wenn die Segmentierung den Reflex von der Störung trennen kann.

Szenario 3 testet die Fähigkeit der Algorithmen dynamische Störungen vom Reflex zu separieren. Abbildung 4.6c zeigt, dass dies für die SWK ohne ROI nicht gelang: Die gemessene Dezentrierung beträgt ca. das doppelte der anderen Algorithmen (vgl. Tab. 4.2). Die Helligkeit der Störung ist inhomogen, sodass der Einsatz der ROI das Problem nicht ganz beseitigte. Das am zuverlässigsten arbeitende Verfahren für dieses Szenario war die Kantenerkennung mit ROI, die eine sehr geringe Standardabweichung aufweist (vgl. Abb. 4.8c). Die Standardabweichung der SWK mit ROI ist ab 4 Mittelungspunkten unter  $0,5\ \mu\text{m}$  und ebenfalls akzeptabel, selbst für Linsen mit geringen Toleranzen. Auffällig ist, dass alle Mittelpunkte der 500 Bilder durch die Kreuzkorrelation auf 8 Pixel abgebildet wurden. Bei einer Dezentrierung von ca.  $4\ \mu\text{m}$  erreicht dieser Algorithmus in diesem System aufgrund seiner Beschränkung auf ganze Pixel seine Leistungsgrenze.

---

<sup>12</sup> Dieser Algorithmus iterierte über die Schwellwerte und berechnete jeweils den Verlauf der Standardabweichung. Als Ausgabe zeigte er dann den Schwellwert mit der geringsten Standardabweichung an.

<sup>13</sup> Dort ist die rel. Diff.\* zu den Werten vor der Anpassung eingetragen.

Die FT in Abb. 4.7a zeigt, dass mit Ausnahme der Kantenerkennung mit ROI alle Algorithmen von der dynamische Störung beeinflusst wurden. Am meisten die SWK, deren maximaler Peak bei der doppelten Umdrehungsfrequenz lag (vgl. Tab. 4.2) und einen dritten Peak mit der Amplitude  $0,4\ \mu\text{m}$  bei der Frequenz  $0,2\text{Hz}$  aufwies. Mit diesem Algorithmus und dem gewählten Schwellwert wäre die Linse nicht zentrierbar. Die HS-Technik versagte in einem Praxisexperiment ebenfalls, da auch sie die Hämmerchen auf die falsche Frequenz schlagen ließ und so die Linse weiter dezentrierte.

Die Ablage der zentrierten Baugruppe, die in Szenario 4 untersucht wurde, variierte (mit Ausnahme der Kreuzkorrelation) ca.  $3\%$  zwischen den SWK-Algorithmen und der Kantenerkennung<sup>14</sup> und beträgt  $0,28 \pm 0,02\ \mu\text{m}$ . Die Streuung der Positionen ist damit deutlich kleiner als ein Pixel (vgl. Abb. 4.6d). Dementsprechend detektierte die Kreuzkorrelation für alle 200 Bilder nur einen Pixel als Maximum der Korrelation mit einem mittleren Korrelationsgrad von  $(99,26 \pm 0,04)\%$ . Die Schwellwert basierten Algorithmen näherten sich ihrer Auflösungsgrenze, so betrug der relative Fehler (über 4 Mittelungspunkten) zwischen  $1/4$  und  $1/3$ . Die weitere Abnahme der Standardabweichung (vgl. Abb. 4.8d und Tab. 4.2) durch weitere Mittelungspunkten auf unter  $0,05\ \mu\text{m}$  zeigt, wozu die Bildverarbeitung in der Lage ist. Dabei trat in der FT für alle Schwellwert-Algorithmen ein Nebenpeak mit etwa der halben Intensität des Hauptpeaks auf (vgl. Abb. 4.7b).

### Fazit Leistungsanalyse

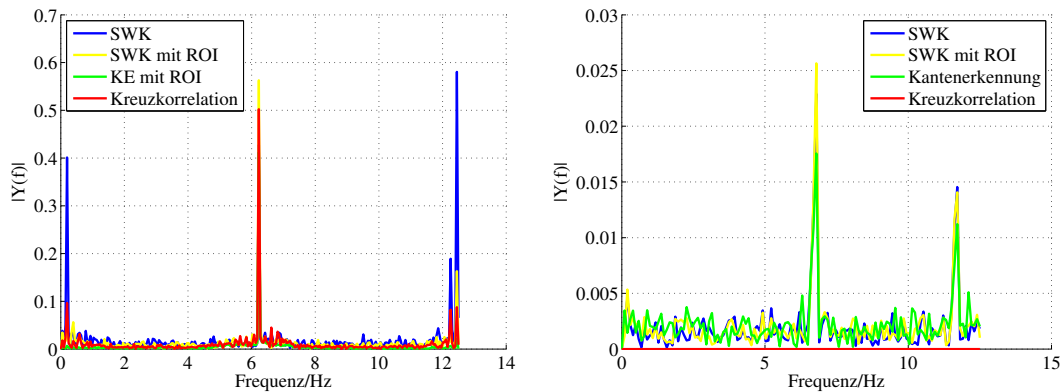
In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass die digitale Bildverarbeitung in der Lage ist, die Ablage der Reflexbilder sehr präzise zu bestimmen. Während die Schwellwert basierten Verfahren grundsätzlich den Nachteil besitzen, von diesem abzuhängen, ist das Problem der Kreuzkorrelation die durch die Pixelgröße gegebene Auflösungsgrenze und die Berechnungsdauer (vgl. Abschnitt 4.3.1). Zwar ließe sich das die Auflösung durch „Oversampling“<sup>15</sup> erhöhen, dies würde sich jedoch negativ auf die Berechnungsdauer auswirken. Um dies zu kompensieren, könnte eine neue Kamera mit einer ROI-Funktion auf Hardware-Ebene verwendet werden. Eine Abschätzung zeigt, dass durch die Wahl einer ROI in der Größenordnung des Reflexes (Durchmesser ca. 190 Pixel) und einer Verdoppelung für das Oversampling wieder eine Fläche erreicht wird, die der im Beispiel berechneten Viertelbilder mit  $(384 \times 288)$  Pixel entspricht. Damit ist es allerdings nicht möglich, jedes Bild der Kameras zu berechnen und

<sup>14</sup>In diesem Szenario wurde für keine ROI benutzt.

<sup>15</sup>Dabei werden sowohl Muster als auch Bild vergrößert (etwa durch lineare Interpolation) und anschließend verglichen.

S.	Ergebnis	SWK	SWK + ROI	KE (+ ROI)	KK
1	SW	0,6	0,6	0,25	-
	Dez./ $\mu\text{m}$ rel. Diff.	$57,18 \pm 0,02$ +1%	$56,83 \pm 0,02$ 0	$58,78 \pm 0,03$ +3%	$57,46 \pm 0,13$ +1%
	FT-P./ $\mu\text{m}$	5,0 / 6,8 Hz	5,0 / 6,8 Hz	5,2 / 6,8 Hz	5,1 / 6,8 Hz
	$\sigma_{r_4}$	0,14 $\mu\text{m}$	0,12 $\mu\text{m}$	0,08 $\mu\text{m}$	0,58 $\mu\text{m}$
	$\sigma_{r_8}$	0,10 $\mu\text{m}$	0,09 $\mu\text{m}$	0,06 $\mu\text{m}$	0,40 $\mu\text{m}$
2	SW	0,5	0,72	0,26	-
	Dez./ $\mu\text{m}$ rel. Diff.	$52,7 \pm 0,3$ -39%	$86,8 \pm 0,5$ 0	$79,6 \pm 0,3$ -8%	$88,3 \pm 0,2$ +2%
	FT-P./ $\mu\text{m}$	5,5 / 3,4 Hz	9,7 / 3,4 Hz	8,8 / 3,4 Hz	9,8 / 3,4 Hz
	$\sigma_{r_4}$	6,1 $\mu\text{m}$	2,3 $\mu\text{m}$	10,6 $\mu\text{m}$	2,5 $\mu\text{m}$
	$\sigma_{r_8}$	0,5 $\mu\text{m}$	0,7 $\mu\text{m}$	0,8 $\mu\text{m}$	0,4 $\mu\text{m}$
2'	SW	0,39	0,6	0,24	-
	Dez./ $\mu\text{m}$ rel. Diff.*	$18,1 \pm 0,2$ -66%	$37,8 \pm 0,3$ -56%	$74,0 \pm 0,3$ -7%	$88,3 \pm 0,2$ 0
	FT-P./ $\mu\text{m}$	2,4 / 3,4 Hz	4,2 / 3,4 Hz	8,4 / 3,4 Hz	9,8 / 3,4 Hz
	$\sigma_{r_4}$	7,5 $\mu\text{m}$	2,3 $\mu\text{m}$	11,0 $\mu\text{m}$	2,5 $\mu\text{m}$
	$\sigma_{r_8}$	0,4 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}$	0,8 $\mu\text{m}$	0,4 $\mu\text{m}$
3	SW	0,68	0,7	0,29	-
	Dez./ $\mu\text{m}$ rel. Diff.	$10,0 \pm 1,7$ +100%	$5,0 \pm 0,2$ 0	$3,60 \pm 0,03$ -28%	$4,6 \pm 0,5$ -8%
	FT-P./ $\mu\text{m}$	0,6 / 12,5 Hz	0,6 / 6,2 Hz	0,4 / 6,2 Hz	0,5 / 6,2 Hz
	2. P./ $\mu\text{m}$	0,4 / 6,2 Hz	0,2 / 12,5 Hz	-	0,1 / 0,2 Hz
	$\sigma_{r_4}$	2,7 $\mu\text{m}$	0,3 $\mu\text{m}$	0,09 $\mu\text{m}$	0,8 $\mu\text{m}$
$\sigma_{r_8}$	2,5 $\mu\text{m}$	0,3 $\mu\text{m}$	0,06 $\mu\text{m}$	0,7 $\mu\text{m}$	
4	SW	0,49	0,48	0,25	-
	Dez./ $\mu\text{m}$ rel. Diff.	$0,28 \pm 0,01$ 0	$0,28 \pm 0,01$ 0	$0,27 \pm 0,02$ -3%	0 -
	FT-P./ $\mu\text{m}$	0,02 / 6,8 Hz	0,03 / 6,8 Hz	0,02 / 6,8 Hz	0
	2. P./ $\mu\text{m}$	0,01 / 11,7 Hz	0,01 / 11,7 Hz	0,01 / 11,7 Hz	-
	$\sigma_{r_4}$	0,06 $\mu\text{m}$	0,08 $\mu\text{m}$	0,09 $\mu\text{m}$	-
$\sigma_{r_8}$	0,03 $\mu\text{m}$	0,03 $\mu\text{m}$	0,05 $\mu\text{m}$	-	

Tabelle 4.2: Übersicht der Analyse-Ergebnisse: Für Szenario 2, 2' und 3 wurde bei der Kantenerkennung (KE) eine ROI verwendet. Die Kreuzkorrelation (KK) konnte in Szenario 4 keine Bewegung mehr feststellen. Die relativen Differenzen geben einen Hinweis darauf, wie ähnlich ermittelten Dezentrierungen sind. FT-P. ist der Hauptpeak der Fouriertransformation, 2. P. der größte Nebenpeak.



(a) FT-Szenario 3: Mit Ausnahme der Kantenerkennung (KE), wurden alle Algorithmen durch die dynamische Störung beeinflusst.

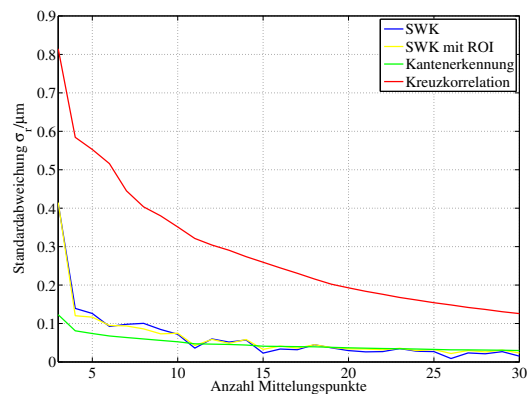
(b) FT-Szenario 4: Eine Störfrequenz ist vorhanden. Die FT der Kreuzkorrelation ist null, da sämtliche detektierten Positionen auf einem Pixel lagen.

Abbildung 4.7: Fouriertransformationen der Szenarien 3 und 4. Die Anzahl an Störfrequenzen ist abhängig vom gewählten Algorithmus. Je geringer der Anteil an Störfrequenz ist, desto kleiner ist auch  $\sigma_{r_X}$  (vgl. Tab. 4.2).

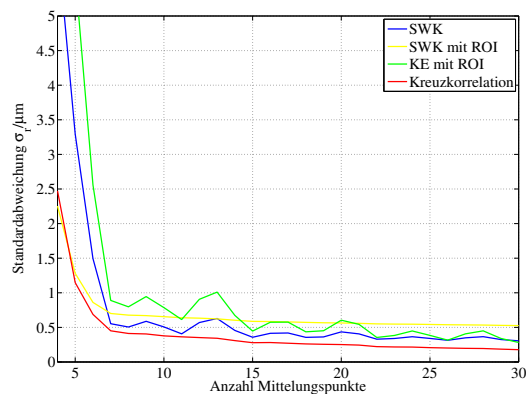
die Auflösung erreicht selbst bei 4-fachem Oversampling nicht die Werte der Schwellwert-Verfahren<sup>16</sup>. Somit kommt dieses sonst sehr universelle Verfahren für den Einsatz in der JDM 200 nicht in Frage.

In den Testszenarien hat sich gezeigt, dass es sich bei der Kantenerkennung um eine gute Methode handelt, um die Dezentrierung von Linsen zu bestimmen. Die berechneten Dezentrierungen waren vergleichbar mit denen der SWK und der Kreuzkorrelation. Für Szenario 3 lieferte dieser Algorithmus das beste Ergebnis und wurde (unter Zuhilfenahme einer ROI) durch die dynamische Störung am geringsten beeinflusst (vgl. Abb. 4.7a). Neben der geringen Berechnungsgeschwindigkeit (vgl. Abb. 4.4) war die höhere Sensitivität des Kantenschwellwerts der Hauptgrund die Kantenerkennung nicht in der Zentriersoftware zu verwenden. Zusätzlich traten Fehler in der Segmentierung durch die Form der Messfeldblende auf (vgl. Abschnitt 3.2.1) und im Vergleich zur SWK musste häufiger eine ROI verwendet werden. Die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse für die SKW mit ROI, insbesondere für Szenario 4 (vgl. Abb. 4.8d) mit der zentrierten Linse haben gezeigt, dass Ablagen im Submikrometerbereich messbar sind. Durch die Mittelung von 8 statt 4 Bildern ließ sich die Messgenauigkeit in

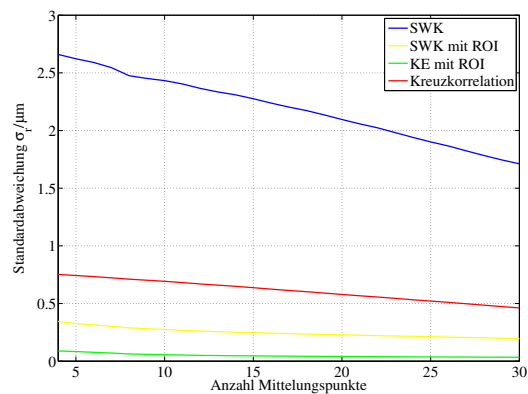
<sup>16</sup> Zumindest bei Verfahren ohne Störung ist die Standardabweichung ca. um einen Faktor 4 größer (vgl. Tab. 4.2 Szenario 1).



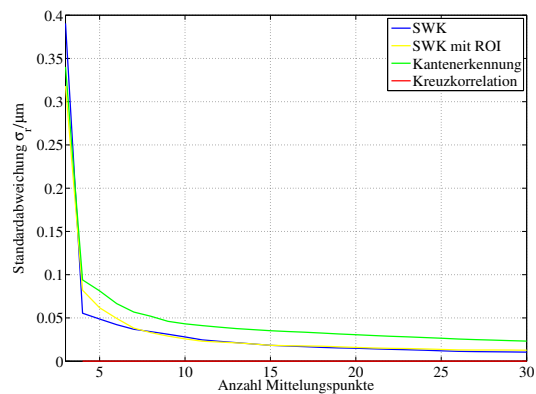
(a) Szenario 1: Störungsfreies Bild.



(b) Szenario 2: Statische Störung.



