

# **Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

**Dipl.-Ing. Rostyslav Mastylo**

geboren am 02.12.1972 in Drogobytsch/Ukraine

Gutachter :      Herr Prof. Dr.-Ing. habil. G. Jäger, Ilmenau  
                      Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. G. Linß, TU Ilmenau  
                      Herr Prof. Dr. U. Bahrs, Berlin

eingereicht:     26. Mai 2011  
verteidigt:       13. Januar 2012

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßmeß- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Herzlich danken möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger und Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Grünwald. Sie ermöglichten mir die Bearbeitung des Themas und gaben mir wertvolle Anregungen. Sie haben ein optimales Umfeld für die Entwicklung des Systems und die Forschung geschaffen. Die Erstellung der Dissertation wurde vom Prof. Jäger hervorragend betreut.

Für die wertvolle Beratung und Ideen bei der Lösung vieler Probleme, ständige Unterstützung und für die Hilfe bei der Korrektur des Manuskriptes zu dieser Arbeit möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske meinen besonderen herzlichen Dank aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Dr.-Ing. Uwe Gerhardt und weiteren Kollegen des Institutes PMS sowie Herrn Dr.-Ing. Walter Schott und Herrn Dr.-Ing. Denys Dontsov von der SIOS Messtechnik GmbH danke ich ebenfalls für umfangreiche technische Unterstützungen. In zahlreichen wissenschaftlichen Gesprächen und Diskussionen wurden mir immer neue Ideen bei der Lösung der Probleme meiner Forschung vermittelt.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Stadnyk Bohdan Ivanovytsch, Leiter des Instituts Computertechnologien, Automatisierung und Metrologie der Nationalen Universität "L'vivska Politechnika" (Lviv, Ukraine), dessen Unterstützung ich immer hatte.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Olha für ihre Unterstützung.

Ilmenau, Mai 2011

## Inhalt

Inhalt .....	2
Abkürzungen und Formelzeichen.....	4
1. Einleitung und Überblick .....	5
2. Stand der Technik .....	9
2.1. Taktile Antastung .....	9
2.1.1. Tastschnittmessmethode.....	9
2.1.2. Atomkraftmikroskopie.....	11
2.2. Berührungslose Antastung.....	12
2.2.1. Konfokale Mikroskopie.....	12
2.2.2. Interferenzmikroskopie.....	14
2.3. Kapitelzusammenfassung.....	15
3. Theoretische Grundlagen der Fokuspunktdetektion .....	17
3.1. Etablierte Verfahren bei der Fokuspunktdetektion .....	17
3.1.1. Astigmatische Messmethode .....	17
3.1.2. Methode der Foucaultschen Schneide .....	20
3.2. Modellierung des optischen Systems.....	22
3.2.1. Berechnung Strahlenverlaufes des astigmatischen Fokusedetektionssystems ...	23
3.2.2. Berechnung der Intensitätsverteilung auf der Quadrantendiode.....	28
3.2.3. Das Fokusfehlersignal.....	30
3.3. Grundlagen der Strahlgeometrie bei der Antastung einer Oberfläche .....	33
3.4. Kapitelzusammenfassung .....	35
4. Aufbau des Basissensors.....	36
4.1. Der Prototyp des Fokussensors auf Basis einer CD-Antasteinheit.....	36
4.2. Hologram-Laser-Unit: Arbeitsweise und Funktionen .....	37
4.3. Aufbau des Fokussensors auf Basis des Hologram-Laser-Units.....	41
4.4. Elektronische Schaltung für den Fokussensor .....	43
4.5. Kombination des Fokussensors mit einem Kameramikroskop .....	45
4.5.1. Entwicklung und Aufbau eines Kameramikroskops .....	45
4.5.2. Realisierung des Kameramikroskops.....	46
4.6. Kapitelzusammenfassung.....	52
5. Messtechnische Eigenschaften des Basissensors .....	53
5.1. Integration des Basissensors in die Nanopositionier- und Nanomessmaschine.....	53

---

5.1.1.	Die Nanopositionier- und Nanomessmaschine.....	53
5.1.2.	Einbau, Messprinzip und Messmodi des Fokussensors in der NPM-Maschine .....	55
5.2.	Kalibrierung der Kennlinie des Fokussensors.....	58
5.3.	Auflösung des Fokussensors.....	63
5.4.	Messungen an kalibrierten Stufenhöhennormalen der PTB .....	67
5.5.	Temperaturstabilität des Fokussensors .....	71
5.6.	Einfluss des Messwinkels und der Oberflächenbeschaffenheit .....	75
5.7.	Kapitelzusammenfassung.....	78
6.	Taktile Erweiterungen des Fokussensors .....	79
6.1.	Fokus-Stylus-Sensor auf der Basis des Fokussensors.....	79
6.1.1.	Messprinzip und Konstruktion .....	79
6.1.2.	Messtechnische Eigenschaften des Tastschnittsensors.....	81
6.1.3.	Auswirkung des Tastschnittsensors auf die Messoberfläche.....	84
6.2.	Fokus-AFM-Sensor auf der Basis des Fokussensors.....	86
6.2.1.	Messprinzip und Konstruktion .....	86
6.2.2.	Messtechnische Eigenschaften des AFM-Sensors .....	90
6.2.3.	Ortsauflösungsvergleich des Fokussensors und fokussensorbasierten Stylus- und AFM-Sensoren .....	92
6.3.	Kapitelzusammenfassung.....	95
7.	Anwendungsbeispiele des Fokussensors zur Oberflächenmessung.....	96
7.1.	Verwendung eines LWD-Objektivs zur Messungen mit Fokussensor.....	96
7.2.	Messung von Stufenhöhen im Millimeterbereich .....	97
7.3.	Einsatz des Fokussensors zur Tröpfchenmessung .....	100
7.4.	Pitchmessung mit Fokussensor .....	102
7.5.	Anwendung des Fokussensors zur Kalibrierung der Z-Spiegels der NPM-Maschine .....	103
7.6.	Weitere Einsatzmöglichkeiten des Fokussensors .....	106
7.6.1.	Messungen an optischen Teilen .....	107
7.6.2.	Messung von mechanischen Teilen .....	109
7.7.	Kapitelzusammenfassung.....	112
8.	Zusammenfassung .....	113
9.	Literaturverzeichnis .....	115

## Abkürzungen und Formelzeichen

<i>AD-Wandler</i>	Analog-Digital Wandler
<i>AFM</i>	Atomic Force Microscope
<i>APC</i>	Automatic Power Control
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device (ladungsgekoppeltes Speicherelement)
<i>CD</i>	Compact Disk
<i>DMS</i>	Dehnungsmessstreifen
<i>DSP</i>	Digitaler Signalprozessor
<i>DVD</i>	Digital Versatile Disc
<i>f</i>	Brennweite einer Linse
<i>FFS</i>	Fokusfehlersignal
<i>HFM</i>	Hochfrequenzmodulation
<i>HH</i>	Brennebene
<i>HOE</i>	Holografisches Optisches Element
<i>k</i>	Erweiterungsfaktor
$\lambda$	Wellenlänge
<i>LWD</i>	Long Working Distance
<i>LWL</i>	Lichtwellenleiter
<i>n</i>	Brechungsindex
<i>NA</i>	Numerische Apertur
<i>NPM-Maschine</i>	Nanopositionier- und Nanomessmaschine
<i>r</i>	Radius
<i>RIN</i>	Relative Intensity Noise
<i>SUM</i>	Summsignal
<i>U</i>	Erweiterte Messunsicherheit
<i>W</i>	Strahltaile
<i>z</i>	Entfernung zu einer Strahltaile

---

# 1. Einleitung und Überblick

Mit der raschen Entwicklung der Nanotechnologie in den letzten 10-15 Jahren ist zunehmend der Bedarf an Messgeräten und Messsensoren zur Erfassung und Messung von sehr kleinen Strukturen bis in den Subnanometerbereich entstanden. Hierbei handelt es sich um sehr anspruchsvolle Messaufgaben aus verschiedenen Branchen der Industrie, wie der Halbleitertechnik, Präzisionsoptik, Mikromechanik, MEMS-Technologien, Lithographie, Molekularbiologie, Qualitätsprüfung usw. Als wesentlichen Meilenstein in der Präzisionsmesstechnik kann man in diesem Zusammenhang die Entwicklung von Mehrkoordinatenmessmaschinen, die im Millimeterbereich mit der Subnanometerauflösung arbeiten, bezeichnen. Diese, als Nanopositionier- und Nanomessmaschinen bezeichneten hochpräzisen und komplexen Messgeräte, öffnen neue Grenzen in solchen Gebieten der Präzisionsmesstechnik, wie z.B. der Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie, der scannenden und Weißlichtinterferometrie und der konfokalen Mikroskopie.

Um heutigen Anforderungen in der Präzisionsmesstechnik standzuhalten, besteht nun eine weitere Aufgabe darin, eine derartige Messmaschine zu vervollständigen und sie in ein komplettes Meßsystem umzuwandeln. Zum Erreichen dieses Ziels müssen unterschiedlichste Messsensoren höchster Genauigkeit entwickelt bzw. angepasst und in die Messmaschine integriert werden.

Beste Voraussetzungen wurden hier durch die Entwicklung einer Nanomessmaschine höchster Genauigkeit an unserem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau geschaffen. Diese Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine) arbeitet abbefehlerfrei mit einer Auflösung von 0,1 nm in einem Messvolumen von 25 mm x 25 mm x 5 mm.

Ein Antastsensor muss für die Anwendungen in der NPM-Maschine ganz spezifischen Anforderungen genügen. Hervorgerufen durch die Tatsache, dass die Nanomessmaschine schon eine Mess- und Positionierbewegung entlang der Z-Achse beinhaltet, braucht man für die Antastung der Prüflinge einen Sensor, welcher als so genannter Nullindikator arbeiten muss. Dabei wird während des Messvorgangs nicht der Sensor über dem Messobjekt bewegt, sondern das Messobjekt selbst, wobei der Sensor fest im Raum bleibt. Die Messsignale dieses Sensors müssen zur Steuerung der Nanomessmaschine und auch zur Messwertbildung genutzt werden.

---

Zur Antastung der Prüflinge in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine kommen verschiedenste Nanosensoren in Frage. Neben der mechanischen Antastung, beispielsweise mit Rasterkraft- oder taktilen Sensoren weist die optische Antastung einige Vorteile, wie z. B. Berührungslosigkeit und hohe Dynamik auf. Aus diesem Grund besteht das Ziel dieser Arbeit darin, ein Nanosensorsystem, welches genannte Antastprinzipien vereint, zu entwickeln und in die NPM-Maschine zu integrieren.

Die Idee dabei besteht darin, einen universellen optischen Basissensor für dieses Nanosensorsystem zu entwickeln, welcher als selbständiger Antastsensor und auch als ein Messweggeber bei taktilen Nanosensoren einsetzbar ist. Um die Vorteile eines optischen Messsystems auszunutzen und die zu messende Struktur und den Messvorgang zu visualisieren, sollte dieser Sensor mit einem Visualisierungssystem erweitert werden, welcher auch für andere Messzwecke genutzt werden kann, bzw. für andere optische Messmethoden, wie zum Beispiel der Weißlichtinterferometrie, zur Verfügung steht.

So wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuartiger optischer Fokussensor als Basissensor für das Nanosensorsystem entwickelt. Das Funktionsprinzip dieses Sensors beruht auf die Fokussmessmethode, die für die DVD- bzw. CD-Player-Technik entwickelt wurde. Dabei wird die Fokusslinse mit Hilfe einer Tauchspule ständig nachgeregelt, so dass der Laserstrahl immer auf die Oberfläche der CD fokussiert ist (so genannte Autofokussierung). Auf dieser Weise funktionieren auch die meisten auf dem Markt der Messtechnik befindlichen Autofokussensoren. Bei diesen Sensoren wird die Oberfläche des Messobjekts anhand der Bewegung der Objektivlinse ausgewertet, welche mit Hilfe verschiedener Längenmesssysteme registriert wird. Hier handelt es sich um vergleichbar preiswerte Messsensoren mit den Genauigkeiten im Submikrometerbereich, welche hauptsächlich normale Antastköpfe (sogenannte Pick-Up Units) aus der CD / DVD - Player als Hauptbausteine verwenden. Entsprechend sind Sensoren dieser Bauart für die hochgenauen und hochdynamischen Anwendungen in den Nanomessmaschinen nicht geeignet.

Deshalb wurde der herkömmliche Autofokussensor entsprechend Anforderungen der NPM-Maschine in einen Fokussensor mit Nullindikatorfunktionsprinzip umgewandelt, indem man auf die Tauchspule verzichtet und die Fokusslinse bzw. Objektiv fest mit dem Sensor verbindet. Der Messbereich des Sensors wurde damit auf einige Mikrometer begrenzt, dafür aber in Verbindung mit einigen besonderen konstruktiven Lösungen die Auflösung in den Nanometerbereich verschoben.

---

Die Anbindung beider mechanischen Antastprinzipien in das Nanosensorsystem wird jeweils mittels des entwickelten Fokussensors (Basissensors) erreicht. Dabei wird die Auslenkung der antastenden Messspitze (Cantilever bzw. Stylus) direkt berührungslos mit fokussiertem Laserstrahl des Fokussensors aufgenommen. Dieses Prinzip bringt einige Vorteile gegenüber der heutzutage gebräuchlichen Detektionsverfahren, wie z.B. Lichtzeigerprinzip bei Rasterkraftsensoren oder induktive Weggeber bei taktilen Sensoren. Beim Rasterkraftsensor können höhere Empfindlichkeit und Stabilität erreicht werden, bei taktilen Sensor wird der Bogenfehler durch direkte fluchtende Antastung bei einer konstanten Lage des Stylus (Nullindikatorprinzip) eliminiert.

Der große Vorteil des entwickelten Nanosensorsystems besteht also in dessen Modularität und Vielseitigkeit. Auf der Grundlage eines Basissensors werden optische und mechanische Antastmethoden und somit unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen Messobjekt und Sensor vereint, was bei der Aufgabenvielfalt moderner Oberflächenmesstechnik im Nanometer- und Subnanometerbereich unverzichtbar ist, um eine gute Verlässlichkeit der Messergebnisse zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit legt die Entwicklung und umfassende Untersuchungen des Nanosensorsystems in Kombination mit einem Digitalkameramikroskop dar und stellt die erzielten Messergebnisse vor. Sie gliedert sich wie folgt:

Kapitel 2 befasst sich mit derzeit etablierten optischen Messverfahren zur nanoskaligen Oberflächenantastung. Die Vor- und Nachteile jedes Verfahrens werden im Einzelnen erläutert.

Im Kapitel 3 wird das Funktionsprinzip der Fokuspunkt detektion auf dem Beispiel zweier wichtigsten Methoden (astigmatischer und der Foucaultschen Schneide) gezeigt. Die Erläuterungen aus diesem Kapitel sind insgesamt von großer Bedeutung für die gesamte Arbeit, da hier das grundlegende Messprinzip des Basissensors (Fokussensors) erklärt ist.

Den Schwerpunkt des Kapitels 4 bildet die Erläuterung des Aufbaus des Fokussensors. Besonders detailliert wird der Hauptbaustein, die so genannte Hologram-Laser-Unit vorgestellt. Ferner ist hier die Kombination des Fokussensors mit einem Kameramikroskop detailliert behandelt.

Kapitel 5 bildet der Schwerpunkt der Gesamtarbeit. Hier sind wichtige messtechnische Eigenschaften des Fokussensors als Basissensors erläutert. Im Kapitel werden u.a. der Aufbau und das Funktionsprinzip der NPM-Maschine vorgestellt. Anschließend werden mögliche Messmodi und Messalgorithmen des aufgebauten Messsystems diskutiert.

Im Kapitel 6 werden die taktilen Sensoren des aufgebauten Nanosensorsystems vorgestellt: der Fokus-Stylus-Sensor und der Fokus-AFM-Sensor. Hierbei werden konstruktive und messtechnische Eigenschaften dieser Sensoren detailliert behandelt und verglichen.

Kapitel 7 stellt einige spezifische Anwendungsbeispiele und mögliche Einsatzbereiche des Fokussensors als berührungslosen Basissensor des entwickelten Nanosensorsystems vor. Hierbei werden repräsentative Beispiele aus den Messungen an optischen, mechanischen und flüssigen Objekten angeführt.

Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem Ausblick.

## 2. Stand der Technik

Um die messtechnischen Anforderungen an das Nanosensorsystem zu formulieren bzw. die dazugehörigen Nanosensoren im Zusammenhang mit etablierten Messmethoden genauer einstufen zu können, soll zunächst ein Überblick über verschiedene Messmethoden gegeben werden. Allerdings werden hier nur Messmethoden betrachtet, welche in Bezug auf Auflösung, Messunsicherheit, Einsatzbereich und dynamischen Verhalten auch in einer Nanomessmaschine eingesetzt werden könnten.

Die Einteilung dabei wird zwischen Sensoren mit taktiler und optischer Antastung unterschieden.

### 2.1. Taktile Antastung

Die zwei Hauptmessmethoden, die man unter die taktile Antastung einordnen kann, sind die Tastschnitt- und Rastersondenmikroskop-Messmethode (Atomic Force Microscope, AFM bzw. Scanning Probe Microscope, SPM). Wobei man nur bedingt das AFM zu den taktilen Messmethoden einstufen kann, da nicht alle Messmodi ein "wirklichen" Kontakt zur Messoberfläche vorsehen. Aber das Grundmessprinzip und die Messgegebenheiten gleichen viel mehr der taktilen als der berührungslosen (hauptsächlich optischen) Antastung.

#### 2.1.1. Tastschnittmessmethode

Bei den Tastschnittmessverfahren handelt es sich um eine rein mechanische Antastung mit einer direkten Berührung der Objekte. Die Tastschnittsysteme werden für normgerechte Messungen von Oberflächenrauheit und zur Ermittlung von Werkstück-Konturen eingesetzt und werden noch immer als Standardverfahren bezeichnet. Mit einer Tastspitze fährt man auf der Oberfläche eines Messobjektes entlang. Dabei wird das Profil punktwise abgetastet und mit Hilfe von unterschiedlichsten Methoden (optisch, induktiv, kapazitiv usw.) im Tastkopf (Abb. 2.1.) in elektrische Signale umgewandelt, welche weiter zur Ermittlung verschiedener Oberflächenkenngrößen dienen.

Die Geometrie der Tastspitze (Abb. 2.2.) hat großen Einfluss auf die ermittelten Kennwerte. Sie wirkt z. B. bei Oberflächen mit sehr kleinen Strukturen wie ein Tiefpassfilter und kann somit Oberflächenstrukturen nicht vollständig erfassen. Die Tastspitze ist deshalb ebenso wie das gesamte Messverfahren genormt und hat eine genau definierte geometrische Form mit Nennmaßen und Nennmesskraft.

Am häufigsten wird ein Tastspitzenradius von  $5\ \mu\text{m}$  und ein Öffnungswinkel der Spitze von  $60^\circ$  verwendet. Genormt sind jedoch auch Radien von  $2$  und  $10\ \mu\text{m}$  und Winkel von  $90^\circ$ .

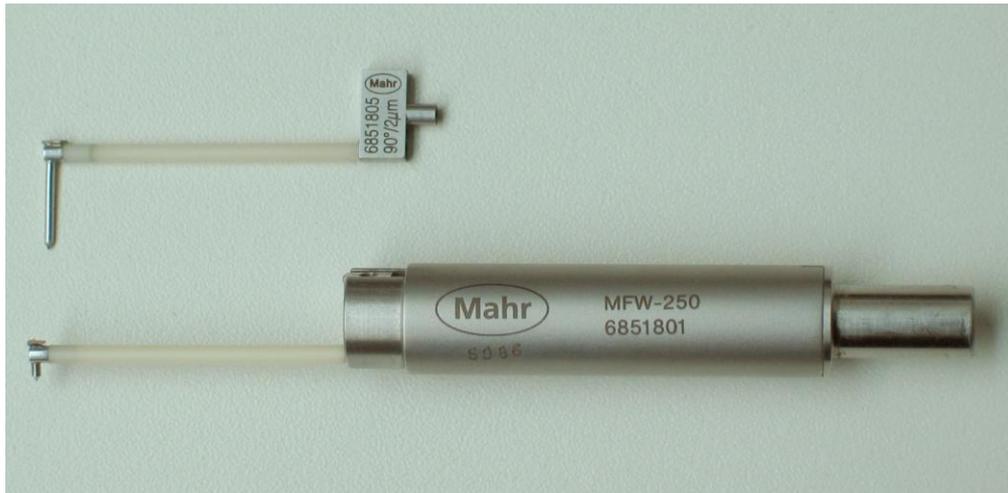


Abbildung 2.1: Ein Tastkopf und ein Tastarm der Firma Mahr GmbH

Vorteile des Tastschnittmessverfahrens liegen vor allem in dessen großer Robustheit und Zuverlässigkeit. Außerdem zeichnet sich diese Messmethode durch hohe Flexibilität und Reproduzierbarkeit aus. Die Messauflösung (vertikal) hängt von der Auswertungsmethode der Bewegung der Tastspitze ab, und kann gegebenenfalls einige Nanometer betragen.

Zu den Nachteilen der Tastschnittmessmethode zählen begrenzte Messgeschwindigkeiten aufgrund des mechanischen Kontaktes (sie betragen max. 50 bis 500  $\mu\text{m/s}$  oberflächenabhängig), erhöhte Messunsicherheiten aufgrund der erforderlichen Antastkraft bei kritischen Messaufgaben (Nadelmessung, Messung in kleinen Bohrungen usw.), eventuelle Verformung oder Beschädigung empfindlicher Oberflächen (bei weichen Materialien/Beschichtungen insbesondere auf optischen Flächen). Außerdem entsteht durch die beim Standardverfahren üblichen Verschiebungen der Tastspitze in Z-Richtung ein sogenannter

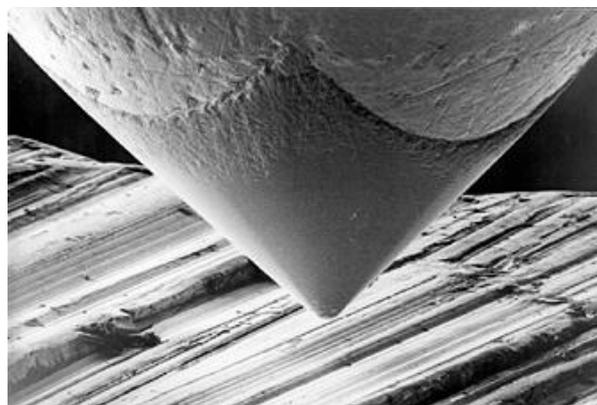


Abbildung 2.2: Diamant Tastspitze aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop [1]

Bogenfehler, da die Querschnittsform des Spitzenabschnitts der Tastnadel, der mit dem Werkstück in Kontakt kommt, in Wirklichkeit kein Punkt ist, sondern eine bogenförmige Gestalt endlicher Größe repräsentiert.

Ferner stellen die Abnutzung der Tastspitze und begrenzte laterale Auflösung, bedingt durch die Größe des Tastspitzenradius, weitere Nachteile des Verfahrens dar.

### 2.1.2. Atomkraftmikroskopie

Die Atomkraftmikroskopie (Atomic Force Microscopy - AFM) ist eine hochauflösende Mikroskopiertechnik, die die Charakterisierung von Festkörperoberflächen, aber auch von biologischen und medizinischen Materialien bis in den subatomaren Bereich hinein, gestattet.

Dabei wird eine an einer Blattfeder - dem so genannten Cantilever (Abb. 2.3 (a)) - befestigte Nadel (Sonde) zeilenweise über die Oberfläche geführt. Hierbei wird die Spitze (Abb. 2.3 (b)) des Cantilevers mittels einer geeigneten Positioniereinrichtung so dicht an die Oberfläche des Testobjektes herangeführt, bis eine Kraftwirkung (einerseits die anziehenden van der Waals

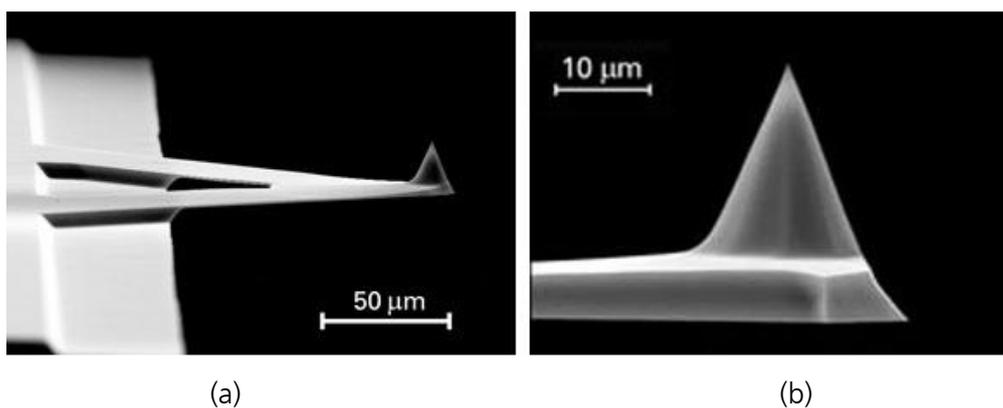


Abbildung 2.3: Cantilever (a) und Tastspitze des Cantilevers (b) [2]

Kräfte und andererseits die abstoßenden Coulomb'schen Wechselwirkungskräfte) zwischen Sonde und Oberfläche auftritt, welche sich in einer detektierbaren Durchbiegung des Cantilevers äußert. Die Durchbiegung ist ein Maß für die Topographie der Oberfläche und kann mit kapazitiven oder meistens optischen Sensoren hochauflösend gemessen werden. Je nach Arbeitsmodus berührt die Tastspitze hierbei die Oberfläche oder befindet sich im Abstand von wenigen Nanometern darüber.

Der Radius der Spitzen beträgt dabei typischerweise 1 – 20 nm, was je nach Rauheit der Messobjekt Oberfläche laterale Auflösungen von 1 – 10 nm erlaubt, die Höhenunterschiede können bis zu 0,1 nm (1 Å) und sogar darunter aufgelöst werden.

Zu den Vorteilen des AFM zählt man vor allem die hervorragende laterale und vertikale Auflösung, die Bilder der Testoberfläche können bis zu atomarer (sogar subatomarer) Auflösung

aufgenommen werden. Ein weiterer Vorteil besteht hauptsächlich für Anwendungen aus der Biologie: biologische Proben können in Flüssigkeiten mikroskopiert werden, also in einer naturähnlichen Umgebung. Außerdem kann man bei der AFM-Messmethode als vorteilhaft die Unabhängigkeit von der Phase und Reflektion der Messoberfläche hervorheben. Schließlich ist es mit dem AFM auch möglich, die Oberfläche zu manipulieren, sogar bis in die Größenordnung der Bewegung einzelner Atome.

Nachteile dieser Messmethode sind vor allem relativ lange Messzeiten. Die maximale Scangeschwindigkeiten betragen 10 bis 50  $\mu\text{m/s}$  (topografieabhängig), hervorgerufen durch die mechanischen Eigenschaften des Cantilevers. Auch hier, allerdings nicht so stark wie bei dem Tastschnittverfahren, können unter Umständen weiche, feine und empfindliche Materialien durch die Wechselwirkung mit der Cantileverspitze beschädigt und sogar zerstört werden. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Abnutzung und Zerstörbarkeit der Cantileverspitze infolge von Oberflächendefekten des Prüflings.

## 2.2. Berührungslose Antastung

Die gängigen berührungslosen Messverfahren, welche für Messungen im Nanometerbereich verwendet werden können, kann man in zwei Gruppen aufteilen: konfokale Mikroskopie und Interferenzmikroskopie.

### 2.2.1. Konfokale Mikroskopie

In Abbildung 2.4. ist das Prinzip eines konfokalen Mikroskops dargestellt. Ein Objektiv fokussiert einen aufgeweiteten Strahl (z.B. Laserstrahl) in dessen Brennebene punktförmig auf das Messobjekt. Das von dem Messobjekt reflektierte Licht wird vom Objektiv gesammelt und über einen Strahlteiler in eine vor dem Detektor platzierte Lochblende gerichtet. Die Lochblende ist hier für die konfokale Eigenschaft des Systems verantwortlich. Informationen, welche nicht aus der Fokusebene des Mikroskopobjektivs stammen werden durch diese Lochblende ausgeblendet. Licht aus der Fokusebene wird auf die Detektor-Lochblende fokussiert und somit vom Detektor (meist ein Photomultiplier oder ein CCD-Chip) registriert. Dieses Vermögen, Informationen über und unter der Fokusebene auszublenden ermöglicht dem konfokalen Mikroskop eine Tiefenabgrenzung und somit eine optische Tomographie.

Die üblichste Verwendungsform eines konfokalen Mikroskops ist das Laser-Rastermikroskop (oder CLSM für confocal laser scanning microscope). Beim Laser-Rastermikroskop wird ein Bild aus einer Menge von Daten zusammengesetzt, wobei das Messobjekt Punkt für Punkt und Zeile für Zeile sequentiell abgetastet wird. Der so erzeugte optische Schnitt ist ein kontrastreiches in X, Y und Z hochaufgelöstes Abbild des Messobjekts. Indem man die Fokusebene schrittweise (Z-

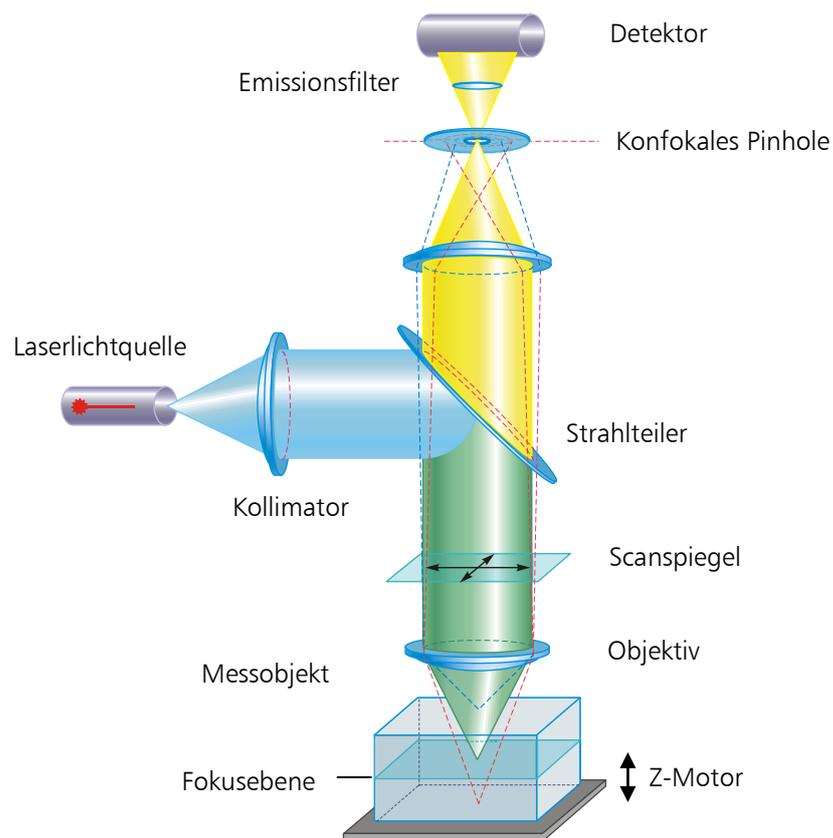


Abbildung 2.4: Prinzip eines konfokalen Laser-Rastermikroskops

Richtung) verschiebt, lassen sich einzelne Bilder (optische Schnitte) zu einem Bildstapel zusammensetzen und anschließend digital verarbeiten, was die Generation eines echten 3D-Bildes des Messobjekts ermöglicht.

Die Auflösung des konfokalen Rastermikroskops hängt vom verwendeten Mikroskopobjektiv und der Lichtquelle ab und kann bis zu 1 nm in Z-Richtung und ca.  $0,5 \mu\text{m}$  lateral erreicht werden.

Die Vorteile der konfokalen Rastermikroskopie liegen, wie bei allen optischen Messmethoden, vor allem in der Berührunglosigkeit der Antastung, d.h. kein Verschleiß und keine Beschädigung des Messobjekts. Es besteht die Möglichkeit der Oberflächenbeobachtung durch das Objektiv. Dadurch kann die Messfläche genau positioniert werden. Außerdem sind ein gutes Höhenauflösungsvermögen (bei großen NA) und hohe Scangeschwindigkeiten (da berührungslos) vorteilhafte Eigenschaften.

Zu den Nachteilen zählen zum einen die laterale Auflösung (begrenzt durch NA des Objektivs) und die Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften der Messoberfläche (Phase, Reflektivität), zum anderen lange Messzeiten bedingt durch punktförmige Antastung in X/Y Richtung und die Notwendigkeit von mehreren Schnittebenen in Z-Richtung. Allerdings werden bei einigen

Geräten die Messzeiten durch parallele Erfassung einzelner Messpunkte, z.B. durch den Einsatz einer Mikrolinsenscheibe oder Nipkowscheibe deutlich verkürzt.

### 2.2.2. Interferenzmikroskopie

Ein weiteres berührungsloses Messverfahren für Topographiemessungen stellt die Interferenzmikroskopie dar. Hier werden verschiedene Interferometertypen eingesetzt: Fizeau-Interferometer, Michelson-Interferenzmikroskop, Mirau-Interferenzmikroskop oder Linnik-Interferenzmikroskop. Dabei wird die Interferenzerscheinung zur flächenhaften Bestimmung der Topographie genutzt.

Eine detaillierte Beschreibung aller derartigen Systeme ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich, es sei deshalb auf [3, 4] verwiesen. Das Prinzip und die Leistungsfähigkeit der Interferenzmikroskopie wird am Beispiel eines Weißlichtinterferenzmikroskops, als eines des leistungsstärksten im Gebiet der Nanotopographievermessung, vorgestellt.

Die Weißlichtinterferenzmikroskopie ist ein abbildendes Zwei-Strahl-Interferenz-Messverfahren, bei dem das Licht einer spektral breitbandigen Quelle verwendet wird (Abb. 2.5). Das von der

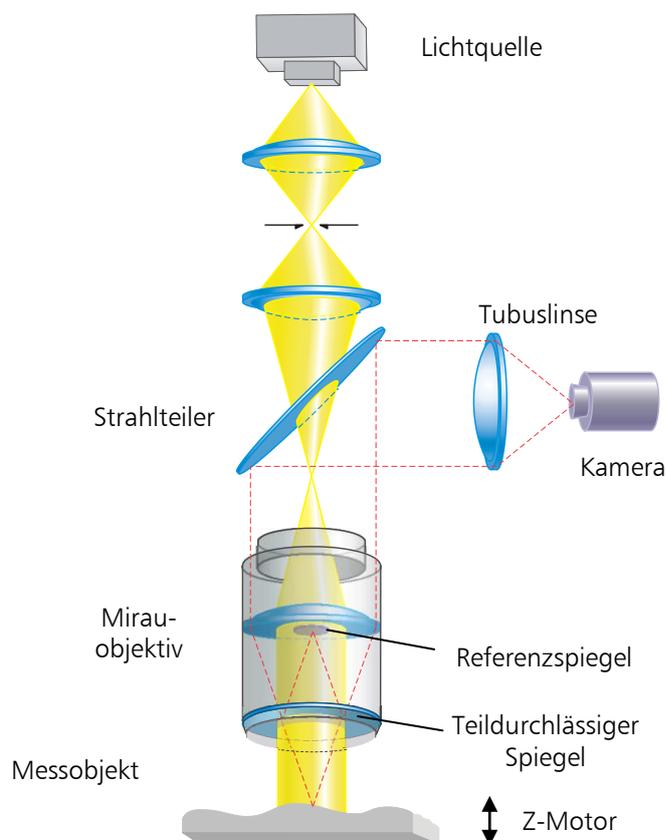


Abbildung 2.5: Prinzip eines Weißlichtinterferenzmikroskops

Weißlicht-Quelle ausgesendete Licht wird über verschiedene Abbildungsoptiken gebündelt und durchläuft das Interferometer-Objektiv (Mirau Objektiv). Das reflektierte Licht wird über einen Strahlteiler auf eine CCD-Kamera gelenkt. Dabei erfolgt im Mirauobjektiv mittels einer Strahlteilerplatte die Aufspaltung in Objekt- und Referenz-Strahlenbündel, die an der Mess-Oberfläche bzw. am ebenen Referenzspiegel reflektiert werden. Die Interferenzerscheinungen werden mit Hilfe einer CCD-Kamera erfasst.

Bei der Messung wird das Messobjekt bzw. das Mirauobjektiv in feinen Schritten in Z-Richtung verfahren. Dabei treten Weißlicht-Interferenzen auf, die sich über das Objekt bewegen. Es wird ein Bilderstapel aufgenommen, der für jeden einzelnen Objektpunkt parallel aber voneinander unabhängig ausgewertet wird.

Das flächenhafte Messprinzip stellt den größten Vorteil dieser Messmethode dar. Es sind sehr kurze Messzeiten möglich. Nach [5] wird bei einem hochauflösenden (50x) Mirauobjektiv und einer 1 Mpixel CCD-Kamera die Messfläche von ca.  $0,4 \mu\text{m} \times 0,4 \mu\text{m}$  in ca. 10 bis 20 Sekunden erfasst (1024 x 1024 Messpunkte). Dabei werden auch Spitzenwerte in der Höhenauflösung von  $< 0,1 \text{ nm}$  erreicht. Größere Messflächen lassen sich mittels Stitching erfassen. Weitere Vorteile sind denen der konfokalen Mikroskopie vergleichbar.