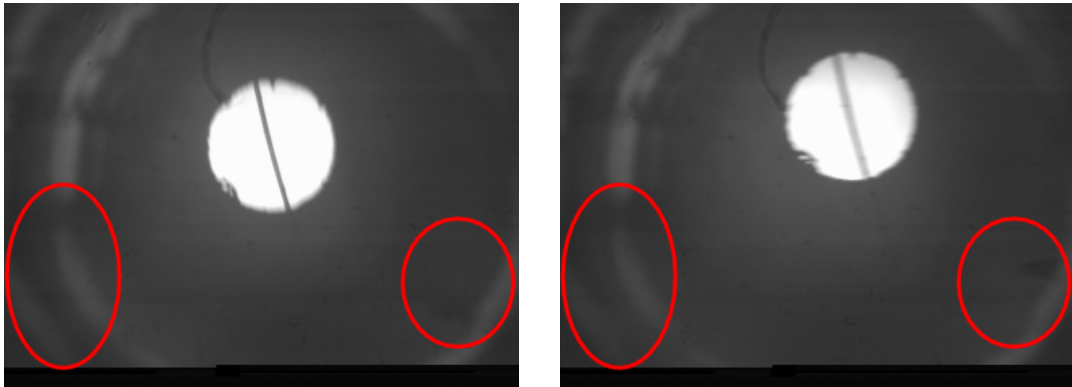
(c) Szenario 3: Dynamische Störung.



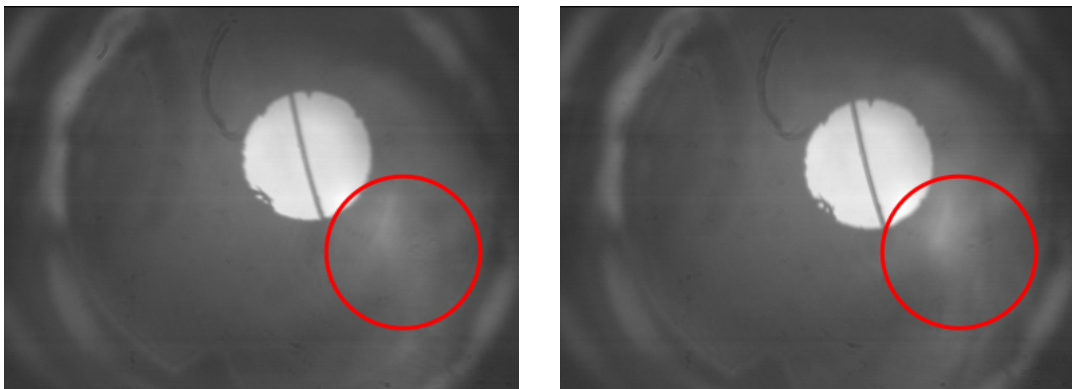
(d) Szenario 4: Zentrierte Linse.

Abbildung 4.8: Um die Messgenauigkeit näher zu untersuchen, wurde  $\sigma_{r_X}$  für eine wachsende Anzahl an Mittelungspunkten berechnet. Idealerweise liegt die Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$  bereits ab 4 Mittelungspunkten unterhalb von  $0,5 \mu\text{m}$ .

den Szenarien 1, 2 und 4<sup>17</sup> für diesen Algorithmus verdoppeln (vgl. Tab. 4.2) und erreichte Werte von  $\sigma_{r_8} < 0,05 \mu\text{m}$ . Daher wurde bei der Entwicklung der Industrie-Version der Zentriersoftware ein adaptiver Nahbereich implementiert. Innerhalb des Nahbereichs wird die Anzahl an Bildern bzw. Messpunkten von 4 auf 8 erhöht (vgl. Abschnitt 5.2).



(a) Test 2: Schwache Störung am Rand. Hervorgehoben sind die deutlichsten Stellen.



(b) Test 3: Reflexnahe Störung, die mit der Bilderkennung noch segmentiert werden kann.

Abbildung 4.9: Übersicht über die dynamischen Störungen des 2. und 3. Tests, zum Vergleich der Leistungsfähigkeit des HS und der Bilderkennung.

## 4.4 Leistungsvergleich Sensor - Bilderkennung

In diesem Abschnitt wird die Schwellwertkonvertierung (SWK) mit ROI direkt mit dem bisher verwendeten Halbschattensensor (HS) der JDM 200 verglichen. Die Daten des HS wurden, um den regulären Tagesbetrieb an der JDM 200 möglichst wenig zu stören, über eine Simulation des Sensors gewonnen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Es soll gezeigt werden, welche Vorteile die Verwendung der Bilderkennung bei dynamischen Störungen hat.

Es wurden vier verschiedene Linsen analysiert, alle mit unterschiedlich stark ausgeprägtem dynamischen Reflexen. Damit gehören alle Linsen in den Grenz-

<sup>17</sup>Die bezogen auf die Verteilung der Baugruppen insgesamt mehr als die Hälfte aller Fälle repräsentieren (vgl. Abb. 3.2).



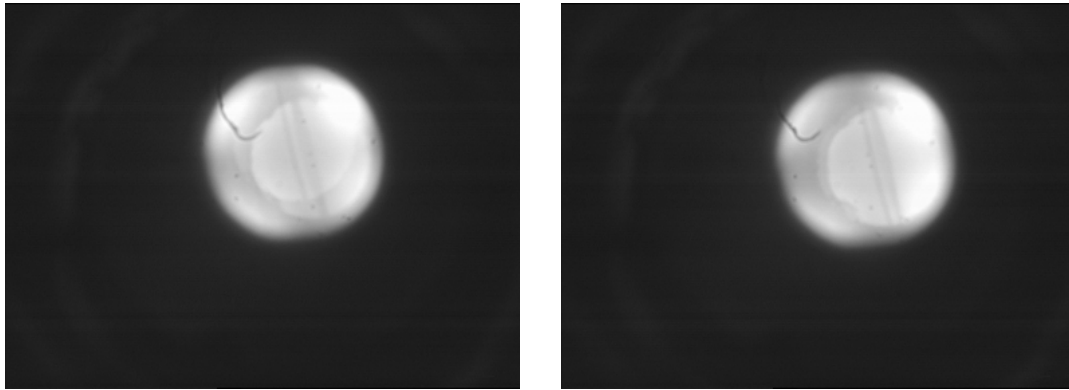


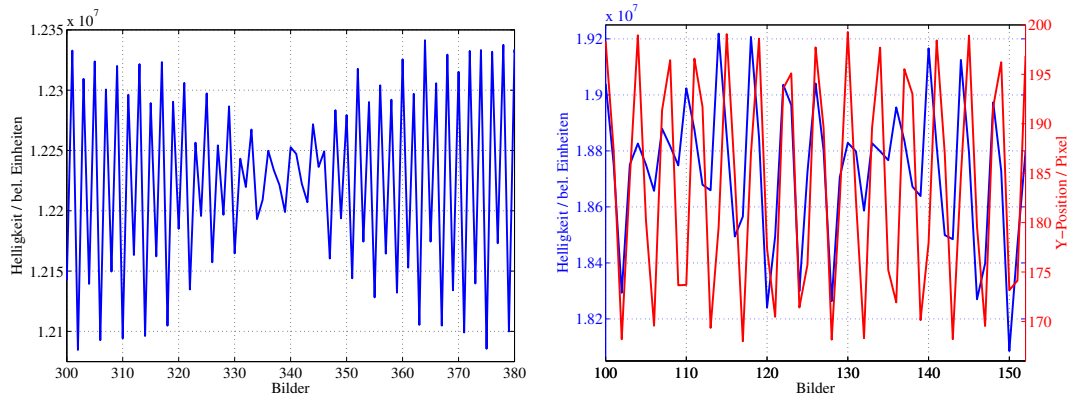
Abbildung 4.10: Test 4: Helle, den Reflex überlagernde Störung.

bereich des HS und repräsentieren ca. 45% des Linsensortiments (vgl. Abb. 3.2). Als Vergleichstest 1 wurde die im letzten Abschnitt in Szenario 3 verwendete Linse (vgl. Abb. 4.5c) benutzt. Die Reflexbilder der Tests 2 und 3 sind in Abbildung 4.9 zu sehen, eine überlagernde dynamische Störung für Test 4 ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Das Besondere an Test 2 ist, dass während der Messung der Zentrierprozess der JDM 200 lief. Die Konsequenzen daraus, werden im Folgenden geklärt.

In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden statt der absoluten Standardabweichung prozentuale Werte  $\bar{\sigma}_{r_x}$  verwendet. Die Peaks der FT sind aus dem gleichen Grund normiert und werden in Abbildung 4.13 gezeigt.

Abbildung 4.11a zeigt einen Ausschnitt aus dem Helligkeitsverlauf des HS für Test 1. Es sind drei überlagerte Schwingungen zu sehen. Die vermeintliche Grundfrequenz der schnellen Oszillation beträgt 12,5 Hz (vgl. Tab. 4.3), dabei handelt es sich jedoch um die Frequenz der Störung. Die FT des HS ähnelt daher der im vorherigen Abschnitt beschriebenen SWK ohne ROI (vgl. Abb. 4.7a), weist jedoch nicht den Peak mit der Frequenz 0,05 Hz auf (vgl. Abb. 4.13a). Noch deutlicher ist in Abbildung 4.13a zu sehen, wie die Peakhöhe der Störung die tatsächliche Grundfrequenz von 6,2 Hz überragt. Dies hat zur Folge, dass die HS-Technik nicht in der Lage ist die Linse zu zentrieren. Dies drückt sich auch in der relativen Standardabweichung  $\bar{\sigma}_{r_8}$  aus. Der Wert des HS beträgt das 2,5-fache der Bilderkennung, die eine relative Standardabweichung von  $\bar{\sigma}_{r_8} = 6\%$  bzw.  $\sigma_{r_8} = 0,3 \mu\text{m}$  besitzt (vgl. Tab. 4.3).

Test 2 umfasst eine Aufnahme mit 638 Bildern, die während des aktiven Zentrierprozesses entstand. Daher betragen die in Tabelle 4.3 angegebenen rela-



(a) Test 1: Ausschnitt des Signalverlaufs des Halbschattensensors. Es sind mehrere Modulationen sichtbar.

(b) Test 2: Direkte Gegenüberstellung des Halbschattensensors (blau) und der Bilderkennung (rot).

Abbildung 4.11: Die Signalverläufe von Test 1 und 2 zeigen, dass das Signal des HS mehrfach moduliert ist, während das der Bilderkennung weniger gestört ist.

tiven Standardabweichung  $\bar{\sigma}_{r_x}$  für den HS und die Bilderkennung ca. 20%. Abbildung 4.12 zeigt die gemessenen Positionen der Bilderkennung (rot) und die aus der normierten Helligkeit umgerechneten des HS (blau). Dabei wurde ein zweiter „virtueller“ Halbschatten-Sensor für die Helligkeitsschwankung in  $x$ -Richtung benutzt, dessen Schattenkante nicht in der Bildmitte lag. Die Skalierung wurde so gewählt, dass der Betrag des Schlagradius mit dem der Bilderkennung vergleichbar war, ohne jedoch das Achsenverhältnis zu manipulieren. Aus Abbildung 4.12 lässt sich folgern, dass für diese Linse der Mittelpunkt der Maschinenachse nicht mit dem Mittelpunkt der CCD übereinstimmte. Der Reflex rotierte nicht um die simulierte Sensorkante, wodurch die Stauchung der Messpunkte entstand.

Im Ausschnitt der Signalverläufe in Abbildung 4.11b ist erkennbar, dass die Bilderkennung eine stabilere Amplitude aufweist, als der HS. Obwohl die Grundfrequenz leicht zu variieren scheint, liegen beide Hauptpeaks bei einer Frequenz von 6,7 Hz (vgl. Tab. 4.3). In der Abbildung der FT (4.13b) zeigt der HS ein Zweitpeak bei 5,8 Hz.

Die Stauchung des Signals an der Halbschattenkante im Ortsraum ist mit einer Verzögerung des Signals im Frequenzraum vergleichbar, wodurch ein rechteckförmiges Signal entsteht. Dies erklärt den frequenzverdoppelten Peak bei 11,6 Hz. Der Signalverlauf zeigt eine weitere interessante Modulation: das Signal des HS nimmt etwa alle 25 bis 30 Bilder in der Helligkeit ab (vgl. Abb. 4.11b). Diese Schwankung wird durch die Schläge der Justierhämmer verursacht, die

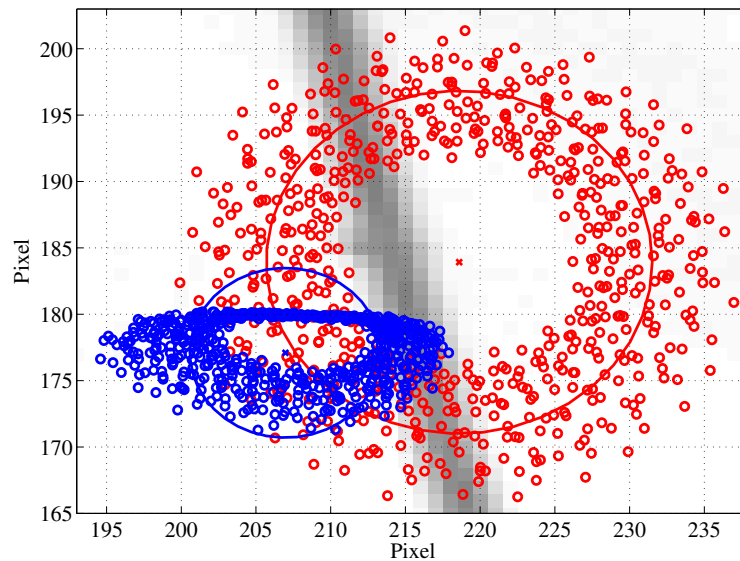


Abbildung 4.12: Ermittelte Positionen mit der Bilderkennung (rot) und umgerechnete norm. Helligkeitsschwankung von zwei simulierten HS (blau) für Test 2. Es ist eine deutliche Stauchung der HS-Positionen zu sehen. Die Streuung der Datenpunkte entstand durch den laufenden Zentrierprozess.

während dieser Aufnahme in Betrieb waren. Der entsprechende Peak dieser Schwankung ist in Abbildung 4.13b bei 0,9 Hz mit einer Höhe von 0,23 norm. Helligkeit. Die Bilderkennung wird aufgrund des relativen Schwellwerts nicht davon beeinflusst und zeigt keinerlei Nebenfrequenzen in der FT.

Im Unterschied zu Test 2 ist die Störung in Test 3 heller und lokalisierter (vgl. Abb. 4.9b). Die Bildsequenz wurde mit halber Spindeldrehzahl (ca. 200 RPM) über 500 Bilder aufgenommen<sup>18</sup>. Der Signalverlauf und die Positionsbestimmung zeigten für den HS und die Bilderkennung keine bemerkenswerten Unregelmäßigkeiten und wurden daher nicht dargestellt. Die FT in Abbildung 4.13c zeigt, dass der HS erneut Störfrequenz detektiert. Das Maximum des Zweitpeaks beträgt 30% und beträgt damit nur die Hälfte des Zweitpeaks des vorherigen Tests mit der dunkleren Hintergrundstörung. Dies lässt sich durch die Abhängigkeit der Detektion erklären: Störungen resultieren aus dem Produkt von Fläche und Helligkeit. Die Dynamik der Helligkeit beträgt bei den Bildern maximal 8 bit, während die Dynamik, die sich aus der Fläche der Viertelbilder ergibt mehr als 16 bit<sup>19</sup> erreicht.

Die Baugruppe konnte mit dem HS nicht genauer als ca. 10  $\mu\text{m}$  zentriert wer-

<sup>18</sup> Damit sollten Störungen durch Interlacing reduziert werden (vgl. Abschnitt 3.2.2).

<sup>19</sup> Die Bilder haben  $384 \cdot 288 = 110592 \text{ Pixel} \geq 2^{16}$ .

Al.	Ergebnis	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
HS	D./ b. E.	3,0 ±9%	6,4 ±20%	3,1 ±1%	11,1 ±0,2%
	FT-n. P.	1 / 12,5 Hz	1 / 6,7 Hz	1 / 3,4 Hz	1 / 6,8 Hz
	2. Peak	0,3 / 6,2 Hz	0,6 / 5,8 Hz	0,3 / 2,4 Hz	-
	$\bar{\sigma}_{r_8}$	15%	21%	5%	0,9%
BE	Dez./µm	5,0 ±4%	55,2 ±20%	38,7 ±0,1%	38,2 ±0,2%
	FT-n. P.	1 / 6,2 Hz	1 / 6,7 Hz	1 / 3,4 Hz	1 / 6,8 Hz
	2. Peak	0,3 / 12,5 Hz	-	-	-
	$\bar{\sigma}_{r_8}$	6%	21%	0,1%	0,3%
	$\sigma_{r_8}/\mu\text{m}$	0,3	11,6	0,04	0,1

Tabelle 4.3: Vergleich zwischen Halbschattensensor (HS) und der Bilderkennung (BE) mit der SWK und ROI. Die Werte der Standardabweichung sind bei Test 2 sehr hoch, da während der Messung der Zentrierprozess mit dem HS lief. Dieser „erkannte“ jedoch die falsche Frequenz und konnte daher die Linse nicht zentrieren. Zum besseren Vergleich zwischen HS und BE ist die Standardabweichung jeweils in Prozent angegeben und die Fouriertransformation normiert.

den. Im Vergleich dazu beträgt die Standardabweichung der Bilderkennung  $\sigma_{r_8}$  für die gemessene Ablage von 38,7 µm nur 0,04 µm. Damit ist die Bilderkennung in der Lage auch diese Baugruppe exakt zu zentrieren.

Für die überlagernde Störung wurden 256 Bilder analysiert. Die in Abbildung 4.10 gezeigte Linse gehört zu den am schwierigsten zu zentrierenden Linsen, die ca. 15% des Gesamtsortiments ausmachen (vgl. Abb. 3.2). Die FT in Abbildung 4.13d zeigt, dass weder Bilderkennung noch HS ein Problem zu haben scheinen. Beide detektieren dabei aber den überlagerten Reflex. Die Kreuzkorrelation, die zur Überprüfung herangezogen wurde, weist einen mittleren Korrelationsgrad von 54% auf und zeigte keinen stabilen Positionsverlauf: Der Reflex wurde während der Umdrehung unterschiedlich stark überdeckt, zudem war der Reflex nicht immer scharf abgebildet. Diese Baugruppe könnte möglicherweise iterativ zentriert werden<sup>20</sup>, falls der tatsächliche Reflex innerhalb der Störung nach deren Justage innerhalb der Toleranz liegt. Für Baugruppen deren Toleranz größer 3 µm ist, konnte dieses Vorgehen schon erfolgreich eingesetzt werden.

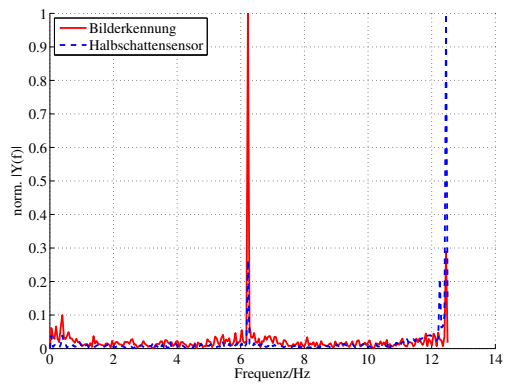
<sup>20</sup>D. h. wie beim Erstrüsten mit dem HS über eine visuelle Kontrolle und dem Nachmessen der Ablage mit dem Prüfgerät.

### Fazit - Vergleich

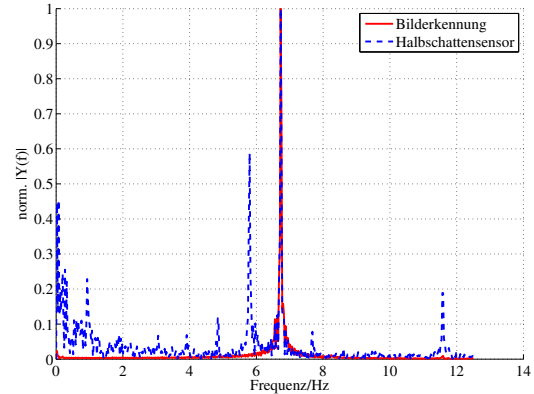
In diesem Abschnitt wurde die Technik des Halbschattensensors direkt mit der Bilderkennung verglichen. Schon aus dem Positionsverlauf ließ sich vermuten, dass der HS wesentlich anfälliger für Störungen der Reflexbilder ist, da diese nur bedingt durch den Lock-In-Verstärker gefiltert werden können. Die FT der Tests zeigen, dass die Bilderkennung (umgesetzt mit der SWK und ROI) die hier demonstrierten dynamischen Störungen eliminieren konnte (vgl. Abb. 4.13) und in den meisten Fällen eine deutlich kleinere relative Standardabweichung  $\bar{\sigma}_{r_8}$  als der HS aufweisen konnte (vgl. Tab. 4.3). Mit Ausnahme<sup>21</sup> von Test 2 lag die Standardabweichung der Bilderkennung unter  $0,5\ \mu\text{m}$  und eignet sich somit auch Baugruppen mit höchsten Anspruch an die Toleranz zu zentrieren. Durch die Fähigkeit, Bildstörungen weitestgehend zu eliminieren, eignet sich dieses Verfahren wesentlich besser, um ein breites Spektrum an Baugruppen zentrieren zu können. Auf diesen Ergebnissen basiert die Entwicklung des im nächsten Kapitel vorgestellten Programms zur automatischen Zentrierung von Linsen.

---

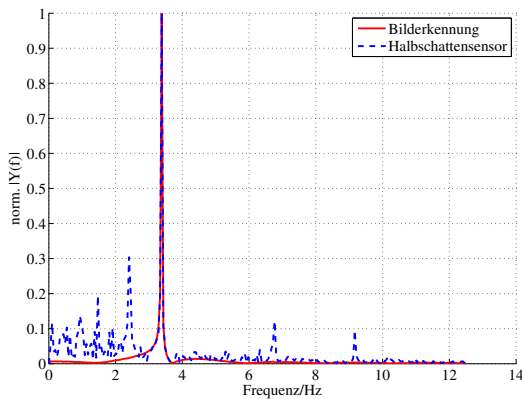
<sup>21</sup> Bei Test 2 wurde während der Messung aktiv zentriert, daher schwankte der Radius um über  $10\ \mu\text{m}$ .



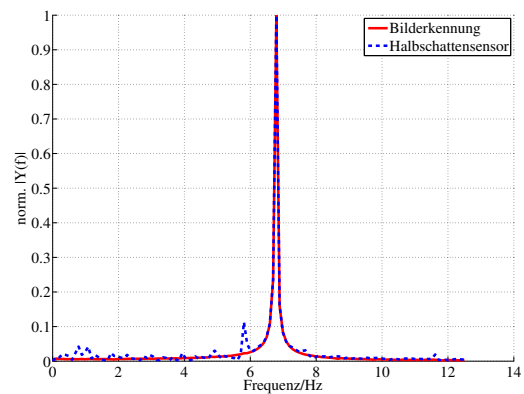
(a) Test 1: Rotierende Störung. Der Hauptpeak des HS liegt bei der doppelten Drehzahl.



(b) Test 2: Die Störung im Hintergrund der Reflexbilder erzeugt viele Nebenfrequenzen.



(c) Test 3: Die mit halber Drehzahl aufgenommenen Reflexbilder mit Störung im Vordergrund erzeugen ebenfalls Nebenfrequenzen beim HS.



(d) Test 4: Überlagernde Störung. Beide Verfahren messen die richtige Frequenz, ohne den Reflex richtig zu erkennen.

Abbildung 4.13: Vergleich der FT zwischen HS und Bilderkennung im Überblick. Die Bilderkennung ist in der Lage, sämtliche Nebenfrequenzen durch die diversen Bildstörungen drastisch zu reduzieren.

# Kapitel 5

## Das *FERMI*-Zentrierprogramm

Basierend auf den Erkenntnissen der Leistungsanalyse (vgl. Abschnitt 4.3) und dem Vergleich der Bildverarbeitung mit dem bisher eingesetzten Sensor (vgl. Abschnitt 4.4) wurde zunächst eine Alpha-Version entwickelt. Diese Software diente als *proof of concept*, die das Funktionieren des neuen Konzepts verifizieren soll (vgl. Abschnitt 5.1). Deren erste Ergebnisse sind in Abschnitt 5.1.2 präsentiert.

Im Abschnitt 5.2 wird die im Rahmen der Projektarbeit konzipierte und entwickelte industrietaugliche Software vorgestellt. Dabei wurden die zu Beginn des Abschnitts formulierten Anforderungen an die Software umgesetzt. Falls dies rein softwaretechnisch nicht möglich war, wurde dazu die Hardware modifiziert. Diese Änderungen sind in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 erläutert.

Abschnitt 5.3 dokumentiert die Ergebnisse des *FERMI*-Zentrierprogramms aus neun Monaten Betriebsdauer. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf mögliche Verbesserungen gelegt. Diese werden im Abschluss des Kapitels erläutert, der eine kurze Zusammenfassung und einen Ausblick auf zukünftige Erweiterungen der Software und Hardware enthält (vgl. Abschnitt 5.4).

### 5.1 Alpha-Version

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie Baugruppen mit Hilfe der Schwellwertkonvertierung (SWK)<sup>1</sup> als Bilderkennung, maschinell zentriert werden können. Die nötigen Hardwareanpassungen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt. Die aus den ersten Ergebnissen resultierenden Konsequenzen für die weitere

---

<sup>1</sup>Für die ersten getesteten Baugruppen war es nicht nötig, eine ROI zu verwenden.

Planung des Projekts werden im Abschnitt 5.1.3 diskutiert.

Da zu Beginn der Arbeit die JDM 200 regelmäßig von dem Industriepartner benutzt wurde, um Linsen mit der Sensortechnik zu zentrieren, sollte die Alpha-Version derart gestaltet sein, dass es jederzeit möglich ist, wieder mit der originalen Soft- und Hardware zu arbeiten. Daher wurde zunächst auf Umbauten an der Maschine verzichtet und keine zusätzlichen Sensoren oder Aktuatoren eingesetzt. Ebenso wurden in dieser Projektphase keine Veränderungen am Messcomputer selbst durchgeführt, die den Einsatz der bisherigen Software verhindern würden.

### 5.1.1 Erstes Hardwarekonzept und Schlagalgorithmus

#### Erstes Hardwarekonzept zur Steuerung der Schlaghämmer

Wie im Abschnitt 3.2.1 beschrieben, werden zum Zentrieren der Baugruppen kleine Magnetspulen verwendet, die die Schlagstößel gegen das Zentrierfutter der JDM 200 beschleunigen (vgl. Abb. 3.3). Die bisherige Software benutzte zur Ansteuerung dieser Stößel eine digitale I/O-Karte<sup>2</sup>. Diese wurde über eine in der Programmiersprache „C“ geschriebene Bibliothek gesteuert.

In MATLAB wurde eine Soundkarte als alternative Lösung eingesetzt. Eine Soundkarte ist ein Digital/Analogwandler, der mit einer Geschwindigkeit von 44,1 kHz die digitalen (Audio-)Daten des Computers in analoge Spannungsschwankungen am Ausgang der Karte umsetzt. Diese z. B. für Audio-CDs typische Abtastrate ergibt sich aus dem Shannon'schen Samplingtheorem ([33]) und der menschlichen Hörschwelle bei ca. 20 kHz. Diese Frequenz ist ausreichend hoch, um Pulse im Sub-Millisekundenbereich zu erzeugen. Dies ist ausreichend schnell, um bei 400 RPM das Futter exakt zu treffen und so die Baugruppen auszurichten. Die Ausgangsspannung wurde durch einen kleinen nicht-invertierenden Operationsverstärker von 1 V auf 10 V erhöht, um sicherzustellen, dass die TTL-Logik der verwendeten Elektronik in der JDM 200 das Signal erkennt und die Spulen entsprechend bestromt. Da diese Anschlüsse außerhalb der JDM 200 lagen, konnte auf Umbauten verzichtet werden, die alte Software unabhängig von der Neuentwicklung eingesetzt werden und durch die Verwendung von Standardkomponenten die Software für die Maschine auf einem anderen Computer entwickelt und getestet werden.

---

<sup>2</sup>Input/Output-Karten dienen der Kommunikation zwischen dem Computer und externen Geräten.



### Schlagalgorithmus

Der im Abschnitt 4.4 verwendete Algorithmus wurde so modifiziert, dass er nicht wie bisher mit bereits gespeicherten Filmen als Eingangssignal arbeitet, sondern ständig neue Bilder (mit 25 FPS) von den Kameras der JDM 200 abrufen. Die mit dieser Funktion ermittelten Schwerpunktzentren der beiden Kameras, wurden an eine weitere Routine übertragen, die ausgehend von den beiden Positionen einen Schlagzeitpunkt für die rotatorische und translatorische Bewegung des Justierfutters berechnete.

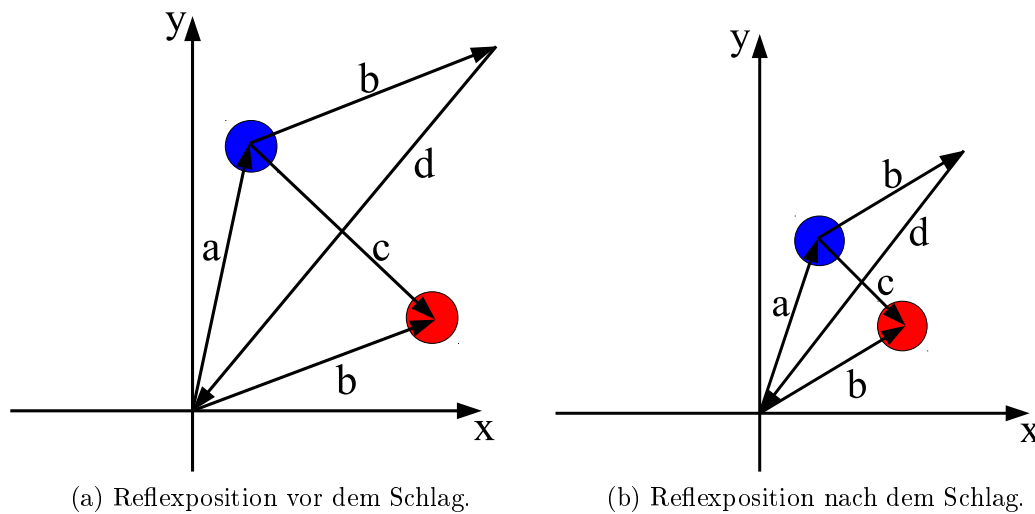


Abbildung 5.1: Zur Berechnung der Schlagrichtung werden die beiden Reflexschwerpunkte (blau und rot) der Baugruppe in ein Koordinatensystem eingetragen ( $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ ). Die Schlagrichtungen  $\vec{c}$  und  $\vec{d}$  ergeben sich aus Gleichung 5.1.

Abbildung 5.1 zeigt, wie die Ablage der beiden Flächen verwendet wird, um einen möglichst idealen Schlagzeitpunkt zu erhalten. Dabei wird aus den Positionsvektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  der beiden einzelnen Ablagen (roter und blauer Punkt), die Schlagrichtung  $\vec{c}$  und  $\vec{d}$  mit der Formel:

$$\vec{c} = -(\vec{a} - \vec{b}) \quad \text{und} \quad \vec{d} = -(\vec{a} + \vec{b}) \quad (5.1)$$

berechnet. Der Kalottenhammer wird dazu benutzt, die beiden Reflexe aufeinander zu schieben, indem er in Richtung  $\vec{c}$  schlägt und so die optische Achse ausrichtet. Der Planhammer wird dann bestromt, wenn sich die Linse so weit gedreht hat, dass der Hammer in Richtung  $\vec{d}$  liegt. Dadurch werden beide Reflexe parallel zum Zentrum verschoben. Ein Bild nach einem solchen Schlag ist

in Abbildung 5.1b zu sehen (siehe auch [31]). Bei diesem Schlag-Algorithmus, welcher auch in der sensorbasierten Software verwendet wurde, ist zu beachten, dass die Ablagen der einzelnen Fläche ( $|\vec{a}|$ ,  $|\vec{b}|$ ) kurzfristig zunehmen können. Dieses Phänomen tritt immer dann auf, wenn die Ortsvektoren der Ablage  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  in die gleiche Richtung zeigen und  $|\vec{a}| < |\vec{b}|$ . Dann ist die Schlagrichtung von  $\vec{c}$  genau entgegengesetzt zu  $\vec{d}$  und führt bei ungünstiger Schlagstärke zu diesem Effekt. Abbildung 5.2, die während der Entwicklung der JDM 200 entstand, zeigt diesen Effekt [37].

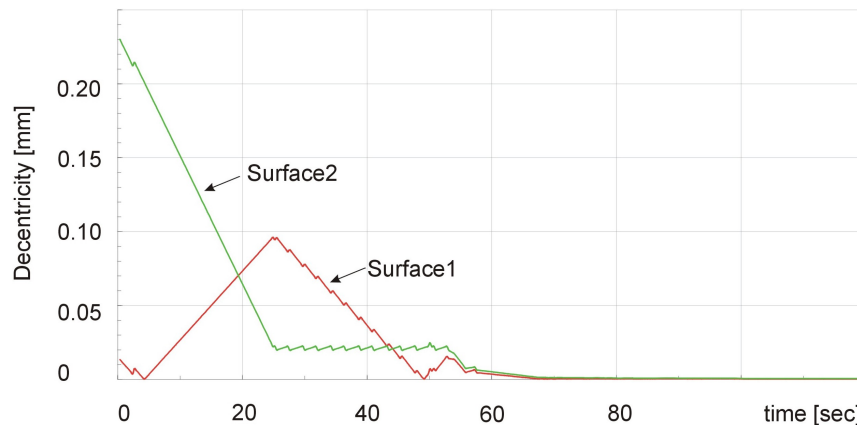


Abbildung 5.2: Zentrierverlauf der Ablage der beiden Baugruppenflächen. Die Ablage von Fläche 1 steigt kurzzeitig durch eine ungünstige (nicht adaptive) Schlagstärke an [37].