Nachteilig bei dem Weißlichtinterferenzmikroskop ist (genau wie bei anderen optischen Messmethoden) die begrenzte laterale Auflösung, welche durch die Eigenschaften des Objektivs begrenzt ist. Beim oben genannten Objektiv beträgt sie ca.  $0,4 \mu\text{m}$ . Problematisch ist auch die Empfindlichkeit bezüglich der optischen (Reflektivität) und topografischen (z.B. Flanken und Kanten) Eigenschaften der Messoberfläche.

Außerdem nutzen die meisten herkömmlichen Weißlichtinterferenzsysteme für die Z-Bewegung piezoelektrische Antriebe, welche ein begrenztes Verfahrbereich von nur einigen  $100 \mu\text{m}$  erlauben und zusätzliche Wegsensoren benötigen.

### 2.3. Kapitelzusammenfassung

Wie der Überblick des Standes der Technik zeigt, gibt es viele Möglichkeiten, die Oberflächentopografien eines Objektes nanometergenau zu erfassen. Tastschnittmessgeräte zeichnen sich durch ihre Einfachheit im Verbund mit der Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit aus. Atomkraftmikroskope sind in der Lage, die Strukturen vertikal und lateral bis in subatomare Größenordnungen aufzulösen. Optische Atastysteme wie Konfokale- und Interferenzmikroskope sind sehr schnell, hoch auflösend und berührungslos.

Die Motivation für diese Arbeit ist es, ein Nanosensorsystem für den Einsatz in der Oberflächenvermessung zu entwickeln, welcher in sich optische und taktile Messmethoden vereint und metrologisch mit den vorgestellten etablierten Messgeräten mithalten kann, dazu

---

auch einfach, zuverlässig und vielseitig in einer Nanomessmaschine zu verwenden ist. Als Basisensor für dieses Nanosensorsystem wurde ein neuartiger Fokussensor entwickelt, welcher entweder als ein direktantastender Sensor, oder als ein Messweggeber bei anderen Antastsensoren eingesetzt werden kann.

Wichtige theoretische Grundlagen zu der Funktion des entwickelten Fokussensors werden im nächsten Kapitel behandelt.

## 3. Theoretische Grundlagen der Fokuspunktdektion

Fokuspunktdektionssysteme bzw. -sensoren finden seit mehr als 25 Jahren eine große Anwendung im Bereich der Antastung optischer Datenträger wie z.B. Kompakt-Disk, CD-ROM, DVD und magnetooptischen Datenträger (MD) und wurden vor allem speziell für diese Zwecke entwickelt. Die erste Veröffentlichung zu der Thematik stammt aus „Philips' technical review“ Jahrgang 1973/74 [6]. Für die Fokussierung des Objektivs wurde damals ein kapazitiv messendes System eingesetzt. Seither ist die Zahl unterschiedlicher Prinzipien der Fokuspunktdektion auch auf Grund der enormen Nachfrage auf dem Konsumgütermarkt stark gewachsen. Die Arten der Fokuspunktdektion sind daher sehr unterschiedlich und umfassen solche Methoden, wie: Astigmatismus-Detektion [7, 8], Prinzip der Foucaultschen Schneide [7, 8], des kritischen Winkels [7, 8, 9], des Lateral-Shearing-Interferometers [8], der Detektion der Spotgröße [10], der Pupillenverdunkelung [7], differentialer Wax-Wane Technik [11, 12] und andere. Ein umfassender Überblick aller Methoden kann an dieser Stelle nicht gegeben werden, es sei deswegen auf die genannten Literaturquellen verwiesen.

Im Weiteren sollen die beiden wichtigsten und am häufigsten verwendeten Fokussmessprinzipien vorgestellt werden: die astigmatische Methode und die Methode der Foucaultschen Schneide. Es handelt sich hierbei um zwei inzwischen klassische Verfahren, die aber weit verbreitet sind.

### 3.1. Etablierte Verfahren bei der Fokuspunktdektion

#### 3.1.1. Astigmatische Messmethode

Das erste Verfahren ist eine Methode, die auf der Basis der Rückreflexauswertung mit astigmatischer Optik arbeitet. Das Fokuspunktdektionssystem mit astigmatischer Strahlauswertung wurde durch die Firma Thomson-Brandt im Jahre 1975 patentiert [13] und veröffentlicht [14].

In Abbildung 3.1 ist das Grundprinzip dargestellt. Eine Laserdiode emittiert einen divergenten Laserstrahl, üblicherweise bei einer Lichtwellenlänge von etwa 780 nm (bei CD-Antastung) oder 650 nm (bei DVD-Antastung). Der Divergenzwinkel des Laserstrahls wird mit Hilfe einer Kollimatoroptik minimiert, so dass annähernd paralleles Licht in den Strahlteiler eintritt. Das Licht wird von der Teilerschicht reflektiert und über die Fokussieroptik auf die Oberfläche (Kompakt-Disk) fokussiert. Im Strahlengang des reflektierten Laserlichtes befindet sich vor dem Fotodetektor eine Kombination aus Sammellinse und zylindrischer Linse. Sie bilden ein

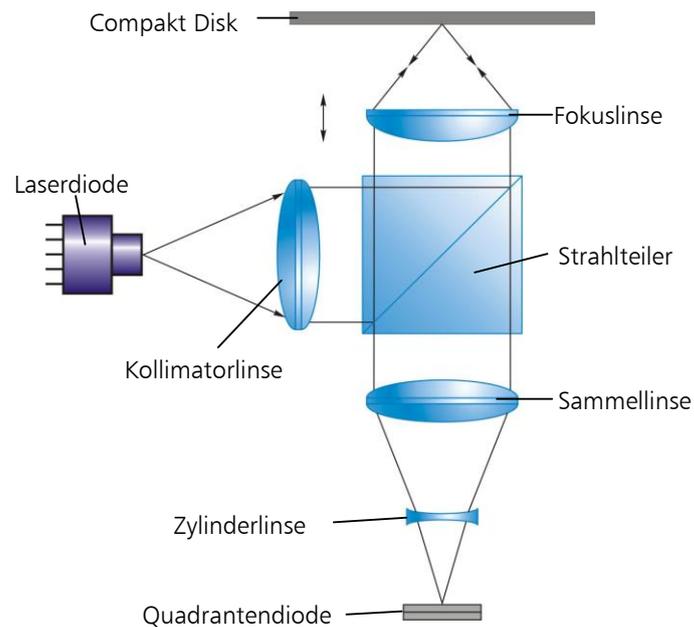


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau astigmatischer Fokuspunkt detektionssysteme

astigmatisches Strahlbündel, welches bei korrektem Abstand zwischen Fokusslinse und CD (kein Fokusfehler) eine Kreisform im Querschnitt annimmt. Diese Kreisform wird auf die vier in Matrixform angeordneten Dioden des Fotodetektors fokussiert. Verändert sich der Abstand zwischen Linse und CD, so entsteht ein Fokusfehler, der einen anderen Strahldurchmesser zur Folge hat, da das reflektierende Strahlbündel vor der astigmatischen Optik nicht mehr parallel sondern divergent bzw. konvergent ist. Ein vom Soll-Wert abweichender Strahldurchmesser wird durch die Zylinderlinse auf dem Fotodetektor elliptisch deformiert. Je nach Fehler verändert sich die Ellipse in der horizontalen oder vertikalen Lage (Abbildung 3.2 (a)) (siehe auch Kapitel 3.2). Die unterschiedliche Ausleuchtung der einzelnen Fotodioden wird über einen Differenzverstärker, wie in Abbildung 3.2 (b) dargestellt, ausgewertet. Am Ausgang des Verstärkers entsteht eine Spannung, welche als Fokusfehlerspannung (Fokusfehlersignal) zur Ansteuerung des Fokusregelverstärkers dient.

In Abbildung 3.3 wurde eine Pick-up-Einheit (optischer Antastkopf) des CD-Players auf die minimal notwendigen optischen Bauelemente reduziert. Der Astigmatismus im reflektierten Strahlengang entsteht dadurch, dass in dieser Anordnung eine planparallele Platte den Strahlteiler bildet. Wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist, ist der reflektierte Strahl beim Durchlaufen der Platte divergent. Somit entstehen unterschiedliche Lichtwege für die verschiedenen Eintrittspunkte der Laserstrahlung in der Platte. Dies führt zu einem

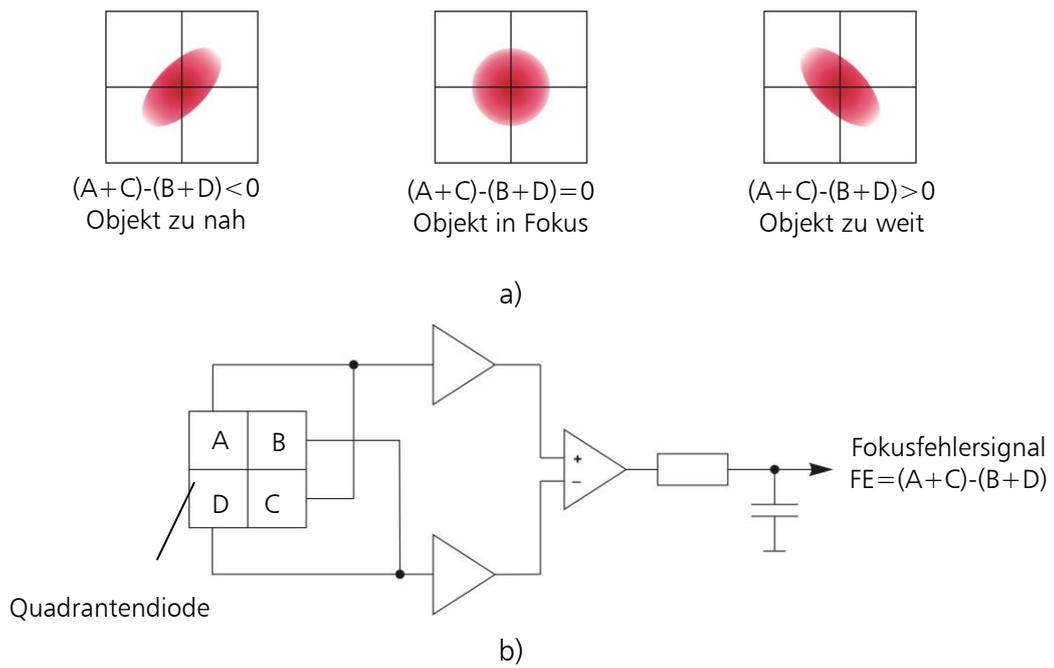


Abbildung 3.2: Astigmatische Optik: Ausleuchtung des Fotoempfängers bei unterschiedlichen Fokussierzuständen (a); Bildung des Fokusfehlersignals (b)

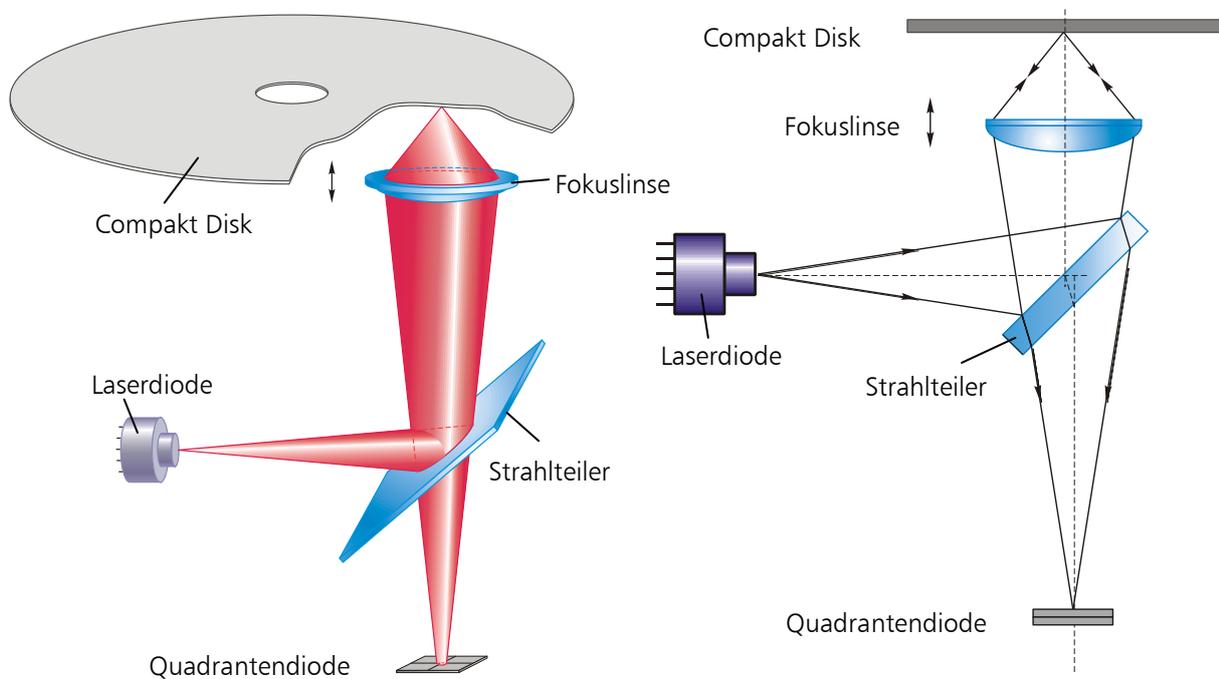


Abbildung 3.3: Vereinfachte Variante der astigmatischen Fokuspunkt detektion

Astigmatismus auf der Quadrantenfotodiode und somit zu der beschriebenen Intensitätsverteilung der Laserstrahlung (Abb. 3.2 (a)).

In Abbildung 3.4 sind unterschiedliche Intensitätsverteilungen der Laserstrahlung auf der Quadrantenfotodiode zur Veranschaulichung graphisch dreidimensional dargestellt. Vor und nach dem Erreichen des Punktes exakter Fokussierung zeigt die Intensität der Laserstrahlung eine ellipsenförmige Verteilung in Form einer zweidimensionalen Gaußschen Glockenkurve. Nur bei exakter Fokussierung nimmt die Glockenkurve im horizontalen Querschnitt die Form eines Kreises an.



Abbildung 3.4: Intensitätsverteilungen auf der Quadrantenfotodiode

### 3.1.2. Methode der Foucaultschen Schneide

Eine weitere etablierte Möglichkeit der Fokuspunkt detektion besteht in der optischen Antastung mit Hilfe des Foucaultschen-Schneiden-Prinzips. Dieses Prinzip wurde zunächst durch Foucault zur Überprüfung der Sphärizität von astronomischen Spiegel eingeführt. Für die Anwendung in dem Compact- bzw. Videodiskplayer schlug die Firma Philips dieses Verfahren im Jahre 1973 vor [15].

In den divergenten Strahlengang wird eine Bezugskante (Schneide) eingebracht (Abbildung 3.5). Sammellinse, Bezugskante und Fotodetektoren sind so justiert, dass bei korrektem Arbeitsabstand der Brennpunkt des reflektierenden und gebündelten Lichts genau auf der Bezugskante liegt. In diesem Fall beleuchten die nach dem Brennpunkt divergierenden Strahlen gleichmäßig zwei Fotodioden auf dem Fotodetektor. Wird nicht korrekt auf die CD fokussiert, verschiebt sich der Brennpunkt der Objektivlinse vor oder hinter die Bezugskante und ein Teil des Strahlengangs wird abgeschattet.

Eine verbesserte Variante der Foucaultschen Schneide Methode bezüglich der Empfindlichkeit bieten die Keilprismen (auch Biprisma genannt) (Abbildung 3.6), welche auch die beschriebenen Bezugskanten bilden. Das Verfahren beruht ebenfalls auf eine Entwicklung von Philips [16] aus dem Jahre 1979.

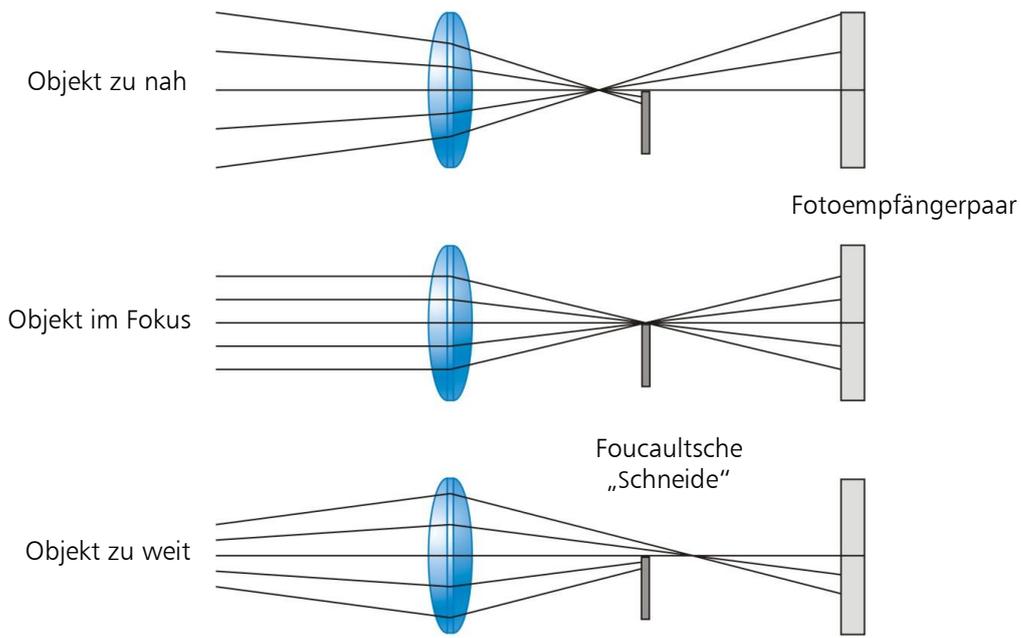


Abbildung 3.5: Grundprinzip der Foucaultschen Schneide Fokuspunkt detektion

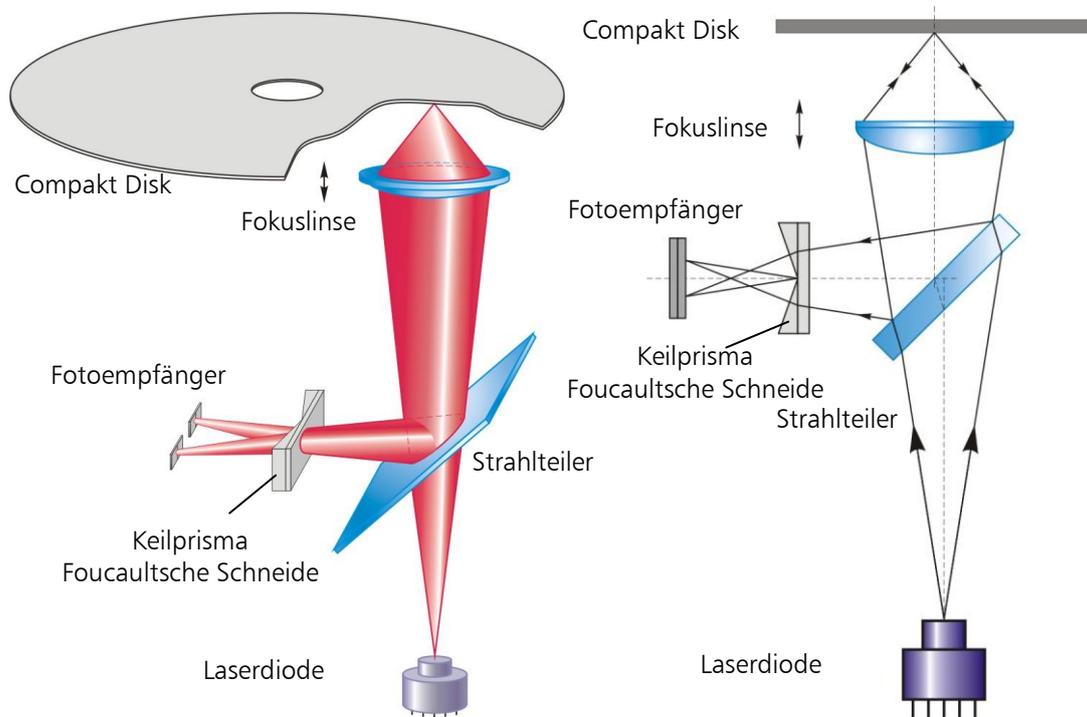


Abbildung 3.6: Fokuspunkt detektion mit Hilfe eines Keilprismas

Bei dieser Lösung liegen die Fotoempfänger in einer Reihe ('in line'). Der reflektierte Laserstrahl wird über die Keilprismen auf ein doppeltes Fotoempfängerpaar abgebildet. Die Prismen teilen dabei das Strahlenbündel in zwei Hälften, so dass jedes Empfängerpaar eine Strahlenhälfte erfasst. Diese Verteilung ist in Abbildung 3.7 (a) dargestellt. Im Fall korrekter Fokussierung bekommen alle Fotoempfänger die gleiche Intensität. Verschiebt sich die Oberfläche in eine oder andere Richtung, so verschiebt sich entsprechend der Schwerpunkt der Strahlung auf den Fotoempfängern. Aus den resultierenden unterschiedlichen Fotoempfängerströmen lässt sich somit mit Hilfe geeigneter, z.B. in Abbildung 3.7 (b) dargestellter Schaltung, ein Fokusfehlersignal ableiten.

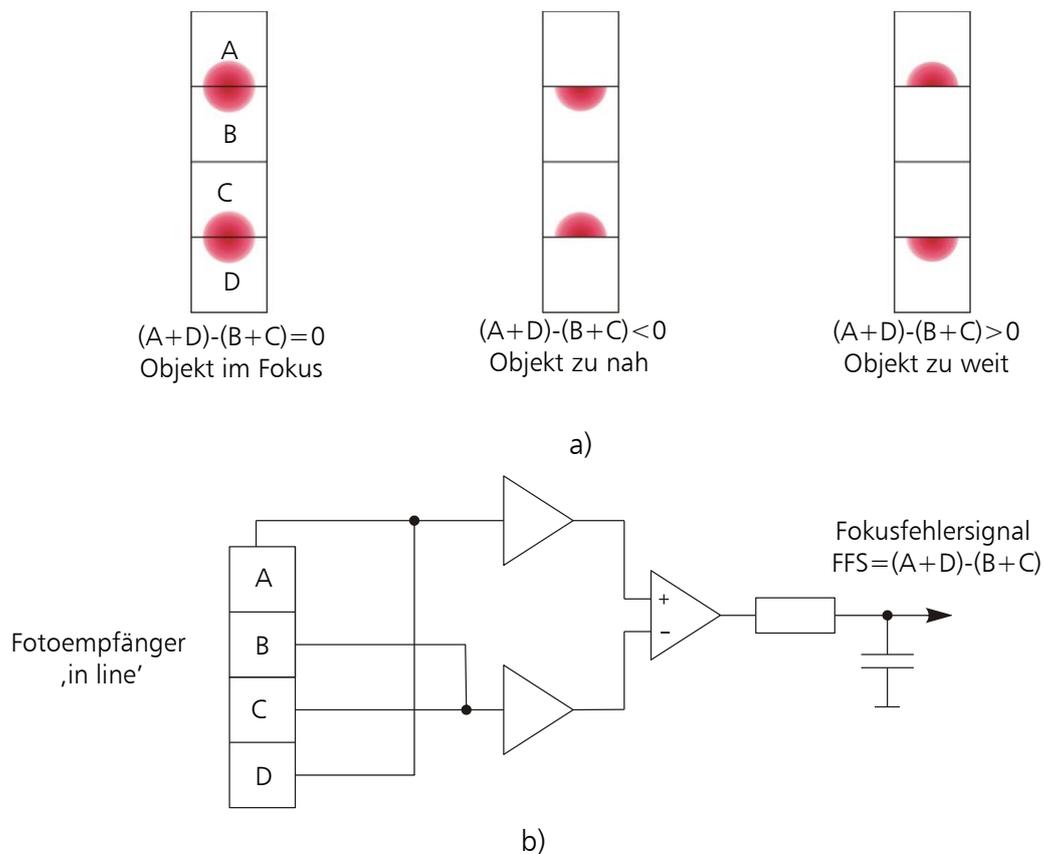


Abbildung 3.7: Foucault'sche Methode: Ausleuchtung des Fotoempfängers bei unterschiedlichen Fokussierzuständen (a); Bildung des FFS (b)

### 3.2. Modellierung des optischen Systems

Damit die Entstehung des Fokusfehlersignals eines Fokuspunktdetektors nachvollzogen werden kann und somit wichtige Einflussfaktoren auf seine Kennlinie ausgemacht und untersucht werden können, wird in diesem Kapitel der optische Aufbau eines Fokuspunktdetektors durchgerechnet.

Die Modellierung der Optik verschiedener Fokuspunktdektionssysteme wurde in der Literatur in vergangenen Jahren mehrmals ausführlich und intensiv behandelt. Eine sehr umfassende Untersuchung und einen Vergleich verschiedener Methoden (Astigmatisches Prinzip, Foucaultsche Schneide, kritischen Winkel und Lateral-Shearing-Interferometers) bietet D. Cohen in seiner Dissertationsarbeit [8]. M. Mansuripur [17] und B. Hnilicka [18] analysierten die astigmatische Fokussierung. In [19, 20] wurden ebenfalls die ersten drei genannten Methoden berechnet und verglichen.

In diesem Abschnitt wird der Strahlenverlauf des astigmatischen Fokusdetektionssystems (Abbildung 3.1), als einer der am häufigsten verwendeten Methode, durchgerechnet. Die Analyse erfolgt entsprechend der Vorgehensweise, die D. Lange in seiner Arbeit [21] detailliert ausgearbeitet hat.

### 3.2.1. Berechnung Strahlenverlaufes des astigmatischen Fokusdetektionssystems

Der prinzipielle Verlauf der Laserstrahlung des astigmatischen Fokusdetektionssystems (Abbildung 3.1) von der Laserdiode bis zur Empfängerebene ist in Abbildung 3.8 schematisch dargestellt. Auf die Darstellung der in den senkrecht zueinander stehenden Hauptschnitten wirksamen unterschiedlichen Brechungsverhältnisse der Zylinderlinse wurde zunächst verzichtet.

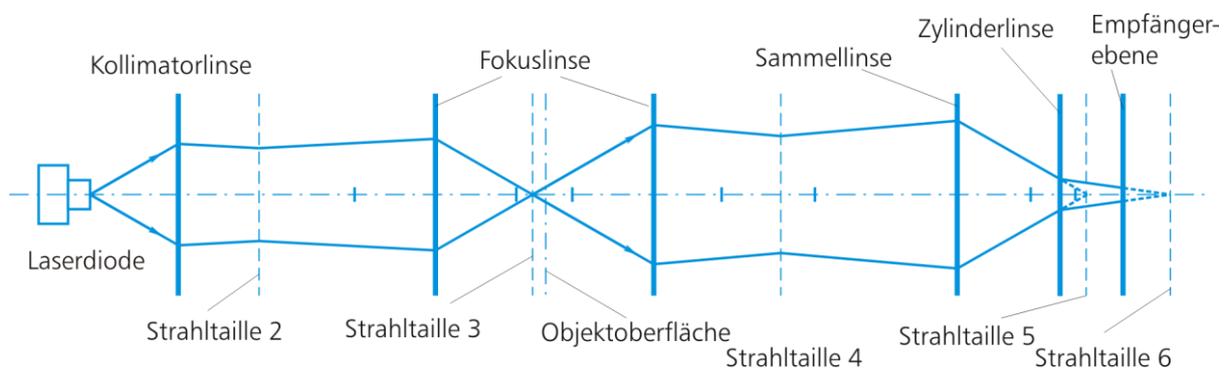


Abbildung 3.8: Strahlengang des Laserstrahls (entspr. zu Abb. 3.1)

Die Transformation eines Laserstrahls beim Durchgang durch dünne Linsen kann in einfacher Weise für die Transformation der Strahltaillen beschrieben werden. In Anlehnung an die Schreibweise der Newtonschen Abbildungsgleichungen lauten die Transformationsgleichungen für die Taillen, die auch als Kogelnikische Gleichungen [22] bezeichnet werden:

$$z' = \frac{f^2}{z^2 + z_R^2} \cdot z \quad z'_R = \frac{f^2}{z^2 + z_R^2} \cdot z_R \quad (3.1)$$

$z$  bzw.  $z'$  sind die Entfernungen der Tailen im Objekt- bzw. Bildraum von den entsprechenden Brennpunkten und  $f$  stellt die Brennweite der Linse im Objektraum dar. Das Verhältnis der Rayleigh-Längen bei der Transformation entspricht dem Quadrat der Radien der Strahltaillen:

$$\frac{z'_R}{z_R} = \left( \frac{W'_0}{W_0} \right)^2 \Rightarrow W'_0 = W_0 \cdot \sqrt{\frac{z'_R}{z_R}} \Rightarrow W'_0 = W_0 \cdot \frac{f}{\sqrt{z^2 + z_R^2}} \quad (3.2)$$

Die Laserstrahlung ist bei ihrem Austritt aus der Laserdiode stark divergent. Der Öffnungswinkel  $\Theta$  des Strahlenbündels beträgt etwa  $12^\circ$ . Mit Hilfe eines Kollimators, dessen objektseitiger Brennpunkt auf der Auskoppelstelle der Laserdiode liegt, gelingt es ein nahezu paralleles Strahlenbündel zu erzeugen. Die Strahltaille der Laserdiode wird nach den oben genannten Kogelnischen Abbildungsgleichungen in den bildseitigen Brennpunkt der Kollimatorlinse abgebildet.

Der Abstand der Strahltaille  $W_{0,2}$  (Taille 1 entspricht der Auskoppelstelle der Laserdiode) vom bildseitigen Brennpunkt ( $F_1$  in Abbildung 3.9) der Fokuslinse ( $HH'_1$ ) wurde mit  $z_1$  bezeichnet und ist allein durch die geometrischen Bedingungen bestimmt. Da es aus technischen Gründen nicht möglich (und für die Erfassung des Fokuspunktes auch nicht notwendig) ist die Taille 2 in den Brennpunkt  $F_1$  zu legen, führt die Transformation durch die Fokuslinse dazu, dass der Fokus (Ebene  $W_{0,3}$ ) nicht mit dem bildseitigen Brennpunkt ( $F'_1$ ) der Linse in einen Punkt fällt. Die Größe des Abstandes  $z_1$  ist in diesem Fall ein systematischer Fehler.

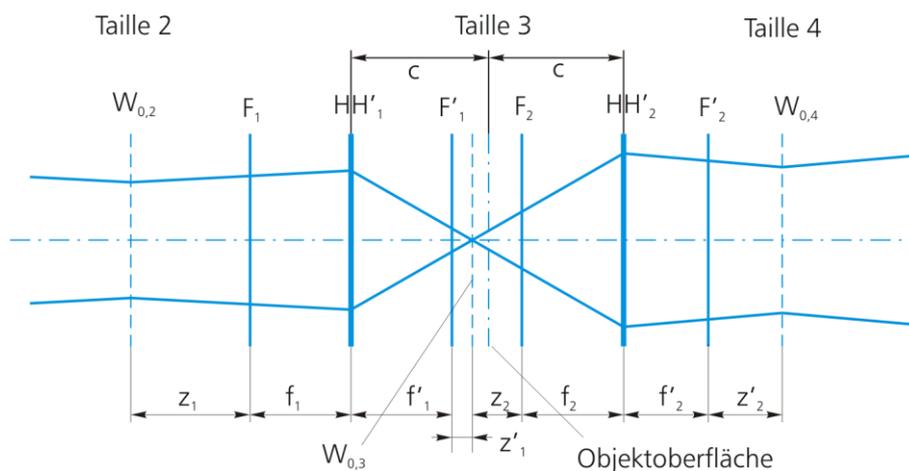


Abbildung 3.9: Abbildungsverhältnisse auf der Messoberfläche

Der Radius der Taille 3, der dem Fokuspunkt entspricht, folgt aus den Transformationsgleichungen. Er beträgt  $W'_{0,2} = 0,5 \mu\text{m}$ . Der Index hinter dem Komma kennzeichnet die Nummer der Taille.  $f_1$  und  $f_2$  bzw.  $f'_1$  und  $f'_2$  bezeichnen die Brennweiten der Fokuslinse vor und hinter der Objektoberfläche.

Die Objektoberfläche befindet sich im Abstand  $c$  zur Fokuslinse. Dieser Abstand ist die eigentlich gesuchte Variable, welche durch das Fokuspunktdektionssystem detektiert wird und von der alle folgenden Parameter abhängen. Aus der Abbildung 3.9 kann man ablesen:

$$2 \cdot c = 2 \cdot f_2 + z'_1 + z_2 \quad \Rightarrow \quad z_2 = f(c) = 2 \cdot c - 2 \cdot f_2 - z'_1 \quad (3.3)$$

Für die Berechnung von  $W'_{0,3} = W_{0,4}$  (Taille 4) benutzt man wiederum die Transformationsgleichungen.

$$z'_2 = f(z_2) = \frac{f_2^2}{z_2^2 + z_{R2}^2} \cdot z_2 = \frac{f_2^2 \cdot (2c - 2f_2 - z'_1)}{(2c - 2f_2 - z'_1)^2 + z_{R2}^2} = f(c) \quad (3.4)$$

$$W_{0,3} = W_{0,2} \cdot \frac{f_2}{\sqrt{z_1^2 + z_{R2}^2}} \neq f(c) \quad (3.5)$$

mit 
$$z_{R2} = \frac{\pi \cdot W_{0,2}^2}{\lambda} \neq f(c) \quad (3.6)$$

$$W_{0,4} = \frac{W_{0,3} \cdot f_2}{\sqrt{z_2^2 + z_{R3}^2}} = \frac{W_{0,3} \cdot f_2}{\sqrt{(2 \cdot c - 2 \cdot f_2 - z'_1)^2 + z_{R3}^2}} = f(c) \quad (3.7)$$

mit 
$$z_{R3} = \frac{\pi \cdot W_{0,3}^2}{\lambda} \neq f(c) \quad (3.8)$$

und damit 
$$z_{R4} = \frac{\pi \cdot W_{0,4}^2}{\lambda} = f(c) \quad (3.9)$$

Es wird ersichtlich, dass die explizite Darstellung der Abhängigkeiten der Einzelgrößen vom Argument  $c$  schnell an Komplexität zunimmt, da inzwischen alle Einflussgrößen Funktionen

dieses Parameters sind. Die Rechnung selbst ist mit Hilfe der Computertechnik nicht sehr aufwendig. Deshalb soll hier auf die explizite Darstellung der Einzelschritte verzichtet werden.

Die Größen der Fokussierungsoptik, die in die Auswerteoptik eingehen, sind nun bekannt. Der weitere Strahlengang wird in Abbildung 3.10 ersichtlich. Der Abstand der Taille 4 ( $W_{0,4}$ ) von der Brennebene ( $F_3$ ) der Sammellinse ( $HH'_3$ ) folgt aus den geometrischen Zusammenhängen :

$$z_3 = a_1 - f_3 - f'_2 - z'_2 = a_1 - f_3 - f'_2 - \frac{f_2^2 \cdot (2c - 2f_2 - z'_1)}{(2c - 2f_2 - z'_1)^2 + z_{R2}^2} = f(c) \quad (3.10)$$

$a_1$  drückt den Abstand zwischen der Fokuslinse und der Sammellinse aus.

Die Abbildung der Taille 4 ( $W_{0,5}$ ) durch die Sammellinse  $HH'_3$  liefert den Radius ( $W_{0,5}$ ) und den Abstand zum bildseitigen Brennpunkt  $z'_3$  der abgebildeten Taille 4. Diese liegt hinter der Zylinderlinse ( $HH'_4$ ). Der Abstand zwischen der Sammellinse und der Zylinderlinse wird durch  $a_2$  ausgedrückt.  $f_3$  ist die Brennweite der Sammellinse  $HH'_3$ .

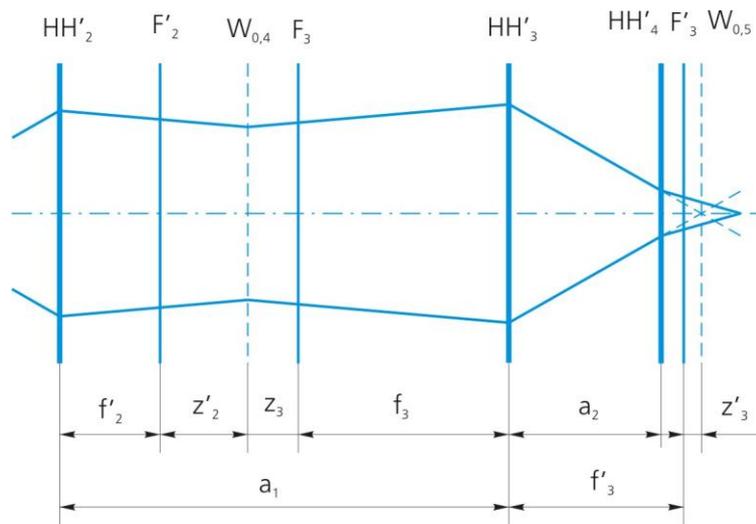


Abbildung 3.10: Teil des Strahlengangs von der Fokuslinse bis zur Zylinderlinse

Der weitere Strahlenverlauf hinter der Zylinderlinse bei exakter Fokussierung ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Die unterschiedlichen Brechungsverhältnisse in den beiden orthogonalen Achsen durch die astigmatische Optik wurden zur besseren Veranschaulichung der Wirkungsweise in einer Ebene gezeichnet. Die Taille  $W_{0,5}$  wird durch die in der x-Achse wirksame Zylinderfläche nach  $W_{0,6x}$  mit  $z'_{4,x}$  abgebildet. Die in der y-Achse wirksame Zylinderfläche bewirkt eine Abbildung der Taille nach  $W_{0,6y}$  mit  $z'_{4,y}$ . Auf der Bildebene erscheint bei exakter Fokussierung ein kreisförmiger Lichtfleck, weil die Bildebene genau in dem Punkt des

Strahlengang angeordnet ist, in der die Strahlradien der x- und in der y-Achse den gleichen Betrag aufweisen. Es existiert auch dann ein Punkt in dem dies gilt, wenn die Bildebene nicht genau den oben genannten Punkt trifft. Dies ist jedoch nicht der Fokuspunkt, vielmehr ist es ein scheinbarer Fokuspunkt, der zu Fehlern bei verkippten Objektoberflächen führt.