Die Experimente wurden mit Linsen begonnen, die zu den 40% des Sortiments gehören, bei denen keine Problemen zu erwarten waren. Bevor das MATLAB-Skript gestartet werden konnte, mussten die Parameter, wie z. B. der Schwellwert manuell gesetzt werden, sodass es den Reflex vom Hintergrund segmentiert. Die Bestromungsdauer, die über die Pulslänge der Schlagsignale geregelt wird, wurde manuell fix auf 5 ms gesetzt. Das Skript selbst besaß keine Abbruchkriterien, d.h. das Stoppen des Zentriervorgangs war dem Anwender selbst überlassen. Es konnte folglich nur auf einem rudimentären Niveau mit der JDM 200 interagiert werden.

### 5.1.2 Erste Ergebnisse

Der Ablauf der Justage gestaltete sich wie folgt: Nach dem sämtliche Parameter gesetzt wurden, wurde die Spindelrotation der JDM 200 gestartet und die

Bestromung der Hämmerchen freigeschaltet<sup>3</sup>. Dann wurde das Skript gestartet und steuerte die Hämmerchen entsprechend der berechneten Zeitpunkte. Bewegte sich das Reflexbild auf den Kontroll-Monitoren kaum noch, wurde das Programm abgebrochen.

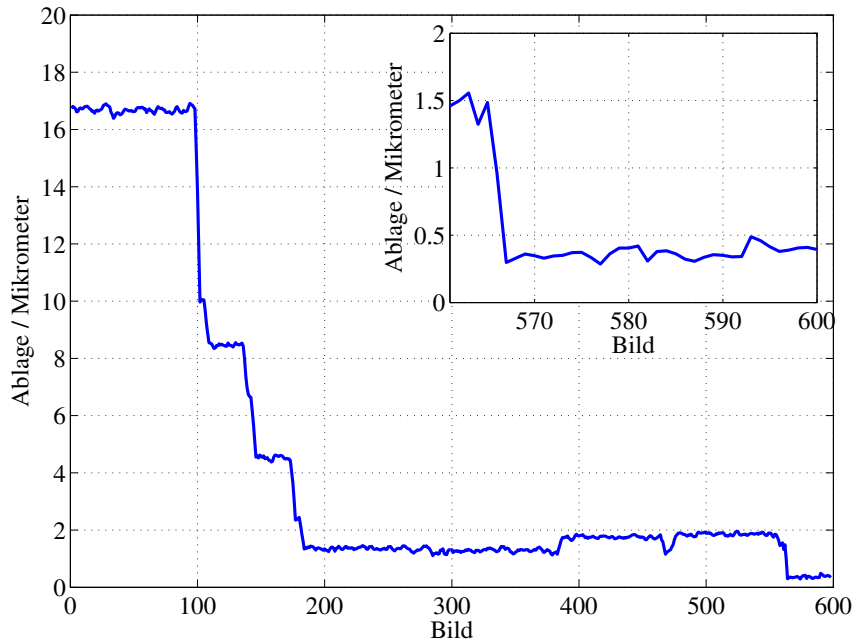


Abbildung 5.3: Verlauf des Zentriervorgangs einer Linsenfläche, die bereits nach 600 Bildern, bzw. 24s mit einer Restablage von weniger als  $0,5\ \mu\text{m}$  beendet wurde.

Ein während des Vorgangs aufgezeichneter Verlauf des Schlagkreisradius der unteren Linsenfläche ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Mit der wiederholt erreichten Restablage von weniger als einem Mikrometer, erfüllt dieses Skript die ursprünglichen Anforderungen an die JDM 200 (vgl. Abschnitt 3.2). Die Ablage, welche über vier konsekutive Bilder mit Hilfe des Kreisfits (vgl. Abschnitt 3.3.2) berechnet wurde, beträgt am Ende des präsentierten Zentriervorgangs  $(0,34 \pm 0,02)\ \mu\text{m}$ .

Die Zentrierdauer dieses Vorgangs ist abhängig von der Anfangsablage, die je nach Baugruppe ca. 30 bis  $100\ \mu\text{m}$  beträgt. Eine lineare Abschätzung der erreichten Zentriergeschwindigkeit über den Bereich<sup>4</sup> von Bild 100 bis 175 ergibt

<sup>3</sup> Dazu gab es ein Zusatzprogramm, welches über einen USB-Digital/Analogwandler eine Spannung von 5 V an die TTL-Logik der Elektronik anlegte.

<sup>4</sup> Erst bei Bild 100 wurde manuell der Skriptteil zum Ausführen der Schläge gestartet.

ca.  $20\ \mu\text{m}/75$  Bildern bzw.  $20\ \mu\text{m}/3\ \text{s}$  bei 25 FPS. Dies ergäbe für zusätzliche  $120\ \mu\text{m}$  Anfangsablage eine Verlängerung der Zentrierdauer von weniger als 20 s für das Annähern auf  $2\ \mu\text{m}$ . Summiert mit den 20 s für das feine Ausrichten ergäbe sich noch immer eine Gesamtdauer unter einer Minute. Vergleichbare Ergebnisse für Ablagen, die ebenfalls mit dieser Software erzielt wurden, sind auch in [30] publiziert.

### 5.1.3 Konsequenzen der Weiterentwicklung der JDM 200

Nach vielen Tests und Untersuchungen wurde entschieden, die alte Sensortechnik und Schlagelektronik und deren Software nicht mehr zu verwenden und stattdessen das neue Verfahren einzusetzen. Damit änderten sich die Anforderungen an die Software grundlegend.

Es wurde eine Software konzipiert, die es dem Bediener der JDM 200 zukünftig ermöglichen sollte, mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) und standardisierten Dialogen auf komfortable Art und Weise Linsen zu zentrieren. Die dafür nötigen Anpassungen und Modifikationen sind im Detail im nächsten Abschnitt 5.2 erläutert.

Bisher ist die JDM 200 in der Lage gewesen, sowohl Linsen ohne Störung als auch diejenigen mit hellem Hintergrund (bzw. schwachen Reflex) zu zentrieren (vgl. Abb. 3.2). Wie im Abschnitt 4.4 gezeigt wurde, versagt die alte Technik jedoch, wenn dynamische Störreflexe auftreten. Die Bilderkennung kann diese Baugruppen unter Zuhilfenahme der SWK mit ROI sicher und exakt zentrieren, so lange die Störreflexe nicht den gesuchten Reflex überdecken.

Aus Zeitgründen wäre es wünschenswert, auf die Bestimmung einer ROI verzichten zu können, da diese neben der reinen Berechnungszeit immer einen Vorlauf benötigt und somit die Komplexität und die Fehleranfälligkeit der Software erhöht (vgl. Abschnitt 4.1.1). Eine partielle, hardwareseitige Lösung für dieses Problem wird in Abschnitt 5.2.3 vorgestellt. Diese ist auch in Hinblick auf alternative Zentrieralgorithmen interessant (vgl. Abschnitt 5.4).

## 5.2 Industrie-Version

In diesem Abschnitt wird das im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelte Programm zur Steuerung der JDM 200 vorgestellt. Im ersten Teil wird ein Überblick über sämtliche Anforderungen an die Software und den Zentrierprozess gegeben. Die Details zur Realisierung dieser Aufgaben finden sich in den folgenden Abschnitten.

Die Anforderungen lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen: Benutzeroberfläche (GUI), Zentrierprozess und Steuerung. Die Anforderungsliste lautet:

- **Benutzeroberfläche:**
  1. Die Reflexbilder sollten live und wahlweise schwellwertkonvertiert (schwarzweiß) dargestellt werden.
  2. Es sollte der Verlauf des Betrags der Ablage beider Baugruppenflächen dargestellt sein und deren momentane Amplitude und Phase.
  3. Die Parameter der Baugruppentypen sollten speicherbar sein.
  4. Neben der Benutzeroberfläche sollte es einen passwortgeschützten Konfigurationsdialog geben.
  5. Das Programm sollte eigenständig, d. h. ohne die Entwicklungsumgebung MATLAB funktionieren.
  
- **Zentrierprozess:**
  1. Der Zentrierprozess sollte automatisch ablaufen, ein manueller Eingriff jedoch jederzeit möglich sein.
  2. Die Schlagstärke sollte adaptiv an die Ablage der Baugruppen angepasst sein.
  3. Der Schlagzeitpunkt des Kalottenhammers muss um eine halbe Umdrehung verzögerbar sein. Der Grund dafür wird in Abschnitt 5.2.2 erläutert.
  
- **Steuerung:**
  1. Die Soundkarte sollte aufgrund ihrer potentiellen Schläge durch Töne<sup>5</sup> nicht mehr verwendet werden.
  2. Die JDM 200 sollte automatisch den Drehprozess nach dem Zentrierprozess starten.

Parallel zur Software ist eine umfassende Dokumentation (über 50 Seiten) entstanden, die der Industriepartner erhalten hat [29].

### 5.2.1 Benutzeroberfläche

Für die einfache Bedienung wurde die in Abbildung 5.4 dargestellte Oberfläche entworfen. In der Abbildung sind zusätzlich die Hauptaufgabengebiete der

---

<sup>5</sup> Ausgelöst z. B. durch Fehler oder Hinweise des Betriebssystems.

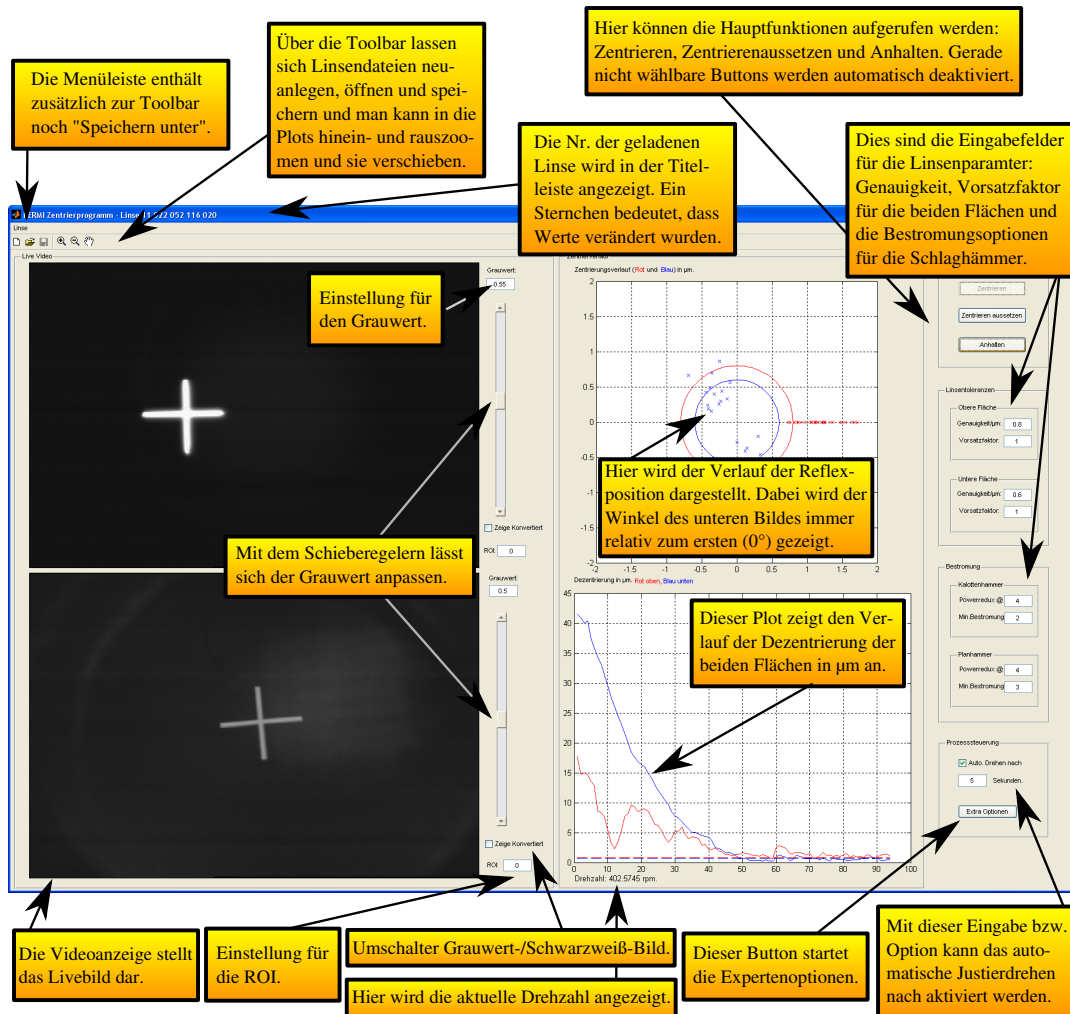


Abbildung 5.4: Die Benutzeroberfläche des *FERMI*-Zentrierprogramms mit der Beschreibung der wichtigsten Funktionen [29].

einzelnen Schaltelemente und Knöpfe erläutert. Beim Verweilen der Maus über den Schaltflächen, erhält der Benutzer Hinweise, wie die in der Abbildung gezeigten. Wie zu sehen ist, erfüllen die vier größten Flächen die Anforderungen 1 und 2 an die GUI. Im linken Teil werden die Kamerabilder live angezeigt. Diese Darstellung lässt sich umschalten auf das schwarzweiß konvertierte Bild. Im rechten Teil werden die gewünschten Messwerte visualisiert: Oben ist ein Amplituden-Phasen-Diagramm und unten die Ablage der beiden Baugruppenflächen zu sehen.

Die Verwaltung der Linsenparameter wurde in Anlehnung an das auf dem CNC-Computer der JDM 200 genutzte Verfahren programmiert. Dort existiert für jeden Baugruppentyp des Sortiments eine eigene Linsendatei, in der die nötigen Parameter gespeichert sind. Für die Zentriersoftware sind dies u. a. die Schwellwerte, sowie die erlaubten Toleranzen der Baugruppe.

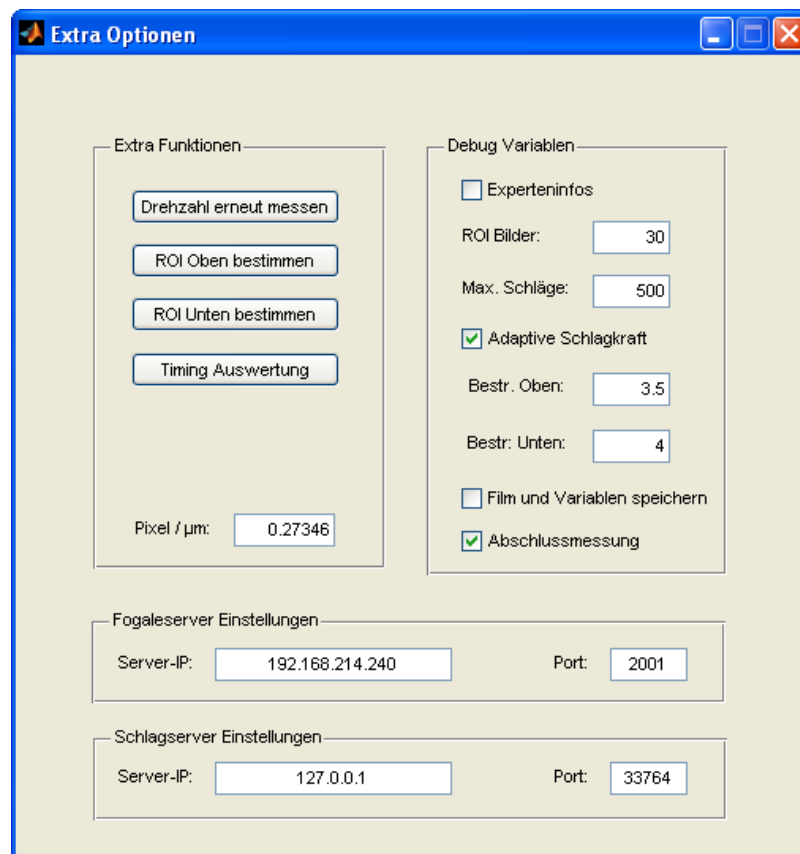


Abbildung 5.5: Der Expertendialog der Zentriersoftware bietet die Möglichkeit sehr grundlegende Programmparameter zu ändern und ist daher mit einer PIN geschützt.

Der über den unten rechts angebrachten Schaltknopf erreichbare Expertendialog ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Um diesen Dialog aufzurufen, bedarf es einer PIN, um Anforderung 4 zu erfüllen. So sollen falsche Eingaben vermieden werden, die beispielsweise zu einem Ausfall der Steuerung der Schlaghämmerchen oder deren Überbeanspruchung führen kann. Erläuterungen zu den diversen Optionen sind in der Softwaredokumentation [29] zu finden.