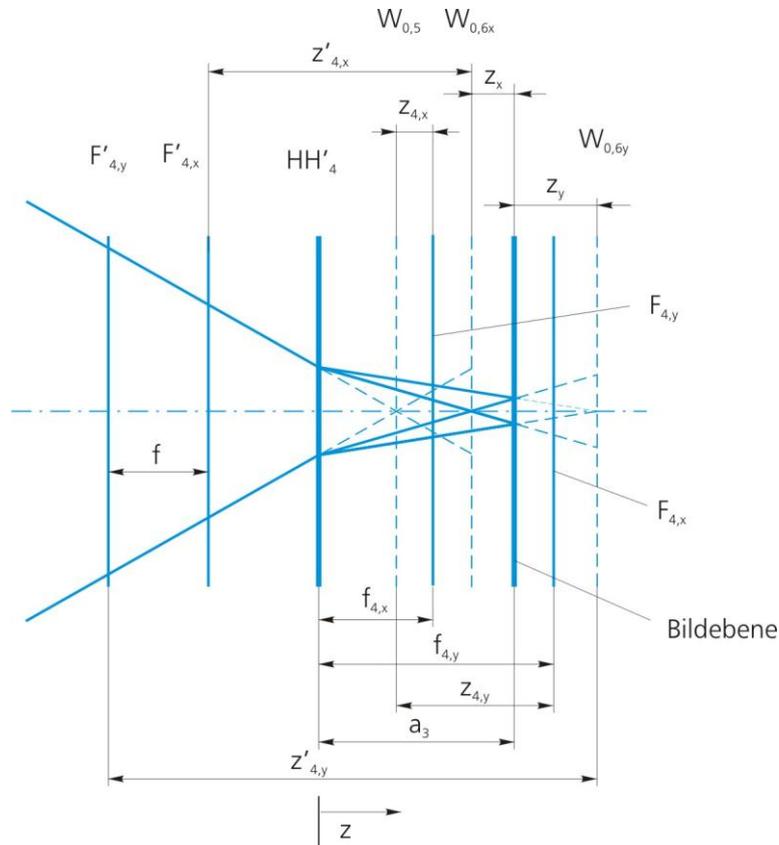


Abbildung 3.11: Strahlenverlauf durch die Zylinderlinse bei exakter Fokussierung

Legt man ein Koordinatensystem in den Schnittpunkt der optischen Achse mit den Hauptebenen der Sammellinse (Abbildung 3.11), so berechnet sich der Abstand der Bildebene von den Strahltaillen mit:

$$z_x = z_x(c) = a_3 - f_{4,x} - z'_{4,x} \quad \text{bzw.} \quad z_y = z_y(c) = a_3 - f_{4,y} - z'_{4,y} \quad (3.11)$$

Die Strahlradien in der Bildebene berechnen sich nach

$$W_x(z_x) = W_{0,6x} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot z_x}{\pi \cdot W_{0,6x}} \right)^2} = W_x(c) \quad (3.12)$$

bzw.

$$W_y(z_y) = W_{0,6y} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot z_y}{\pi \cdot W_{0,6y}} \right)^2} = W_y(c) \quad (3.13)$$

Diese Radien repräsentieren gewissermaßen die Halbachsen der Ellipsen, die bei Defokussierung auf der Quadrantendiode wirksam werden. Sie werden für die Berechnung der Intensitätsverteilung der Quadrantendiode benötigt. Diese Intensitätsverteilung drückt somit die Abhängigkeit der Fotodetektorströme von dem Abstand "Fokuslinse - Objektoberfläche" aus und ist die gesuchte Fokusfehlerfunktion des Fokusedektors.

### 3.2.2. Berechnung der Intensitätsverteilung auf der Quadrantendiode

Der Fotostrom eines Fotoelementes ist proportional zu der von ihm empfangenen Strahlungsleistung. Ausgangspunkt für die Berechnung der Ausgangsfotostrome einer Quadrantendiode ist die Gleichung für die Intensitätsverteilung im Laserlicht [23]:

$$I(x, y, z) \sim u(x, y, z) \cdot \overline{u(x, y, z)} = \left( \frac{W_0}{W(z)} \right)^2 \cdot e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{W(z)^2}} \quad (3.14)$$

Man kann den Exponenten der Funktion als Gleichung eines Kreises interpretieren:

$$\frac{x^2}{W^2} + \frac{y^2}{W^2} = r^2 \quad (3.15)$$

Durch die Einführung unterschiedlicher Halbachsen ( $W_x$  und  $W_y$ ) entsteht daraus die Gleichung einer Ellipse:

$$\frac{x^2}{W_x^2} + \frac{y^2}{W_y^2} = r^2 \quad (3.16)$$

Die Halbachse  $W_x$  fällt mit der x-Achse zusammen, die Halbachse  $W_y$  mit der y-Achse. Die Gleichung für die Intensitätsverteilung ergibt sich somit zu:

$$I(x, y, z) \sim \frac{W_{0x} \cdot W_{0y}}{W_x \cdot W_y} \cdot e^{-2 \left( \frac{x^2}{W_x^2} + \frac{y^2}{W_y^2} \right)} \quad (3.17)$$

Zur Ermittlung der Gesamtintensität ist eine Integration über die interessierenden Bereiche notwendig. Die bereichsweise Integration vereinfacht sich erheblich, wenn man eine Koordinatentransformation so durchführt, dass die Quadranten der Quadrantendiode mit den vier Quadranten des kartesischen Koordinatensystems zusammenfallen. Da die Ellipse um  $45^\circ$  gekippt auf der Quadrantendiode liegt, ist eine Drehung des Koordinatensystems um die z-Achse um einen Winkel von  $45^\circ$  notwendig. Die Substitutionsgleichungen für eine solche Transformation lauten:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= (x - y)/\sqrt{2} \\ \tilde{y} &= (x + y)/\sqrt{2} \\ \tilde{z} &= z\end{aligned}\tag{3.18}$$

Im Weiteren soll auf die Kennzeichnung durch Schlangenlinien verzichtet werden. Die Gleichung für die Intensitätsverteilung lautet nun:

$$I(x, y, z) \sim \frac{W_{0x} \cdot W_{0y}}{W_x \cdot W_y} \cdot \exp\left[-\left(\frac{(x - y)^2}{W_x^2} + \frac{(x + y)^2}{W_y^2}\right)\right]\tag{3.19}$$

Berücksichtigt man eine mögliche Verschiebung der Strahlmitte aus der X-Y-Nullkoordinate der Quadrantendiode so erhält man für die Intensität der Laserstrahlung:

$$I(x, y, z) \sim \frac{W_{0x} \cdot W_{0y}}{W_x \cdot W_y} \cdot \exp\left[-\left(\frac{((x + \Delta x) - (y + \Delta y))^2}{W_x^2} + \frac{((x + \Delta x) + (y + \Delta y))^2}{W_y^2}\right)\right]\tag{3.20}$$

Für die späteren Berechnungen ist zu beachten, dass alle Tailen Funktionen des Parameters  $c$  (Abstand Fokulinse - Objektoberfläche) sind, und dass damit auch die Intensitätsverteilung eine Funktion dieses Parameters wird.

Abbildung 3.12 zeigt die Lage der Quadrantendiode sowie eines darauf liegenden ellipsenförmigen Laserstrahls im kartesischen Koordinatensystem. Man kann sich die Integration über die Intensitätsverteilung auf den Einzelempfängern besser veranschaulichen, indem man sich die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung als zweidimensionale Gaußsche Glockenkurve, die sich über die xy-Ebene erhebt, vorstellt. Der Fotodiodenstrom eines einzelnen Empfängers ist dann proportional dem über ihm befindlichen Volumenelement.

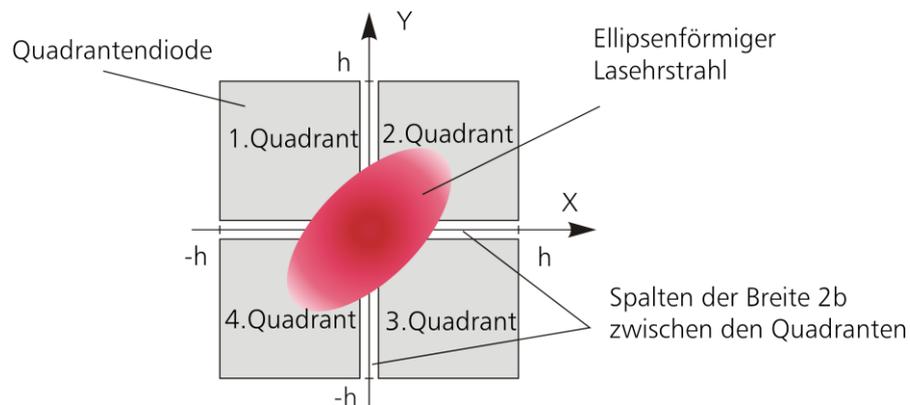


Abbildung 3.12: Projektion des Laserstrahls auf die Quadrantendiode

$$I_{\text{Foto}} \sim \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{W_{0x} \cdot W_{0y}}{W_x \cdot W_y} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{((x + \Delta x) - (y + \Delta y))^2}{W_x^2} + \frac{((x + \Delta x) + (y + \Delta y))^2}{W_y^2} \right) \right] \cdot dy \cdot dx \quad (3.21)$$

Die Integrationsgrenzen ergeben sich aus den geometrischen Daten der Quadrantendiode, die in den Datenblättern zu finden sind. Ein typischer Wert sind  $h \approx 125 \mu\text{m}$  und  $2b \approx 5 \mu\text{m}$ . Die Integrationsgrenzen für einzelne Quadranten ergeben sich wie folgt (siehe Abbildung 3.12):

1.Quadrant:	$y_1 = b$	$y_2 = h$	$x_1 = -h$	$x_2 = -b$
2.Quadrant:	$y_1 = b$	$y_2 = h$	$x_1 = b$	$x_2 = h$
3.Quadrant:	$y_1 = -h$	$y_2 = -b$	$x_1 = b$	$x_2 = h$
4.Quadrant:	$y_1 = -h$	$y_2 = -b$	$x_1 = -h$	$x_2 = -b$

Das Fokusfehlerstrom erhält man durch entsprechende Addition und Subtraktion der Fotodiodenströme (siehe Abschnitt 3.1.1., Abbildung 3.2(b)):

$$I_{\text{Fehler}} = (I_{Q2} + I_{Q4}) - (I_{Q1} + I_{Q3}) \quad (3.22)$$

Die Indizes Q1..Q4 bezeichnen die einzelnen Quadranten 1 bis 4 der Quadrantendiode in der Abbildung 3.12.

### 3.2.3. Das Fokusfehlersignal

Unter Benutzung verschiedener Softwareprogramme konnte aus den Gleichungen 3.12, 3.13, 3.21 und 3.22 das Fokusfehlersignal (Kennlinie des Fokuspunkt detektionssystems) in

Abhängigkeit vom Abstand der Fokuslinse von der Objektoberfläche ( $c$ ) berechnet werden. Zusätzlich konnten verschiedene Einflussfaktoren wie Fokuslinsenbrennweite, Astigmatismus, Strahldurchmesser, Dejustage, welche die Empfindlichkeit der Anordnung bestimmen bzw. zu Fehlern im Messergebnis führen, qualitativ eingeordnet werden [21].

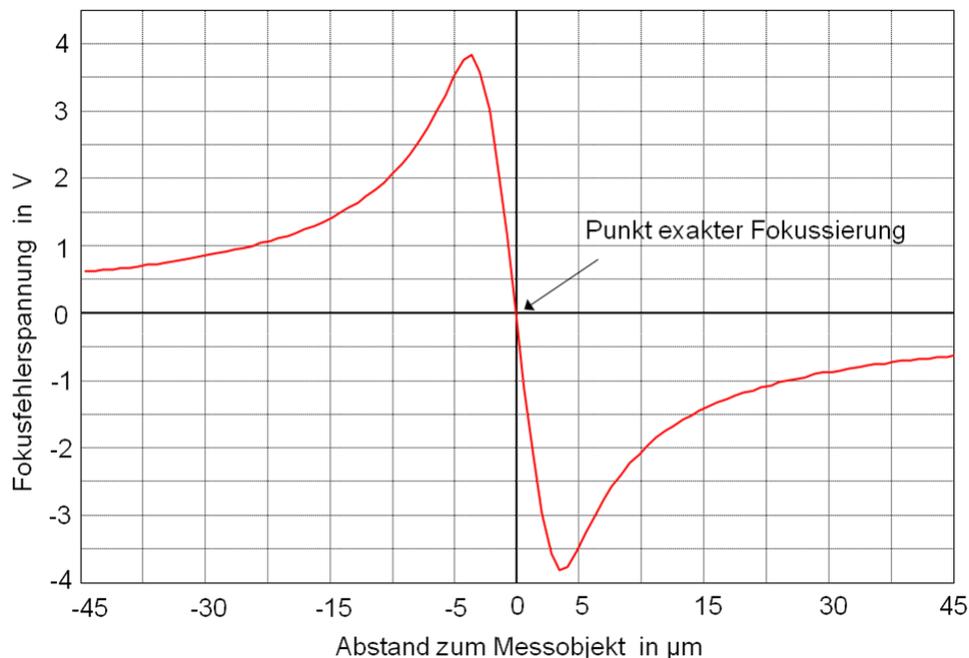


Abbildung 3.13: Typischer Verlauf eines Fokusfehlersignals  
(berechnet entspr. Gleichung 3.22)

Abbildung 3.13 zeigt den prinzipiellen Verlauf des Fokusfehlersignals. Der Kurvenverlauf zeigt einen ersten Bereich, in dem sich der Fokuspunkt der Objektoberfläche nähert - in diesem Bereich steigt das Fokusfehlersignal allmählich an, da die Radien der Tailen in die Größenordnung der Quadrantendiode kommen. Im zentralen Bereich (in dem die Ellipse gewissermaßen umklappt) um den Punkt exakter Fokussierung (kreisförmige Gaußverteilung auf den Empfängern), zeigt das Signal annähernd lineares Verhalten. Der Anstieg im linearen Bereich ist ein Maß für die Empfindlichkeit der Anordnung. In einem dritten Bereich ist der Punkt exakter Fokussierung überschritten und die Gesamtintensität nimmt wieder ab.

Ferner kann mit Hilfe vorgelegten Berechnungen das Fokuspunkt detektionssystem beliebig dimensioniert werden. Abbildung 3.14 zeigt wie sich einige wichtige Parameter auf die Empfindlichkeit des Meßsystems auswirken. Abbildung 3.14 (a) stellt das Fokusfehlersignal für zwei unterschiedliche Brennweitendifferenzen ( $10 \mu\text{m}$  bzw.  $6 \mu\text{m}$ .) der astigmatischen Linse dar. Das Signal ändert sich im linearen Bereich nur unwesentlich. Lediglich die Extremwerte verschieben sich nach außen und erreichen höhere Amplituden. In Abbildung 3.14 (b) wurde die

Abhängigkeit des Fokusfehlersignals vom Radius der Beleuchtungsstrahls dargelegt. Der Einfluss dieses Parameters ist relativ gering. Die rote Kurve zeigt das Signal für einen Strahldurchmesser von ca. 2 mm, die blaue Kurve steht für einen breiteren Strahldurchmesser von etwa 5 mm.

Ein weiterer Parameter, welcher die Fokuskennlinie beeinflusst, ist die Fokuslinsenbrennweite. Die in Abbildung 3.14 (c) dargestellten Funktionsverläufe wurden durch Variation dieser Größe erzielt. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf bei einer Fokuslinsenbrennweite von 4 mm und die rote bei 2.5 mm. Im linearen Bereich der Kennlinien ist eine deutliche Empfindlichkeitsänderung zu registrieren, die Extremwerte behalten ihre Amplituden.

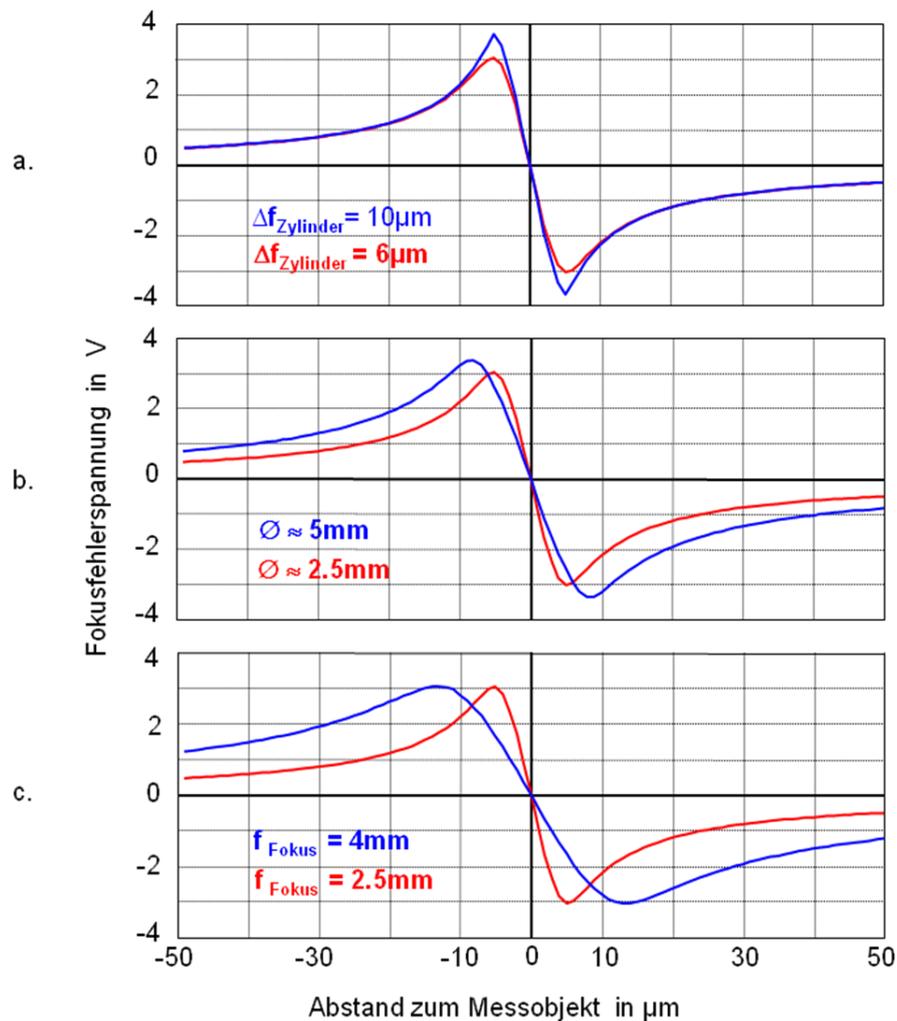


Abbildung 3.14: Einfluss verschiedener Parameter auf das Fokusfehlersignal: unterschiedliche astigmatische Linsen (a); unterschiedliche Beleuchtungsstrahlradien (b); unterschiedliche Fokuslinsen (c)

Die Fokusfehlersignale anderer Fokuspunkt detektionsysteme (z.B. der Foucaultschen Schneide oder des kritischen Winkels) weisen den gleichen, so genannten S-förmigen, Verlauf auf (Abb. 3.13). Die Kennlinienunterschiede dieser Systeme (Methoden) liegen in deren Empfindlichkeit,

Arbeitsbereich, Offset usw. [8], welche auch durch die Modifizierung der jeweiligen optischen Komponenten entsprechend konkretem Einsatzbereich variiert und beeinflusst werden können.

### 3.3. Grundlagen der Strahlgeometrie bei der Antastung einer Oberfläche

Für das weitere Verständnis der optischen Antastung einer Oberfläche wird in diesem Abschnitt kurz auf die Spotdimensionierung eingegangen.

Der Größe des auf einer Oberfläche fokussierten Spots wird nach den Gesetzen der Beugung an der kreisförmigen Öffnung berechnet. Dabei gilt [24]:

$$E_x \sim \frac{J_1^2\left(\frac{2\pi R x}{\lambda f}\right)}{\left(\frac{2\pi R x}{\lambda f}\right)^2} \quad (3.23)$$

Hier:  $E_x$  bedeutet die Lichtenergie,  $\lambda$  - die Wellenlänge des verwendeten Lichtes,  $R$  ist der Radius der beugenden Öffnung (Linse),  $f$  ist die Brennweite der Linse,  $x$  ist ein Punkt auf der Empfängerfläche (Oberfläche) und  $J_1$  die Besselfunktion 1-er Ordnung.

Dieser Energieverlauf stellt eine rotationssymmetrische Hell-Dunkel-Verteilung mit einem ausgeprägten zentralen Maximum, dem sogenannten Beugungsscheibchen oder Airy-Scheibchen, dar. Dabei entfällt auf die Airy-Scheibchen 83,8% der Gesamtlichtintensität.

Die Gleichung für den Durchmesser des ersten Intensitätsminimums (Airy-Scheibchendurchmesser) ergibt sich für die erste Nullstelle der Besselfunktion mit [24]:

$$d_0 = 1,22 \frac{\lambda f}{R} \quad (3.24)$$

und mit 
$$NA = \frac{R}{f} \quad (3.25)$$

zu 
$$d_0 = 1,22 \frac{\lambda}{NA} \quad (3.26)$$

Hier:  $NA$  bezeichnet die Numerische Apertur (halber Öffnungswinkel) der Objektivlinse.

Praxisnah wird oft für die Definition der Spotgröße das Kriterium der vollen Halbwertsbreite (FWHM - Full Width Half Maximum) verwendet [7, 25]. Es bezeichnet den Durchmesser, bei dem

die Intensität des Airy-Scheibchens auf die Hälfte des Maximalwertes sinkt. Für diesen Durchmesser gilt näherungsweise:

$$d \approx 0,51 \frac{\lambda}{NA} \quad (3.27)$$

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels gesagt wurde, kommen die Fokuspunkt detektionssysteme ursprünglich aus dem Bereich der Antastung optischer Datenträger. Somit wurden deren Komponenten entsprechend diesem Einsatzbereich bestimmt. Standardmäßig finden Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 780 \text{ nm}$  (CD) bzw.  $650 \text{ nm}$  (DVD) Verwendung. Die numerische Apertur  $NA$  ist bei  $0,45$  (CD) bzw.  $0,6$  (DVD) festgelegt. Daher beträgt die Spotgröße, unter Verwendung von Gleichung 3.27, ca.  $1 \mu\text{m}$  für CD-Antastung bzw. ca.  $0,6 \mu\text{m}$  für DVD-Antastung.

Die CD (DVD)-Struktur ist in der Abbildung 3.14 verdeutlicht. Ein kollimierter Laserstrahl wird durch die Fokuslinse verengt, sodass er beim Auftreffen auf die transparente CD (DVD)-Oberfläche einen Durchmesser von etwa  $0,8 \text{ mm}$  (für DVD  $0,5 \text{ mm}$ ) besitzt. Der Strahl wird an

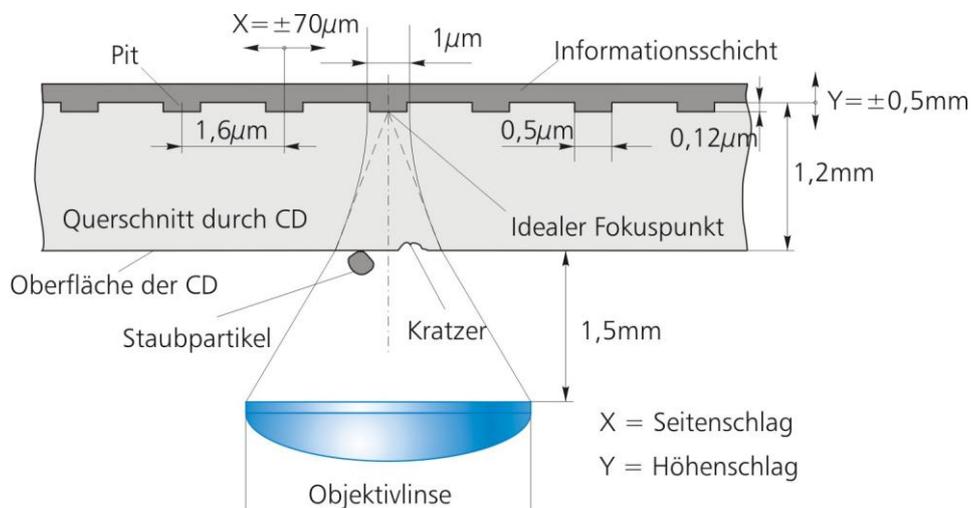


Abbildung 3.14: Strahlenverlauf in der CD

der Oberfläche der CD (DVD) gebrochen (Lichtbrechungsindex des Trägermaterials (Substrates) beträgt  $1,55$ ). Die Brechung des Strahls bewirkt eine Bündelung von ca.  $800 \mu\text{m}$  (für DVD  $500 \mu\text{m}$ ) an der Diskoberfläche auf letztendlich ca.  $1 \mu\text{m}$  (für DVD  $0,6 \mu\text{m}$ ), wenn er auf die Datenspur trifft. Auf Grund dieser Eigenschaft des Trägermaterials wirken sich kleine Kratzer oder Staubpartikel auf der CD (DVD)-Oberfläche kaum aus. Man geht davon aus, dass Staub

oder Kratzer, die kleiner als 0,5 mm (bei DVD 0,3 mm) sind, keine Lesefehler des Laufwerks nach sich ziehen.

Was bei der Optikdimensionierung in diesem Zusammenhang unbedingt eingehalten werden muss, ist folgendes: der kleinstmögliche Spotgröße ist nur im Fall eines so genannten beugungsbegrenzten Spots zu erreichen. Dazu müssen zwei Bedingungen stimmen: zum einen symmetrische Energieverteilung über den Strahlquerschnitt, zum anderen das optische System muss frei von Aberrationen sein.

Die erste Bedingung ist prinzipiell durch den Einsatz der Laserdiode nicht erfüllt, aber im Fall der Verwendung einer Kollimatorlinse mit  $NA$  ca. 0,1 oder kleiner wird die Energieverteilung nahe zu uniform [7]. Die zweite Bedingung bedeutet, dass hochqualitative (beugungsbegrenzte) Optik eingesetzt werden muss, um einen fokussierten Laserstrahl mit absolut sphärischer Wellenfront zu erreichen. Bei der CD/DVD Abtastung wird die Wellenfront durch das Passieren der transparenten Disksubstratschicht nicht mehr sphärisch. Deshalb wird die Dicke dieses Substrates streng normiert, sie beträgt 1,2 mm für CD und 0,6 mm für DVD, und alle Objektivlinsen, welche für CD/DVD Abtastung konzipiert sind, wurden in Einbezug auf die jeweilige Substratdicke entworfen. Die sphärische Abberation wird mit diesen Optiken kompensiert.

Die Betrachtungen an dieser Stelle sind wichtig bei der Wahl und Dimensionierung von optischen Komponenten im Strahlengang des aufgebauten Fokussensors (siehe Kapitel 4.3).

### 3.4. Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Funktionsprinzip der Fokuspunkt detektion auf dem Beispiel zweier wichtigsten Methoden (astigmatischer und der Foucaultschen Schneide) erläutert. Dabei, um die Entstehung eines typischen Fokusfehlersignals zu veranschaulichen und dessen Einflussparameter zu untersuchen, wurde die astigmatische Fokuspunkt detektionsmethode auch detaillierter unter die Lupe genommen und mit Hilfe geometrischer Optik modelliert. Für ein besseres Verständnis der optischen Oberflächenantastung ist auch die Spotdimensionierung am Beispiel der CD/DVD Abtastung vorgenommen.

Die Erläuterungen aus diesem Kapitel sind insgesamt von großer Bedeutung für die gesamte Arbeit, da hier das grundlegende Messprinzip des Basissensors (Fokussensors) erklärt ist.

Der Aufbau des Basissensors mit der Einbeziehung vorgelegten Grundlagen wird im nächsten Kapitel erörtert.

## 4. Aufbau des Basissensors

### 4.1. Der Prototyp des Fokussensors (des Basissensors)

Bei dem Entwurf des Fokussensors musste zunächst entschieden werden, ob ein Autofokussystem (Pick-Up Einheit, Abtastkopf) eines kommerziellen Anbieters oder eine eigene Entwicklung Verwendung finden sollte. Im ersten Versuchsaufbau wurde eine Antasteinheit aus einem handelsüblichen Compact Disk Player eingesetzt. Hierfür war folgender Grund ausschlaggebend: solche CD/DVD Pick-Up-Einheiten verfügten über alle notwendigen fertig justierten und abgestimmten optischen und elektronischen Bauteile, welche für den Messsensor relevant waren. Zudem war es damit möglich, einen Fokussensor ohne großen Aufwand in Betrieb zu nehmen und seine messtechnischen Parameter in der Praxis zu untersuchen. In Anbetracht der Tatsache, dass solche CD/DVD-Player-Bausteine immer noch oft in der Messtechnik eingesetzt werden [26-34], war es ein wichtiger Zwischenschritt, Erfahrungen mit derartigen Systemen zu sammeln.

Als Prototyp des Fokussensors kam die Pick-Up-Einheit KSS 240A der Firma Sony zu Einsatz (Abbildung 4.1.).



Abbildung 4.1: Pick-Up Einheit KSS 240A der Firma Sony

Bei allen Autofokussystemen dieser Bauart wird die Fokuslinse (Objektivlinse) mit dem Abtastkopf mit Hilfe einer Tauchspule verbunden, was, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, für die angestrebte Anwendung eine Quelle von verschiedenen Fehlern, wie mechanische und thermische Unstabilität bzw. erhöhte Vibrationsempfindlichkeit, darstellt. Das Problem wurde gelöst, indem die Linse fixiert wurde und der gesamte Abtastkopf als Null-Indikator mit

kleinerem Messbereich, welcher dem steilen Abschnitt um Nulldurchgang der Kennlinie entspricht (siehe Abb. 3.13 in Abschnitt 3.2.3, Kapitel 3), eingesetzt wird.

Der Antastkopf wurde mit Hilfe eines Laserinterferometers getestet. Da das Gehäuse der Pick-Up Einheit komplett aus Kunststoff besteht, wurden die ersten Messungen bezüglich Stabilität durchgeführt. Das Ergebnis war enttäuschend. In allen Versuchen zeigte sich, dass das Fokussystem stark von der Temperatur abhängt (Abbildung 4.2). Die Messwertdrift über größere Zeiträume lag im Bereich von bis zu  $6 \mu\text{m}/\text{K}$ .

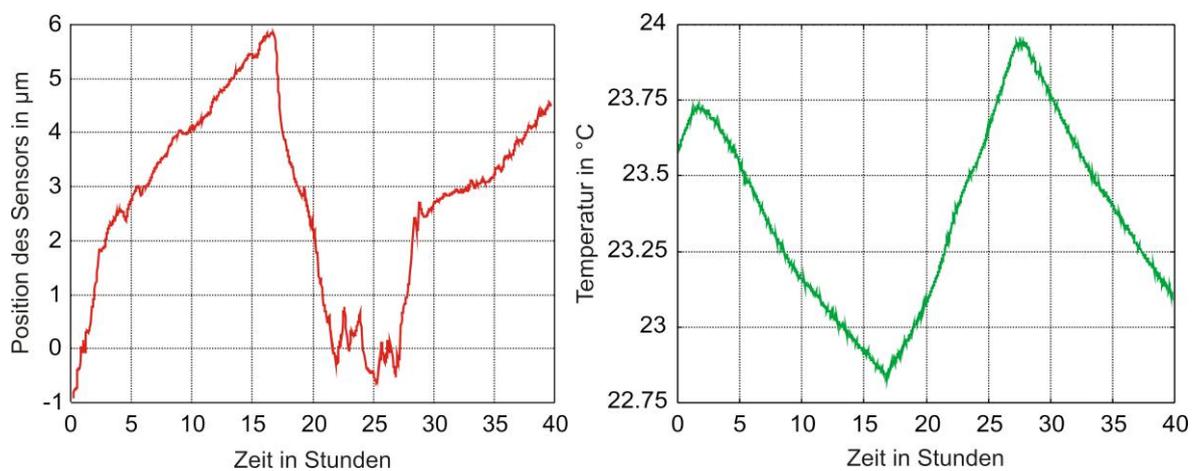


Abbildung 4.2: Temperaturabhängigkeit des Fokussensorsprototyps

Abgesehen von den ohnehin nicht optimalen und beschränkten konstruktiven Eigenschaften der Pick-Up-Einheiten dieser Bauart (z.B. bezüglich Integrierbarkeit und Modularität), sind solche Einheiten für den Einsatz in der Nanomesstechnik insbesondere durch diese Stabilitätsprobleme nicht geeignet. Dadurch wurde die Notwendigkeit einer eigenen Entwicklung des Fokussensors begründet. Um einen kompakten und stabilen Aufbau zu erzielen, wurde eine möglichst einfache Konstruktion ohne aufwendige Justagelemente (Drift- und Fehlerquellen) angestrebt. Dabei kam ein neuer Baustein, der ebenfalls aus dem Gebiet der CD/DVD Technik stammt, zum Einsatz.

## 4.2. Hologram-Laser-Unit: Arbeitsweise und Funktionen

Die rasante Entwicklung der optischen Datenspeicherungssysteme in den letzten 10-15 Jahren hat die Anforderungen an die optischen Pick-Up-Einheiten extrem angehoben. Im Vordergrund stand die Notwendigkeit der Miniaturisierung dieser optischen Antastköpfe um höhere Abtastraten, Datendichte und Stabilität, einen schnellen Zugriff und kleinere Herstellungskosten zu erzielen. Die führenden Hersteller, wie Sony, Philips, Sharp, Matsushita, NEC, Mitsubishi und

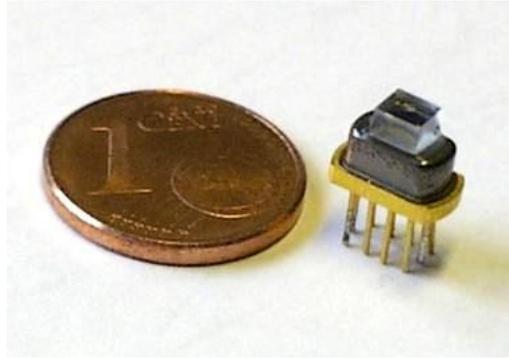


Abbildung 4.3: Hologram-Laser-Unit

andere, investierten in Richtung der Reduzierung der Größe, Masse und Kosten der optischen Abtasteinheiten erheblichen Aufwand, was zu großen Fortschritten in dieser Branche führte. Es wurden verschiedene Möglichkeiten [35, 36] vorgeschlagen und auch realisiert. Eine der etablierten Lösungen in diesem Zusammenhang auf dem Markt ist die Verwendung von holografischen optischen Elemente (HOE) [37-48]. Im Weiteren wird eine dieser Entwicklungen, die so genannte Hologram-Laser-Unit (Abbildung 4.3), vorgestellt.

Die Entstehung der Hologram-Laser-Unit beruht auf die gemeinsamen Entwicklungen der Firmen Sharp und Philips [49-53]. In diesem kompakten opto-elektronischen Baustein sind mehrere fundamentale Funktionen einer konventionellen Pick-Up Einheit integriert (Abbildung 4.4):

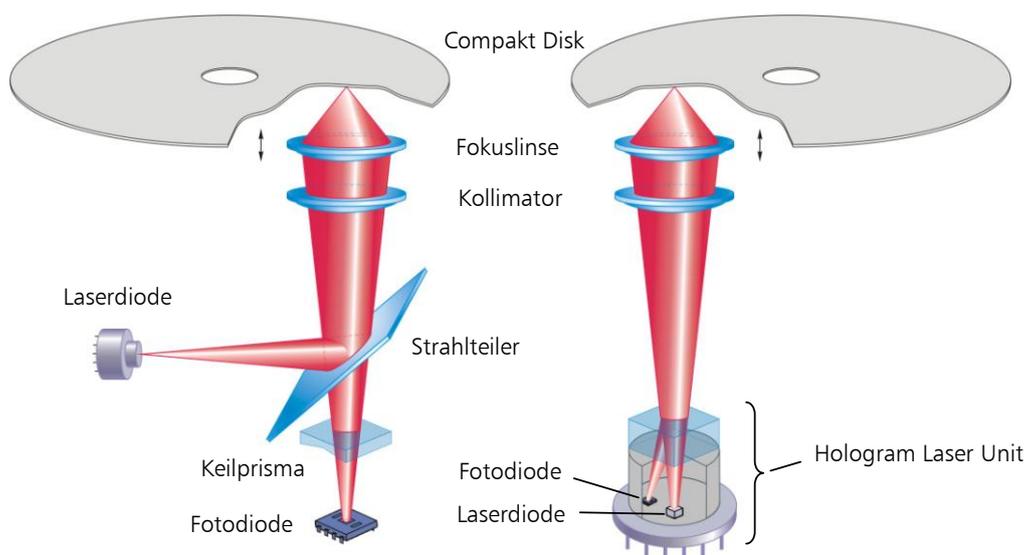


Abbildung 4.4. Konventioneller optischer Pick-Up (a),  
Pick-Up mit Hologram-Laser-Unit (b) [51]

1. Strahlungsgenerierung (Halbleiterlaserdiode);
2. Detektierung der Servosignale zur Fokusfehlerkorrektur und Spurverfolgung (Fotodioden, sowie deren Vorverstärker);
3. Strahlaufspaltung, -teilung und -ablenkung (HOE).