Um aus der Software ein eigenständiges Programm zu generieren, wurde die MATLAB-Compiler-Toolbox verwendet. Diese übersetzt mit Hilfe eines regulären Compilers, wie z. B. dem LCC von Intel<sup>®</sup> [14] oder den GCC von GNU [8], die MATLAB Skripte in ein sogenanntes Binärformat des zum Übersetzen verwendeten Betriebssystems. Es ist so möglich, sowohl Windows als auch Linux Programme zu erstellen. Falls auf dem Computer, auf dem das Programm später ausgeführt werden soll, kein MATLAB vorhanden ist, muss für die Darstellung der GUI die so genannte MATLAB Compiler Runtime (MCR) installiert werden<sup>6</sup> [39]. Diese Lösung erlaubt es, ein freies Betriebssystem (etwa GNU/Linux) auf dem Messrechner einzusetzen.

Zusammenfassend bietet die neue GUI gegenüber der vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF entwickelten Software viele Vorteile: Durch die Verwendung von Linsendateien, ist nur eine Anwendung für sämtliche Baugruppentypen<sup>7</sup> nötig und diese stellt im Gegensatz zur IOF-Lösung den aktuellen Zentrierverlauf grafisch dar.

### 5.2.2 Adaptiver Zentrierprozess und neue Steuerung

Entsprechend Punkt 1 der Anforderungsliste, wurden Grenzwerte eingeführt, um den Zentrierprozess zu automatisieren. Dabei wurden absolute Grenzen für die Zentrierdauer und die maximale Ablage definiert. Durch eine Grenze für die maximale Ablage kann verhindert werden, dass die Schlaghämmer das Justierfutter zu weit aus der Mittelstellung auslenken. Die Zentrierdauer wird über die maximale Anzahl von 500 zulässigen Schlägen kontrolliert, was in etwa 235 s bzw. 4 Minuten entspricht. Danach bricht die Software den Vorgang mit einer Fehlermeldung ab<sup>8</sup>.

Um möglichst schnell die Linsen zu zentrieren, wurde ein Nahbereich definiert. Erreicht die gemessene Ablage der Reflexschwerpunkte diesen, so wird die Anzahl an Bildern, die für den Kreisfit verwendet werden von 4 auf 8 verdoppelt.

---

<sup>6</sup> Dieses Paket basiert auf der Java-Runtime und dessen grafischer Schnittstelle „Swing“ und sorgt plattformübergreifend für eine dem Betriebssystem angepasste Darstellung der Komponenten und Dialoge.

<sup>7</sup> Die Software des IOF benötigte für jeden Typ eine eigene Anwendung [29].

<sup>8</sup> Hinweise zum Verhalten in solchen Fällen werden in Tabelle 1 vorgestellt.



Neben der Reduktion der Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$ , wird ab dieser dynamischen Grenze<sup>9</sup> die Schlagstärke reduziert. Die Schlagstärke wird dabei linear reduziert, damit soll verhindert werden, dass die Hämmerchen die Baugruppe immer wieder über das tatsächliche Zentrum hinaus schlagen. Die lineare Reduktion bietet noch ein gewisses Potential für zukünftige Verbesserungen (vgl. Abschnitt 5.4).

Die Kontrolle der Schlagrichtung  $\vec{c}$  (vgl. Abb. 5.1) ermöglichte es, Baugruppen „über Kreuz“ zu zentrieren. Dabei wird mit dem oberen Reflexbildgerät die Ablage der unteren Fläche beobachtet und umgekehrt. Dieser Trick wird häufig bei Baugruppen mit mehreren Linsen und solchen mit großen, bzw. sehr kleinen Radien angewandt, um Störungen oder den Einsatz von Vorsatzoptiken zu vermeiden (vgl. Tabelle 2.1). Registriert die Software den Anstieg des Betrags von  $\vec{c}$  über mehreren Schläge, so wird automatisch die Richtung des Kalottenhammers umgedreht, d. h. effektiv wird der Schlag eine halbe Umdrehung später ausgeführt. Auch dieser Parameter wird automatisch in der Linsendatei gespeichert, sodass weitere Baugruppen des gleichen Typs sofort mit der richtigen Schlagrichtung ausgerichtet werden können.

Um den Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden, wurde auf den weiteren Einsatz der Soundkarte als Hardwarelösung für die Steuerung der Hämmer verzichtet. Statt dessen wurde die bisher mit der alten Software eingesetzte Digital-I/O-Karte verwendet. Um die maximale zeitliche Präzision zu erreichen, wurde für die Karte eine eigene Software in der hardwarenahen Programmiersprache „C“ geschrieben. Diese kommuniziert mit dem MATLAB-Programm über eine Netzwerkschnittstelle. Die maximal erreichbare Frequenz wurde dadurch von 44,1 kHz auf über 450 kHz erhöht, was Schlagvariationen im einstelligen Mikrosekundenbereich erlaubt.

Um den CNC-Prozess automatisch starten zu können, wurde mit Absprache des Maschinenherstellers Optotech ein rudimentäres Netzwerkprotokoll entwickelt. Dieses erlaubt es der Software nach Abschluss des Zentrierprozesses über eine in C-implementierte Routine eine Verbindung zum CNC-Computer herzustellen und den Drehprozess zu starten.

Der Ablauf des Justier-Drehprozesses wurde im Vergleich zum vorherigen Vorgehen (vgl. Abschnitt 3.2.3) modifiziert:

1. Falls noch nicht geschehen, Linsendatei für die zu zentrierende Baugruppe auf dem CNC- und dem Mess-PC laden.

---

<sup>9</sup>Die Grenze lässt sich in der Software ändern und besitzt eine Hysterese, sodass nicht ständig zwischen Nah- und Fernbereich gewechselt wird.

2. Tür der JDM 200 öffnen und die Baugruppe in das Futter einspannen.
3. Tür schließen und Rotation der Spindel an der Maschine starten.
4. In der Zentriersoftware den Startknopf drücken und warten, bis der Hinweis erscheint, dass mit dem Justierdrehen begonnen wird.
5. Der Hinweisdialog gibt dem Benutzer kurz die Möglichkeit, das automatische Starten des Drehprozesses zu unterbinden.
6. Der Drehprozess startet automatisch, warten bis die Maschine wieder steht.
7. Tür der JDM 200 öffnen, die bearbeitete zentrierte Linse entnehmen.

In die Software konnten bei diesem Ablauf wesentliche Sicherheitselemente für die Steuerung integriert werden. Da die Tür der JDM 200 ein Magnetschloss mit Verschlusssensor besitzt, kann die Spindel nicht bei offener Tür gestartet werden. Diesen Umstand macht sich die Software zu nutze und startet erst dann mit dem Schlagen der Hämmer, wenn sich die Spindel dreht. Dazu misst die Software mittels der Digital-I/O-Karte die Drehzahl der Maschine, die bei jeder Umdrehung einen Puls generiert. Liegt die ermittelte Drehzahl nicht innerhalb des Spielraums von  $(400 \pm 5)$  RPM, so bricht die Software den Vorgang mit einem Hinweis ab. Die Drehzahl wird auch während des Zentriervorgangs kontrolliert und verhindert so, dass bei einem Ausfall der Spindelrotation weiter geschlagen wird. Durch diese Kombination und den Einsatz des Magnetschlusses kann der Anwender nicht versehentlich verletzt werden.

Zusammenfassend kann die neue Software dank der Bilderkennung die Ablage der Baugruppen erstmals absolut messen und bietet daher gegenüber der alten Technik diverse Vorteile: Es können feste Grenzwerte und Toleranzen verwendet werden. Außerdem wird die Schlagstärke und die Messgenauigkeit adaptiv angepasst und die Zentrierdauer überwacht.

### 5.2.3 Erste Modifikation der Reflexbildgeräte

Die digitale Auswertung der Kamerabilder wurde durch das Haar in den Reflexbildgeräten (vgl. Abschnitt 3.2.1) erschwert und die Größe des Reflexes führte häufig zu Störreflexen. Daher wurde die Messfeldblende gewechselt. So ist beispielsweise für das automatische Bestimmen eines idealen Schwellwerts (vgl. Abschnitt 4.2) eine einzelne Fläche zu bevorzugen.

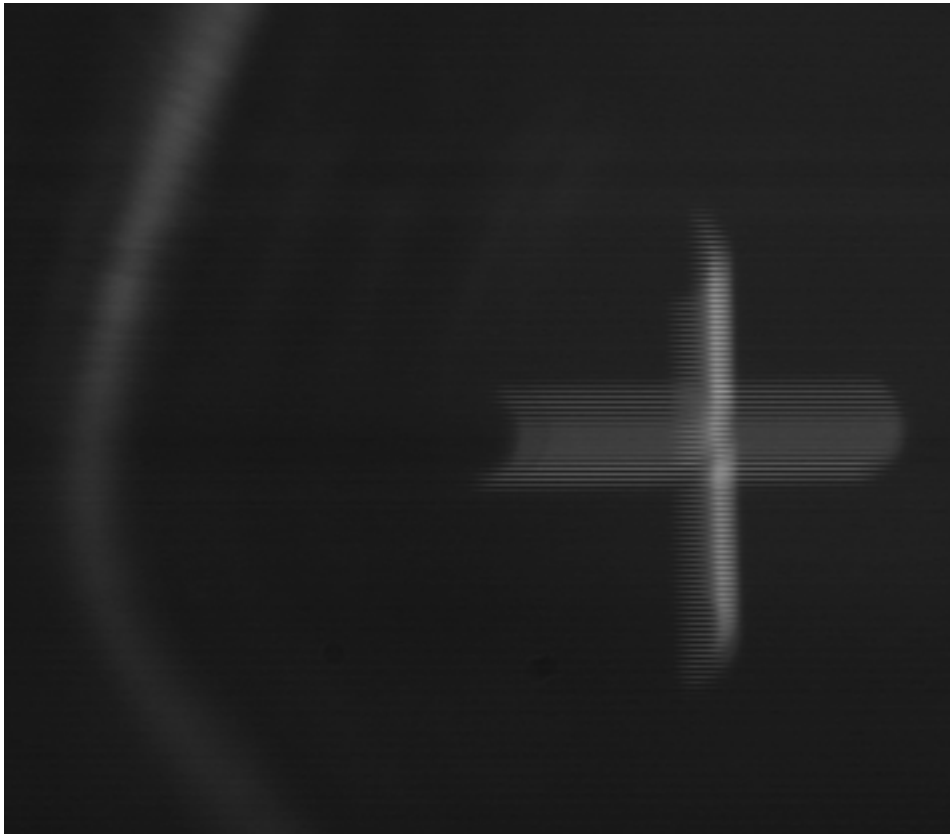


Abbildung 5.6: Ausschnitt eines typischen Reflexbildes mit der neuen Strichkreuzblende. Das Interlacing der Kameras wurde bei dieser Modifikation noch nicht behoben.

Die bisherige Blende wurde durch ein Strichkreuz ersetzt, welches sich auch für weitere Bildererkennungstechniken eignet (vgl. Abschnitt 5.4). Ein typisches Reflexbild mit der neuen Blende ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Mit dem neuen Strichkreuz verbesserte sich bei vielen Baugruppen, die mit einer Vorsatzoptik zentriert werden müssen, der Kontrast. Dies lässt sich durch die starke Reduktion des Streulichts im Beleuchtungsstrahlengang erklären. Dies hat zur Folge, dass die Zahl der Baugruppentypen, bei denen eine ROI verwendet wurde, reduziert werden konnte. Der Einsatz der alten Software wäre nach diesem Umbau sehr aufwendig, da alle Baugruppen erneut für die geringere Helligkeit eingerichtet werden müssten. Mit dem neuen *FERMI*-Zentrierprogramm (welches anfangs mit der alten Blende arbeitete) musste nur bei einer geringen Anzahl Linsen der Schwellwert korrigiert werden. Hier zeigt sich nochmals der Vorteil der neuen Software, die eine relative Schwelle zum hellsten Pixel nutzt und so Schwankungen in der Gesamthelligkeit kompensieren kann.

## 5.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus 9 Monaten Betrieb der im letzten Abschnitt vorgestellten Industrie-Version der *FERMI*-Zentriersoftware vorgestellt. Die Daten von über 7000 Zentriervorgängen wurden in der Firma Leica Microsystems während des regulären Betriebs der JDM 200 erhoben und gespeichert. Hier werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

1. Welche mittlere Restablage besitzen die Baugruppen, nachdem sie mit der Software zentriert wurden?
2. Wie schnell können die Baugruppen im Mittel zentriert werden?
3. Wie viel Prozent der dokumentierten Zentriervorgänge wurden erfolgreich beendet?
4. Wie verteilen sich die Zentriervorgänge auf die unterschiedlichen Baugruppentypen? Wie viel Prozent der Baugruppentypen des Gesamtsortiments lassen sich zentrieren?

Die erzielten Ergebnisse führten zu Ideen und Vorschlägen, wie die Soft- und Hardware weiter verbessert werden könnten. Diese sind im Abschnitt 5.4 aufgeführt.

### 5.3.1 Mittlere Restablage und Zentrierdauer

Für die Untersuchung der mittleren erzielten Restablage und der Zentrierdauer, wurden sämtliche erfolgreich beendeten Zentriervorgänge benutzt. Dies waren in Summe 6422 Vorgänge (vgl. Abb. 5.10), wobei davon ausgegangen wird, dass es sich bei jedem Vorgang um eine eigene Baugruppe, bzw. Linse handelt.

#### Mittlere erzielte Restablage

Die Datenpunkte in Abbildung 5.7 zeigen die erzielte Restablage beider Linsenflächen abschnittsweise sortiert nach der zulässigen Toleranz (rote Linie). Es gibt Bereiche, in denen die Datenpunkte inhomogen verteilt liegen (etwa ab Linse 4500). Der Grund dafür ist eine Korrektur der Toleranzgrenze innerhalb des Erfassungszeitraums von 9 Monaten. Die erlaubte Toleranz wird für jeden Baugruppentyp in der Linsendatei gespeichert (vgl. Abschnitt 5.2.1), aber nicht in den Messdaten. Wurde erkannt, dass die Toleranzen für eine Baugruppe beispielsweise falsch in der Datei gespeichert wurden, so führte eine Modifikation der Linsendatei dazu, dass spätere Vorgänge eine niedrigere (oder höhere)

Toleranz besitzen. In Abbildung 5.7 wurde die für die Baugruppe maximale Toleranz verwendet<sup>10</sup>, wodurch die inhomogenen Stellen entstanden sind. Die mittlere Ablage der Baugruppen innerhalb des geforderten Toleranzbereichs ist in grün markiert und zeigt, dass diese etwa 2/3 der Toleranz beträgt. Die niedrigste gemessene Restablage für eine Linsenfläche beträgt  $0,07\ \mu\text{m}$ , dies beträgt ca. das doppelte der Standardabweichung  $\sigma_{rs}$ , die während der Leistungsanalyse für die Schwellwertkonvertierung bei Szenario 4 für eine zentrierte Linse ermittelt wurde (vgl. Tab. 4.2).

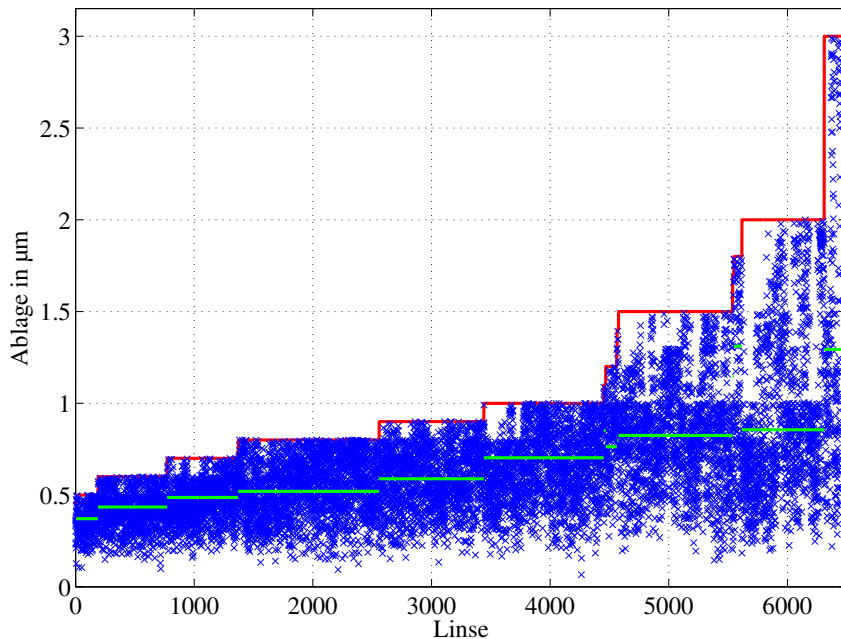


Abbildung 5.7: Nach Genauigkeit sortierte erzielte Endablage der Linsenflächen (blau). Die maximale erlaubte Toleranz ist in rot dargestellt, der Mittelwert der erreichten Ablage in grün.