Im Vergleich zu einem konventionellen Aufbau, wurde dadurch die Zahl von optischen Komponenten von acht auf drei reduziert. Besonders vorteilhaft ist, dass in der Hologram-Laser-Unit die Laserdiode und der Fotoempfänger bezüglich der Kollimatorlinse in der gleichen Ebene liegen, was die Justierung viel einfacher und genauer macht. Das zusätzliche Gitter ist ebenfalls in der Unit (im Hologram) integriert und wird für die so genannte Drei-Strahl-Methode bei der Spurverfolgung der CD verwendet, indem es zwei Substrahlen erzeugt, welche parallel zum Hauptstrahl auf die CD-Oberfläche fokussiert werden.

Das HOE ist eine geätzte Glasstruktur bestehend aus zwei Teilen (Regionen) mit leicht unterschiedlichen Perioden und funktioniert ähnlich wie ein Beugungsgitter. Das von der CD reflektierte Laserlicht wird durch das HOE gebeugt und trifft auf die Fotodiodenpaare (Abbildung 4.5). Unterschiedliche Gitterperioden der beiden Teile des HOEs rufen zwei Maxima erster Ordnung hervor, die jeweils einer Bildhälfte entstammen. Diese zwei Substrahlen werden für die Fokuspunkt detektion, ähnlich wie bei der Methode mit Keilprismen (siehe Abschnitt 3.1.2.), genutzt. Entsprechend 'in line' (in einer Reihe) sind auch zwei Fotoempfängerpaare ausgerichtet.

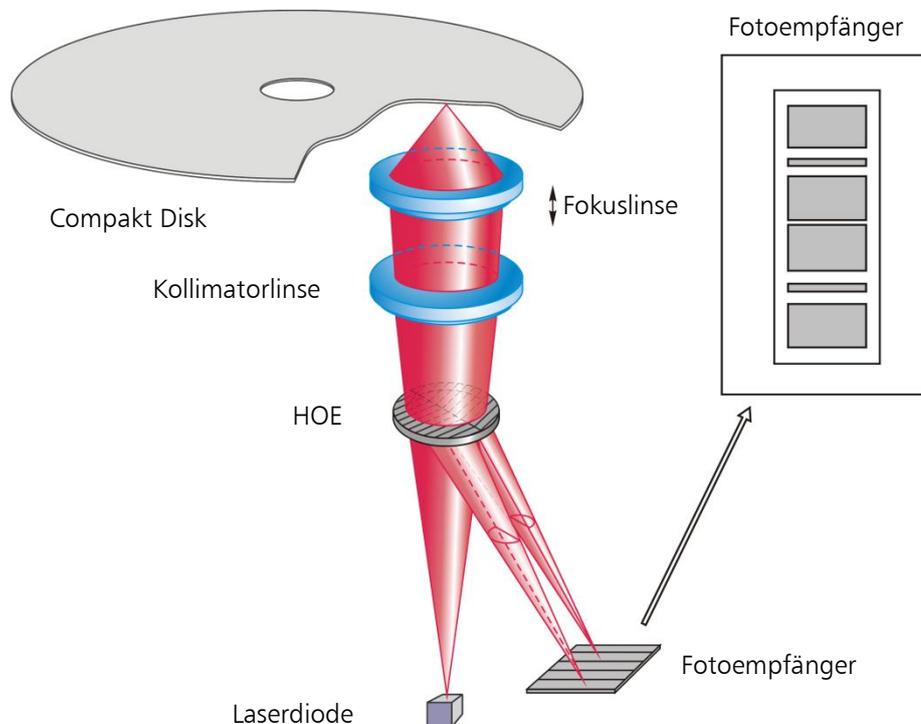


Abbildung 4.5: Funktionsprinzip des HOE's [49]

Das hier beschriebene zweiteilige HOE ist für den Einsatz in einem CD-Player üblich. Für das Abspielen von DVD's wird das HOE modifiziert, in dem man es in drei Regionen (ebenfalls mit unterschiedlichen Gitterperioden) aufgeteilt hat (Abbildung 4.6) [54-56]. Diese Anordnung ist für das Auslesen einer dual-layer DVD und geänderter Spurverfolgungsmethode notwendig. Das Fokusdetektionsprinzip bleibt dabei unverändert.

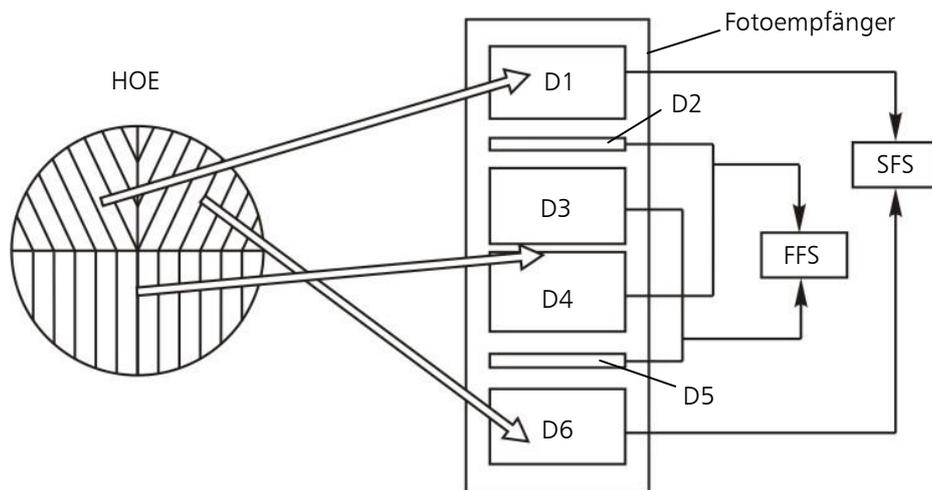


Abbildung 4.6: Funktionsprinzip des HOE's für DVD Abtastung [54]

In diesem Fall besteht die Fotodiode aus sechs Segmenten  $D_1$  bis  $D_6$ . Zur Fokusfehlerdetektion wird der reflektierte Laserstrahl durch die Halbkreisregion des HOE's auf die Segmenten  $D_3$  und  $D_4$  fokussiert. Die Segmenten  $D_2$  und  $D_5$  sind Hilfssegmente, die für eine genauere Fokusdetektion genutzt werden. Das Fokusfehlersignal (FFS) entsteht als:

$$FFS = (I_2 + I_4) - (I_3 + I_5) \quad (4.1)$$

Die Indizes  $I_2$  bis  $I_5$  bezeichnen die Ausgangssignale der entsprechenden Segmente  $D_2$  bis  $D_5$ .

Die zwei kleineren Regionen des HOE's sind für die Spurverfolgung des DVD's verantwortlich und lenken ein Teil des Laserstrahls auf die Segmente  $D_1$  und  $D_6$  ab. Das Funktionsprinzip der Spurverfolgung entspricht der so genannten DPD-Methode (Differential Phase Detection), hier verwendet man keine zusätzliche Strahlteilung durch ein Gitter wie bei CD-Abtastung, sondern man arbeitet mit einem Strahl und vergleicht dabei die Lichtmengen auf den Segmenten  $D_1$  und  $D_6$  (Spurfehlersignal:  $SFS = I_1 - I_6$ ). An dieser Stelle muss unbedingt bemerkt werden, dass beschriebene Bauart (1-Strahl Methode) für eine korrekte Antastung sehr wichtig ist, da im Fall der Strahlteilung zur Spurenverfolgung (3-Strahl Methode) weitere Hilfsstrahlen entstehen, die der Hauptstrahl in einigen Situationen beeinflussen können (Übersprechen). Dieses Phänomen wurde in der Praxis beobachtet, während beide Typen von der Hologramm-Laser-Unit untersucht

und verglichen wurden. Für die CD-Antastung steht dies allerdings kein Problem dar, weil hier während der Antastung immer die "konstanten Bedingungen" herrschen: gleiche Art und Größe von Strukturen, welche außerdem nicht gemessen, sondern nur "gelesen" werden.

Es gibt auch weitere Typen der Hologram-Laser-Unit, welche zum Abspielen (bzw. auch Beschreiben) verschiedener Arten von optischen Datenträgern (CD-RW, CD-R, oder MD [57]) entworfen wurden. Für den Einsatz im Fokussensor wurde eine DVD-Unit (Abbildung 4.3) ausgewählt. Die ausschlaggebenden Gründe dazu sind die kürzere Wellenlänge (650 nm) der Laser-Unit, was sich in einem kleinerem Abtastspot (Messspot) widerspiegelt (siehe Kapitel 3.3) und die erwähnte 1-Strahl Funktionsweise.

### 4.3. Aufbau des Fokussensors auf Basis der Hologram-Laser-Unit

Wie in vorherigem Kapitel dargelegt, verfügt die Hologram-Laser-Unit über alle notwendigen und fertig zueinander ausgerichteten optischen und optoelektronischen Komponenten, welche man sonst sehr aufwendig (manuell) justieren müsste, um einen Messsensor nach dem Fokuspunktdektionsprinzip aufbauen zu können. Zum Komplettieren des Fokussensors fehlen noch zwei optische Bauelemente und zwar die Kollimator- und die Objektivlinse, welche axial zum Hologram der Unit angebracht werden müssen. Die Wahl der beiden Linsen erfolgt entsprechend der Spezifikationen wie bereits in Kapitel 3.3 für die DVD-Abtastung angegeben: als Kollimator wird eine Linse mit  $NA = 0,11$  ( $f = 22$  mm) und als Objektiv – eine Linse mit  $NA = 0,60$  ( $f = 3,3$  mm) Linse empfohlen.

Was es bei der Auswahl der Objektivlinse noch unbedingt zu beachten gilt, ist die Berücksichtigung der Substratdicke (Transparenzschicht) der DVD falls die einzusetzende Linse speziell für die DVD Abtastung entworfen wurde (siehe Kapitel 3.3). Die Reduzierung der dadurch entstehenden sphärischen Aberration ist die wichtigste Aufgabe, um den kleinsten (beugungsbegrenzten) Spot für die gewünschte laterale Auflösung zu gewährleisten. Dies erfolgt durch den Einsatz einer zusätzlichen Kompensationsglasplatte im Strahlengang zwischen Messobjekt und Objektivlinse. Der Brechungsindex und die Dicke dieser Glasplatte müssen so gewählt werden, dass gilt:

$$d_1 \cdot n_1 = d_2 \cdot n_2 \quad (4.2)$$

Hier sind  $d_1$ ,  $n_1$  und  $d_2$ ,  $n_2$  die Dicke und die Brechungsindizes entsprechend des DVD-Substrates und der Kompensationsglasplatte. Die Parameter des DVD-Substrates  $d_1 = 0,6$  mm und  $n_1 = 1,55$  sind streng definiert.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurde ein prinzipieller Aufbau für den Fokussensor (Abbildung 4.7) gewählt. Zwischen Kollimatorlinse und der Objektivlinse wurde ein zusätzlicher Strahlteiler angeordnet, welcher die Kombination des Fokussensors mit einem Mikroskop ermöglicht. Dieser Strahlteiler muss polarisierend sein, um die maximale Leistung der Laserdiode zum Testobjekt zu leiten, und gleichzeitig minimale Störeinflüsse auf dem Kamerachip des Mikroskops von dem reflektierten Laserstrahl zu haben. Durch den Einsatz der Hologram-Laser-Unit, ist es möglich, einen äußerst kompakten „justagefreundlichen“ Fokussensor aufzubauen.

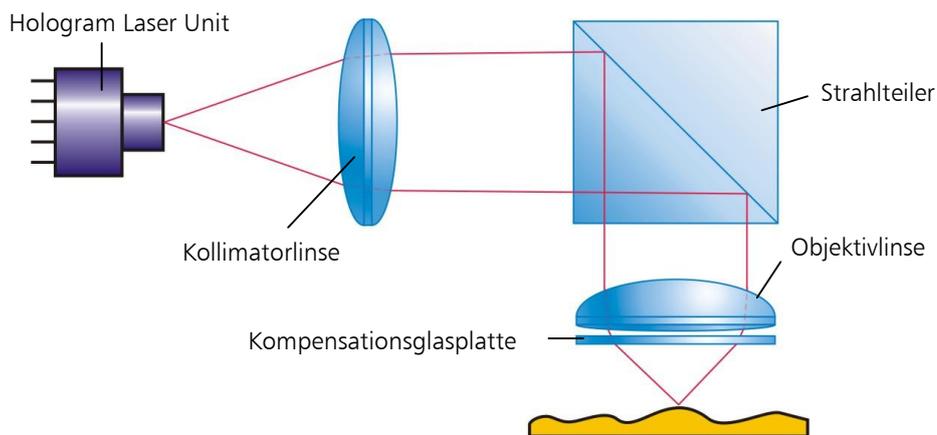


Abbildung 4.7: Prinzipieller Aufbau des Fokussensors

Die in der Hologram-Laser-Unit integrierte Laserdiode emittiert einen divergenten Laserstrahl bei einer Lichtwellenlänge von etwa 650 nm. Der Laserstrahl wird mit Hilfe der Kollimatorlinse kollimiert, so dass er parallel in den Strahlteilerwürfel eintritt. Das Licht wird von der Teilerschicht um 90° abgelenkt und über die Fokussieroptik auf die zu messende Oberfläche fokussiert. Der reflektierte Strahl durchläuft ebenfalls Fokuslinse (Objektiv), Strahlteiler, Kollimatorlinse und trifft auf das Hologram der Hologram-Laser-Unit, welches ihn zu den in der Unit liegenden Fotoempfängern ablenkt und aufspaltet. Für die Fokuspunktdetektion (wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben) werden die Signale der Fotodioden  $D_2$  bis  $D_5$  genutzt.

Die praktische Realisierung dieses prinzipiellen Aufbaus ist in der Abbildung 4.8 zu sehen. Die Hologram-Laser-Unit wird in eine Hülse eingeklebt. Diese wird ihrerseits im Sensorgehäuse geklemmt, so dass eine Drehung der Hologram-Laser-Unit um die optische Achse möglich ist. Das ist erforderlich, um die Justage der Hologram-Laser-Unit bezüglich des polarisierenden Teilerwürfel vorzunehmen. Zusätzlich beinhaltet die Hülse noch die justierbare Kollimatorlinse. Um den Einfluss von Temperaturänderungen auf den Sensor zu reduzieren, wurden die mechanischen Teile des Fokussensors aus Invar-Legierung (Fe65Ni35) hergestellt.

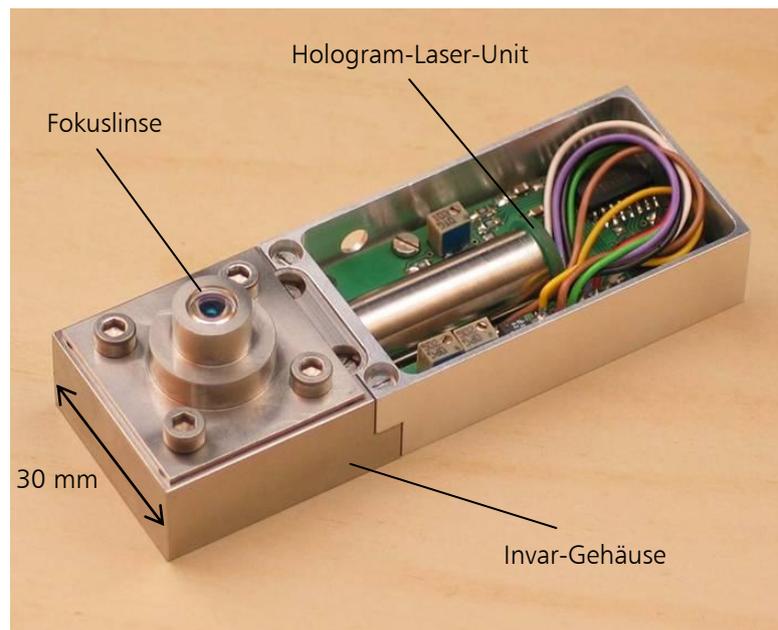


Abbildung 4.8: Praktische Realisierung des Fokussensors

Die elektrische Beschaltung des Fokussensors wird im nächsten Kapitel dargestellt.

#### 4.4. Elektronische Schaltung für den Fokussensor

Die Hologram-Laser-Unit (Abb. 4.3) ist mit folgenden elektrischen Anschlüssen ausgestattet:

1. Laser Diode
2. Monitor Diode
3. Spannungsversorgung (5 V, 2,5 V und Masse)
4. Fotodiodenausgänge zur Fokuspunktdetektion ( $S_2+S_4$  und  $S_3+S_5$ )
5. Fotodiodenausgänge zur Spurverfolgung ( $S_1$  und  $S_6$ )

Unter diesen Voraussetzungen werden an die elektronische Schaltung des Fokussensors zwei prinzipielle Aufgaben gestellt: die Spannungsversorgung und Laserdiodenansteuerung, sowie die Messsignalaufbereitung. In Abbildung 4.9 ist das Blockdiagramm der elektronischen Schaltung dargestellt.

Die Fotodiodenausgänge sind in der Unit fertig verknüpft ( $S_2+S_4$ ,  $S_3+S_5$ ) und vorverstärkt. Die Spannungsversorgung spielt in diesem Fall eine sehr wichtige Rolle, da die Referenzspannung (2,5 V) der integrierten Operationsverstärker direkt in das Messergebnis einfließt.

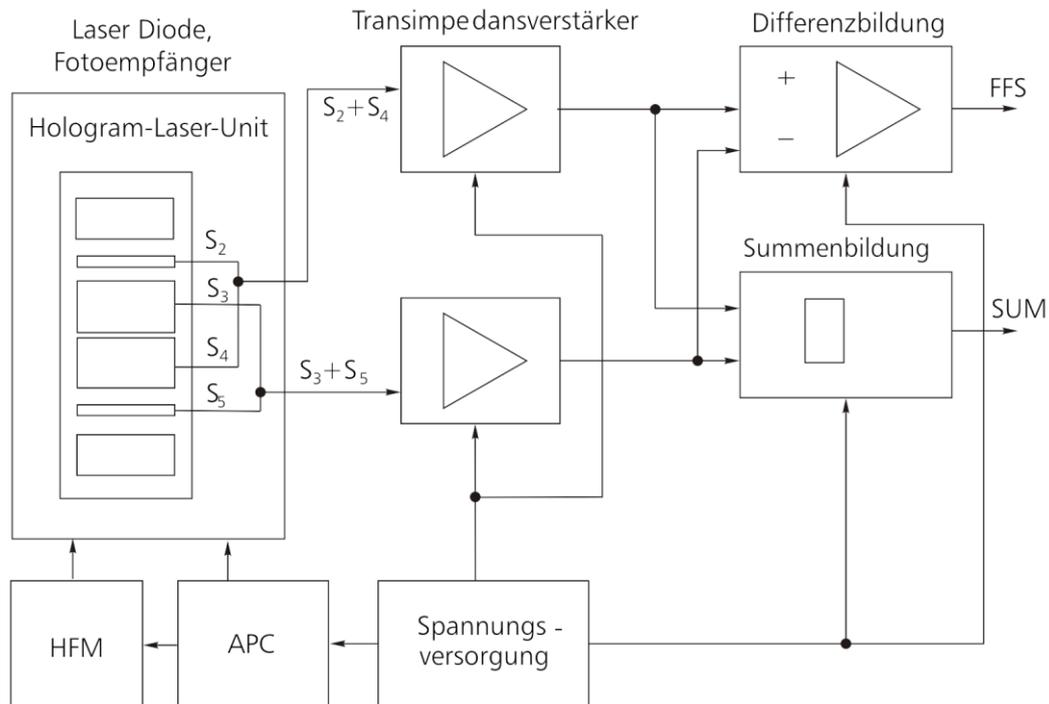


Abbildung 4.9: Blockdiagramm der elektronischen Schaltung für den Fokussensor

Außerdem hängen von der Qualität der Versorgungsspannung die Stabilität und die Langlebigkeit der Laserdiode ab. Die Stabilität der Strahlungsleistung der Laserdiode ist von besonderer Bedeutung für die gesamte messtechnische Leistung des Fokussensors. Deswegen wird eine spezielle APC (Automatic Power Control)-Schaltung eingesetzt, welche im Verbund mit der in der Hologram-Laser-Unit integrierten Monitordiode die Eliminierung von Strahlungsschwankungen der Laserdiode gewährleistet.

Einen weiteren wichtigen Block in der Elektronik des Fokussensors bildet eine spezielle Schaltung zur Hochfrequenzmodulation (HFM) der Laserdiode (siehe Kapitel 5.3). Die Modulationsfrequenz und die Amplitude lassen sich dabei mit Hilfe von zwei Potentiometern einstellen.

Außerdem, da die Laserdiode sehr empfindlich auf Stromspikes reagiert, ist eine zusätzliche Schaltung im Laserdiodeansteuerungskreis vorgesehen, welche die Zerstörung der Laserdiode durch plötzliche Stromschwankungen vermeidet.

Als Messsignale des Fokussensors werden zwei Signale gebildet: das Fokusfehlersignal  $FFS = (S_2 + S_4) - (S_3 + S_5)$  und zusätzlich ein Hilfssignal, das so genannte Summensignal  $SUM = (S_2 + S_4) + (S_3 + S_5)$ , welches ein Maß für die Reflexion des Messobjektes ist (siehe Kapitel 5.2). Dazu werden die in der Hologram-Laser-Unit vorverstärkten und verknüpften Einzelsignale mit Hilfe von rauscharmen Operationsverstärkern entsprechend subtrahiert bzw. addiert.

Das eigentliche Messsignal wird als Quotient von diesen beiden Signalen gebildet:

$$S_{mess} = \frac{FES}{SUM} \quad (4.3)$$

## 4.5. Kombination des Fokussensors mit einem Kameramikroskop

### 4.5.1. Entwicklung und Aufbau eines Kameramikroskops

Die grundlegende Idee der Kombination des Fokussensors mit einem Kameramikroskop entstand bereits während der Arbeiten an Fokussensorprototyp (siehe Kapitel 4.1). Als ein sehr großes Problem während der optischen Antastung mit dem Fokussensor dieser Bauart wurde die Schwierigkeit beim Auffinden und Wiederfinden von interessierenden Gebieten auf der Prüflingsoberfläche, besonders bei komplizierten Strukturen, festgestellt. Dazu kam noch die Notwendigkeit für die Beobachtung des Messvorganges selbst. Man verfolgte und tastete die Oberfläche quasi blind an, was zu einem großen Zeitaufwand bei einer Messung führte. Die Gefahr einer Kollision des Messobjektives mit der Probe und damit die Zerstörung oder Beschädigung beider war hoch. Das alles führte dazu, ein Kamerasystem (Kameramikroskop) zur Beobachtung des Antast- und Messvorganges mittels Fokussensors zu konstruieren.

Als ideale Schnittstelle zwischen dem Fokussensor und dem Kameramikroskop bietet sich die Fokuslinse (das Objektiv) des Fokussensors an, da ihre opto-mechanischen Parameter vergleichbar mit den Objektivparametern der klassischen Mikroskopie sind. Für die Integration der Mikroskopoptik wurde der zusätzliche Teilerwürfel zwischen der Kollimator- und Objektivlinse des Fokussensors, welcher den Messstrahl des Sensors um 90° umlenkt (Abb. 4.7), genutzt.

Wichtige Eckpunkte des Aufbaukonzepts des Kameramikroskops wurden aus den folgenden Betrachtungen abgeleitet. Die Objektivlinse des Fokussensors mit einer Brennweite von 3,3 mm und einem Durchmesser von 4,5 mm dient als Mikroskopobjektiv. Die Prüflingsoberfläche befindet sich genau im Brennpunkt. Es muss eine entsprechende Vergrößerung sowie eine zusätzliche Beleuchtung der Oberfläche realisiert werden. Schärfentiefe und beleuchtete Objektfläche müssen über Blenden regulierbar sein. Um verschiedene feine Oberflächen auflösen zu können, muss die Tubuslinse des Kamerasystems austauschbar sein.

Daher wurde das optische System entsprechend einem zusammengesetzten Mikroskop aufgebaut. Das Objekt befindet sich im Brennpunkt der Objektivlinse des Fokussensors, das entstehende achsparallele Strahlenbündel wird mit einer weiteren sammelnden Linse, der Tubuslinse, auf den Kamerachip fokussiert.

### 4.5.2. Realisierung des Kameramikroskops

Ein sehr wichtiger Faktor bei der Entwicklung des Kameramikroskops ist die zusätzliche Beleuchtung des Messobjekts. Sie wurde nach dem Prinzip der Köhlerschen Beleuchtung realisiert. Diese, durch August Köhler im Jahre 1893 entwickelte, Anordnung besteht aus zwei ineinander verschachtelten Strahlengängen (Pupillenstrahlengang und Lukenstrahlengang), auf der Basis von zwei sammelnden Systemen (Abb. 4.10.): dem Kollektor und dem Kondensor, mit zwei Blenden: Apertur- und Leuchtfeldblende [58]. Dabei sind die folgenden drei Bedingungen zu erfüllen:

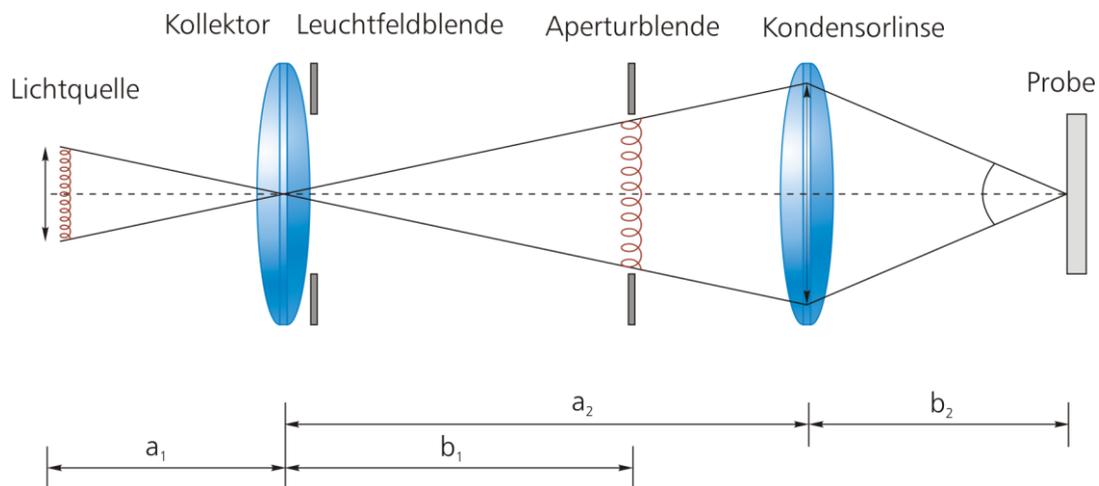


Abbildung 4.10: Klassische Variante der Köhlerschen Beleuchtung (Durchlicht)

1. Der Kollektor mit der Brennweite  $f_1$  soll die Glühwendel (Lichtquelle) in die Ebene der Aperturblende scharf abbilden:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} \quad (4.4)$$

2. Die Aperturblende soll in der Brennebene der Kondensorlinse stehen. Die von einem Punkt in der Aperturblende ausgehenden Strahlen werden dadurch zu Parallelstrahlen.
3. Der Abstand  $b_2$  zwischen Kondensorlinse und Objektebene ist so zu wählen, dass die Leuchtfeldblende in der Objektebene scharf abgebildet wird:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} \quad (4.5)$$

wobei aufgrund von Bedingungen 1 und 2 gilt:

$$a_2 = b_1 + f_2 \quad (4.6)$$

Mit Hilfe des Kollektors wird das Licht der Beleuchtungsquelle gebündelt. In der direkt an der Kollektorlinse angebrachten Leuchtfeldblende entsteht ein sehr helles, aber völlig diffuses, unscharfes Bild der Leuchtquelle. Durch den Kondensor wird dieses Bild der Leuchtfeldblende zusammen mit dem gleichmäßig verteilten Licht auf der Ebene des Objektes abgebildet. Die Lichtquelle selbst wird durch den Kollektor in der Ebene einer zweiten Blende (Aperturblende) abgebildet. Diese befindet sich in der Brennebene des Kondensors, der somit ein paralleles Strahlenbündel durch die Probe leitet.

Durch die Verwendung der Köhlerschen Beleuchtung erhält man also nie ein scharfes Bild der Leuchtquelle und des Objektes in der gleichen Ebene. Eine Verfälschung des betrachteten Bildes durch Inhomogenitäten der Leuchtquelle ist somit ausgeschlossen und das vorhandene Licht wird optimal ausgenutzt. Außerdem wird objekt- und kontrastschädliches Streulicht minimiert, d.h. es werden störende Lichtreflexe (z.B. von den Tubusinnenwänden) sowie Ungleichmäßigkeiten der Lichtquelle und der Optik weitestgehend beseitigt. Dabei kann die beleuchtete Fläche mit der Leuchtfeldblende und der Winkel des Beleuchtungskegels (damit auch die Schärfentiefe) mit der Aperturblende eingestellt werden. Die Köhlersche Beleuchtung ist somit für Hellfeldmikroskopie die effektivste Art der Beleuchtung.

Die Optik des Kameramikroskops wurde entsprechend den genannten Forderungen der Köhlerschen Beleuchtung dimensioniert. Dabei wurde jedoch die Auflichtmikroskopvariante (Unendlich-Optik-Mikroskop) realisiert, da sie sich viel flexibler und kompakter in die möglichen Messanordnungen integrieren lässt. Der Unterschied dieser Variante besteht in einem zusätzlichen Strahlteiler zwischen der Kondensor- und Objektivlinse zur Trennung des Beleuchtung- und Abbildungsstrahlenganges des Mikroskops. Außerdem musste bei den Berechnungen berücksichtigt werden, dass der Kondensor die Aperturblende (mit der Abbildung der Lichtquelle) scharf in der hinteren Objektivenebene abbilden sollte, um die Köhlerschen Forderungen nicht zu verletzen. Gegenüber der Durchlichtbeleuchtungsvariante bekommt dadurch das Köhlersche Beleuchtungssystem einige Abwandlungen [59].

Der entstandene prinzipielle Aufbau ist auf der Abbildung 4.11 zu sehen. Die wichtigsten Funktionen der einzelnen Elemente des Aufbaus lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Kollektor bildet die Lichtquelle in die Aperturblendenebene scharf ab (erstes Zwischenbild der Lichtquelle).

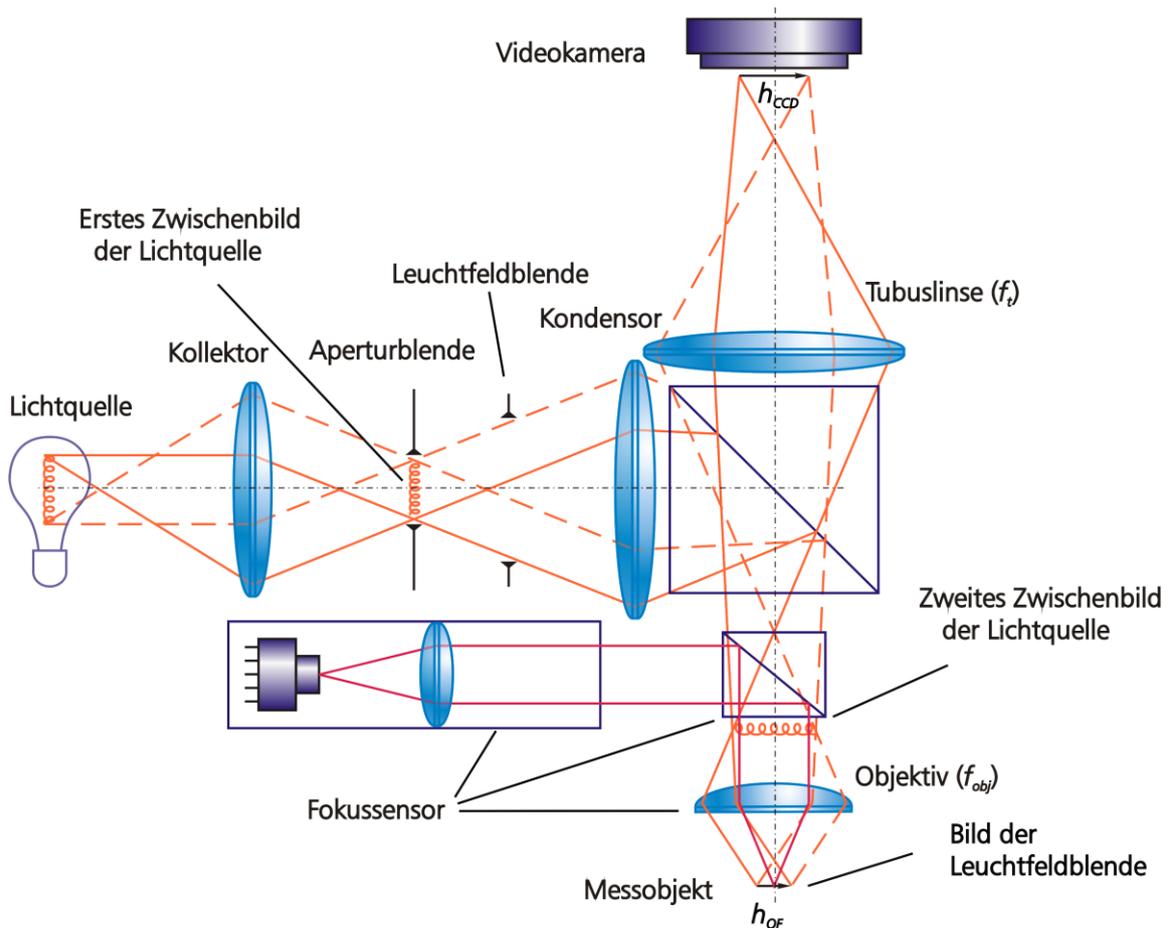


Abbildung 4.11: Prinzipieller Aufbau des Kameramikroskops

- Die Leuchtfeldblende befindet sich in der Brennebene des Kondensators.
- Der Kondensator bildet das erste Zwischenbild der Lichtquelle in die hintere Objektivbrennebene scharf ab (zweites Zwischenbild der Lichtquelle).
- Das Objektiv projiziert dieses zweite Zwischenbild der Lichtquelle ins Unendliche. Das Bild der Leuchtfeldblende wird in die Objektebene abgebildet.
- Das vom Objektiv aufgenommene Gesamtbild besteht somit aus dem diffus beleuchteten scharfen Objekt und der umgebenden schwarz scharf abgebildeten Leuchtfeldblende. Dieses Bild wird durch die Tubuslinse vergrößert auf dem Kamerachip abgebildet.
- Die Aperturblende reguliert den Öffnungswinkel der Beleuchtung (Schärfentiefe und Kontrast) und ist nicht sichtbar im Kamerabild.
- Die Leuchtfeldblende verändert den beleuchteten Probenbereich. Sie wird durch den Kondensator und das Objektiv in der Messobjektebene scharf abgebildet.

Der Beleuchtungsstrahlengang wurde mit optimal dimensionierten Elementen berechnet und konstruiert. Ausgangsparameter war dabei die Kamerachipgröße  $h_{CCD}$ , welche voll ausgeleuchtet werden muss, was seinerseits von der beleuchteten Messobjektfläche  $h_{OF}$  bzw. der Vergrößerung des Kameramikroskops abhängt.

Bei einem Mikroskop mit unendlich-Optik wird die Kamera ohne Okular verwendet, dabei wird das Bild von System "Objektiv + Tubuslinse" direkt auf den Kamerachip projiziert. Die Vergrößerung des Mikroskops ergibt sich aus dem Verhältnis der Brennweiten der beiden verwendeten Linsen (Objektiv- und Tubuslinse). Dies geschieht nach folgender Verhältnisgleichung [60]:

$$\Gamma = \frac{f_t}{f_{obj}} = \frac{y_1}{y} \quad (4.7)$$

und die Brennweite der Tubuslinse ist damit:

$$f_t = \frac{y_1}{y} \cdot f_{obj} \quad (4.8)$$

Hier ist  $f_{obj}$  die Brennweite der Objektivlinse und beträgt für eine DVD-Objektivlinse standardmäßig 3,3 mm.

$y$  - ist die kleinste Objektgröße, die noch aufgelöst werden kann und wird als durch die Objektivlinse maximal auflösbarer Punktabstand eingesetzt.

$y_1$  - ist die kleinste auflösbare Bildgröße auf dem Kamerachip und entspricht der Pixelgröße des Kamerachips. Dabei gilt: wenn man zwei Punkte in einem Digitalbild auflösen will, muss nach dem Abtasttheorem von Shannon und Nyquist die Quantisierung doppelt so fein sein, wie die maximal mögliche Ortsauflösung. Man benötigt zwei Pixel zur digitalen Auflösung der kleinsten Objektgröße  $y$ . Zum Beispiel für eine 2 Megapixel USB-Kamera [61] mit einer Pixelgröße von  $4,2 \times 4,2 \mu\text{m}$  (Pixeldiagonale =  $5,9 \mu\text{m}$ ) beträgt  $y_1$ :  $2 \times 5,9 \mu\text{m} = 11,8 \mu\text{m}$ .

Da in der Mikroskopie das Rayleigh-Kriterium als Grenze für die maximale laterale Auflösung zweier Objekte gilt, berechnet man die Größe  $y$  nach folgender Gleichung [62]:

$$y = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2 \cdot NA} \quad (4.9)$$

Die Größen  $\lambda$  und  $NA$  bezeichnen entsprechend die Wellenlänge der Mikroskopbeleuchtung und die Numerische Apertur der Objektivlinse. Für unseren Fall  $\lambda = 550 \text{ nm}$  (mittlere Wellenlänge für Weißlichtbeleuchtung) und  $NA = 0,6$  beträgt  $y$  etwa 560 nm.

Für die angegebenen Parameter ergibt sich aus (4.8) die Tubuslinsenbrennweite von  $f_{t\_max} \approx 70$  mm. Damit erreicht man also die förderliche Mikroskopvergrößerung von etwa 21. Eine Überschreitung dieses Wertes führt zu der so genannten leeren Vergrößerung des optischen Systems.

Jetzt kann man anhand der berechneten Brennweite der Tubuslinse das Objektfeld des Kameramikroskops (und entsprechend die zu beleuchtende Messobjektfläche  $h_{OF}$ ) aus der Gleichung für die Mikroskopvergrößerung (4.7) ermitteln:

$$h_{OF} = \frac{h_{CCD} \cdot f_{obj}}{f_t} \quad (4.10)$$

dabei ist  $h_{OF}$  Objektfeldgröße, welche durch die Kamerachipgröße  $h_{CCD}$  „gesehen“ wird.

Für  $f_{obj} = 3,3$  mm,  $f_t = 70$  mm und  $h_{CCD} = 8,4$  mm (Diagonalgröße des USB-Kamerachips) bekommt man eine Objektfeldgröße von  $h_{OF} \approx 400 \mu\text{m}$ . Dies ist die Bezugsgröße, auf die der Beleuchtungsstrahlengang berechnet wird. Dementsprechend wurden anhand von Gleichungen 4.4-4.6 alle notwendigen Größen  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  bezogen auf  $f_1$ ,  $f_2$  (siehe Abb.4.10.) ermittelt. Der Abstand  $b_2$  wird dabei konstruktiv durch die Einbaubedingungen beeinflusst und beträgt mindestens 65 mm.

Um die kleinstmöglichen baulichen Abmessungen des Mikroskops zu realisieren, wurden die Kollektor- und Kondensorlinse entsprechend mit  $f_1 = 5$  mm und  $f_2 = 25$  mm ausgewählt. Die maximalen Größen der Leuchtfeld- und Aperturblende betragen dabei entsprechend ca.  $\varnothing 3$  mm und  $\varnothing 2,1$  mm (gerechnet für  $h_{OF} = 400 \mu\text{m}$ ). Eine Verkleinerung der Aperturblende verringert die Beleuchtungsstärke auf dem Kamerachip, aber sie verbessert die Bildschärfe für außeroxiale Bildpunkte und die Schärfentiefe. Eine Vergrößerung des Aperturblendendurchmessers über diesen Wert hinaus führt zu Vignettierungen.

Der realisierte Gesamtaufbau des beschriebenen Kameramikroskops ist in der Abbildungen 4.12 ohne und in 5.2 mit Fokussensor zu sehen. Das Mikroskopgehäuse wurde aus drei Hauptteilen aufgebaut: Tubus, Beleuchtungsmodul und Zwischendeckel. Das Licht zur Mikroskopbeleuchtung wurde über Lichtwellenleiter von einer Kaltlichtquelle mit regulierbarer Halogenlampenleistung zugeführt. Dadurch wird der Wärmeeintrag in den Messaufbau minimiert.

Die Konstruktion des Mikroskops wurde so ausgeführt, dass alle einzelnen Elemente (außer dem Strahlteiler) justierbar bleiben. Die seitlichen Bohrungen im Beleuchtungsmodul ermöglichen die Anpassung der Beleuchtungskomponenten an unterschiedliche Kameras (Chipgrößen), Objektivlinsen und Tubuslinsen. Damit kann auch die Vergrößerung des Mikroskops durch das Einsetzen anderer Tubuslinsen geändert werden. Die Apertur- und Leuchtfeldblende wurden als

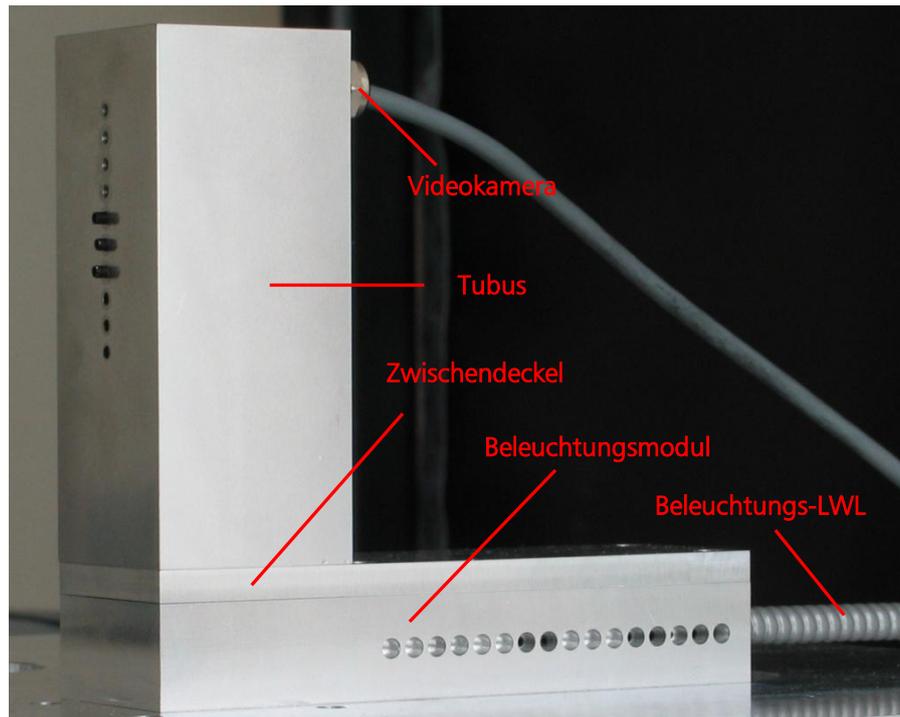


Abbildung 4.12: Praktische Realisierung des Kameramikroskops

mechanische Irisblenden mit einem Außendurchmesser von 14,8 mm ausgewählt. Die Irisblende kann dabei von 0,7 mm bis 8 mm Öffnungsdurchmesser stufenlos eingestellt werden.

Ferner wurde im Strahlengang zwischen Strahlteiler und Tubuslinse ein zusätzlicher Polfilter angebracht. Der polarisierende Strahlteiler des Fokussensors lässt ca. 1 bis 3 % der Laserstrahlung in Richtung Mikroskop, trotz bester Qualität und sorgfältiger Justierung durch. Diese Strahlen werden durch die Tubuslinse auf die Kamera fokussiert und verursachen eine Übersteuerung des Kamerabildes. Der Polfilter soll diese bildstörende Laserstrahlung des Fokussensors, die von der Messoberfläche und von den Innenseiten des Strahlteilers durchkommt, eliminieren.

Ein typisches Kamerabild während einer Messung an einer Si-Struktur ist in Abbildung 4.13 zu sehen. Die laterale Größe eines hier abgebildeten Rechteckes beträgt ca.  $110 \times 80 \mu\text{m}$ , die Höhe ca.  $10 \mu\text{m}$ . Der weiße Fleck in der Mitte des Bildes ist der fokussierte Laserspot des Fokussensors. Er markiert damit die Stelle auf der Messoberfläche, wo man im Moment gerade misst. Der Durchmesser dieses Messflecks erscheint im Kamerabild größer als in Wirklichkeit. Dies geschieht durch die Streuung des fokussierten Laserstrahls an der Prüflingsoberfläche und die große Beleuchtungsstärke an dieser Stelle im Vergleich zu umliegenden beleuchteten Messobjektfeld.

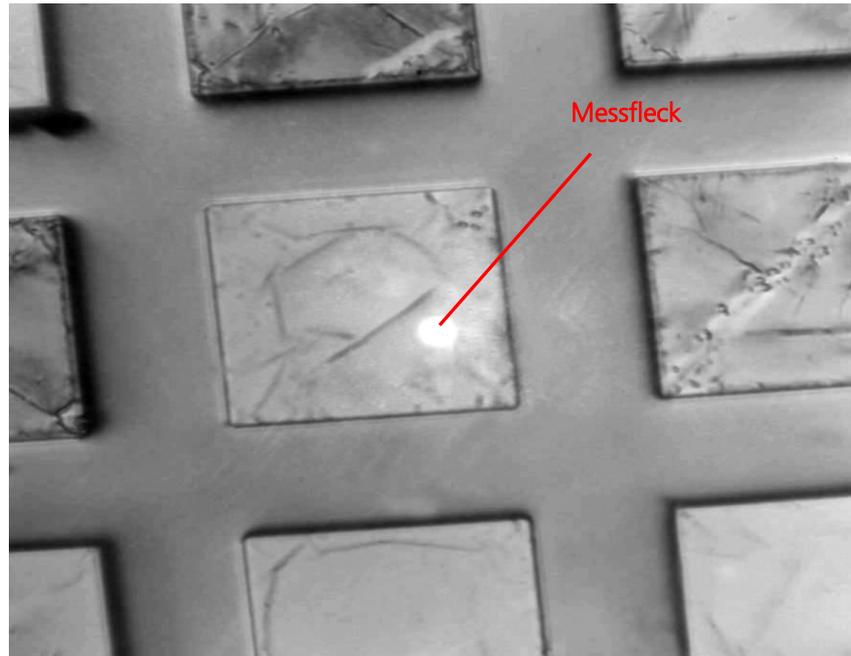


Abbildung 4.13: Kamerabild während einer Messung

## 4.6. Kapitelzusammenfassung

Den Schwerpunkt dieses Kapitels bildet die Erläuterung des Aufbaus des Fokussensors. Besonders detailliert wurde der Hauptbaustein, das eigentliche Herz des Fokussensors, die so genannte Hologram-Laser-Unit vorgestellt. Entsprechend den Funktionen dieser Hologram-Laser-Unit wurde die elektrische Schaltung des Fokussensors erklärt und dessen opto-mechanische Konstruktion präsentiert.

Im Kapitel wurden außerdem die Vorarbeiten an einem Prototyp des Fokussensors kurz dargelegt, um in die Problematik anzuleiten und den gegenwärtigen Aufbau zu begründen.

Ferner ist hier die Kombination des Fokussensors mit einem Kameramikroskop detailliert behandelt, da diese sehr viel für eine komfortable Nutzung des Fokussensors bedeutet. Dabei wurde besonders ausführlich die Beleuchtung des Kameramikroskops erörtert.

Im nächsten Kapitel wird auf die Funktionsweise und messtechnische Eigenschaften des Fokussensors eingegangen.

## 5. Messtechnische Eigenschaften des Basissensors

### 5.1. Integration des Basissensors in die Nanopositionier- und Nanomessmaschine

#### 5.1.1. Die Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Das Nanosensorsystem ist für die Anwendung in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine) entwickelt worden. Im Weiteren wird diese Messmaschine kurz vorgestellt.

Die NPM-Maschine ist eine Entwicklung des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau in Kooperation mit der SIOS Messtechnik GmbH [63, 64, 65]. Sie stellt ein dreidimensionales Koordinaten- Positionier- und Messsystem höchster Genauigkeit mit einem Messbereich von 25 mm x 25 mm x 5 mm (für X-, Y- und Z-Achse) dar. Die aktuelle Auflösung beträgt 0,1 nm und die Positionierreproduzierbarkeit  $< 3$  nm im ganzen Messbereich. Die Verfahrensgeschwindigkeiten liegen bei 6 mm/s für X- und Y-Achse, und  $\leq 50$  mm/s für die Z-Achse.

Die ausgezeichnete Leistung der NPM-Maschine beruht auf drei wichtige Eigenschaften:

1. Abbe Fehler-Freie Anordnung von der Laserinterferometern:

Die grundlegende Idee des Aufbaukonzeptes der NPM-Maschine ist die konsequente Realisierung des Abbekomparator-Prinzips in allen drei orthogonalen Koordinatenachsen. Das bedeutet, dass sich die Messachsen von drei Längenmesssystemen (Laserinterferometern) in dem Berührungspunkt des Antastsensors mit dem Messobjekt schneiden (Abbildung 5.1). Durch diese Anordnung kann grundsätzlich auch bei größeren Strukturhöhenunterschieden abbefehlerfrei gemessen werden.

2. Anwendung eines effektiven Konzepts zur Kompensation der translatorischen Fehler bei der Bewegung der Spiegelecke:

Die Positionierung der Spiegelecke erfolgt mit einem dreiachsigen elektromagnetischen Antriebssystem. Für die X- und Y-Achsen wurde jeweils ein Antriebssystem verwendet. Für die Z-Achse werden vier einzelne Antriebe verwendet. Dadurch ist es möglich, durch unterschiedliche Ansteuerung der Antriebe, zusätzlich den Roll- und Nickwinkel der Spiegelecke zu beeinflussen. Die Winkeländerungen bei der Positionierung werden durch zwei Winkelsensoren, die auf dem Prinzip des Autokollimationsfernrohrs beruhen, direkt an der Spiegelecke gemessen. Die Winkelabweichungen werden zur Winkelregelung bzw. Fehlerkorrektur benutzt.

## 3. Nutzung der Nanosensoren nur in der Null-Indikator-Funktionsweise:

In diesem Modus wird während des Messvorgangs nicht der Sensor über dem Messobjekt bewegt, sondern das Messobjekt selbst, wobei der Sensor fest im Raum bleibt. Die Messsignale dieses Sensors werden zur Steuerung der Nanomessmaschine und auch zur Messwertbildung genutzt.

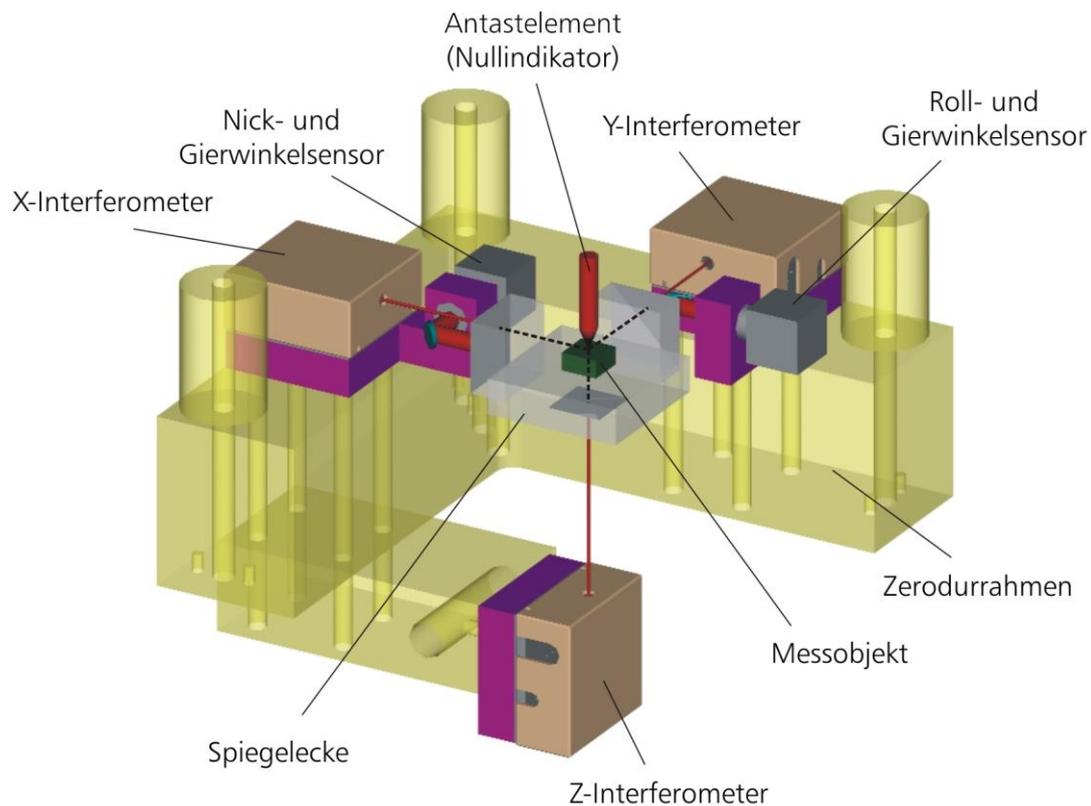


Abbildung 5.1: Grundprinzip der NPM-Maschine

Das Messobjekt liegt direkt auf einer äußerst präzise gefertigten Spiegelecke aus Zerodur. Die Position der Spiegelecke wird durch die drei fest angeordneten Miniaturinterferometer mit einer Auflösung von 0,1 nm erfasst. Das Licht für die Interferometerköpfe wird von drei stabilisierten He-Ne-Lasern über Lichtwellenleiter aus der Elektronikeinheit übertragen. Dadurch entsteht ein kompakter und temperaturstabiler Aufbau der NPM-Maschine. Außerdem wurden zur weiteren Erhöhung der Temperaturstabilität die meisten Befestigungsteile der Interferometer und des Antastsystems aus speziellen ausdehnungsarmen Materialien, wie Zerodur oder Invar, gefertigt.

Das Kernstück der Elektronik ist ein digitaler Signalprozessor (DSP), der alle eingehenden Messsignale verarbeitet, die Antriebssysteme regelt und den Messablauf steuert. Die Steuerung

und der Datenaustausch mit der NPM-Maschine erfolgt von einem PC über eine USB-Schnittstelle mit Hilfe einer speziellen Script-Sprache. Dieses Programm, der so genannte *NMM Skript Viewer*, stellt eine Reihe von Befehlen zur Verfügung, mit denen komplexe Messabläufe programmiert werden können.

Die Einsatzmöglichkeiten der NPM-Maschine sind sehr stark von dem verwendeten Antastsystem abhängig. Aufgrund der mechanischen und elektrischen Schnittstellen können unterschiedliche Sensoren in die NPM-Maschine integriert werden. Das Antastsystem muss von oben auf einer Trägerplatte montiert werden. Der Antastpunkt des Sensors soll im Schnittpunkt aller drei Messachsen der NPM-Maschine liegen. Der Antastsensor sollte ein wegproportionales Spannungssignal von max.  $\pm 10\text{ V}$  am Ausgang bereitstellen. Die Auflösung des dafür vorgesehenen AD-Wandlers der Messmaschine beträgt 16 bit.

### 5.1.2. Einbau, Messprinzip und Messmodi des Basissensors in der NPM-Maschine

Der mechanische Einbau des Fokussensors (Basissensors) und des Kameramikroskops gestaltet sich auf Grund seiner kompakten Geometrie ziemlich einfach. Der Fokussensor (siehe Abb. 4.8) wurde mittels vier Schrauben mit der Mikroskopeinheit (siehe Abb. 4.12) ober- und unterhalb der Trägerplatte der NPM-Maschine montiert (siehe Abb. 5.2). Die Trägerplatte selbst wird auf den drei Zerodur-Säulen der NPM-Maschine befestigt.

Die Höhe des Fokussensors (bzw. des Objektivlinsenhalters) wurde so ausgewählt, dass sich der Messpunkt des Sensors im eingebauten Zustand im Schnittpunkt der drei Interferometerstrahlen

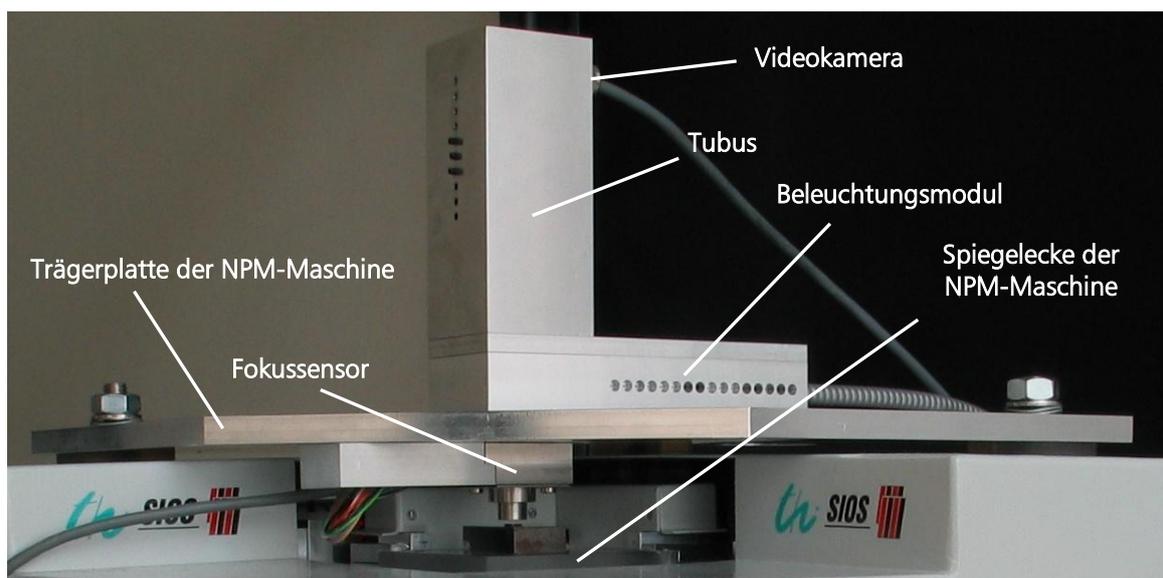


Abbildung 5.2: Gesamtaufbau des Kameramikroskops

befindet. Dabei muss der Fokussensor beim Einbau genau auf diesen Punkt einjustiert werden. Für die Justage wird der "Restlaserstrahl" des Z-Interferometers genutzt, der die Spiegelschicht der Spiegelecke durchdringt (ca. 2 bis 3% der Gesamtlaserleistung). Dieser Laserstrahl trifft dann in die Objektivlinse des Fokussensors, und kann von oben mit abgebautem Tubus des Kameramikroskops beobachtet und mittig einjustiert werden.

Auf Grund des Funktionskonzepts der NPM-Maschine sind zwei mögliche Arbeitsweisen für das Messsystem mit integriertem Fokussensor realisierbar: der Positioniermodus und der Scanmodus.

Im Positioniermodus des Messsystems regelt die Maschine in vertikaler Richtung auf eine angegebene absolute Position des Z-Interferometers, welche sich im Arbeitsbereich der Fokussensorkennlinie (siehe Abb. 5.8) befinden muss. Das Messergebnis des Fokussensors wird dabei dem wegproportionalen Fokusfehlersignal entsprechen und kann auch separat (ohne die DSP-Einheit) ausgewertet werden. Der vertikale Messbereich wird durch die Größe des Arbeitsbereiches der Fokussensorkennlinie (ca.  $\pm 3,5 \mu\text{m}$ , siehe Abb. 5.8) begrenzt.

Im Scanmodus arbeitet der Fokussensor als Nullindikator. Die NPM-Maschine nutzt das Fokusfehlersignal mit dem für den DSP-Eingang der Maschine relevanten Signalbereich von  $\pm 10\text{V}$  für die Regelung und regelt ihre Z-Position auf einen Sollwert der Fokusfehlerkennlinie. Die Z-Position der Spiegelecke ändert sich somit proportional zum gemessenen Profil. Das Messergebnis wird dabei im einfachsten Fall aus Z-Interferometerwerten bestehen.

Mit Hilfe des Scanmodus kann der volle vertikale Bewegungsbereich der NPM-Maschine von 5 mm ausgenutzt werden, da die Messmaschine ständig auf den Soll- bzw. Nullwert des Fokussensors (siehe Abb. 3.13) nachregelt. Aus diesem Grund wurden die meisten Messabläufe im Scanmodus der NPM-Maschine durchgeführt. Der Positioniermodus ist trotzdem in manchen Fällen nützlich, z.B. bei Messung komplizierter Strukturen (Rauheiten mit scharfen Kanten in 1 bis  $5 \mu\text{m}$  Bereich oder Strukturen mit  $>20^\circ$ -geneigten Kanten), wo die Oberflächendetektion erschwert ist und die Regelung aussetzen bzw. fehlschlagen kann.

Ferner verfügt die NPM-Maschine über einen zweiten DSP-Sensoreingang. Dieser kann für das Summensignal des Fokussensors (Kapitel 4.4, 5.2) genutzt werden. Damit ist die elektrische Anbindung des Fokussensors in die NPM-Maschine bereits vollständig.

Weiterhin wurden für den Scanmodus zwei verschiedene Messalgorithmen mit *NMM Skript Viewer* programmiert und getestet: einer mit exakter und der zweite mit dynamischer Messwertaufnahme. Im ersten Fall stoppt das Programm die laterale Bewegung des Messobjekts (entlang X- oder Y-Achse) in jedem Messpunkt und wartet bis der Sollwert (Nullwert) erreicht bzw. ausgeregelt wird, dann wird der jeweilige Z-Interferometerwert aufgenommen. So besteht das gemessene Höhenprofil eines Messobjekts ausschließlich aus Z-Interferometerwerten.

Bei der zweiten Variante werden dynamische Messungen ermöglicht, das Messobjekt wird dabei kontinuierlich entlang der Scanlinie bewegt und das Fokusfehlersignal wird zwar ständig auf Null ausgeregelt kann jedoch auch noch eine Regelabweichung aufweisen. Es wird eine permanente Differenzbildung zwischen dem Ausgangssignal des Fokussensors und dem Längenwert des Z-Interferometers der NPM-Maschine ausgeführt. In diesem Fall liefert das Z-Interferometer anhand der Trägheit der Messmaschine den niederfrequenten Anteil des Messergebnisses und die nichtausgeregelt Abweichungen des Fokussignals sind die hochfrequenten Anteile des Messergebnisses (Abbildung 5.3).

Die dynamische Messmethode ermöglicht viel kürzere Messzeiten gegenüber der punktuellen Messwertaufnahme. Damit sind Messungen im Scanmodus bis zu maximal möglichen lateralen Verfahrensgeschwindigkeit der NPM-Maschine von 6 mm/s möglich. Die realisierbare Scangeschwindigkeit ist allerdings von der Oberflächengestalt des Messobjekts abhängig. Ein weiterer Vorteil des dynamischen Messprinzips ist seine geringere Temperatur- und Vibrationsempfindlichkeit.

Deshalb wird hauptsächlich die dynamische Messmethode des Fokussensors in der NPM-Maschine verwendet. Eine wichtige Voraussetzung, um die Genauigkeit des Messsystems zu

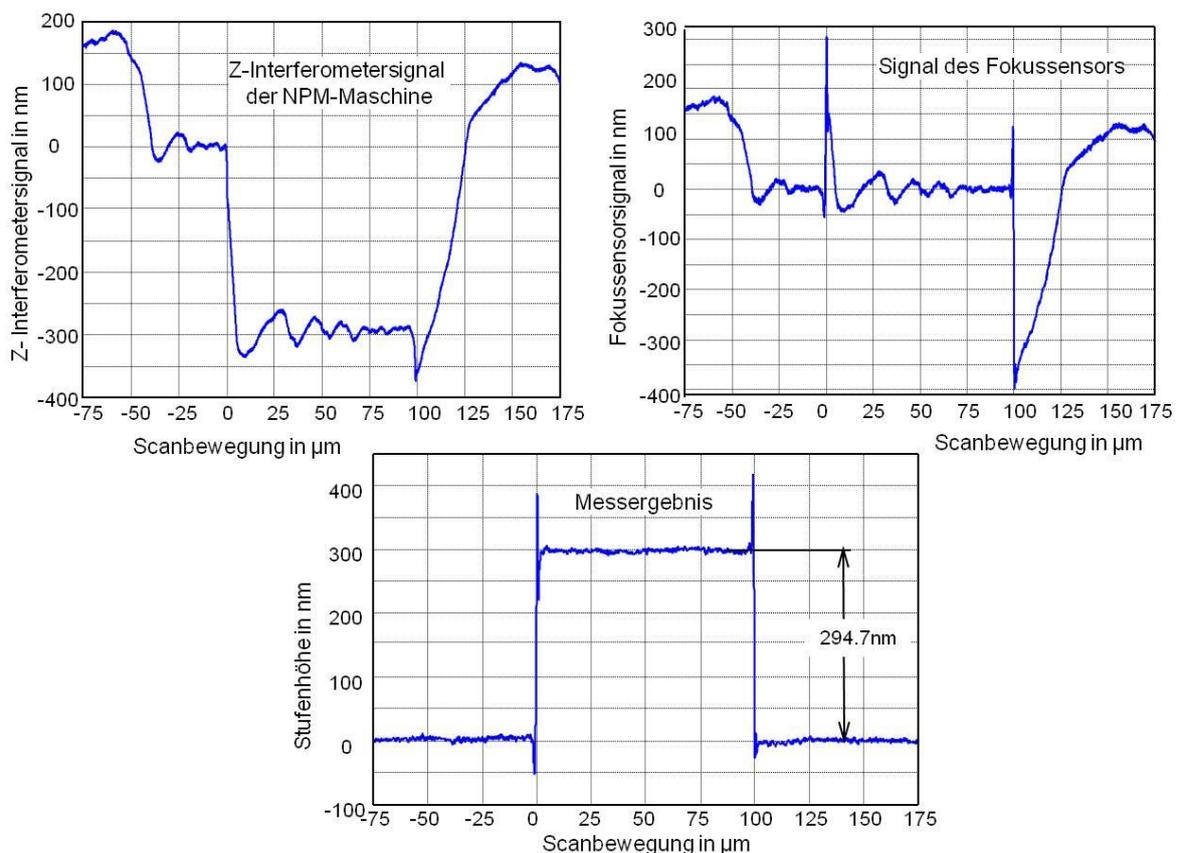


Abbildung 5.3: Dynamisches Messprinzip zur Messung einer Stufenhöhe

gewährleisten besteht darin, dass das Fokusfehlersignal genau wegproportional kalibriert wird. Diese Kalibrierung kann jederzeit mit Hilfe der NPM-Maschine gegen die Z-Interferometerwerte erfolgen (Kapitel 5.2) und ist vor jeder Messung durchzuführen. Dadurch werden genauigkeitsmindernde Einflüsse auf das Messergebnis wie Drift, Kriechen, Reflexionsgrad und Messoberflächenneigung eliminiert.

## 5.2. Kalibrierung der Kennlinie des Fokussensors

Wie im Kapitel 5.1 bereits erwähnt, muss vor der Messung zunächst die Kennlinie des Fokussensors aufgenommen und kalibriert werden. Dieser Vorgang erfolgt in der NPM-Maschine mit Z-Interferometer und besteht im Allgemeinen aus drei Teilaufgaben:

1. Annähern an die Messoberfläche (grobes Suchen des Kennlinienbereichs).
2. Aufnahme der Kennlinie des Fokussensors.
3. Ermittlung der Regressionskoeffizienten der aufgenommenen Kennlinie.

Bei der ersten Annäherung muss der Arbeitsabstand der Objektivlinse berücksichtigt werden. Er beträgt im Fall der herkömmlichen DVD-Linse mit angebrachter Kompensationsglasplatte (siehe Kapitel 4.3) ca. 1,8 mm. Die Annäherung zur Oberfläche wird mit Hilfe des integrierten Kameramikroskops beobachtet. Anhand der Unschärfe der Oberfläche im Kamerabild und besonders auf Grund der Größe des Laserspots des Fokussensors auf der Oberfläche wird der ungefähre Anfang des Kennlinienbereichs festgelegt (Abbildung 5.4 (1)).

Im zweiten Schritt bewegt man das Messobjekt ca. 70  $\mu\text{m}$  langsam mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 bis 15  $\mu\text{m/s}$  von der ermittelten Stelle durch den Schärfebereich der Objektivlinse ebenfalls in positiver Richtung (Abbildung 5.4 (2,3)). Dabei werden parallel die Fokussensorsignale (FES und SUM) und Z-Interferometerwerte aufgenommen. Ein Beispiel beider

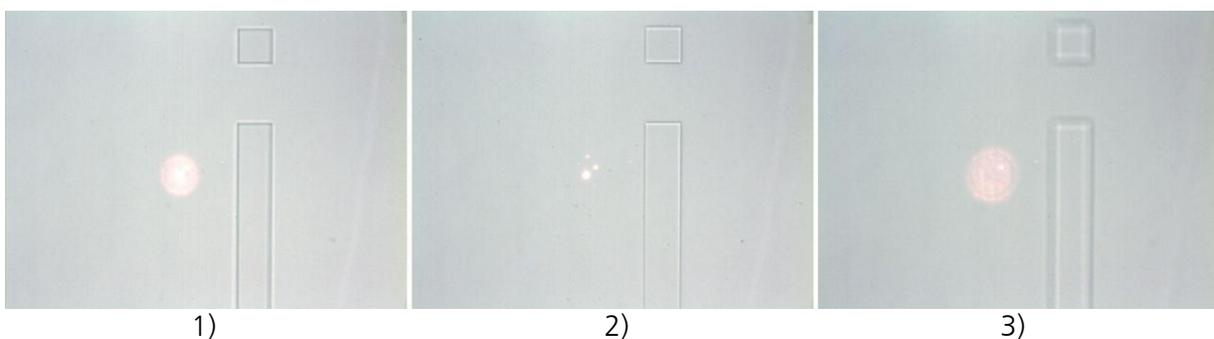


Abbildung 5.4: Mikroskopkamerabilder während eines Kalibrierungsvorganges:  
1) – Fokus zu nah, 2) – Im Fokus, 3) – Fokus zu weit

Sensorsignale (FES und SUM) ist in der Abbildung 5.5 zu sehen. Die leichte Unsymmetrie der Kennlinien ist nicht auf die Justage, sondern auf die Konstruktionseigenschaften der Hologram-Laser-Unit zurückzuführen. Dies beeinflusst die Messeigenschaften des Fokussensors in keiner Weise.

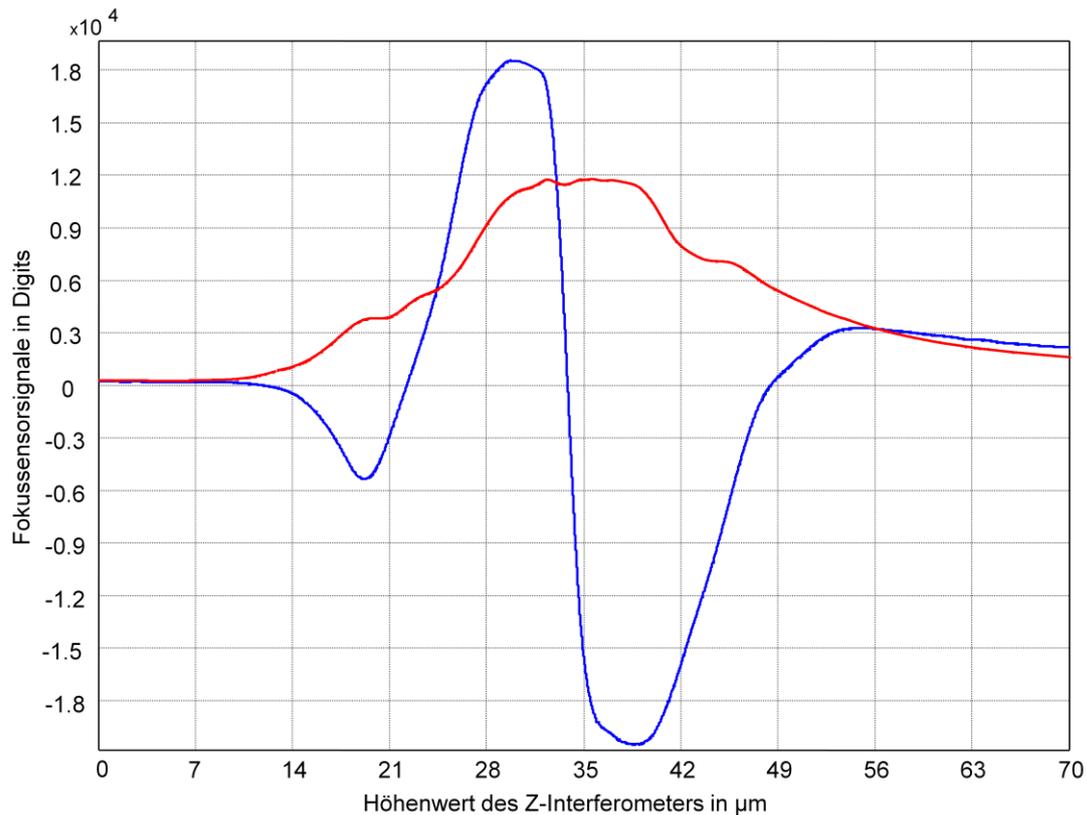


Abbildung 5.5: Unkalibrierte Kennlinien des Fokussensors: blau – Fokusfehlersignal (FES), rot – Summensignal (SUM)

Das Summensignal (SUM) wird dabei als ein Hilfssignal genutzt, um das Fokusfehlersignal zu normieren. Die Normierung ist eine sehr wichtige Operation, besonders im Fall der Messung von Oberflächen mit verschiedenen Reflexionseigenschaften. Außerdem eliminiert sie Strahlleistungsänderungen (temperaturbedingt, Alterung usw.) der Laser Diode. Diese Operation wird in der DSP-Einheit der NPM-Maschine softwaremäßig durch das Dividieren FES/SUM erreicht. Dabei entsteht die so genannte normierte Kennlinie des Fokussensors, welche zum Antasten und Messen genutzt wird (siehe Abbildung 5.6).

Um die Wirksamkeit der Normierung zu verdeutlichen, ist ein Vergleich von normierten Kennlinien an unterschiedlich reflektierenden Oberflächen (von 5 bis 50%) in der Abbildung 5.7 dargestellt. Analysiert man die Kurven, stellt man fest, dass sich die „peak-to-peak“ Amplituden bei allen Reflexionen um weniger als ca. 0,5 % unterscheiden.