Eine Sortierung der erzielten Restablage der Linsenflächen unabhängig von der geforderten Toleranz wird in Abbildung 5.8 vorgestellt. Es ist ersichtlich, dass 98% der Linsen(flächen) eine Restablage kleiner als  $1,5\ \mu\text{m}$  aufweisen. 90% der Vorgänge erreichten eine Dezentrierung von weniger als  $1\ \mu\text{m}$ . Der Mittelwert der Verteilung beträgt:  $0,66 \pm 0,32\ \mu\text{m}$ .

Da die Streuung des Mittelwerts nahezu 50% des Werts beträgt, wurde zusätzlich der Median berechnet:  $0,60\ \mu\text{m}$ . Die Hälfte der Linsen wurde also genauer

<sup>10</sup> Für Baugruppen, bei denen die Toleranz reduziert wurde, wurde der ursprüngliche Wert aus der maximalen Ablage der Zentriervorgänge vor der Änderung der Toleranz rekonstruiert.

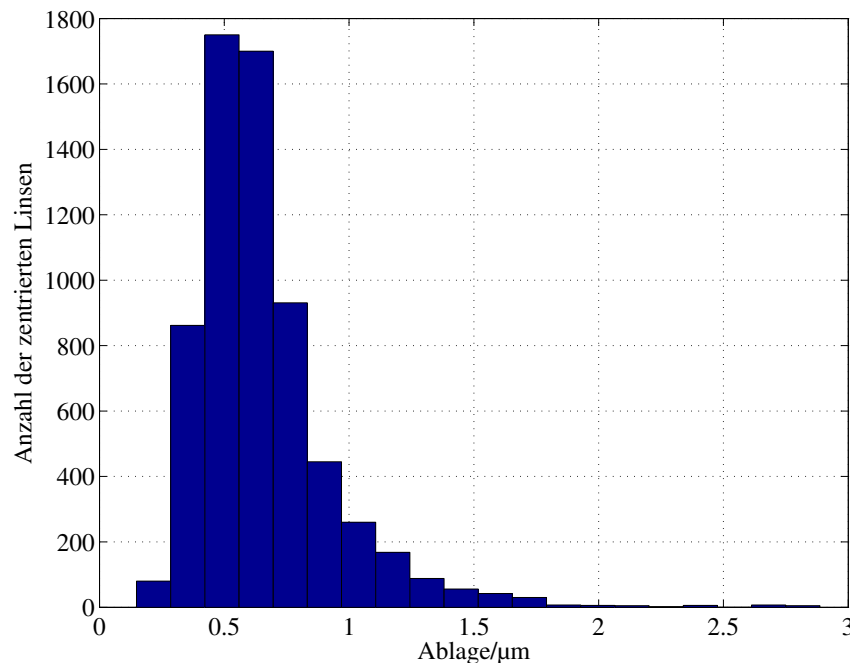


Abbildung 5.8: Verteilung der Restablagen der erfolgreichen Zentriervorgänge. Der Mittelwert beträgt  $0,66 \mu\text{m}$  und über 90% der Vorgänge werden mit einer Restablage von weniger als  $1 \mu\text{m}$  gefertigt.

als  $0,6 \mu\text{m}$  zentriert und dies obwohl nur 12% der Vorgänge eine solche Toleranz fordern (vgl. Abb. 5.7).

### Mittlere erzielte Zentrierdauer

Die erhobenen Daten enthielten neben der erzielten Restablage auch die Dauer des Zentriervorgangs. Diese ist für die Baugruppen, die innerhalb von 4 Minuten (vgl. Abschnitt 5.2.2), die gewünschte Toleranz erreichten in Abbildung 5.9 dargestellt. Das Histogramm zeigt, dass binnen zwei Minuten 94% der Vorgängen erfolgreich beendet werden konnten. Über 4000 Linsen, bzw.  $2/3$  der Vorgänge wurden innerhalb einer Minute zentriert. Der Mittelwert von  $53 \pm 36 \text{ s}$  variiert deutlich. Daher wurde auch hier der Median bestimmt: 44 s.

### 5.3.2 Verteilung und Einstufung der Zentriervorgänge

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie viele Zentriervorgänge erfolgreich beendet wurden und wie häufig während des Prozesses Probleme aufgetreten sind. Dafür wurden die Abbruchkriterien der neuen Software verwendet (vgl. Abschnitt 5.2.2). Das Überschreiten der maximalen Zentrierdauer eines Vorgangs,

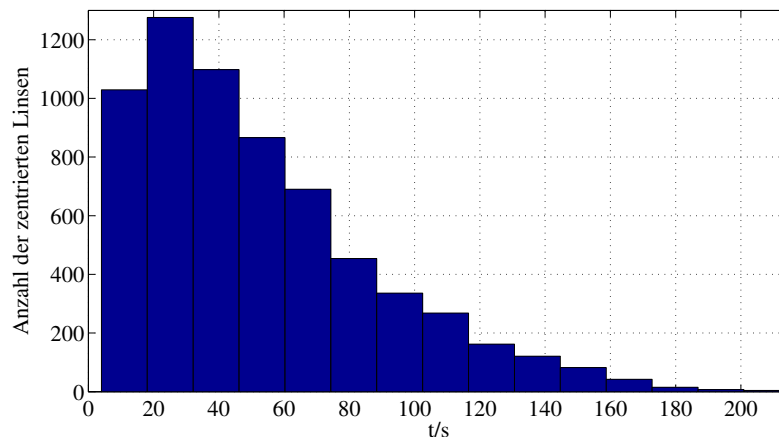


Abbildung 5.9: Histogramm der Zentrierdauer  $t$  sämtlicher erfolgreicher Zentriervorgänge mit einem Median von 44s. Innerhalb von zwei Minuten wurden 94% der Vorgänge beendet (inkl. einer möglichen Bestimmung der ROI).

wird hier als Zeitproblem bezeichnet. Ein Schlagproblem trat bei den Vorgängen auf, bei denen die Baugruppe die maximale zulässige Ablage überschritt. Die Zentriervorgänge, bei denen die Software ein Problem hatte, resultieren aus der Anzahl von zentrierten, aber fälschlicherweise als nicht zentriert gezählten Baugruppen (*false-negatives*). Eine nähere Analyse dieses Problems war nicht möglich, da es sich nicht reproduzieren ließ und sehr selten war ( $< 0,04\%$ ).

### Häufigkeitsverteilung von Problemen während des Zentriervorgangs

Das Tortendiagramm in Abbildung 5.10 zeigt die Häufigkeitsanteil der unterschiedlichen Problemtypen während der 9-monatigen Messzeit. Demnach konnten 89% aller Vorgänge erfolgreich (ohne eine Störung) beendet werden. Dies ist jedoch nicht gleichbedeutend mit einer Quote von 89% zentrierbarer Baugruppen oder Linsen: So kann beispielsweise ein Zentriervorgang, der aus Zeitgründen abgebrochen wurde (vgl. Abschnitt 5.2.2) wiederholt werden, um die Baugruppe dennoch zu zentrieren. Da die Software nicht in der Lage ist zu erkennen, ob die in der JDM 200 eingespannte Baugruppe gewechselt wird, wurde für jeden Zentriervorgang ein neuer Datensatz gespeichert. Es ist davon auszugehen, dass Baugruppentypen, deren Fertigung durch die JDM 200 vorgesehen wurden, aus ökonomischen Gründen auch auf der JDM 200 zentriert wurden, falls nicht sämtliche Zentriervorgänge für den Baugruppentyp fehlschlugen. Eine Übersicht der aufgetretenen Probleme und deren Lösungsstrategien sind im Anhang in Tabelle 1 aufgeführt.

## Verteilung der Zentriervorgänge

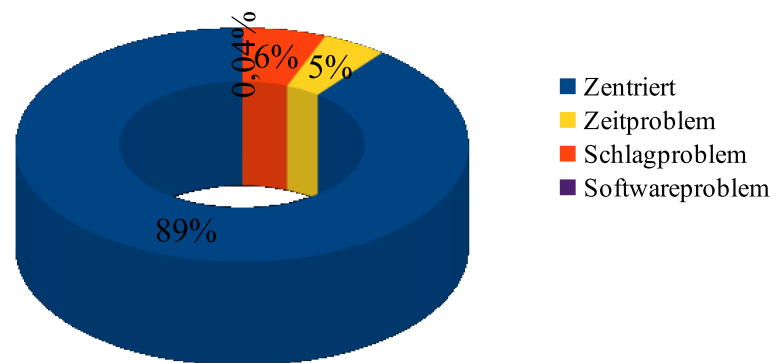


Abbildung 5.10: Aufteilung der 7215 Zentriervorgänge nach deren erzieltem Abschluss. Die Daten wurden mit dem neuen *FERMI*-Zentrierprogramm binnen 9 Monaten im Industrieinsatz der JDM 200 bei der Firma Leica Microsystems erhoben. Die Probleme beziehen sich auf die Abbruchkriterien der Software (vgl. Abschnitt 5.2.2).

### Baugruppenbezogene Anzahl an Zentriervorgängen

Zu jedem Zentriervorgang speicherte die Software die Zugehörigkeit zur Baugruppe, von denen insgesamt 106 verschiedene Typen registriert wurden. Um herauszufinden, wie viel Prozent der Baugruppentypen des Gesamtsortiments sich auf der JDM 200 zentrieren lassen und ob alle Typen etwa gleich häufig auf der Maschine zentriert wurden, wurde die Anzahl an Zentriervorgängen in Abhängigkeit des Baugruppentyps ermittelt. Abbildung 5.11 zeigt diese Anzahl an Zentriervorgängen, wobei Vorgänge, bei denen eines der im letzten Abschnitt vorgestellten Problem auftrat, als nicht erfolgreich eingetragen sind.

Für etwa ein Viertel aller Baugruppentypen wurden mehr als 100 Zentriervorgänge registriert, während ca. ein Viertel unter 15 Vorgänge aufwies. Die Verteilung ist insgesamt sehr inhomogen<sup>11</sup> und es zeigt sich kein Zusammenhang zwischen der Gesamtzahl an Vorgängen eines Typs und deren Erfolgsquote. Es gibt Typen mit mehr als 50 Vorgängen ohne ein einziges Problem und solche bei den von 80 Zentriervorgängen weniger als 50 ohne Problem beendet wurden. Für vier Baugruppentypen (vgl. Abb. 5.11 ab Typ 102) wurde nur ein einziger Vorgang gespeichert.

<sup>11</sup>Der Mittelwert an Zentriervorgängen/Baugruppentyp beträgt  $68 \pm 71$ , der Median 42 Vorgänge/Baugruppentyp.



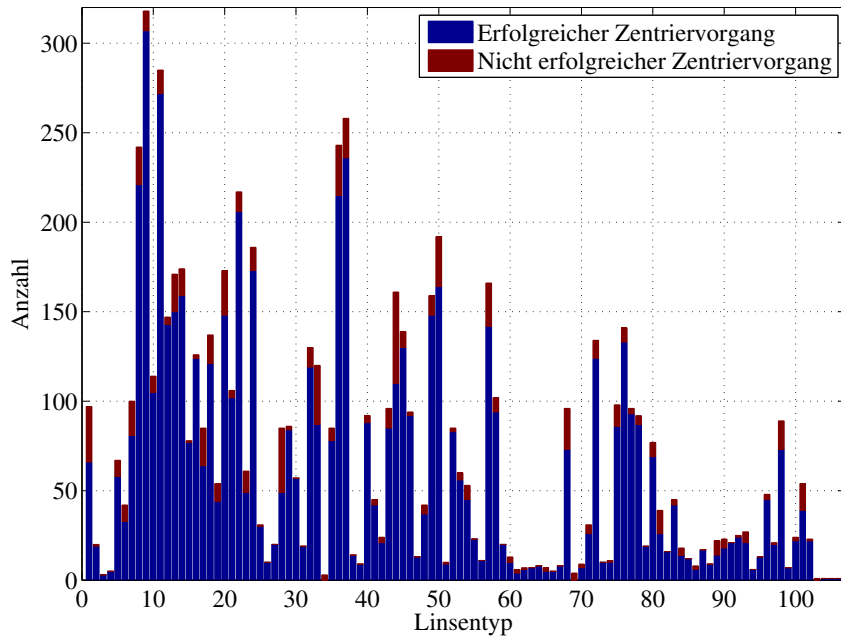


Abbildung 5.11: Verteilung der Zentriervorgänge auf die einzelnen Baugruppentypen. Nach dieser Statistik gibt nur 3 Typen, die nicht zentriert werden konnten.

Um die Baugruppentypen nach ihrem Problemanteil kategorisieren zu können, wurden die Vorgänge normiert und nach zunehmendem (relativen) Problemanteil sortiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.12 dargestellt, dabei wurden die Probleme wieder in die Kategorien: Zeit-, Schlag- und Softwareproblem unterteilt. Aus der Abbildung lässt sich ableiten, dass bei ca. einem Viertel aller Baugruppentypen kein Zentriervorgang Probleme bereitete und dass bei 100 von 106 Typen die maximale Problemquote nicht mehr als 33% beträgt. Insgesamt konnten drei Typen nicht zentriert werden, was insgesamt einer Erfolgsquote von über 97% entspricht. Zu beachten ist hierbei, dass dieser Wert auf teilweise einzelnen Zentriervorgängen pro Baugruppentyp basiert und das möglicherweise nicht alle im Sortiment befindlichen Baugruppen-Typen auf der JDM 200 zentriert wurden.

### 5.3.3 Kritische Betrachtung der Erfolgsquote

Im letzten Abschnitt wurden zwei Werte ermittelt, die dazu dienen sollen, die Fähigkeiten der neuen Software zu bewerten. Dies war zum einen die Anzahl der erfolgreichen Zentriervorgänge insgesamt mit 89% und zum anderen die Er-

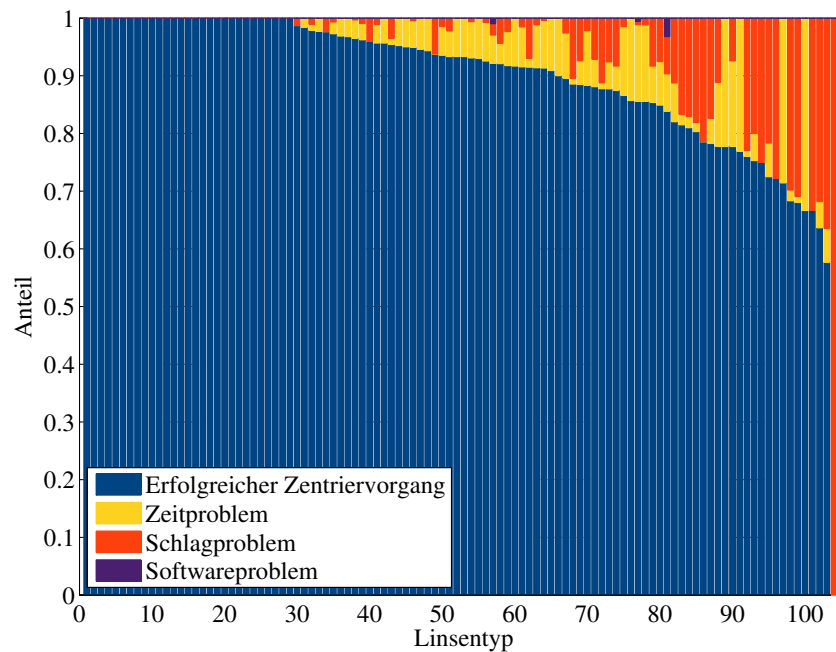


Abbildung 5.12: Verteilung der erfolgreichen und problematischen Zentriervorgänge in Abhängigkeit des Baugruppentyps, sortiert nach der Häufigkeit der Probleme. Hier zeigt sich, dass die nicht zentrierbaren Baugruppen aufgrund von Schlagproblemen nicht zentriert werden konnten und dass das Softwareproblem bei nur 3 Typen auftrat.

folgsquote von 97% der Baugruppentypen, die (mindestens ein Mal) zentriert werden konnten. In diesem Abschnitt soll geklärt werden, wie viele Baugruppentypen tatsächlich im industriellen Einsatz im Vergleich zu der alten Halbschattensensortechnik auf der JDM 200 zentriert werden können.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde die in Abbildung 5.12 gezeigte Verteilung der Zentrierprobleme in Klassen mit unterschiedlich hohen Problemanteilen eingeteilt, deren Verteilung in Abbildung 5.13 gezeigt wird. In die Klassen bis 25% Problemhäufigkeit fallen demnach 88% der Baugruppentypen, nur 12% der getesteten Baugruppen bereiteten beim Zentrieren häufiger Probleme.