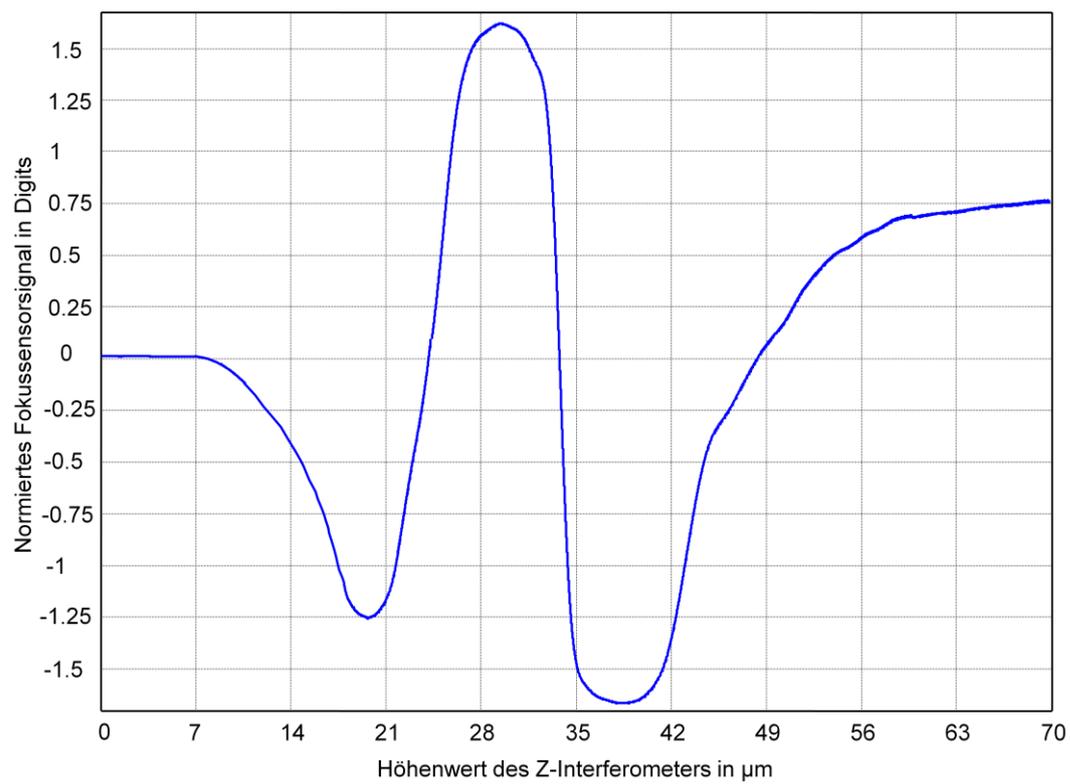


Abbildung 5.6: Normierte Kennlinie des Fokussensors

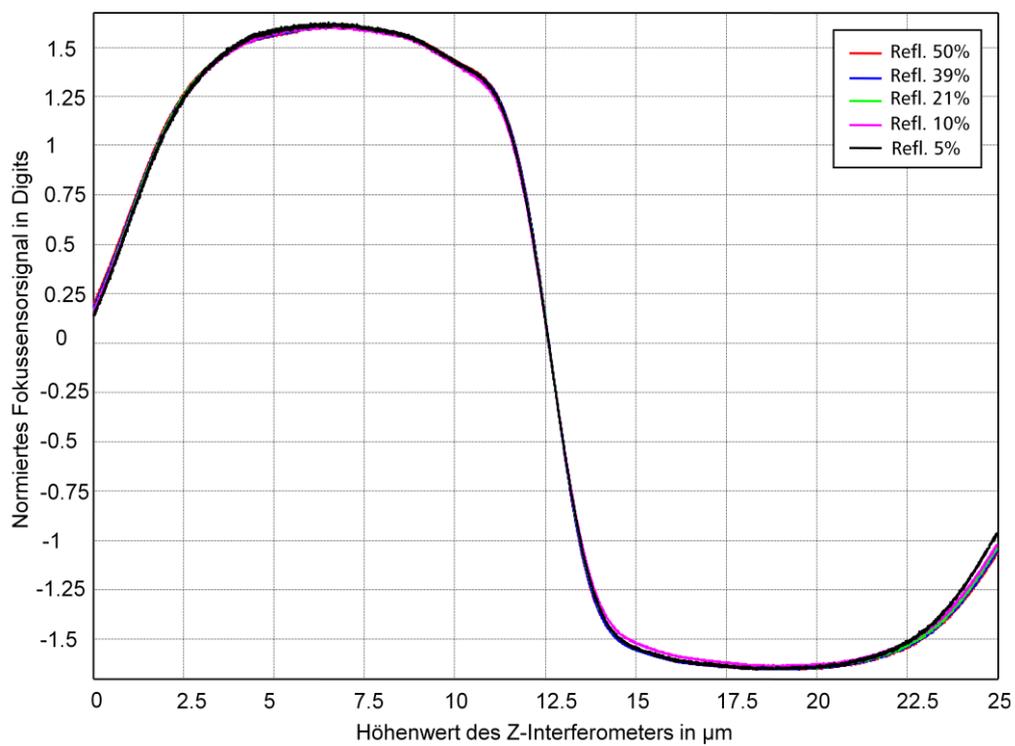


Abbildung 5.7: Normierte Kennlinien des Fokussensors bei unterschiedlichen Oberflächenreflexionen

Würde die Normierung nicht durchgeführt werden, so kämen während der Messung Amplitudenfehler durch die falschen Kalibrierparameter der Kennlinie zu Stande, deren Größenordnung proportional zum Reflexionsgradunterschied ist. Z. B. für einen Fall eines Reflexionswechsels von 5% auf 50% würden sich die Messwerte um 10-fache unterscheiden. In einzelnen Fällen könnte dabei topographieabhängig eine Messung überhaupt nicht möglich sein.

Im dritten Schritt der Kalibrierung wird die Regression des linearen Bereichs der normierten Kennlinie durchgeführt. Dies wird mit Hilfe des PC-Softwarepakets *MatLab R14* realisiert, welches die vier Regressionskoeffizienten (für die Regression 3. Ordnung) ermittelt. Diese Koeffizienten werden für weitere Messvorgänge eingesetzt und bleiben für fast alle „normalen“ Oberflächen konstant (siehe Abbildung 5.7). Lediglich bei rauen (feinkörnigen) oder stark geneigten Oberflächen sollte die Kennlinie neu aufgenommen werden und die Koeffizienten überprüft bzw. geändert werden.

Fährt man jetzt die gleiche Strecke wie im zweiten Kalibrierschritt unter Einsatz von errechneten Regressionsparametern, bekommt man die kalibrierte Kennlinie des Fokussensors, siehe Abbildung 5.8. Die X- und Y-Achsen in dieser Abbildung bedeuten entsprechend Z-Interferometerwerte und kalibrierte Fokusfehlerwerte. Der rot gekennzeichnete Bereich der Kennlinie ist der eigentlich genutzte, lineare Arbeitsbereich der gesamten Fokussensorkennlinie

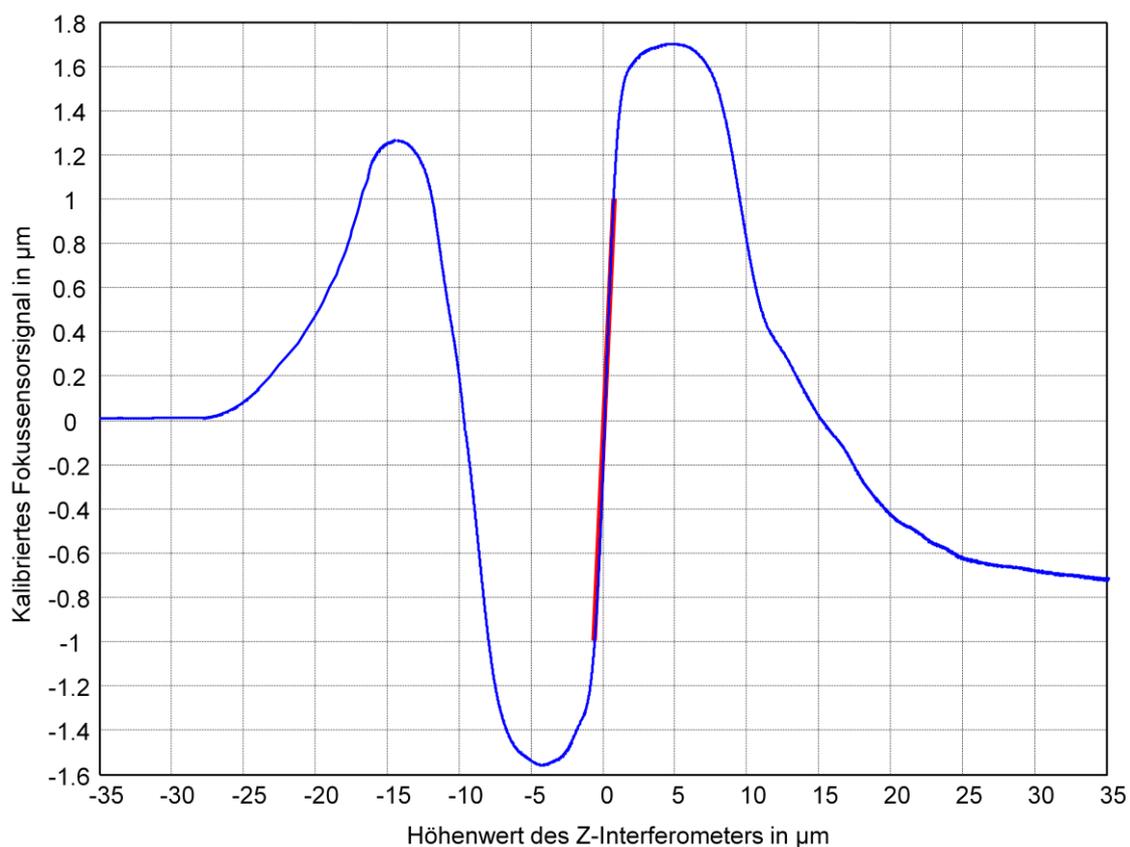


Abbildung 5.8: Kalibrierte Kennlinie des Fokussensors

und beträgt ca.  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Abbildung 5.9. zoomt diesen Bereich noch deutlicher heraus, die Werte des Z-Interferometers der NPM-Maschine (X-Achse) entsprechen hier genau den kalibrierten Werten des Fokussensors (Y-Achse). Damit ist es möglich, wie bereits im Kapitel 5.1 dargelegt, Messungen im dynamischen Modus durchzuführen. Die maximale Strukturhöhe auf dem Messobjekt sollte sich dabei im kalibrierten Bereich der Kennlinie von ca.  $\pm 1 \mu\text{m}$  befinden, um Messfehler und Verfälschungen zu vermeiden. Will man den ganzen Peak-to-Peak-Bereich der Kennlinie ausnutzen bzw. kalibrieren, um z.B. größere Strukturen messen zu können, muss man mit größeren Messabweichungen rechnen, da die Nichtlinearitäten der Kennlinie in den Randbereichen sehr stark zunehmen und eine saubere Regression nicht möglich ist. Durch den Peak-to-Peak-Bereich der Kennlinie (siehe Abb. 5.8) wird auch die maximale Strukturhöhe, welche im dynamischen Modus gemessen werden kann, begrenzt. Dabei handelt es sich vor allem um senkrechte (scharfe) Kanten, wo der Messtisch der NPM-Maschine anhand seiner Masse nicht schnell genug ausgeregelt werden kann. Die kritischen Höhen solcher Strukturen betragen z. B. für die Kennlinienkalibrierung in Abbildung 5.8 ungefähr  $\pm 1,6 \mu\text{m}$ . Praktische

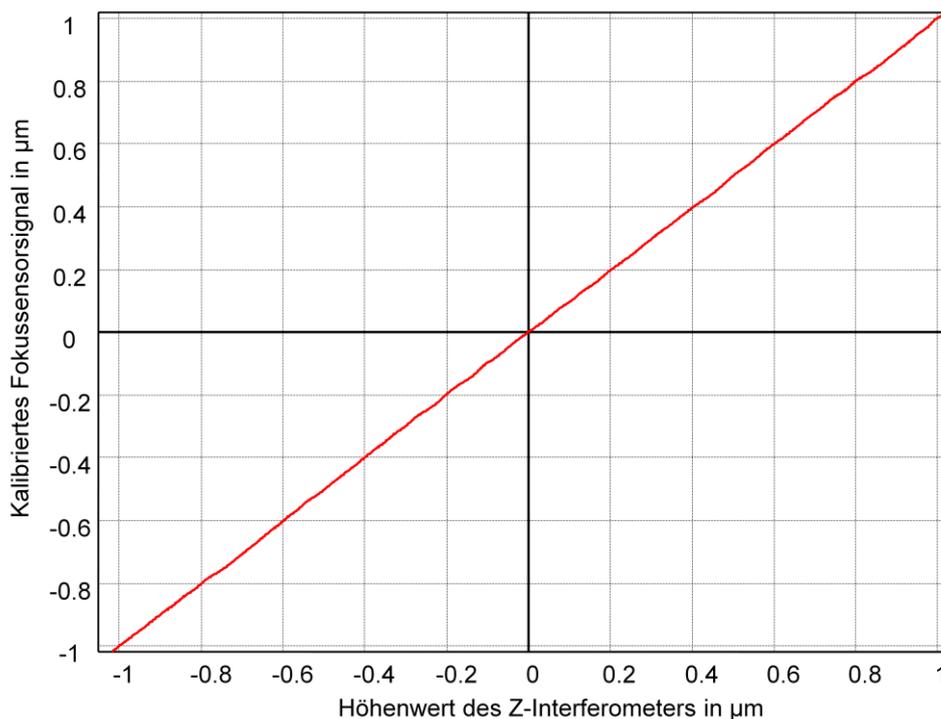


Abbildung 5.9: Kalibrierter Arbeitsbereich der Fokussensorkennlinie

Untersuchungen haben aber gezeigt, dass senkrechte Strukturen sogar bis ca.  $\pm 3,5 \mu\text{m}$  Höhe bei der dynamischen Messmethode ohne Probleme gemessen werden können.

Der Messvorgang selbst sieht dann folgendermaßen aus: man nähert sich zunächst der Prüflingsoberfläche an bis die erste Schwelle an der Kennlinie erreicht wurde (z.B.  $-1 \mu\text{m}$  siehe

Abb. 5.8, 5.9). Dann wird in diesem Bereich der Null-Übergang gesucht und dort anschließend auf die Regelung umgeschaltet. Von diesem Zeitpunkt aus können beliebige Scan-Bewegungen gestartet werden. Die Maschine regelt ständig auf die Nullposition der Fokuskenlinie und verfolgt somit die Prüflingsoberfläche. Das Ergebnis setzt sich aus den Z-Interferometerwerten und den nichtausgeregelten wegproportionalen Fokusfehlerwerten zusammen (Kapitel 5.1.2, Abbildung 5.3).

### 5.3. Auflösung des Fokussensors

Um eine Analyse der vertikalen Auflösung des Fokussensors durchzuführen, sind die Größe des kalibrierten Arbeitsbereichs des Fokusfehlersignals und die Digitalisierung des AD-Wandlers der NPM-Maschine zu betrachten. Für einen Arbeitsbereich von  $\pm 1 \mu\text{m}$  (Abb. 5.9) und eine AD-Wandler-Auflösung von 16 Bit ergibt sich eine Wegauflösung von ca. 0,03 nm, unter der Voraussetzung, dass das Fokusfehlersignal entsprechend vollem DSP-Signalbereich von  $\pm 10 \text{ V}$  verstärkt wird. Für diesen Zweck ist die Verstärkungsvorwahl der Signale in der Elektronik des Sensors vorgesehen, damit kann auch bei wenig reflektierenden Oberflächen (z.B. Glas) das Fokusfehlersignal entsprechend aufgelöst werden. Die praktisch erzielbare Auflösung wird durch elektrisches Rauschen (von den elektronischen Komponenten) und das Rauschen der Laserdiode (Strahlungsrauschen) beschränkt.

Der Anteil des elektrischen Rauschens im Fokusfehlersignal hängt in großem Maße von den Reflexionseigenschaften der Prüflingsoberfläche und der verwendeten Strahlungsleistung der Laserdiode ab und kann nur sehr grob geschätzt werden. Der Einfluss anderer Störquellen (z.B. mechanischer Vibrationen) im Subnanometerbereich kann kaum vermieden werden. Man kann das kalibrierte Fokusfehlersignal außerhalb des Fokusbereiches des Fokussensors betrachten, z.B. den Abschnitt zwischen  $-35$  und  $-30 \mu\text{m}$  in Abbildung 5.8. An dieser Stelle sind die Fotoempfänger der Hologram-Laser-Unit zwar beleuchtet aber noch unempfindlich gegen Messbewegungen. Als Prüfoberfläche diente eine beschichtete Silizium-Probe mit einem Reflexionsgrad von ca. 60%. Das Rauschen beträgt hier ca.  $\pm 0,2 \text{ nm}$  (siehe Abbildung 5.10). Bei Messobjekten mit anderen Reflexionseigenschaften kann dieser Wert variieren. Auch die Strahlungsleistung ist demgemäß ein wichtiger Faktor. Die Strahlungsleistung darf nicht zu hoch eingestellt werden, da sonst verstärkt signalstörende Interferenzen und Überlagerungen durch das Streulicht und Reflexionen im Inneren des Fokussensors auftreten können. Die optimale Strahlungsleistung muss experimentell ermittelt und eingestellt werden bzw. bei extremen Messobjekten (Glas oder Spiegel) eventuell nachträglich geändert werden. Die Untersuchungen diesbezüglich haben gezeigt, dass die Laserlichtleistung am Ausgang der Kollimatorlinse von ca. 0,5 mW vollkommen ausreichend ist.

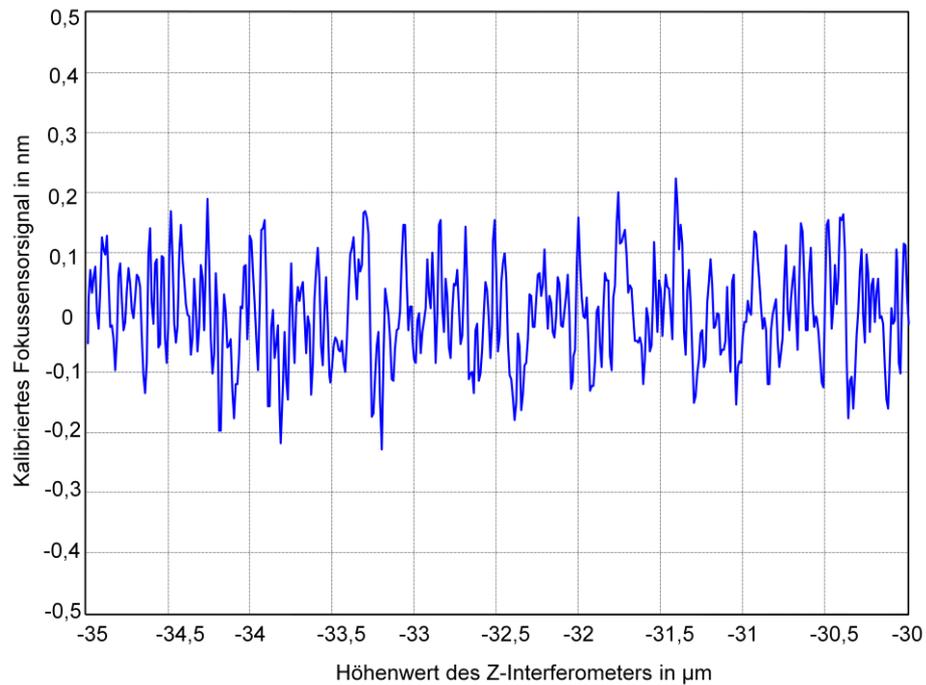


Abbildung 5.10: Kalibriertes Fokusfehlersignal außerhalb des Fokusbereiches

Im Weiteren wird der Einfluss der Laserdiode untersucht. Abbildung 5.11 zeigt eine typische Kennlinie mit einer Laserdiode in DC-Betrieb. Es treten periodische Störungen auf. Der Arbeitsbereich der Kennlinie ist in Abb. 5.12 zur Verdeutlichung nochmals separat dargestellt.

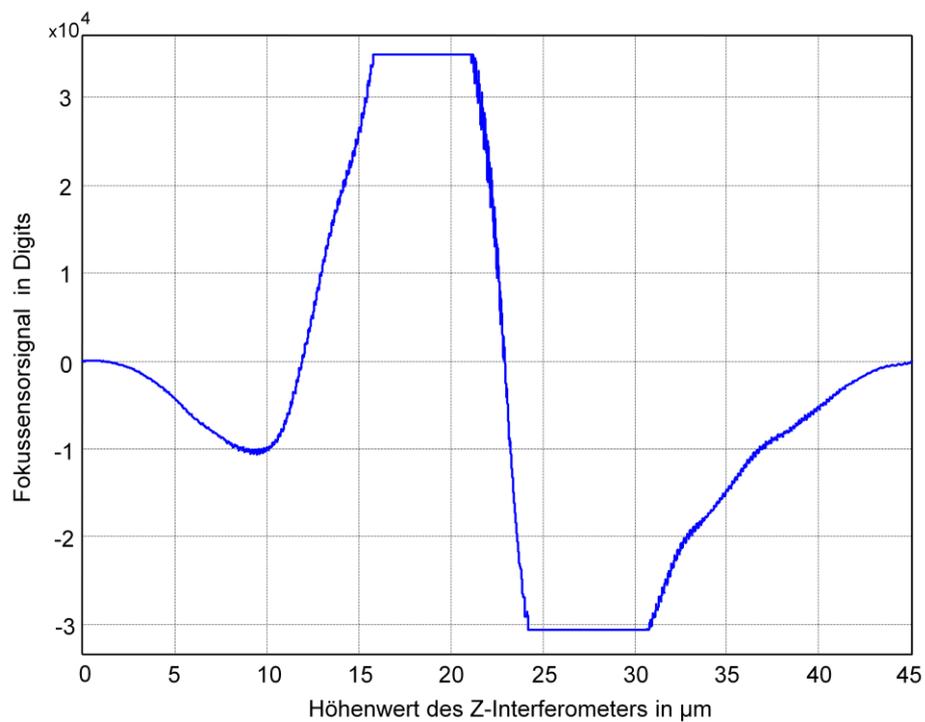


Abbildung 5.11: Fokusfehlerkennlinie mit Störungen

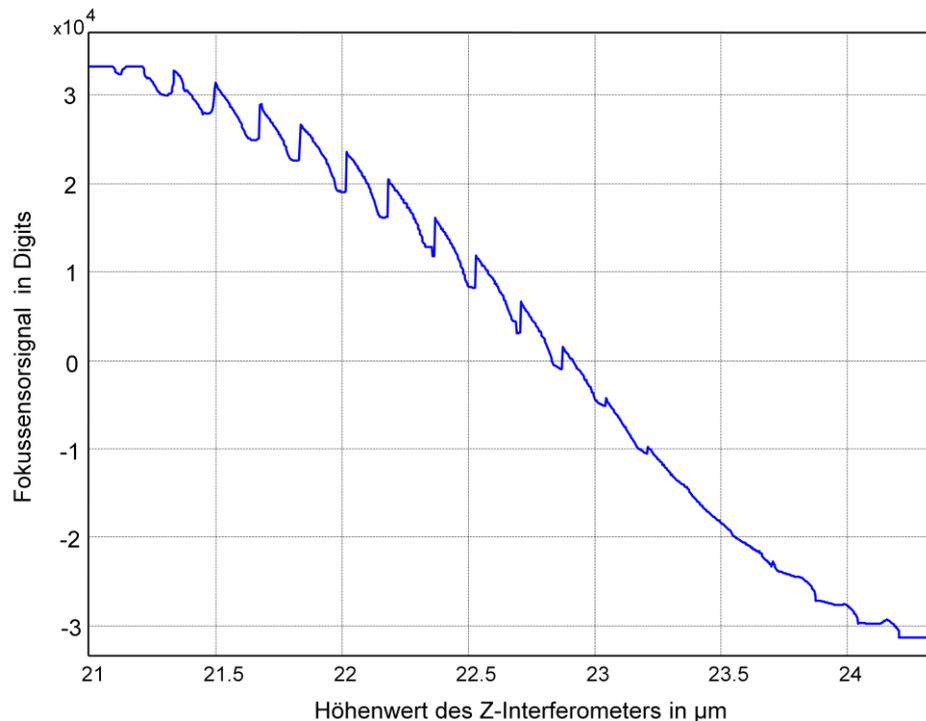


Abbildung 5.12: Fokusfehlerkennlinie (Arbeitsbereich) mit Störungen

Die Größe der Unregelmäßigkeiten lag im Bereich von bis zu 250 nm, was einen Einsatz in der NPM-Maschine ausschließt.

Dieses Phänomen wird durch die optische Rückkopplung der Laserdiode hervorgerufen und wurde insbesondere im Zusammenhang mit der optischen Datenspeichertechnik untersucht [66-72]. Es wird als „Relativ Intensity Noise“ (RIN) bezeichnet. Die störenden Reflexe gelangen dabei sowohl von der Messoberfläche als auch von den optischen und mechanischen Teilen im Inneren des Sensors zurück in die Laserdiode. Dies verursacht zwei Arten vom Laserdiodenrauschen: Modenverteilungsrauschen (Mode-Partition-Noise) und Modenspringen (Mode-Hopping).

Das Modenverteilungsrauschen ist ein breitbandiges Rauschen und entsteht durch kurzzeitige Veränderungen in der Energieverteilung einzelner Moden hauptsächlich bei Multimode-Laserdioden. Das Modenspringen ist ein Extremfall des Modenverteilungsrauschens und kann auch bei Monomode-Laserdioden auftreten. Dabei beginnt die dominante longitudinale Mode sich rapid zwischen den Moden umzuschalten, was durch die Leistungsunterschiede der einzelnen Moden zu den drastischen Strahlungsänderungen der Laserdiode und entsprechend zu den sprung- und spitzartigen Unregelmäßigkeiten des Fokusfehlersignals führt (siehe Abb. 5.12).

Folglich wurden verschiedene Varianten zur Reduzierung des „Relativ Intensity Noise“ der Laserdiode untersucht und erprobt. Zunächst wurde versucht, durch das Platzieren eines

optischen Isolators (Polarisationselement und Lambdaviertelplatte) im Strahlengang des Fokussensors die Rückreflexionen zu reduzieren. Dies brachte aber kein signifikantes Resultat. Auch eine bessere Justierung von optischen Bauteilen bezüglich der Hologram-Laser-Unit führte zu keinem Erfolg. Lediglich durch eine Vergrößerung des Abstandes Kollimatorlinse - Objektivlinse konnte die Qualität der Sensorsignale etwas verbessert werden.

Erst nach der Anwendung einer speziellen Hochfrequenzmodulation der Laserdiode entsprechend [69-71] wurden die Unregelmäßigkeiten der Laserstrahlung komplett eliminiert (siehe Abb. 5.5-5.9).

Im Fall der Hochfrequenzmodulation wird der Ansteuerungsstrom der Laserdiode zusätzlich mit einem sinusoidalen hochfrequenten Strom moduliert. Die resultierende rapide Variation der Ausgangsleistung zwingt die Laserdiode zur gleichmäßigeren Energieverteilung der verfügbaren Moden und verschiebt damit das Modenverteilungsrauschen zu höheren Frequenzen. Die Modulationsamplitude muss dabei groß genug ausgewählt werden, um zu gewährleisten, dass sich die Laserdiode während eines Teiles der Modulationsperiode unter seiner Laserschwelle befindet. Die optimalen Werte für die Modulationsfrequenz und Modulationsamplitude müssen empirisch für jeden einzelnen Fall eingestellt werden, um eine optimale Störunterdrückung zu erreichen. Die Modulationsfrequenz liegt dabei im Bereich um 500 MHz. Die Amplitude wird entsprechend dem Schwellenstrom der Laserdiode ausgewählt.

Die Elektronik des Fokussensors wurde demgemäß mit einer speziellen Schaltung zur Hochfrequenzmodulation der Laserdiode ergänzt (siehe Kapitel 4.4, Abbildung 4.9). Die Modulationsfrequenz und die Amplitude lassen sich mit Hilfe von zwei Potentiometern einstellen.

Durch das Unterdrücken der Strahlungsunregelmäßigkeiten der Laserdiode verbleibt nun das elektrische Rauschen, da die eventuell gebliebenen Restanteile des Strahlungsrauschens kaum getrennt betrachtet werden können.

Die Größe des Gesamtrauschens, bzw. die damit verbundene vertikale Auflösung des Fokussensors, beträgt  $< 1$  nm und ist, wie bereits erwähnt, von den Messobjekteigenschaften (Reflektion, Rauheit usw.) abhängig.

Die Größe der lateralen Auflösung (X- und Y-Achse) ist durch die Größe des fokussierten Laserspots auf der Prüflingsoberfläche begrenzt und beträgt ca.  $0,6 \mu\text{m}$  (siehe Kapitel 3.3). Eine Möglichkeit zur Verringerung dieses Parameters wird im nächsten Kapitel dargestellt.

## 5.4. Messungen an kalibrierten Stufenhöhennormalen der PTB

Die Genauigkeit- und Reproduzierbarkeitsuntersuchungen des Fokussensors in Kombination mit der NPM-Maschine wurden an Stufenhöhennormalen (Schichtdickennormalen) durchgeführt, die an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) kalibriert worden waren [73]. Es handelt sich dabei um Si-Chips mit einer Kantenlänge von 5 mm x 5 mm, die eine stufenförmige strukturierte Schicht aus Si-Oxid in Form zweier unterbrochener Linien mit der Stufenbreiten von ca. 30  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  besitzen. Abbildung 5.4 zeigt einen Oberflächenausschnitt eines solchen Normalen der 30  $\mu\text{m}$  breiten Linie. Die Stufenhöhe der Linien wurde in zwei spezifizierten Bereichen (je 100  $\mu\text{m}$  lang) gemäß dem ISO-Norm 5436 [74] als Mittelwert ermittelt und ist mit der erweiterten Messunsicherheit angegeben.

Die Gesamtoberfläche der Normale ist mit einer spiegelnden Chromschicht überzogen. Diese Schicht besitzt einen Reflexionsgrad von ca. 60 % und ist daher zur optischen Antastung mit dem Fokussensor bestens geeignet. Insgesamt standen fünf Normale mit unterschiedlichen Höhen von 7,4 nm, 21,2 nm, 69,1 nm, 294,2 nm und 778,4 nm zur Verfügung.

Alle Messungen wurden im dynamischen Modus durchgeführt. Das Messergebnis wird dabei als Differenz zwischen Z-Interferometer- und Fokusfehlersignalwerten gebildet. Das ermöglicht hohe Scangeschwindigkeiten bzw. kleine Messzeiten. Jedes Normal wurde 40 Mal nacheinander an einer Stelle innerhalb des 100  $\mu\text{m}$ -langen kalibrierten Bereichs der jeweiligen Stufe gemessen und gemäß der ISO Norm 5436 ausgewertet. Die Länge der Scanlinie richtet sich nach der Breite der zumessenden Stufe und beträgt in unseren Fall 90  $\mu\text{m}$  (für eine Stufenbreite von 30  $\mu\text{m}$ ). Die Gesamtmesszeit für 40 Scanlinien bei einer Scangeschwindigkeit von 50  $\mu\text{m}/\text{s}$  beträgt ca. 1,5 min (2,5 sec pro Linie), was sogar bei einer „relativ schlechten“ Temperierung des Messraumes von  $\pm 1^\circ\text{C}$  zu keinem bemerkenswerten Temperatureinfluss auf das Messergebnis führt.

Eine Scanlinie des 69,1 nm Normalen ist in der Abbildung 5.13 zu sehen. Die rot gekennzeichneten Abschnitte auf dem Messprofil zeigen die Bereiche, welche zur Stufenhöhenbestimmung gemäß ISO 5436 ausgewertet werden. Auf diese Weise wurden die Stufenhöhen für jede Scanlinie ermittelt. Das Endergebnis setzt sich dabei aus der mittleren Stufenhöhe und der erweiterten Messunsicherheit  $U$  ( $k = 2$ ) zusammen, die aus 40 einzelnen Messungen berechnet wurden. Während an der PTB für die im dargestellten Beispiel verwendete Stufenhöhe ein Wert von  $(69,1 \pm 1,2)$  nm ermittelt wurde, liegt der mit dem Fokussensor und der NPM-Maschine ermittelte Wert mit  $(69,6 \pm 0,8)$  nm innerhalb der erweiterten Messunsicherheit der PTB-Messung. In der Tabelle 5.1 sind die Messergebnisse aller fünf Stufenhöhennormalen der PTB aufgelistet. Auch die übrigen Stufenhöhenmessungen liegen

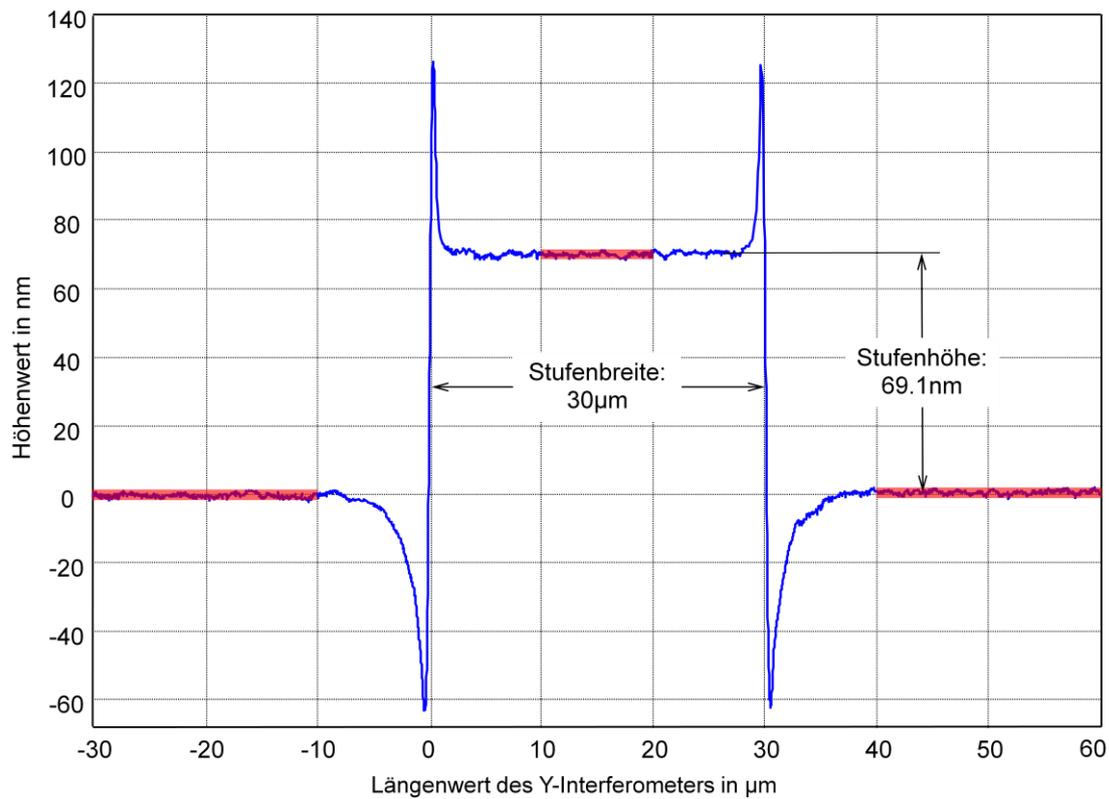


Abbildung 5.13: Linienscan des 69,1 nm Normals der PTB

Normal Nummer	PTB Messung $\pm U$	NPM-Maschine mit Fokussensor $\pm U$	Differenz
C26 R18	$7,4 \pm 1,0$ nm	$7,3 \pm 0,5$ nm	0,1 nm
C18 R18	$21,2 \pm 1,1$ nm	$20,9 \pm 0,8$ nm	0,3 nm
C17 R27	$69,1 \pm 1,2$ nm	$69,6 \pm 0,8$ nm	-0,5 nm
C19 R26	$294,2 \pm 2,0$ nm	$294,7 \pm 0,9$ nm	-0,5 nm
C12 R01	$778,4 \pm 3,5$ nm	$779,3 \pm 1,1$ nm	-0,9 nm

Tabelle 5.1: Messungen an PTB-Stufenhöhennormalen

innerhalb der erweiterten Messunsicherheit der PTB-Messung. Die letzte Spalte zeigt den Unterschied zwischen den eigenen Messungen und den PTB-Ergebnissen.

Die Stufenhöhenmessungen wurden mehrmals an unterschiedlichen Stellen des  $100\ \mu\text{m}$  langen kalibrierten Bereichs der jeweiligen Stufe wiederholt. Dabei wichen die absoluten Werte der Stufenhöhen zwar etwas von den in der Tabelle angegebenen ab, aber blieben stets im Bereich der erweiterten Messunsicherheit der PTB-Messung. Man kann davon ausgehen, dass die Stufenhöhe in diesem Bereich wirklich variiert. Diesem Sachverhalt wird mit der Größe der erweiterten Messunsicherheit der PTB-Messung Rechnung getragen.

Das Überschwingen („Batwing effect“ in englischer Literatur) an scharfen Kanten mit Stufenhöhen im Bereich kleiner der Wellenlänge des verwendeten Messstrahls (siehe Abb. 5.13) ist eine typische Erscheinung bei optischen Messungen im Nanometerbereich und entsteht durch Beugungseffekte [75]. In der praktischen Messungen mit dem Fokussensor wurde diese Tatsache noch etwas präzisiert. Bis zu einer Kantenhöhe von etwa  $200\ \text{nm}$  -  $250\ \text{nm}$  bleiben die Überschwinger fast symmetrisch und höhenproportional. Danach gilt: je größer die Kantenhöhe ist, desto schwächer und wenig ausgeprägt sind die Überschwinger. Außerdem schlägt sich zunehmend die Neigung der Messoberfläche im Zusammenspiel mit der Kantensteilheit und deren Lage in einer schlechteren Symmetrie nieder.