Die in Abbildung 5.13 verwendeten Klassengrenzen wurden dabei so gewählt, dass die daraus resultierenden Häufigkeiten in etwa mit denen von Leica Microsystems ermittelten Anteilen an Bildstörungen übereinstimmte (vgl. Abb. 3.2 und Tab. 5.1). Durch den Vergleich zeigt sich, dass beispielsweise die statischen Reflexbildstörungen, bei den Baugruppentypen anzusiedeln sind, die zwischen

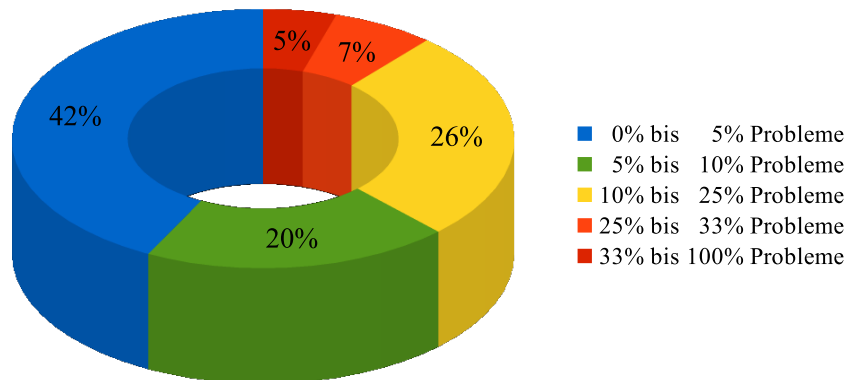


Abbildung 5.13: Verteilung der Baugruppentypen in Problemklassen. Die Klassengrenzen wurden dabei so gewählt, dass die gemessenen Häufigkeit in etwa der Verteilung der Reflexbildstörungen von Leica Microsystems entspricht (vgl. Abb. 3.2 und Tab. 5.1).

5% und 10% Probleme aufweisen.

Da sich, wie in Abschnitt 4.4 gezeigt wurde, mit der Bilderkennung auch Baugruppen mit dynamischen Störungen zentrieren lassen, lässt dies den Schluss zu, dass 85 bis 88% der Baugruppentypen des Sortiments im industriellen Einsatz zentrierbar sind. Die Produktionsleitung von Leica Microsystems bestätigte, dass mittlerweile mindestens 80% der Baugruppen auf der JDM 200 gefertigt werden. Bisher waren mit dem Halbschattensensor hingegen nur 55 bis 62% des Sortiments möglich.

Dies bedeutet, dass trotz der inhomogenen Verteilung der Baugruppen auf die verschiedenen Typen (vgl. Abb. 5.12), die Statistik der gemessenen Vorgänge repräsentativ ist und die JDM 200 mit der neuen Software in der Lage ist, Baugruppen mit einem Problemanteil von weniger als 25% im Alltag zu zentrieren.

Störungsart	Anteil	Anteil	Problemanteil
Keine Störung	40%	42%	weniger als 5%
Statische Störung	15%	20%	5% bis 10%
Dynamische Störung	30%	26%	10% bis 25%
Überlagernde dyn. Stör.	15%	12%	25% und mehr

Tabelle 5.1: Vergleich der Verteilung der Störreflexe (Abb. 3.2) mit der Häufigkeit von Problemen der gemessenen Zentriervorgänge (Abb. 5.13).

## 5.4 Weiterentwicklung und Ausblick

Über die Dauer der gesamten Arbeit wurden mehrere Probleme des Justierdrehens mit Hilfe der JDM 200 identifiziert. In diesem Abschnitt werden zu den gravierendsten Problemen Lösungsvorschläge präsentiert, die in einer Weiterentwicklung der Maschine umgesetzt wurden. Dabei sollen alle bisher vorgestellten Ergebnisse noch einmal verbessert werden. Vor allem die Anzahl an zentrierbaren Baugruppentypen soll weiter erhöht werden. Dafür wurde die Software zu großen Teilen überarbeitet, um die neue Hardware zu unterstützen.

### 5.4.1 Neuentwicklung der Reflexbildgeräte

Da das *Interlacing* der Kameras der JDM 200 die Positionsbestimmung der Videobilder erschwert und die Reflexe verschmiert aussehen lässt (vgl. Abschnitt 3.2.2), wurde entschieden, diese zu tauschen. Die neuen Kameras besitzen neben einem *Global Shutter* auch eine höhere Auflösung ( $1400 \times 1024$  Pixel) und sind in der Lage Vollbilder mit einer maximalen Frequenz von 75 Hz zu liefern.

Da für diesen Umbau die beiden Reflexbildgeräte aus der Maschine entfernt und modifiziert werden mussten, wurde parallel zur Wahl der neuen Kameras eine verbesserte Beleuchtungseinheit entwickelt. Bisher wurde durch den Einsatz von polarisiertem Licht das Streulicht der gegenläufig montierten Reflexbildgeräte reduziert. Die neuen Kameras vom Typ Genie HM1400 / XDR [38] sind in der Lage, die Videobilder synchron zu einem Triggersignal aufzunehmen. Durch die zusätzliche Koppelung der Beleuchtung an das Triggersignal können die Aufnahme und die Beleuchtung vom Computer gesteuert werden.

Statt die Beleuchtung mit einem *Chopper*<sup>12</sup> aufzurüsten, wurden LEDs, die sich direkt triggern lassen, als neue Beleuchtungsquelle verwendet. Für eine zusätzliche Separierbarkeit der Signale wurde in einem Reflexbildgerät eine rote und in dem anderen eine grüne LED und passende Farbfilter eingesetzt. So lassen sich selbst bei einem Ausfall der Triggereinheit die Reflexbildgerät weiterhin betreiben.

Eine weitere Neuerung ist der zusätzliche Einsatz von (frequenzverstimmten) Infrarotdioden. Viele der zu zentrierenden Baugruppen besitzen einfache Antireflexschichten, d.h. sie sind entweder auf sichtbares oder infrarotes Licht optimiert. Der Einsatz von Licht im sichtbaren und infraroten Spektrum erhöht bei diesen Baugruppen die Helligkeit der Reflexe deutlich gegenüber der

---

<sup>12</sup>Mit einem Chopper lässt sich eine kontinuierliche Beleuchtung sehr einfach unterbrechen bzw. takten.

bisherigen Lichtquelle, bei der Reflexe durch entsprechende Antireflexschichten unterdrückt wurden.

### 5.4.2 Modifikation des Bilderkennungsalgorithmus

Auch in den neuen Reflexbildgeräten wurde wieder eine kreuzförmige Messfeldblende verwendet. Dies hat wie bisher den Vorteil, dass Bestimmung einer ROI für viele Baugruppen überflüssig wurde. So wurde schon nach der ersten Modifikation die Zentriersoftware so modifiziert, dass diese Bestimmung nur noch optional durchgeführt wird.

Da durch die veränderte Hardware wesentliche Bestandteile der Software verändert werden mussten, wurde auch der Bilderkennungsalgorithmus modifiziert. Dabei wurde insbesondere die Schwerpunktbestimmung (vgl. Abschnitt 4.1.3) überarbeitet. Der neue Algorithmus beruht darauf, dass ein Strichkreuz<sup>13</sup> bei der Aufsummierung des Reflexbildes in einer Dimension einen scharfen Peak bildet. Abbildung 5.14 zeigt dies an einem Beispiel, welches noch mit den alten Kameras aufgenommen wurde.

Durch das Aufsummieren des Bildes in Vektoren sind verschiedene Bildverbesserungen wesentlich schneller durchführbar als bisher. So ist für das Anwenden einer ROI nicht mehr eine volle Matrixmultiplikation nötig, sondern nur noch eine Vektormultiplikation je für die  $x$ - und  $y$ -Richtung. Gleiches gilt für die Schwellwertkonvertierung, jedoch ist zu beachten, dass die Summation ebenfalls eine gewisse Zeit benötigt. Der Einsatz beschleunigt die Schwerpunktbestimmung also vor allem dann, wenn mehrere Filteroperationen auf den durch Summation gewonnen Vektoren durchgeführt werden.

### 5.4.3 Ausblick Zentrieren von sphärischen Linsen

Die neue Positionsbestimmung durch die Aufsummierung der Reflexbilder bietet noch ein hohes Entwicklungspotential. So könnte der Zeitgewinn durch die beschleunigten Operationen in Zukunft auch dazu genutzt werden, inhomogene Beleuchtungen automatisch zu detektieren und zu korrigieren. Dies könnte über das umgekehrte Verfahren wie zur der Generierung der ROI bewerkstelligt werden: Die Teile des Summenvektors, die sich nicht geändert haben werden detektiert und für den jeweiligen Zentriervorgang von den Summenvektoren subtrahiert.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten gibt es im Bereich der Schlagdurchführung: So ist das Zeitproblem als Fehlerquelle bzw. Problem beim Linsenzentrieren

---

<sup>13</sup> Im Gegensatz zu einer Kreisblende, die bei der Aufsummierung eher eine Glocke bildet (vgl. Abb. 5.14 links).

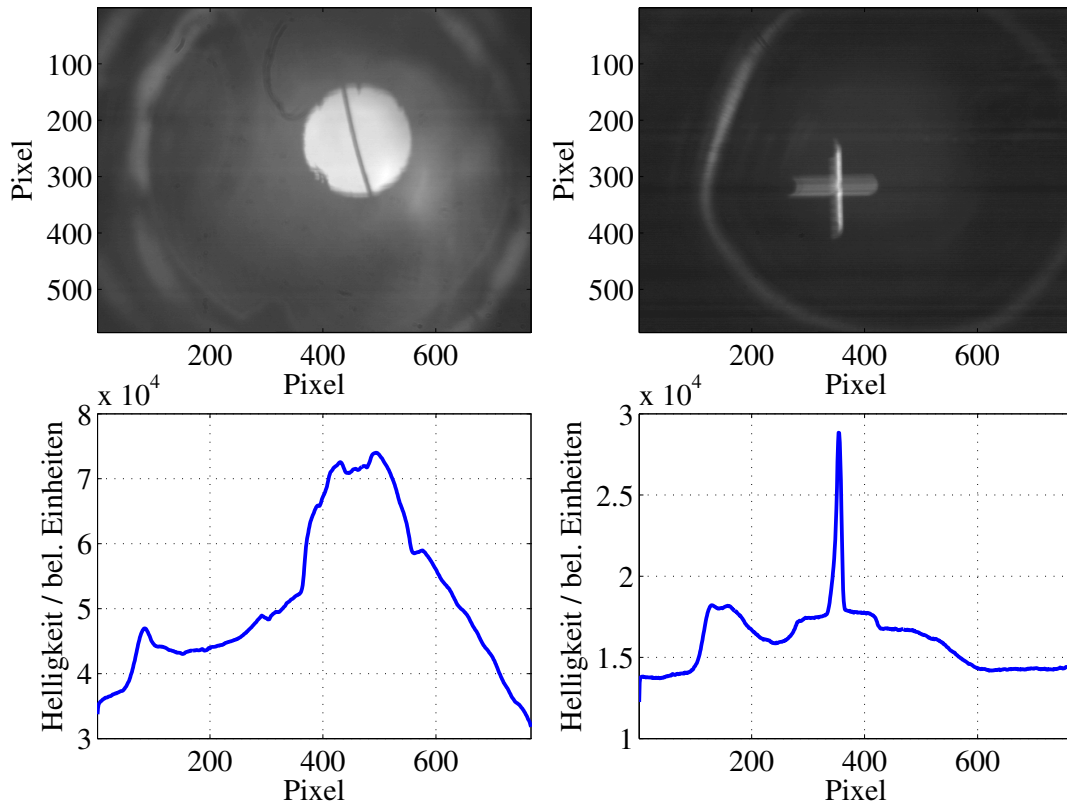


Abbildung 5.14: Vergleich der eindimensionalen Aufsummierung der Reflexbilder (unten) in  $y$ -Richtung. Auf der linken Seite wurde ein Reflexbild mit der ursprünglichen Blende verwendet, rechts ist die Messfeldblende mit Strichkreuz verwendet worden. Durch die Summierung können Filteroperationen beschleunigt werden, da sie nur auf eindimensionale Daten angewendet werden müssen.

in dem Segment der gering problembehafteten Linsentypen ( $<15\%$ ) dominant (vgl. Abb. 5.12). Dies deutet darauf hin, dass die Schläge entweder zu schwach oder zu stark waren und die lineare Reduktion der Schlagstärke nicht optimal ist (vgl. Abschnitt 5.2.2). Um diesen Effekt näher zu untersuchen, ist es notwendig zwischen beiden Fällen unterscheiden zu können. Bisher analysiert die Software die Messdaten noch nicht auf Phasensprünge die durch „überschlagen“ der beiden Schlagvektoren  $\vec{c}$  und  $\vec{d}$  (vgl. Abb. 5.1) entstehen.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil dieses Kapitel werden die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse noch einmal kurz dargestellt. Darüber hinaus werden im Abschnitt 6.2 Konzepte vorgestellt, wie mit komplexeren Reflexionsmustern in Zukunft asphärische Linsen und möglicherweise Freiformflächen ausgerichtet werden können.

### 6.1 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeit wurde eine allgemeine Erläuterung der theoretischen Grundlagen gegeben, gefolgt von einer Einführung in das Justierdrehen mit Hilfe der JDM 200.

In Abschnitt 3.3 wurden drei verschiedene Methoden analysiert, die helfen sollen, Messsysteme für die Ablage von Linsen zu beurteilen. Dabei hat sich gezeigt, dass das einfache Untersuchen des Signalverlaufs bzw. der Position des Reflexbildes keine geeignete Methode ist, um quantitativ die vier vorgestellten Testfälle<sup>1</sup> zu kategorisieren.

Aus der Fouriertransformation ließ sich zusätzlich zur Dynamik des Signals eine aussagekräftige Störanalyse gewinnen. So kann über die Beobachtung der Nebenfrequenzen eine Voraussage über die Zentrierbarkeit von Baugruppen gewonnen werden (vgl. Tab. 3.3, S. 39).

Den eindeutigsten Wert lieferte die Untersuchung der Standardabweichung  $\sigma_{r_X}$ . Dazu wird mittels des Kreisfits der Radius  $r_X$  des Schlagkreises aus  $X$ -Schwerpunkten berechnet. Die Standardabweichung ist somit ein Maß, wie stark die Messung des Radius streut: je kleiner  $\sigma_{r_X}$ , desto genauer die Messung.

---

<sup>1</sup> Einzel- und Doppelreflex, simuliert und experimentell gemessen (vgl. Tab. 3.2, S. 35).

In Kapitel 4 wurden Bildverarbeitungsalgorithmen vorgestellt, die es ermöglichen sollen, die Position der Reflexe aus den Kamerabildern der JDM 200 zuverlässig zu extrahieren. Der wichtigste Algorithmus zur Bildvorverarbeitung ist hier der zur automatischen Bestimmung einer *Region-of-interest* (ROI).

In vier ausgewählten Szenarien wurde er sowohl mit der Schwellwertkonvertierung (SWK) als auch der Kantenerkennung kombiniert, um die beiden Segmentierungsverfahren zu unterstützen. Die Testszenarien deckten einen großen Teil des Spektrums an möglichen Problemen ab: von Reflexbildern ohne Störung, über einen Fall mit statischer Störung, bis hin zu einem Fall mit dynamischer Störung.

Während bei diesen drei Szenarien ein auf der Kreuzkorrelation basierender Algorithmus neben den schwellwertbasierenden Verfahren bestehen konnte, zeigte der letzte Test die größte Schwäche der Kreuzkorrelation. Dabei wurde eine bereits mit dem Halbschattensensor zentrierte Baugruppe untersucht, dessen Reflexpositionen sich nur im Subpixelbereich unterschieden. Dies kann die Kreuzkorrelation prinzipbedingt nicht auflösen und detektierte daher keine Bewegung des Reflexes. In Tabelle 4.2 (vgl. S. 57) sind die Analyseergebnisse zusammengefasst, die zeigen, dass die SWK mit ROI auch für das Zentrieren von Baugruppen mit dynamischen Störungen geeignet ist. So liegt die Standardabweichung selbst für Szenario 3 bereits bei vier Mittelungspunkten bei  $\sigma_{r_4}=0,3\ \mu\text{m}$  und ist damit vergleichbar mit der Rundlaufgenauigkeit der Werkstückspindel (vgl. Abschnitt 3.2).

Um abschließend ein Urteil über die Bildverarbeitung zu erhalten, wurden weitere Tests durchgeführt, bei denen die bisherige Technik des Halbschattensensor mit der SWK mit ROI verglichen wurde. Die Testszenarien überprüften diesmal noch gezielter das Verhalten bei störungsbehafteten Reflexbildern (vgl. Abb. 4.9, S. 60 und Abb. 4.10, S. 61). Die Analyse der Störfrequenzen mit Hilfe der Fouriertransformation und die Standardabweichung  $\sigma_{r_8}$  zeigten deutliche Unterschiede zwischen der Bilderkennung und dem Halbschattensensor. So war mit einer testbedingten Ausnahme die Standardabweichung  $\sigma_{r_8}$  der Bilderkennung stets kleiner  $0,5\ \mu\text{m}$  (vgl. Tab. 4.3, S. 64).