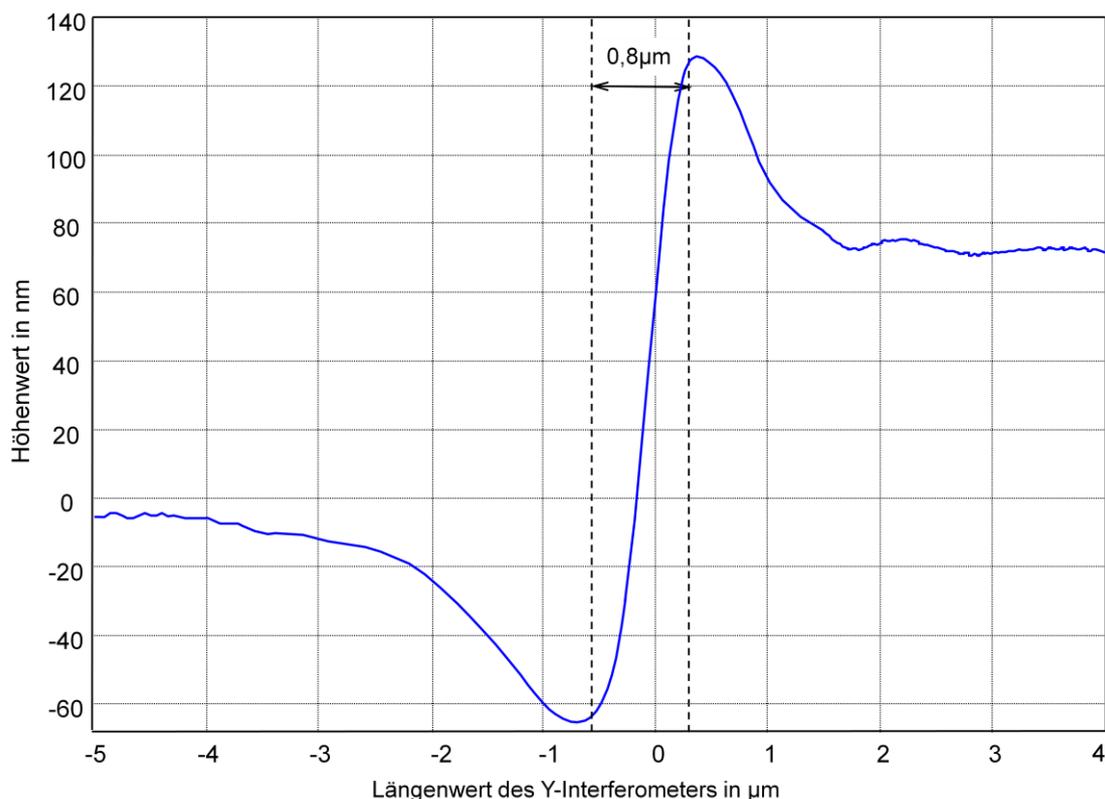


Abbildung 5.14: Überschwingen an der  $69,1\ \text{nm}$  Kante

Der steile Bereich des Überschwingens (siehe Abbildung 5.14) entspricht etwa der Spotgröße des Fokussensors und beträgt ca.  $0,6-0,8\ \mu\text{m}$ . Das Überschwingen insgesamt ist ein sehr reproduzierbarer Effekt, ein Beispiel dazu zeigt die 3D-Messung am  $69,1\ \text{nm}$  Stufenhöhennormal (Abbildung 5.15). Durch dessen Auswertung kann man z. B. die Kantendetektion mit der Auflösung deutlich kleiner der Spotgröße des Fokussensors durchführen. Einige Arbeiten in diesem Zusammenhang wurden bereits durchgeführt [77, 78]. Entsprechend dieser Untersuchungen kann der Abstand zwischen zwei Kanten mit einer erweiterten Messunsicherheit von  $8\ \text{nm}$  detektiert werden. Allerdings, um die geometrische Lage einer Kante absolut zu bestimmen, fehlen weitere Kriterien zur Auswertung der Überschwinger. Hier sind weitere Untersuchungen unumgänglich.

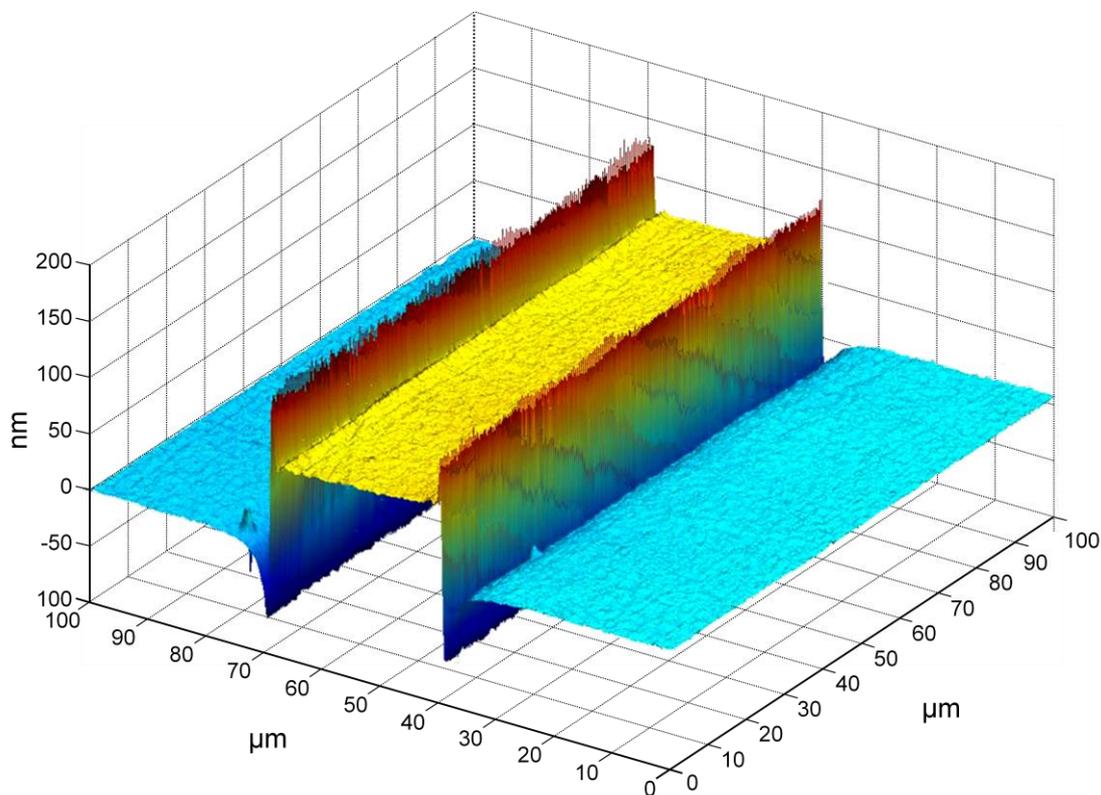


Abbildung 5.15: Eine 3D-Messung einer  $69,1\ \text{nm}$  Stufenhöhe

Eine weitere 3D-Messung mit Überschwingen an einer Siliziumstruktur ist in Abbildung 5.16 zu sehen. Die Höhe der Struktur beträgt etwa  $300\ \text{nm}$ . Hier sieht man aber deutlich, dass sich die Form und Amplitude der Überschwinger an verschiedenen Kanten unterscheiden. Dies ist zum einen auf die leichte Unsymmetrie des fokussierten Laserspots und zum anderen auf die Lage der betroffenen Kante bezüglich der Foucaultschen Schneide der Hologram-Laser-Unit [78] zurückzuführen.

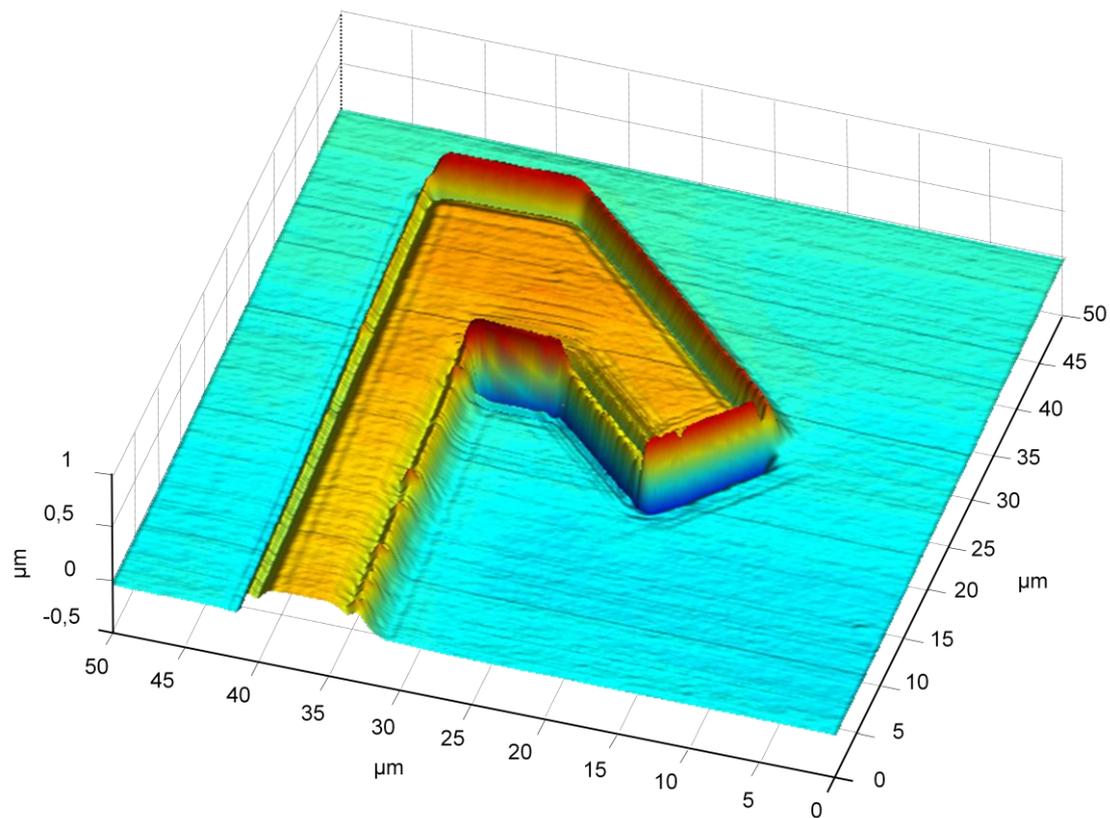


Abbildung 5.16: Abhängigkeit der Überschwinger von der Kantenlage

## 5.5. Temperaturstabilität des Fokussensors

Die Temperaturstabilität des Fokussensors ist ein sehr wichtiger Parameter, welcher die metrologischen Eigenschaften des Sensors beeinflusst. Durch den Einsatz der Hologram-Laser-Unit mit ihrem kompakten justagefreien Aufbau wurde die Temperaturstabilität des Fokussensors im Vergleich zum klassischen konventionellen Aufbau (siehe Kapitel 4.1, Abbildung 4.2.) deutlich verbessert. Um einen möglichst geringen Temperatureinfluss seitens der übrigen mechanischen Teile des Sensors zu gewährleisten, wurden diese aus Invar (Fe65Ni35) hergestellt, welches einen sehr niedrigen Ausdehnungskoeffizient von  $1,7-2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (bei 20-90°C) aufweist [79]. Damit beträgt die temperaturbedingte Ausdehnung des Gehäuses des Fokussensors, die direkt in das Messergebnis einfließt, ca. 43 nm/K. Dieser Wert deutet darauf hin, dass der Fokussensor nur in streng temperierter Messumgebung eingesetzt werden soll, um Messunsicherheiten unter 10 nm zu gewährleisten. Dabei geht es vor allem um Langzeitmessungen bzw. Flächenmessungen mit großer Messpunktdichte und Messfläche. Die temperaturbedingte Drift der Elektronik des Fokussensors beeinflusst das Messergebnis kaum. Die Driftquellen hier sind vor allem die Laserdiode und die Signalverarbeitungseinheit.

Die Laserdiode wurde gegen temperaturbedingte Leistungsänderung gesichert, indem eine spezielle Automatic-Power-Control-Schaltung verwendet wird. Die Laserstrahlungsleistung wird dabei in einem geschlossenen Kreis kontinuierlich kontrolliert und konstant geregelt. Durch die Normierung der Kennlinie des Fokussensors wird eine zusätzliche Stabilisierungsmaßnahme getroffen (siehe Kapitel 5.2).

Die restlichen Laserstrahlungsfluktuationen werden zusammen mit der Signalverstärkungsdrift durch das Funktionsprinzip des Fokussensors eliminiert. Das ist zum einen die Art der Fokussignalebildung im Fokussensor, welcher als Differenz einzelner Fotoempfängerströme (siehe Kapitel 4.2, Abbildung 4.6) gebildet wird. Zum zweiten ist es die so genannte Nullindikatorarbeitsweise, bei welcher nur im Fokuspunkt (Nullpunkt) des Sensors gearbeitet wird. Dadurch verändern sich die Einzelsignale immer synchron, da die Lichtmenge an den entsprechenden Fotoempfänger der Hologram-Laser-Unit im Nullpunkt gleich gehalten wird, was bei symmetrischem Aufbau des Signalverstärkungskreises und durch Differenzbildung den Temperatureinfluss ausgleicht.

Es ist in diesem Zusammenhang sehr schwer, den Temperatureinfluss der elektronischen Bauteile mit genauen Werten zu beurteilen und besonders von der temperaturbedingten Ausdehnung zu unterscheiden. Eine konkrete Aussage diesbezüglich kann deshalb nicht gegeben werden.

Die Temperaturabhängigkeit des Fokussensors wurde deshalb experimentell ermittelt. Dazu wurde eine einfache Vorrichtung genutzt, in der der Fokussensor seitlich auf eine Grundplatte so befestigt wurde, dass die optische Achse der Fokuslinse parallel zu der Platte lag. Die Grundplatte wurde aus Zerodur<sup>®</sup> (spezielle Glaskeramik mit einem extrem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von ca.  $0 \pm 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [80]) hergestellt, um möglichst kleinste temperaturbedingte Ausdehnung zu garantieren. Als Messobjekt wurde ein Spiegel verwendet, welcher ebenfalls auf die Zerodurplatte aufgestellt wurde. Auf mögliche Justierungselemente wurde aus Drift- und Kriechgründen verzichtet. Der Spiegel wurde in den Fokuspunkt des Fokussensors gebracht (siehe Abb. 5.17). Die manuelle Spiegelverschiebung erforderte zwar eine besondere Feinfühligkeit und Zeitaufwand aber machte es zugleich möglich, weitere Driftquellen zu vermeiden. Danach wurde das vorher kalibrierte Fokusfehlersignal parallel mit der Temperatur über mehrere Stunden aufgezeichnet. Das Messergebnis ist in der Abbildung 5.18 zu sehen. Anhand dieser Messung kann keine eindeutige Aussage über das Temperaturverhalten des Fokussensors getroffen werden. Nur im letzten Zeitabschnitt der Messung ist deutlich eine Korrelation zwischen Temperatur und Fokussignal zu erkennen. Hier betrug die Drift ca. 70 nm/K. Wie bereits oben erwähnt, kommen 43 nm/K (mehr als die Hälfte) von dieser Größe durch die thermische Ausdehnung des Invar-Gehäuses des Sensors. Daher deuten diese Zahlen eindeutig darauf hin, dass die Nutzung der Hologram-Laser-Unit zusammen mit einer kompakten mechanischen Konstruktion aus Invar, einen sehr stabilen Fokussensor ermöglicht. Trotzdem darf nicht auf eine gute Temperierung des Messraumes verzichtet werden. Für

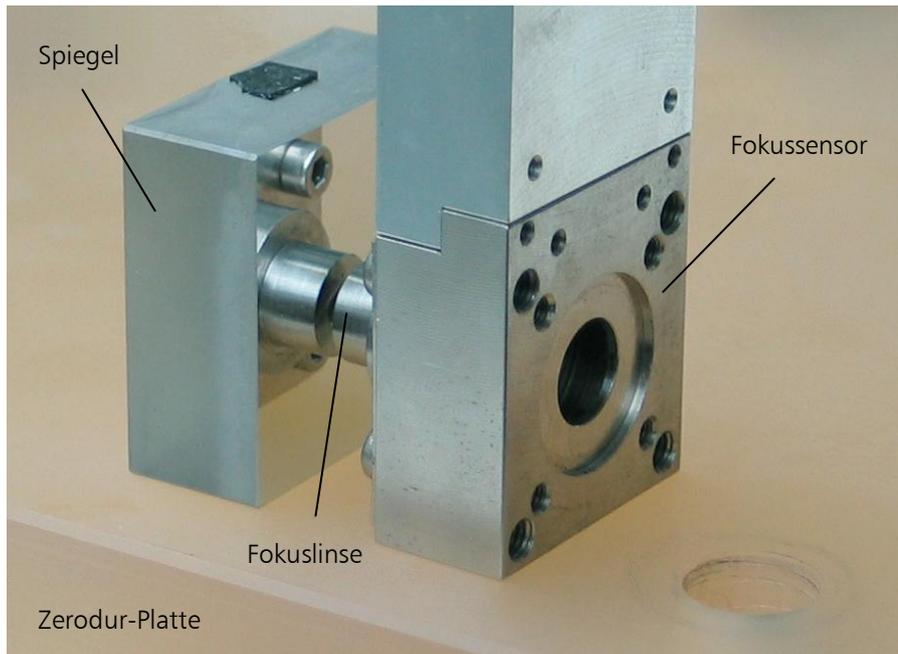


Abbildung 5.17: Anordnung zur Untersuchung der Stabilität des Fokussensors

genauere Aussagen über das thermische Verhalten des Fokussensors sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Schließlich wurde auch die Temperaturdrift des gesamten Messsystems (NPM-Maschine + Fokussensor) ermittelt, um einen Vergleich zu der bereits dargestellten Temperaturabhängigkeit des Fokussensors durchzuführen. Die Messung erfolgte unter realen Messbedingungen im angetasteten Zustand, d.h. die NPM-Maschine regelte ständig die Z-Position des Messtisches entsprechend der Nulllage der Fokussensorkennlinie, wobei die X- und Y-Position konstant blieb. Die Umgebungstemperatur wurde dabei mit Hilfe eines Thermostates aktiv geregelt. Das Messergebnis ist in der Abbildung 5.19 zu sehen. Hier sind das Z-Interferometersignal und die Temperatur dargestellt. Man konstatiert eine eindeutige Korrelation zwischen beiden Signalen, die mit einem Wert von ca. 600 nm/K bezeichnet werden kann.

Der Einfluss des Fokussensors beträgt also nur ca. 10 % der gesamten Temperaturänderung.

Daraus lässt sich folgender Rückschluss ziehen: Langzeitmessungen mit Fokussensor in der NPM-Maschine müssen in speziell temperierten Räumen ( $\leq 0,1$  K) durchgeführt werden, um eine Langzeitdrift unter 50 nm zu gewährleisten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Temperatureinfluss zu kompensieren, was allerdings anhand der Kompliziertheit des Messaufbaus schwer zu realisieren wäre bzw. nur bedingte Verbesserung bringen könnte.

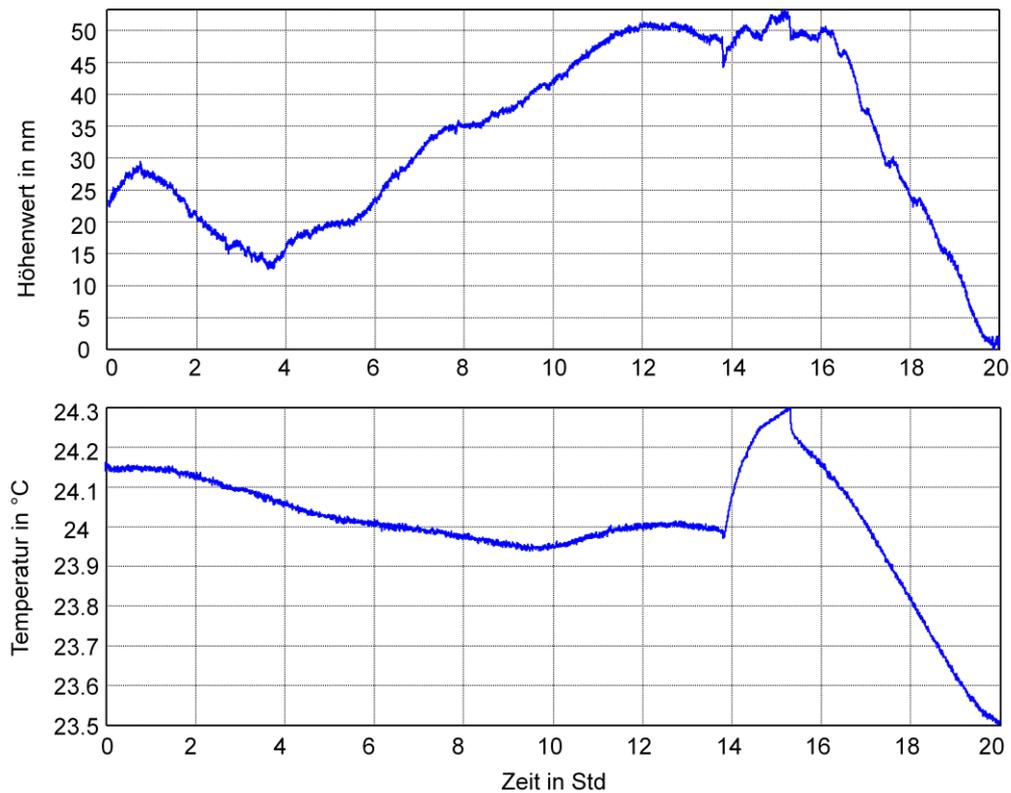


Abbildung 5.18: Temperaturverhalten des Fokussensors

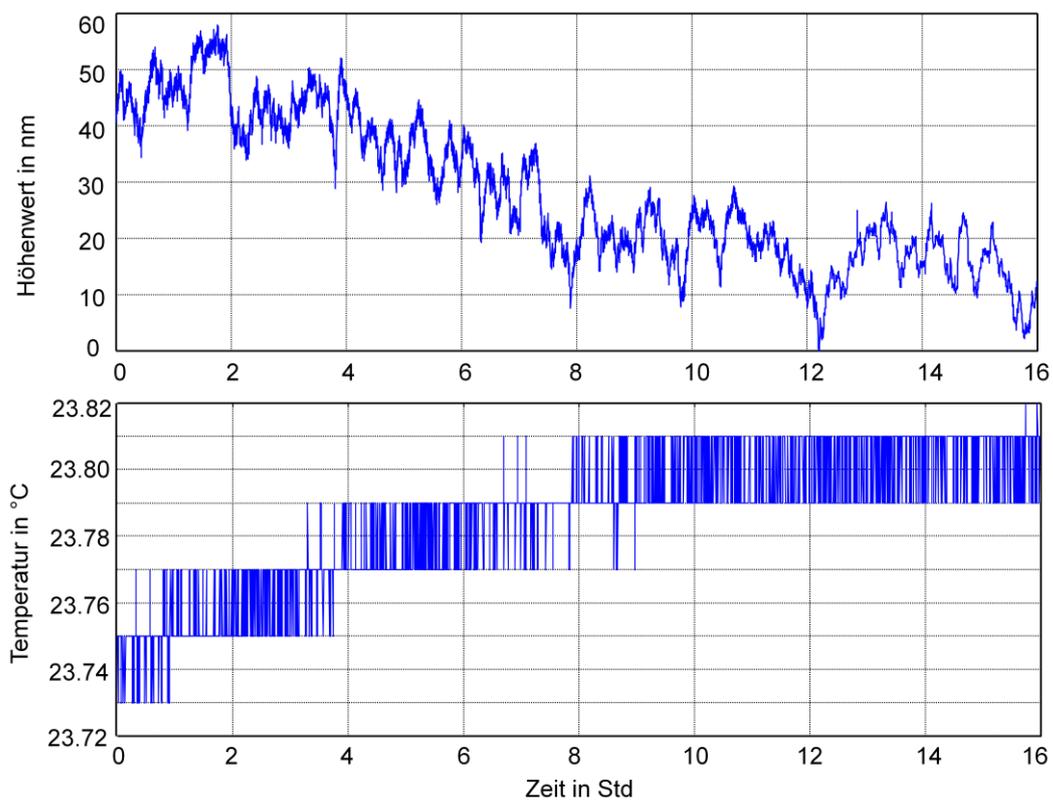


Abbildung 5.19: Temperaturverhalten des Meßsystems (Fokussensors + NPM-Maschine)

## 5.6. Einfluss des Messwinkels und der Oberflächenbeschaffenheit

Die Funktionalität des Fokussensors bei Messungen auf geneigten Oberflächen ist ein wichtiger messtechnischer Parameter, welcher die Einsatzmöglichkeiten des Fokussensors mit bestimmt. Dabei geht es hier vor allem um die Ermittlung des maximalen Neigungsbereiches des Messobjekts, bei welchem der Sensor noch arbeitet und um den Einfluss der geneigten Messoberfläche auf das Messergebnis.

Die erste Aufgabe ist vergleichbar einfach zu realisieren. Die maximale Neigung des Messobjekts wurde experimentell untersucht. Als Kriterium dazu diente die Annahme, dass der Fokussensor solange messen kann, bis kein Licht vom Messobjekt zurück in das optische System, in die Apertur der Objektivlinse, gelangt. Dazu wurde das Messobjekt schrittweise gekippt und die Fokusfehlerkennlinie aufgenommen. An der Kippposition, wo das Fokusfehlersignal noch kleinste auswertbare bzw. kalibrierbare S-förmige Funktion zeigte, wurde eine Messung durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit des Sensors zu überprüfen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass der Fokussensor bei Kipppositionen im Bereich bis zu  $\pm 24^\circ$  funktioniert. Diese Größe gilt allerdings nur für gut reflektierende Oberflächen ( $> 30\%$ ), da bei wenig reflektierenden Oberflächen ( $< 30\%$ ) das Signal-Rauschen-Verhältnis des Fokusfehlersignals durch sehr kleine Lichtmengen des ins Objektiv zurückkommenden Lichtes sich besonders stark verschlechtert. Dies beeinträchtigt die Messauflösung und kann die Messung zum Teil instabil bzw. unmöglich machen, da die Regelung der NPM-Maschine zu schwanken beginnt. Bei wenig reflektierenden Oberflächen beträgt die maximale Verkippung ca.  $\pm 20^\circ$ . Die Abbildung 5.20 zeigt ein Beispiel eines Linienscans einer Kugellinse. Die Neigung der Linsenoberfläche am Anfang und am Ende des Scans beträgt ca.  $20^\circ$ .

Ein zusätzlich begrenzender Faktor bezüglich des maximalen Kippwinkels bei geneigten Messobjekten ist die Beschaffenheit deren Oberfläche. Das heißt, dass bei Messungen von strukturierten Oberflächen oder Oberflächen mit Unregelmäßigkeiten, wie z.B. Bearbeitungsspuren, Kratzer oder auch bei „größeren“ Rauheiten (1 bis  $10\ \mu\text{m}$ ), der maximal erreichbare Kippwinkel durch die Streuung des einfallenden Laserstrahls sich noch zusätzlich verringern kann. Seine absolute Größe kann in diesem Fall nur grob abgeschätzt werden und beträgt ca.  $\pm 15\text{-}17^\circ$ .

Ferner wurde der zweite Aspekt, nämlich die Problematik des Einflusses der geneigten Messoberfläche auf die Richtigkeit des Messergebnisses, untersucht. Dabei geht es vor allem um die Messung von Objekten mit wechselnder Neigung, wie z.B. Linsen, ob solche durch das Fokusfehlermessprinzip fehlerfrei gemessen werden können. Liegt während der Messung eine

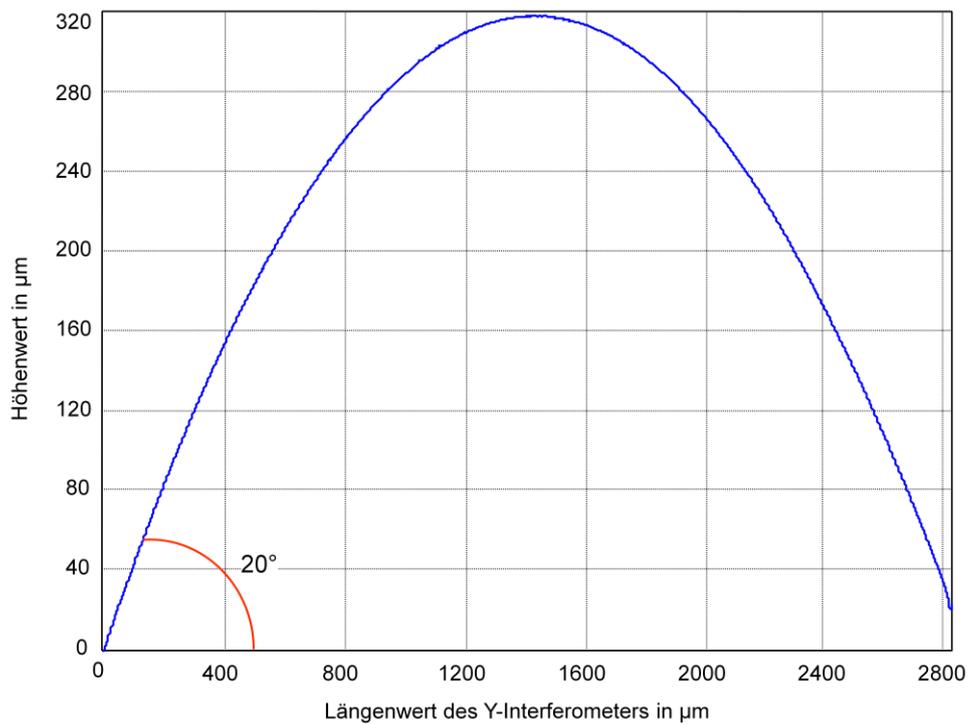


Abbildung 5.20: Linienscan einer Kugellinse

konstante Neigung vor, entsteht prinzipiell kein Fehler, da die Kalibrierparameter der Kennlinie (bzw. die Kennlinie selbst) in jedem Messpunkt konstant bleiben. Um auch bei wechselnder Neigung fehlerfrei messen zu können, sollte in jedem Messpunkt eine Kalibrierung erfolgen, was allerdings in der Praxis kaum realisierbar ist.

Entsprechende Untersuchungen wurden an einem kalibrierten Mikro-Konturnormal der PTB durchgeführt [81]. Die Abbildung 5.21 zeigt das Messergebnis. Hier sind zwei Zylindersegmente (Radius je  $499 \mu\text{m}$ ) gemessen worden. Da der Fokussensor nur in der Lage ist, den Neigungsbereich von ca.  $\pm 20^\circ$  zu erfassen, können nur kleine Ausschnitte auf den Zylindersegmenten (grün dargestellt) gemessen werden. Zum Vergleich wurden die gleichen Elemente des Konturnormal zusätzlich mit dem Fokus-Stylus-Sensor gemessen (blau dargestellt), welcher auf der Basis des entwickelten Fokussensors (im Kapitel 6.1 dargestellt) aufgebaut wurde.

Die zwei Neigungsbereiche der Kugelsegmente von ca.  $\pm 20^\circ$  sind in der Abbildung 5.22 noch einmal vergrößert dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass alle drei Messverfahren prinzipiell übereinstimmen. Der gemessene Radius und die Formabweichung lagen in der Toleranz der PTB-Messung. Ein konkreter Vergleich zwischen diesen Messungen kann allerdings nicht gemacht werden, da die PTB-Messung mit einem optischen Messverfahren im Durchlicht durchgeführt wurde, bei welchem die lokale Rauheit des Normals nicht erfasst werden kann.

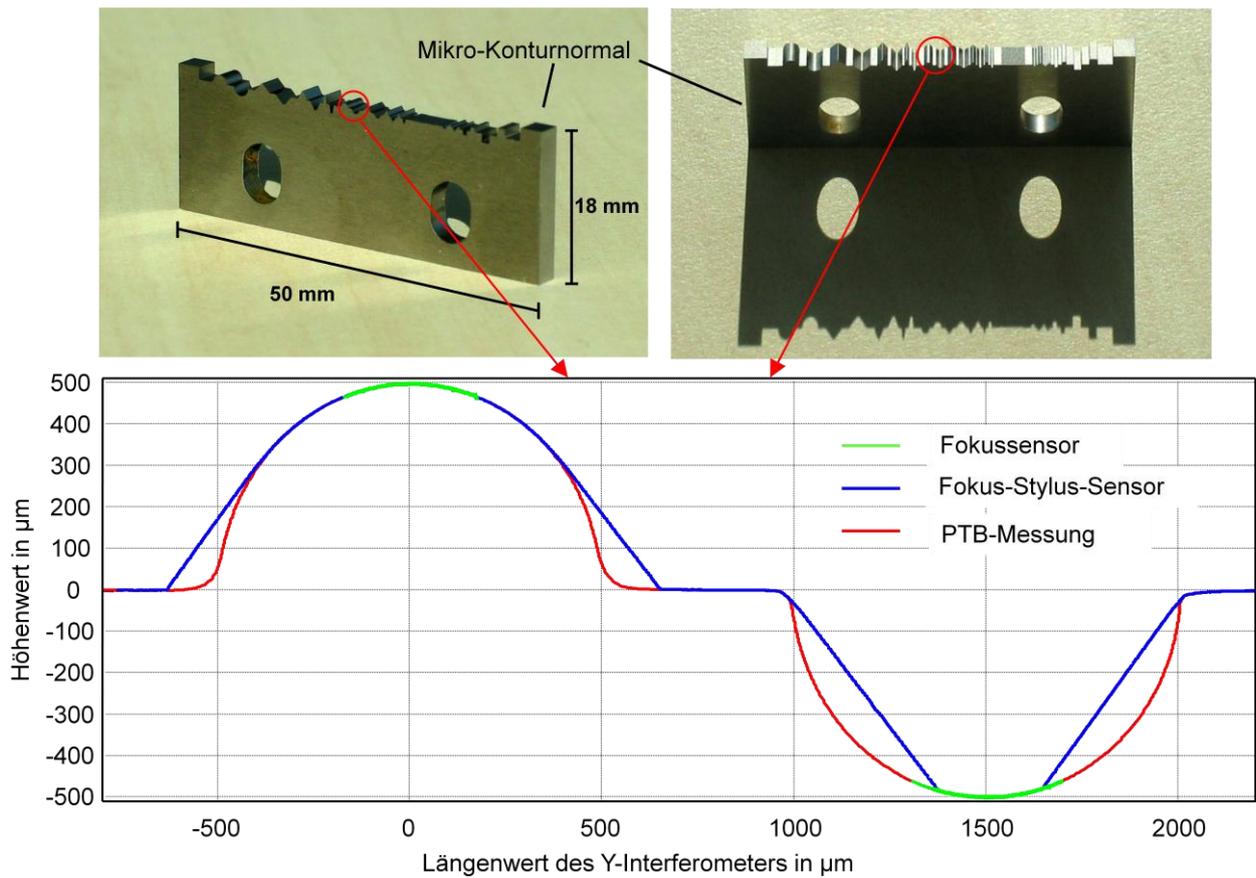


Abbildung 5.21: Messung eines Mikro-Konturnormal der PTB

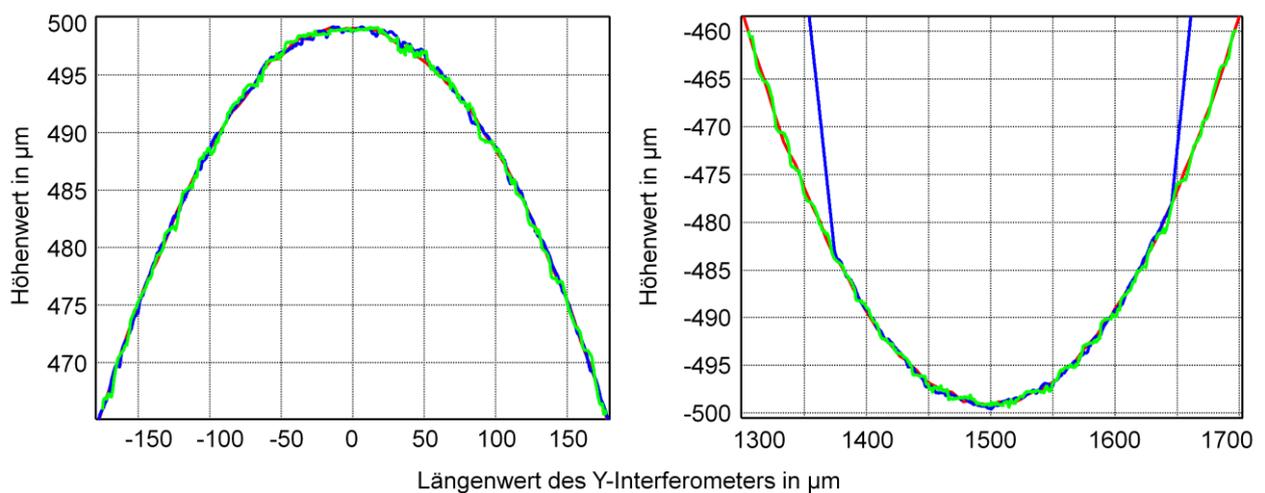


Abbildung 5.22: Vergleichsmessung eines Mikro-Konturnormal: rot – PTB, grün - Fokussensor, blau - Fokus-Stylus-Sensor

Als Schlussfolgerung kann man feststellen, dass durch das Messprinzip des Fokussensors beim Messen von Objekten mit wechselnder Neigung bis  $\pm 24^\circ$  kein systematischer Fehler entsteht. Diese Eigenschaft des Fokussensors ist durch das Nullindikatormessprinzip des Fokussensors zu

erklären. Die Nullposition des Fokussensors bleibt im genannten Bereich konstant und unempfindlich gegen Neigungsänderung der Messoberfläche und entsprechend gegen Änderung von Kalibrierungs- bzw. Kennlinienparametern.