Mit einer Alpha-Version konnte bewiesen werden, dass die Bilderkennung auch in der Anwendung Ablagen kleiner  $0,5\ \mu\text{m}$  erzielen kann [30]. Daraufhin wurde Anforderungskatalog erarbeitet, auf dessen Grundlage das neue *FERMI*-Zentrierprogramm entwickelt wurde. Es handelt sich um ein eigenständiges Programm, welches sofort im Industrieinsatz eingesetzt wurde und mit dem über 7000 Zentriervorgänge in 9 Monaten stattfanden.

Diese Vorgänge wurden anschließend untersucht, um zu klären, wie schnell und genau wie viele Baugruppen zentriert wurden. Der Median der Ablage beträgt



für alle erfolgreichen Zentriervorgänge  $0,60\ \mu\text{m}$ . Das Ergebnis ist um so erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass bei fast einem Drittel der Vorgänge Toleranzen von  $1,5\ \mu\text{m}$  und höher zulässig waren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Software die hardwareseitige Limitierung durch die Rundlaufgenauigkeit der hydrostatisch gelagerten Werkstückspindel erreicht.

Der Median der Zentrierdauer beträgt  $44\ \text{s}$ , dieser unterbietet die gewünschte Dauer von  $3\ \text{Minuten}$  deutlich. Die hohen Zentriergeschwindigkeiten wurden durch die erste Modifikation der Reflexbildgeräte (vgl. Abschnitt 5.2.3) begünstigt, da daraufhin seltener eine ROI bestimmt werden musste.

Die Untersuchung, wie viel Prozent der Baugruppentypen des Gesamtsortiments zentriert werden konnten, gelang durch das Einführen von Klassengrenzen. Diese unterteilten die Häufigkeit von Problemen in Abhängigkeit des Baugruppentyps in  $5\ \text{Klassen}$  (vgl. Abb. 5.13) und belegen, dass mit der neuen Software  $85\ \text{bis}\ 88\%$  der Baugruppentypen zentrierbar sind. Dies bedeutet ein Plus gegenüber der Sensortechnik um  $26\ \text{bis}\ 30\%$ .

## 6.2 Ausblick Zentrieren von asphärischen Linsen

Für die neuste Generation des *FERMI*-Zentrierprogramms liegen noch keine repräsentativen Messergebnisse vor. Es wird jedoch vermutet, dass es mit der neuen Auswertung (und den besseren Kameras) möglich sein wird, in Zukunft bis zu  $95\%$  des Gesamtsortiments zentrieren zu können. Mit der neuen Auswertung (vgl. Abschnitt 5.4) ist es beispielsweise möglich, stehende Reflexe zu erkennen und softwaretechnisch zu unterdrücken.

Aus den bisherigen Beobachtungen und den Messergebnissen lassen sich auch Ideen und Konzepte für das Zentrieren von asphärischen Linsen gewinnen.

Die exakte Position einer asphärischen Linse lässt sich im Raum mit einem einzelnen Reflex nicht immer eindeutig bestimmen (vgl. Abschnitt 2.4). Es lässt sich jedoch abschätzen, wie groß die Unterschiede zwischen sphärischen und asphärischen Linsen in der Nähe der optischen Achse sind.

Als Beispiel dient eine Katalogasphäre<sup>2</sup> mit einem Grundradius  $r = 15\ \text{mm}$ . Wie in Abbildung 6.1 nicht maßstabsgetreu gezeigt wird, unterscheiden sich die Flächen der Sphäre (blau) und der Asphäre (rot) in Abhängigkeit der Höhe  $h$  rotationssymmetrisch um den Betrag  $z$ . Für eine Höhe  $h = 2\ \text{mm}$ , was etwa der halben Höhe des alten Kamerachips entspricht, ergibt sich  $z = 0,3\ \mu\text{m}$ . Dies lässt sich über die resultierende Winkelabweichung:  $\varphi = \beta - \alpha$  umrechnen in eine Ablage des Radienaufpunktes von ca.  $D = 8\ \mu\text{m}$ .

---

<sup>2</sup> Es handelt sich dabei um die Asphäre LINOS G31 7707 000 [27].

In einem Abstand von 2mm zur optischen Achse beträgt die Differenz einer möglichen Verkippung zwischen beiden Linsentypen also weniger als  $10\ \mu\text{m}$ . Gesetzt den Fall, dass sich die asphärischen Linsen ähnlich gut in die Fassungen einbringen lassen, so ist der Unterschied in den zu erwartenden Anfangsablagen vernachlässigbar. Daraus folgt, dass sich asphärische Linsen genauso gut wie Sphären auf der JDM 200 zentrieren lassen.

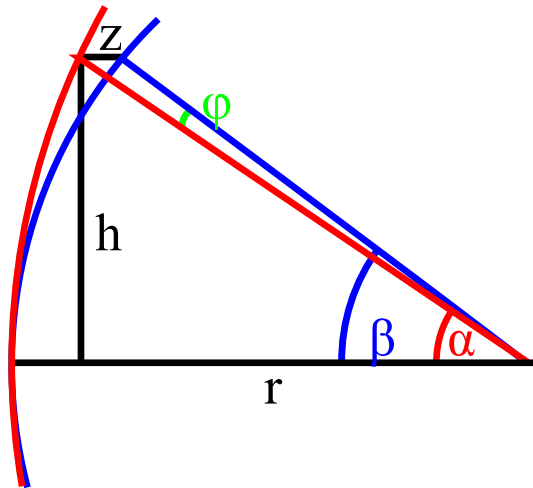


Abbildung 6.1: Nicht maßstabgetreue Darstellung der Differenz  $z$  zwischen einer Sphäre und einer Asphäre in der Höhe  $h$  und der daraus resultierenden Winkelabweichung  $\varphi = \beta - \alpha$ . Die Differenz lässt sich in eine Ablage  $D = r \sin \varphi$  umrechnen.

# Literaturverzeichnis

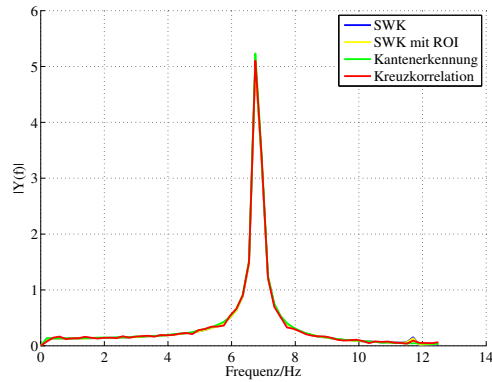
- [1] AROLD, Oliver ; YANG, Zheng ; ETTL, Svenja ; HÄUSLER, Gerd: How precise is "Flying Triangulation"? In: *DGaO-Proceedings*. 2010, S. A23
- [2] BROCKHAUS, F.A.: *dtv Brockhaus Lexikon Band 6*. Deutscher Taschenbuch Verlag, Wiesbaden, 1984
- [3] BÄHR, Jochen ; KRACKHARDT, Ulrich ; DIETRICH, Dennis: Abbildungsfreies Vermessen spiegelnder Freiformflächen. In: *Photonik* Bd. 5. 2007, S. 80–83
- [4] CANNY, John: A Computational Approach to Edge Detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Bd. PAMI-8. 1986, S. 679–698
- [5] COHEN-TANNOUJDI, Claude ; LALOË, Frank ; DIU, Bernard: *Quantum Mechanics: Volume 1*. John Wiley & Sons, 1977
- [6] D. MARR, E. H.: Theory of edge detection. In: *Proc. Royal Society* Bd. 270. 1980, S. 187–217
- [7] DOBRINSKI, Paul ; KRAKAU, Gunter ; VOGEL, Anselm: *Physik für Ingenieure*. 9. Auflage. B. G. Teubner Stuttgart, 1996
- [8] GCC-TEAM: *GCC, the GNU Compiler Collection*. <http://gcc.gnu.org/>, Abruf: 05.04.2012
- [9] GELSINGER, Pat: *Intel® Core™ i7: The fastest processor on the planet*. <http://download.intel.com/pressroom/kits/corei7/pdf/Gelsinger-2008-ww47-Corei7%20launch.pdf>, Abruf: 30.03.2012
- [10] GUNKEL, Claus ; SURE, Thomas: Mikroskopobjektiv-Fertigung: auf dem Weg von der Mikrometerskala zur Nanotechnologie. In: *Jahrbuch Optik und Feinmechanik*. 51. Jahrgang. Schiele und Schön, 2004, S. 43–70

- [11] GUYENOT, Volker ; SIEBENHAAR, Christian: Centering of optical components by using stick-slip effect. In: *SPIE Proceedings*. 1999 (3739)
- [12] HECHT, Eugene: *Optik*. 5., verbesserte Auflage. Oldenbourg Verlag, 2009
- [13] HERTL, Peter: *Theoretische Physik*. Springer, 2007
- [14] INTEL: *Intel<sup>®</sup> Compilers*. <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-compilers/>, Abruf: 05.04.2012
- [15] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, 2002
- [16] KAPPA OPTO-ELECTRONICS GMBH: *Monochrom Kamera CF 8/5 MX*. [http://www.kappa.de/download.php?media\\_id=00001633](http://www.kappa.de/download.php?media_id=00001633), Abruf: 05.04.2012
- [17] KNAUER, Markus ; KAMINSKI, Jürgen ; HÄUSLER, Gerd: Absolute Phasenmessende Deflektometrie. In: *DGaO-Proceedings*. 2004, S. A15
- [18] KNAUER, Markus C. ; RICHTER, Claus ; FABER, Christian ; HÄUSLER, Gerd: Phasenmessende Deflektometrie. In: *Jahrbuch 2009 Optik und Feinmechanik*. Schiele und Schön, 2009, S. 141–153
- [19] KNUTH, Donald: *The Art of Computer Programming*. Bd. 3: Sorting and Searching. Third. Addison-Wesley, 1997
- [20] LAMBDA RESEARCH CORPORATION: *OSLO Optics Reference*. [http://www.lambdaresearch.com/downloads/OSLO\\_EDU/OSLOOpticsReference.pdf](http://www.lambdaresearch.com/downloads/OSLO_EDU/OSLOOpticsReference.pdf). Version: 2011, Abruf: 05.04.2012
- [21] LEWIS, J. P.: Fast Template Matching. In: *Vision Interface*. 1995, S. 120–123
- [22] MARKENAMT (DPMA), Deutsches P.: Verfahren und Vorrichtung zum Zentrieren von Fassungen für optische Linsen. In: *Patentschriften*. 1996. – Patent DE 000019547296 A1
- [23] NAUMANN/SCHRÖDER: *Bauelemente der Optik*. 6., neubearbeitete Auflage von G. Schröder. Carl Hanser Verlag, 1992
- [24] NOLTING, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 2*. 8. Auflage. Springer, 2011
- [25] OTSU, Nobuyuki: A threshold selection method from grey level histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979, S. 62–66

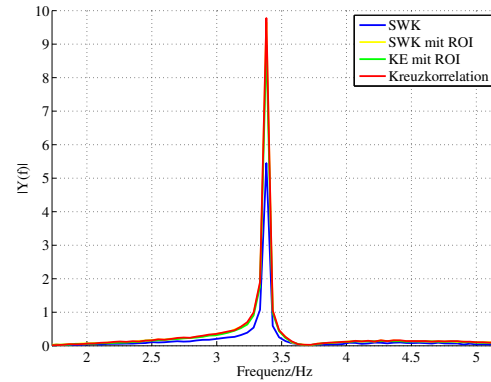
- [26] PETTER, Jürgen ; NICOLAUS, Ralf ; MAY, Thilo ; NOACK, André ; TSCHUDI, Theo: Ultra-hochpräzise, kontaktlose, absolute Abstandsmessung durch Mehrwellenlängeninterferometrie. In: *DGaO-Proceedings*. 2009, S. A3
- [27] QIOPTIQ: *The LINOS Catalog*. 2012/2013
- [28] RASHED, Roshdi: A Pioneer in Anaclastics. Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses. In: *Isis* Bd. 81. 1990, S. 464–491
- [29] SCHIFFNER, Sebastian: *Dokumentation des FERMI-Zentrierprogramms*. 2010
- [30] SCHIFFNER, Sebastian ; SURE, Thomas: Enhancement of alignment-technologies for lenses used in high-end optics. In: *DGaO-Proceedings*. 2009, S. A25
- [31] SCHIFFNER, Sebastian ; SURE, Thomas: Verbesserung der Zentriertechnologie für high-end Optiken durch in situ Messtechnik. In: *Jahrbuch 2010 Optik und Feinmechanik*. Schiele und Schön, 2010, S. 75–98
- [32] SESSNER, Rainer ; HÄUSLER, Gerth: Richtungscodierte Deflektometrie (RCD). In: *DGaO-Proceedings*. 2004, S. A16
- [33] SHANNON, Claude E.: A mathematical theory of communication, 1948 (Bell System Technical Journal), S. 623–656
- [34] SIEBENHAAR, C.: Präzisionsjustierungen durch Einleitung von mechanischen Impulsen. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelement*. VDI-Verlag, 2001
- [35] STEINBRECHER, Rainer: *Bildverarbeitung in der Praxis*. Oldenbourg, 1993
- [36] SURE, Thomas: FERMI, Automatisierte Höchstpräzisions Fertigungstechnologie für Mikrooptik-Baugruppen. In: *wt Werkstatttechnik online*. Springer VDI Verlag, 2006, S. 89–93
- [37] SURE, Thomas ; ET al: Automatisierte Höchstpräzisions-Fertigungstechnologie für Mikrooptik-Baugruppen - FERMI. In: *Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes, Förderkennzeichen: O2PD2451* (2007)
- [38] TELEDYNE DALSA: *Genie HM1400 / XDR*. <http://www.teledynedalsa.com/mv/products/cameradetail.aspx?partNumber=CR-GM0x-H140x>, Abruf: 05.04.2012

- [39] THE MATHWORKS, INC: *MATLAB Compiler Produktbeschreibung*. <http://www.mathworks.de/products/compiler/description1.html>, Abruf: 05.04.2012
- [40] THE MATHWORKS, INC: *MATLAB Documentation Image Processing Toolbox*. <http://www.mathworks.de/help/toolbox/images/ref/edge.html>, Abruf: 17.03.2012
- [41] TIZIANI, Hans J. ; HENTSCHEL, Rudiger ; BRAUNECKER, B.: *Advanced Optics Using Aspherical Elements*. SPIE Press, 2008 (SPIE Press Monograph PM 173)
- [42] VOET, Donald ; VOET, Judith G.: *Biochemie*. Wiley-VCH, 1994
- [43] WILHELM, Rainer ; COURTEVILLE, Alain ; GARCIA, Fabrice: A novel, low coherence fibre optic interferometer for position and thickness measurements with unattained accuracy. In: *Proceedings of SPIE* Bd. 6189, 2006

# Anhang



(a) FT-Szenario 1: Keiner der Algorithmen weist Nebenfrequenzen auf.



(b) FT-Szenario 2: Der Peak der Schwellwertkonvertierung (SWK) ist aufgrund der geringeren Dynamik niedriger.

Abbildung 1: Fouriertransformationen der Szenarien 1 und 2. Die Höhe der Peaks ist in Abschnitt 4.3 in Tabelle 4.2 auf Seite 57 angegeben.

Problem	Auftreten	Lösungsvorschläge
Allgemein	Erste Baugruppe einer Serie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falls die Reflexbilder unscharf sind: Überprüfen, ob die richtige Linsendatei auf dem CNC-PC geladen wurde.</li> <li>2. Kontrollieren, ob die richtige Linsendatei auf dem Mess-PC geladen wurde.</li> </ol>
	Erstrüsten einer Baugruppe	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hinweise für „Erste Baugruppe einer Serie“ beachten.</li> <li>2. Schwellwert und Einsatz der ROI überprüfen.</li> </ol>
Zentrierdauer	Gesamte Serie einer Baugruppe	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Schwellwert in Linsendatei kontrollieren.</li> <li>2. Einsatz der ROI aktivieren.</li> <li>3. Schlagstärke modifizieren.</li> </ol>
	Einzelne Baugruppe einer Serie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baugruppe auf Verschmutzungen untersuchen.</li> <li>2. Kontrollieren, ob die Linse fest eingespannt ist.</li> </ol>
Schlagproblem	Gesamte Serie einer Baugruppe	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Schlagrichtung des Kalottenhammers ändern.</li> <li>2. Schwellwert und ROI überprüfen.</li> <li>3. Vorherige Fertigungsschritte kontrollieren.</li> </ol>
	Einzelne Baugruppe, oder erste Baugruppe einer Serie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vorausrichtung des Futters kontrollieren: Ein erfahrener Bediener kann das Futter manuell auf eine Ablage kleiner 50 <math>\mu\text{m}</math> ausrichten.</li> </ol>

Tabelle 1: Lösungsvorschläge für Probleme, die während des Drehprozesses der JDM 200 beobachtet wurden. Weitere Hinweise sind in [29] aufgeführt.