## 5.7. Kapitelzusammenfassung

Das vorliegende Kapitel bildet der Schwerpunkt der Gesamtarbeit, da hier wichtige messtechnische Eigenschaften des Fokussensors als Basissensors erläutert sind. Zunächst wurde detailliert auf die Kennlinie des Fokussensors eingegangen: ihre Fehlerbereinigung, Kalibrierung und anschließend daraus resultierendes Auflösungsvermögen. Außerdem ist die Reproduzierbarkeit mit Unsicherheitsbetrachtung des Sensors auf der Basis von Messungen an kalibrierten Stufenhöhennormalen der PTB dargelegt. Zum Schluss des Kapitels wurde das Temperaturverhalten des Fokussensors und der Einfluss der Messoberfläche (Neigung, Beschaffenheit) untersucht und diskutiert. Danach sind entsprechende Empfehlungen abgeleitet.

Im Kapitel wurden u.a. der Aufbau und das Funktionsprinzip der NPM-Maschine vorgestellt. Nach der erfolgreichen Integration des Fokussensors und des Kameramikroskops in die Messmaschine wurden mögliche Messmodi und Messalgorithmen des aufgebauten Messsystems diskutiert. Anschließend wurde eine optimale Messmethode begründet.

Im nächsten Kapitel werden taktile Erweiterungen des Fokussensors (Fokus-AFM-Sensor und Fokus-Stylus-Sensor) als Bestandteile des Nanosensorsystems vorgestellt.

## 6. Taktile Erweiterungen des Fokussensors

Der Fokussensor lässt sich dank seines kompakten und modularen Aufbaus relativ einfach mit anderen mechanischen Antastmessmethoden kombinieren. In diesem Fall wird die Prüflingsoberfläche taktil angetastet. Der Fokussensor tastet die Rückseite des Antastelementes an und wird in diesem Fall als sekundärer, bewegungsregistrierender Messwegindikator genutzt. Das Ziel besteht insbesondere darin, durch eine taktile Antastung die Nachteile der optischen Messverfahren, wie z.B. begrenzte laterale Auflösung, Fehler durch Beugungserscheinungen, Phasensprünge und Abhängigkeit vom Reflexionsgrad zu vermeiden.

In diesem Zusammenhang kommen vor allem zwei etablierte Antastmöglichkeiten in Frage: Tastschnittmessverfahren und das Antasten mit einem Cantilever (AFM) (siehe Kapitel 2.1). Im Weiteren werden diese beiden Messkombinationen vorgestellt.

### 6.1. Fokus-Stylus-Sensor auf der Basis des Fokussensors

#### 6.1.1. Messprinzip und Konstruktion

Das Tastschnittmessprinzip an sich wurde detailliert in Kapitel 2.1.1 erläutert. Hierbei werden in der Praxis für die Messung der profilproportionalen Bewegung der Tastnadel (Stylus) vor allem kapazitive und induktive Sensoren eingesetzt. In unserem Fall wird diese Bewegung optisch mit Hilfe des Fokussensors erfasst (Abb. 6.1). Man fokussiert den Laserstrahl des Fokussensors auf die Rückseite der Tastnadel und nutzt das Fokusfehlersignal genau so, wie bei rein optischer Antastung zur Profilbestimmung des Prüflings. Das Funktionsprinzip bleibt dabei unverändert: Positionsregelung auf die Nullstelle der Fokussensorkennlinie. Um den Einfluss der lokalen Unebenheit bzw. Rauheit der Rückseite der Tastnadel zu eliminieren wurde ein dünnes, spiegelndes Silizium-Plättchen (ca. 2 mm<sup>2</sup>) auf der Rückseite angebracht. Ein wesentlicher Vorteil der Nullindikatormessung gegenüber dem Ausschlagsverfahren herkömmlicher Tastschnittgeräte besteht darin, dass mit konstanter Messkraft gemessen werden kann. Außerdem wird dabei der Bogenfehler durch direkte fluchtende Antastung bei einer konstanten Lage des Stylus eliminiert.

Der prinzipielle Aufbau des Fokus-Stylus-Sensors ist in der Abbildung 6.1 dargestellt. Es wurde ein kompletter Tastkopf (siehe Abb. 2.1) MFW 1250 der Firma Mahr GmbH mit Tastarm, eingebauter Hebelvorrichtung und Tastkraftentlastung der Tastspitze angewendet. Somit sind die Antastkräfte, welche auf die Messoberfläche bei einer Messung wirken, relativ niedrig, z.B. in unserem Fall betragen sie etwa 0,9 mN.

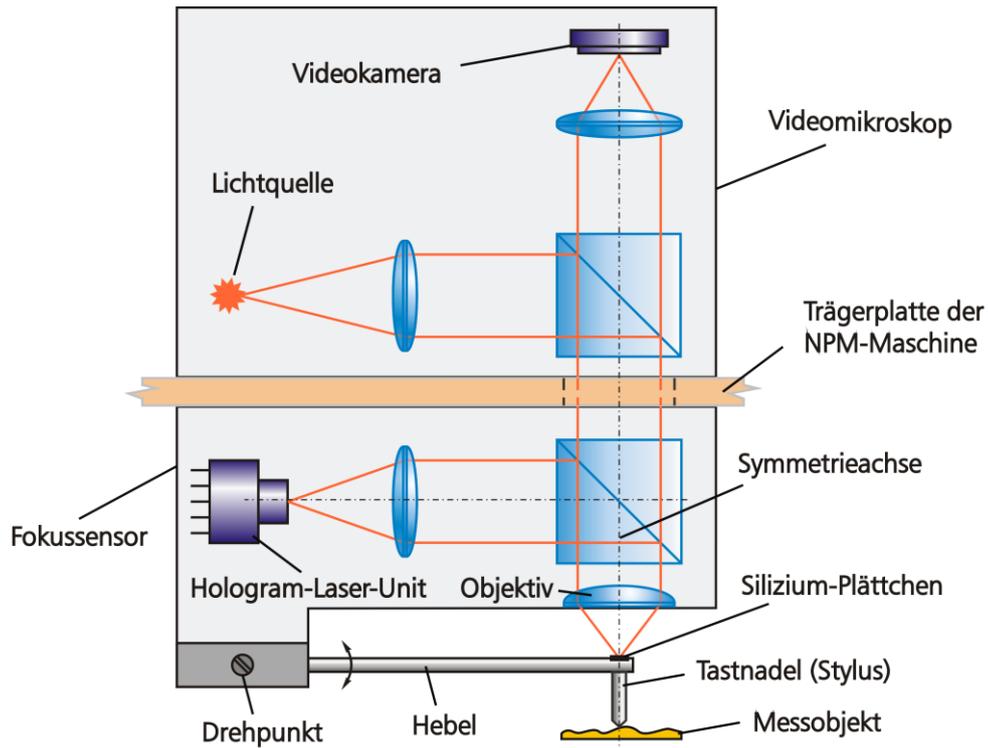


Abbildung 6.1: Prinzip eines Fokus-Stylus-Sensors auf der Basis des Fokussensors

Ein weiterer Vorteil gegenüber herkömmlichen Tastschnittgeräten besteht darin, dass die vertikale Bewegung der Messspitze fluchtend zur Symmetrieachse des Fokussensors gemessen wird. Fehler 1. Ordnung werden somit vermieden und das Abbe-Prinzip der NPM-Maschine wird eingehalten.

Vorteilhaft bei dem Fokus-Stylus-Sensor gegenüber der rein optischen Antastung (Fokussensor) ist, dass die Reflexionseigenschaften auf dem Taster nun stets konstant sind und der Sensor nur einmal kalibriert zu werden braucht. Nachteilig allerdings ist, dass das integrierte Digitalkameramikroskop zum Beobachten der Messoberfläche während der Messung nicht mehr benutzt werden kann. Der Durchmesser der Tastnadel ist viel größer als das Kamerabildfeld, die Messoberfläche wird dadurch komplett verdeckt. Insgesamt bleibt die Funktion des Mikroskops bei dieser Messeinsatzart sehr beschränkt, man kann es nur für eine vorläufige Justage (Fokussensor-Tastspitze) und auch für Kontrolle der laufenden Messung (Sicherheit) nutzen. Sonst könnte auf das Mikroskop verzichtet werden, bzw. das Mikroskop kann (z.B. aus Kosten- oder Platzgründen) vereinfacht und umgebaut werden. Eine weitere Option kann ein Kamerasystem mit seitlicher Beobachtung darstellen.

Die praktische Realisierung des Fokus-Stylus-Sensors auf der Basis des Fokussensors ist in der Abbildung 6.2 zu sehen. Der mechanische Aufbau des Fokussensors musste entsprechend

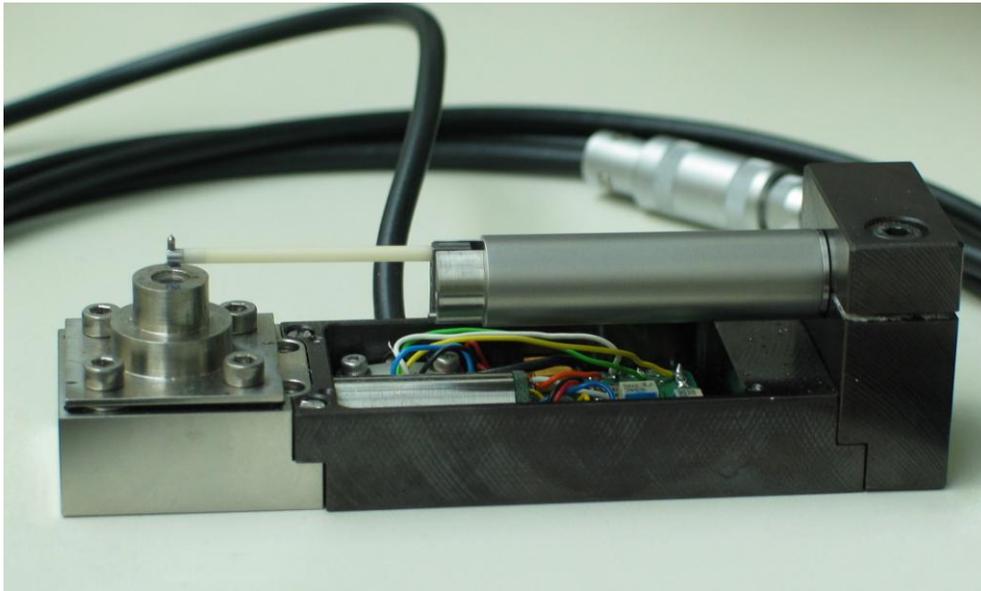


Abbildung 6.2: Praktische Realisierung des Fokus-Stylus-Sensors auf der Basis des Fokussensors

modifiziert werden. Das Sensorgehäuse wurde so verändert, dass es gleichzeitig als Aufnahme für den Taster dient (auf der. Abb. 6.2 dunkel lackiert). Somit wird durch diese einfache und zugleich robuste Konstruktion ein sehr stabiler und kompakter Tastsensoraufbau geschaffen. Die Justierung ist relativ einfach und besteht nur darin, dass der Laserstrahl des Fokussensors auf das fest angebrachte Siliziumplättchen fokussiert werden muss. Dieses sollte sich dabei frei über den ganzen Arbeitsbereich der Fokussensorkennlinie bzw. durch den Fokussierbereich des Objektivs (siehe Abb. 5.4) bewegen können, d.h. der Bewegungsbereich der Rückseite des Taststiftes (entsprechend freier Hebelbewegung) von ca. 1 mm soll der Fokusbereich des Objektivs überdecken. Um eine Kollision mit dem Objektiv auszuschließen, muss das Siliziumplättchen andererseits beim maximalen Hub mindestens 0,5 mm von dem Objektivlinsenglas entfernt bleiben.

Das Siliziumplättchen sollte dazu möglichst klein sein und möglichst symmetrisch (axial) zur Tastspitze platziert werden, damit der Z-Interferometer der NPM-Maschine, die Tastspitze und der Fokuspunkt des Fokussensors sich auf einer Achse befinden (fluchtend) und somit das abbefehlerfreie Messprinzip der NPM-Maschine gewährleistet werden kann.

### 6.1.2. Messtechnische Eigenschaften des Fokus-Stylus-Sensors

Zunächst werden die Betrachtungen der Auflösung des aufgebauten Fokus-Stylus-Sensors durchgeführt. Die Vorgehensweise ist recht einfach: die vertikale Auflösung entspricht der Auflösung des Fokussensors  $< 1$  nm (siehe Kap. 5.3), da sie durch den Tastvorsatz (Tastnadel und Hebelvorrichtung) nicht beeinflusst wird.

Die laterale Auflösung dagegen wird jetzt durch die Geometrie der Tastspitze bestimmt bzw. begrenzt. In unserem Fall beträgt der Radius der Diamantspitze  $2\ \mu\text{m}$  (siehe Abb. 2.2, Kap. 2.1.1). Dieser Radius ist in der taktilen Oberflächenmessung standardisiert.

Die Messunsicherheit des Fokus-Stylus-Sensors wurde an den bereits mit dem Fokussensor getesteten Stufenhöhennormalen der PTB [73] untersucht. Für die Messungen wurden allerdings nicht kalibrierte Bereiche (am Rand des Messobjekts) verwendet, damit die kalibrierten Regionen des Normal durch die mechanische Auswirkung der Diamanttastspitze nicht beschädigt werden konnten. Es wurde davon ausgegangen, dass die Strukturrenhöhe des Normal durch den Herstellungsprozess sehr konstant eingehalten werden kann und somit keine Abweichungen gegenüber den kalibrierten Bereichen zu erwarten waren.

Die Messungen haben diese Vermutung bestätigt. Die gemessenen Werte lagen tatsächlich im Bereich der Messunsicherheit des Normalwertes. Die Abbildung 6.3 zeigt eine Beispielmessung am C17 R27 Normal ( $69,1\ \text{nm} \pm 1,2\ \text{nm}$ ) der PTB. Die gemessene Stufenhöhe beträgt  $68,6\ \text{nm}$ .

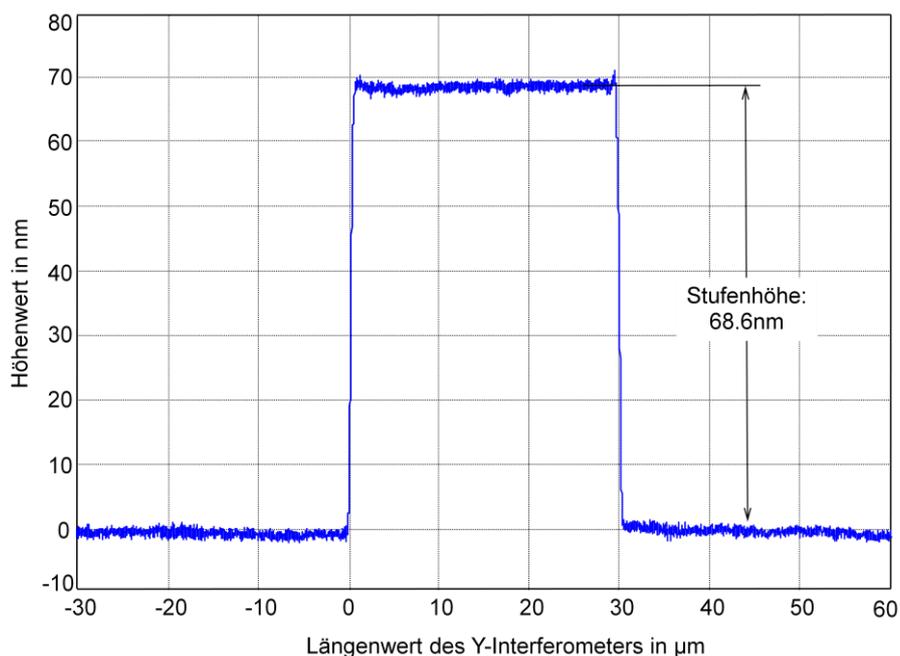


Abbildung 6.3: Linien-Scan des  $69,1\ \text{nm}$  Normal der PTB mit Fokus-Stylus-Sensor

Dabei wurde eine Fläche von  $100 \times 100\ \mu\text{m}$  mit 400 Linien abgerastet, die erweiterte Messunsicherheit für diese Messung betrug  $0,7\ \text{nm}$  für  $k = 2$ .

Eine entsprechende 3D-Darstellung dieser Messung ist in der Abbildung 6.4 zu sehen. Die Länge einer Einzelscanlinie beträgt hier  $100\ \mu\text{m}$ , wobei zur Stufenhöhenauswertung laut ISO-Norm eine Linienlänge von  $90\ \mu\text{m}$  verwendet wurde.

Ein weiterer messtechnischer Parameter, welcher eine wichtige Rolle spielt, ist die Scangeschwindigkeit während einer Messung. Einerseits möchte man möglichst schnell scannen. Andererseits darf es zu keiner Beschädigung des Messobjekts kommen und die Tastnadel darf

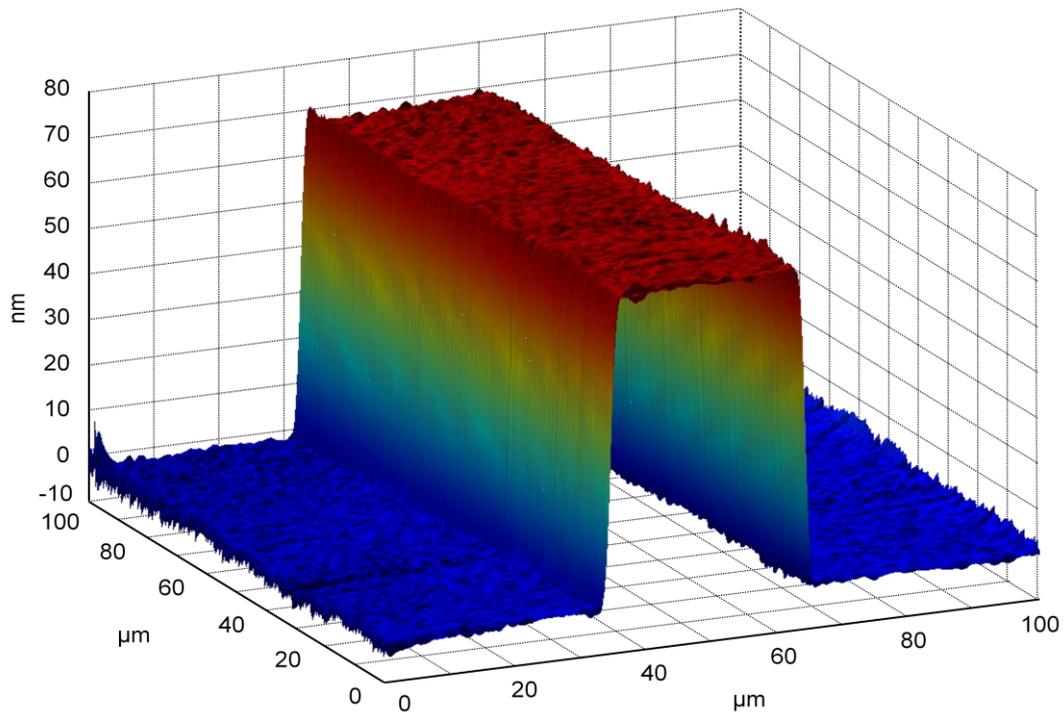


Abbildung 6.4: 3D-Messung des 69,1 nm Normals der PTB mit Fokus-Stylus-Sensor

auch bei großen Stufenhöhen nicht über das Messobjekt „springen“. Hier sind die realen Geschwindigkeiten erwartungsgemäß viel kleiner als z.B. bei rein optischer, berührungsloser Antastung. Der größte Einfluss kommt dabei von der Strukturbeschaffenheit des Messobjekts. Vereinfacht gilt folgendes: je „glatter“ die Oberfläche ist, desto schneller kann gescannt werden. Zugleich stellt die Kanten geometrie eine Begrenzung dar. Hier sind zum einen steile Kanten größer  $10\ \mu\text{m}$  und zum anderen die Steilheiten der Kanten in der Größenordnung des Öffnungswinkels der Tastspitze besonders kritisch. Im ersten Fall „springt“ die Tastspitze förmlich aus dem Messbereich des Fokussensors, im zweiten beginnt die Spitze durch eine größere Berührungsfläche in Folge der Reibung zu schwingen bzw. zu vibrieren, was zu einer Art Resonanz mit anschließendem „Abklingen“ des Regelungssystems führen kann. Die Abb. 6.5 zeigt die Messung einer solchen Struktur, deren Messung durch diese Problematik verfälscht wurde. Hier erkennt man deutlich, dass störende Schwingungen der Tastspitze nur jeweils an den fallenden Flanken der V-förmigen Vertiefungen auftreten, was durch eine leichte Neigung der Messobjektoberfläche und damit unterschiedlichen Reibungskräften an diesen gegenüberstehenden Wänden zu erklären ist. Da dieses Phänomen gleichermaßen bei Trace- und Retrace-scans aufgetreten ist, lässt sich ausschließen, dass die Schwingungen von der Messbewegungsrichtung („Ziehen“ bzw. „Schieben“ des Tasters) abhängig sind. Somit liegen die maximalen Scangeschwindigkeiten des Fokus-Stylus-Sensors im Bereich von 10 bis  $500\ \mu\text{m/s}$ .

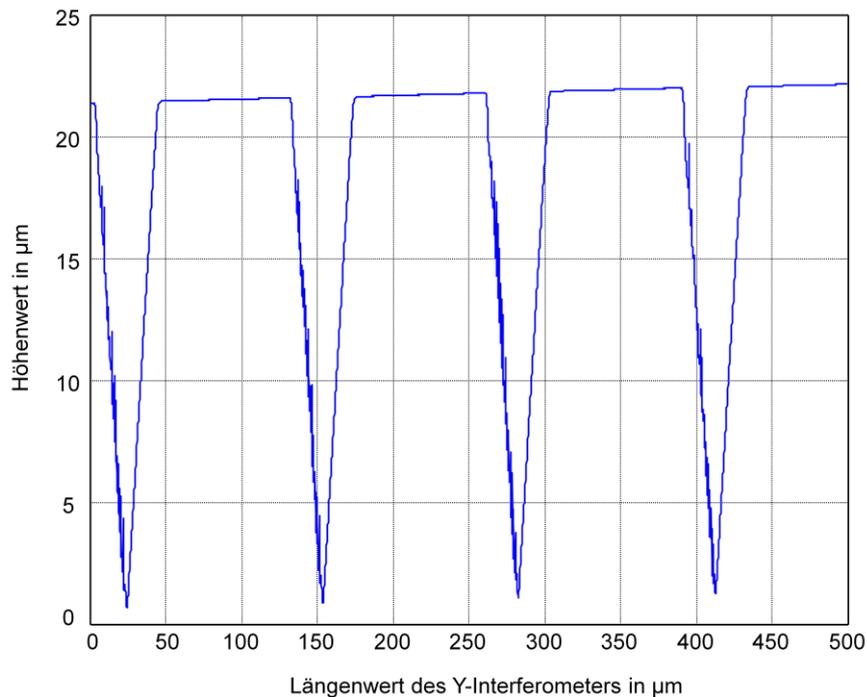


Abbildung 6.5: Linienscan einer V-förmigen Si-Struktur mit Fokus-Stylus-Sensor

Das thermische Verhalten des Fokus-Stylus-Sensors setzt sich aus der Temperaturabhängigkeit des Fokussensors (siehe Kap. 5.5) und zusätzlich der thermischen Ausdehnung der Tastnadel zusammen. Letztere könnte z.B. bei einer Länge des Aluminiumtaststiftes von 10 mm eine Temperaturempfindlichkeit von ca. 230 nm/K hervorrufen. Somit ist ein Messeinsatz des Fokus-Stylus-Sensors im Subnanometerbereich ohne präzise Temperaturkontrolle unmöglich.

### 6.1.3. Auswirkung des Fokus-Stylus-Sensors auf die Messoberfläche

Da es sich bei der Tastschnittmessmethode um eine taktile Messung des Objekts handelt, entsteht natürlich eine gewisse mechanische Wechselwirkung zwischen der Tastspitze und Messoberfläche. Meistens resultiert daraus eine „Beschädigung“ vor allem des Messobjekts, aufgrund der großen Härteunterschiede zwischen Tastspitze (Diamant) und Messobjekt.

Eine Abnutzung dieser Art konnte nachgewiesen und gemessen werden. Dazu wurde die bereits mit Fokus-Stylus-Sensor gemessene Stelle des Stufenhöhennormal der PTB (Kap. 6.1.2) mit Hilfe des Fokussensors abgetastet. Ein Bild des Kameramikroskops (Abb. 6.6) lässt deutlich die Fläche erkennen (hellere Bereiche), wo mit Fokus-Stylus-Sensor gescannt wurde (Abb. 6.4). Zusätzlich ist hier auch die Fläche der Fokussensormessung aufgezeichnet, um ein Bezug der beiden Scans zu verdeutlichen. Das zweite weniger ausgeprägte Rechteck oben auf dem Bild zeigt die Stelle, wo andere, ebenfalls mit Tastsensor durchgeführte, Probemessungen verliefen.

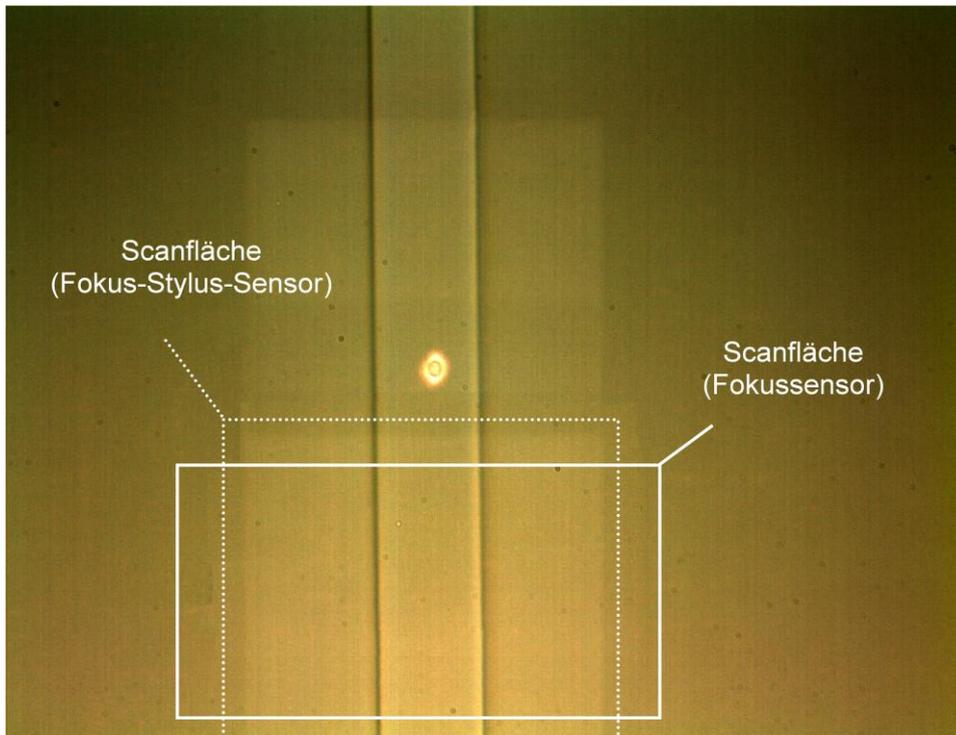
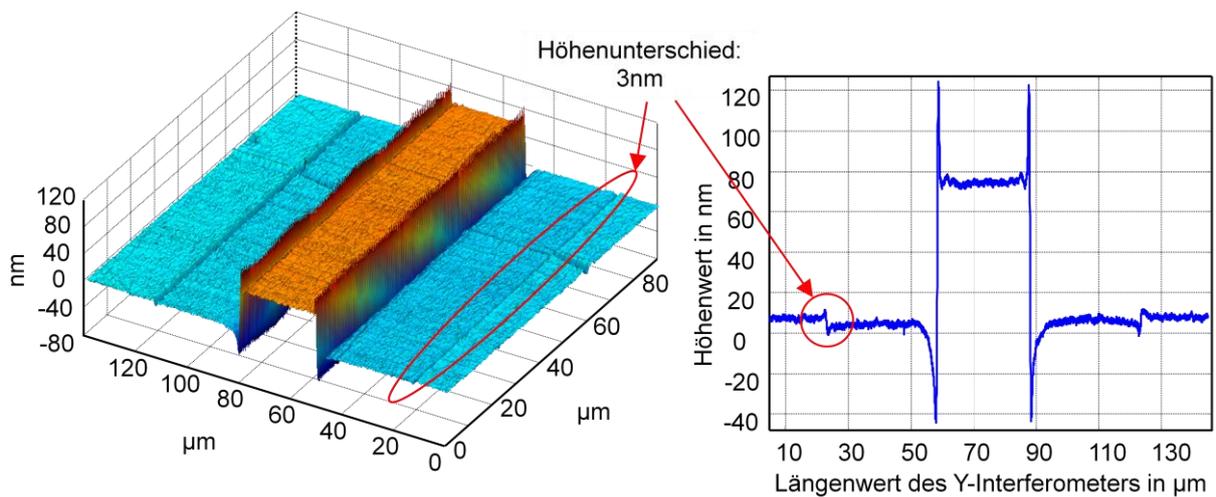


Abbildung 6.6: Mikroskopbild mit Spuren der Stylusmessung

Abbildung 6.7: Auswirkung der Tastnadel auf die Messoberfläche  
(gemessen mit dem Fokussensor)

Die Messung mit Fokussensor zeigt, dass während der Scans mit dem Stylus ca. 3 nm von der Siliziumoberfläche durch die Diamantentastspitze abgetragen wurden (siehe Abb. 6.7). Das Feld von  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  wurde mit 400 Scanlinien mit einer  $2\ \mu\text{m}$ -Tastspitze abgescannt.

Eine nennenswerte Abnutzung der Diamantentastnadel kann fast ausgeschlossen werden, wenn man zum einen die Härte beider Materialien gegenüberstellt: 10 für Diamant und 6,5 für Silizium (nach Mohs), und zum anderen sehr niedrige Reibungskoeffizient (bzw. Rauheit) des Diamanten berücksichtigt.

## 6.2. Fokus-AFM-Sensor auf der Basis des Fokussensors

### 6.2.1. Messprinzip und Konstruktion

Das Prinzip der Atomkraftmikroskopie (AFM) wurde detailliert in Kapitel 2.1.2 vorgestellt. Hier werden für die Messung der profilproportionalen Bewegung des Cantilevers überwiegend optische Verfahren nach dem so genannten „Lichtzeigerprinzip“ eingesetzt. Das heißt, dass ein Laserstrahl unter einem bestimmten Winkel auf den Cantilever auftritt und entsprechend auf eine Quadrantendiode reflektiert wird. Dabei sind die Differenzsignale der Quadrantendiode in einem bestimmten Bereich proportional zur Bewegung des Cantilevers. In einigen Fällen werden unterschiedliche Arten von Interferometern (z.B. Faser-Interferometer) zur Cantileverbewegungsdetektion verwendet.

In unserem Fall wird diese Bewegung ebenfalls optisch, allerdings mit Hilfe des Fokussensors erfasst. Genau wie bei dem bereits beschriebenen Fokus-Stylus-Sensor fokussiert man den Laserstrahl des Fokussensors nun auf die Rückseite des Cantilevers und nutzt das Fokusfehlersignal zur Bestimmung der Auslenkung des Cantilevers infolge eines zu scannenden Oberflächenprofils. Das Funktionsprinzip der Messung bleibt dabei unverändert: die Positionsregelung auf die Nullstelle der Fokussensorkennlinie (Nullindikatormessprinzip).

Im Vergleich zum Fokus-Stylus-Sensor musste allerdings die Sensorkonstruktion für den Fokus-AFM-Sensor abgewandelt werden, damit ein sinnvoller Einsatz in der NPM-Maschine möglich wird. Die Ursache dafür liegt einerseits im Aufbau des Cantilevers, dessen mechanische Belastbarkeit auf Grund des Spitzenradius von etwa 10 nm und des Materials (Silizium) stark begrenzt ist. Andererseits kann der Positioniertisch der NPM-Maschine durch seine relativ große Masse nur in einem niederfrequentem Bereich bewegt werden (siehe Kapitel 5.1.2), um bei der Regelung die Tastspitze des AFM im Nullpunkt des Fokussensorssignals zu halten. Diese Gegebenheiten beschränken die Scangeschwindigkeit auf  $< 1 \mu\text{m/s}$ .

Dieses Problem wurde dadurch gelöst, indem ein zusätzliches Piezoelement zwischen dem Fokussensor und dem AFM-Aufsatz, der auch die Fokuslinse beinhaltet, angebracht wurde. Dadurch wird eine zusätzliche, (im Vergleich zur NPM-Maschine) höherfrequente Nullpositionsnachregelung ermöglicht. Während der Messung liefert die Messmaschine den

niederfrequenten Anteil der Nachregelungsbewegung. Das Piezoelement dagegen ist auf Grund seiner viel höheren Eigenfrequenz für die hochfrequenten Anteile dieser Bewegung zuständig. Der Prinzipaufbau des Fokus-AFM-Sensors ist in der Abb. 6.8 dargestellt. Als Piezoelement wurde ein Piezoringaktuator ausgewählt, da das Licht vom Fokussensor bzw. Mikroskopbeleuchtung zum Cantilever ungehindert hindurchgeführt werden muss. Die Fokuslinse (Objektiv) muss zusammen mit dem AFM-Aufsatz bewegt werden. Daher (siehe Abb. 6.8) wurde der Innendurchmesser des Piezoringactuators entsprechend dem Durchmesser des kollimierten Laserstrahls (ca. 5 mm) ausgewählt. Zum Einsatz kam ein Piezoringaktuator der Firma *Piezsystem Jena* mit einer eingebauten Linearisierung (Dehnungsmessstreifen) und einem

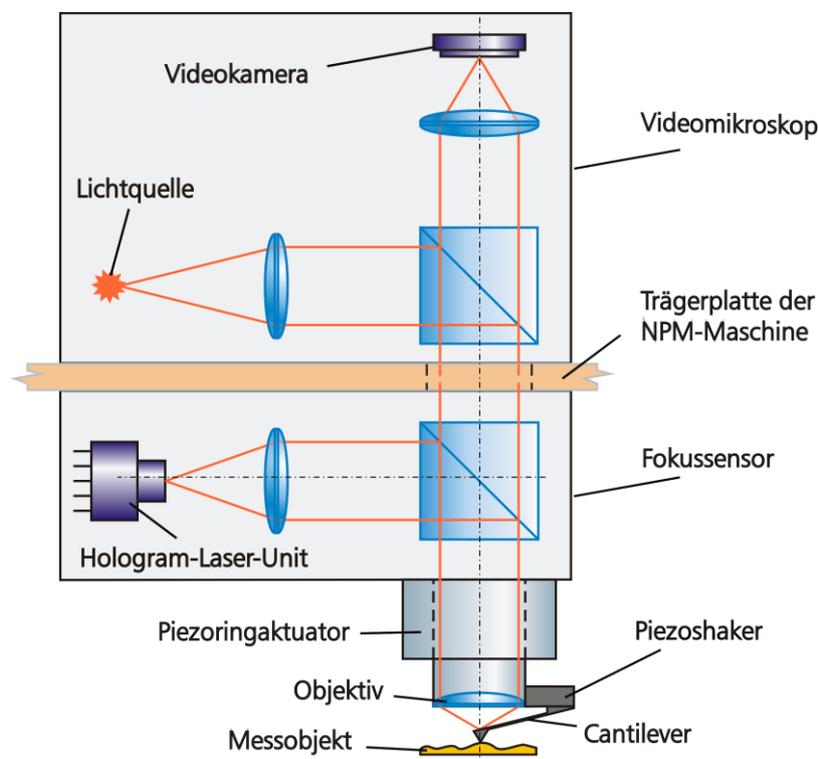


Abbildung 6.8: Prinzipieller Aufbau eines Fokus-AFM-Sensors auf der Basis des Fokussensors

Hub von  $10\ \mu\text{m}$  bei einer Auflösung  $< 1\ \text{nm}$  [82]. Als AFM-Aufsatz wurde eine bereits bestehende Konstruktion [83] verwendet. Mit Hilfe dieses Aufsatzes ist es möglich, den Fokuspunkt des Fokussensors genau auf die Rückseite des Cantilevers zu justieren, da dessen Breite ca.  $30..50\ \mu\text{m}$  beträgt. Außerdem wurde ein Piezoshaker integriert, um zukünftig den so genannten „Tappingmodus“ mit dem AFM realisieren zu können.

Im Gegensatz zum Fokus-Stylus-Sensor, bleiben bei dem Fokus-AFM-Sensor die Funktionen des integrierten Digitalkameramikroskops erhalten. Es dient zum einen zur Cantilever-Laserstrahl Justage, zum anderen bleibt die Beobachtungsfunktion während einer Messung fast

unbeschränkt erhalten. Der Cantilever deckt dabei nur einen kleinen Teil des Mikroskopbildes ab, die Oberfläche des Messobjekts ist weiterhin auf dem Bildschirm scharf zu sehen. Dazu ist nur eine kleine Nachjustierung an der Mikroskopoptik erforderlich, da die Länge der Cantileverspitze nur wenige Mikrometer beträgt.

Im Vergleich zur Stylusvariante bzw. zum Fokussensor erscheint der Gebrauch des Fokus-AFM-Sensors allerdings deutlich komplizierter, weil dabei ein zusätzlicher Regelkreis für den Piezoaktuator in den Messvorgang integriert werden muss. Auch in diesem Fall werden alle Regelungsfunktionen durch die DSP-Einheit der NPM-Maschine übernommen, wobei ein zweiter Eingang für das linearisierte Messsignal des Piezoactuators verwendet wird. Das Messergebnis setzt sich in dieser Messanordnung aus drei einzelnen Messsignalen zusammen und zwar aus dem Fokusfehlersignal des Fokussensors, dem Messsignal des Piezoverstärkers und dem Z-Interferometer-Signal der NPM-Maschine. Gegen die Befürchtungen, dass während der Messung die beiden Regelkreise quasi „gegeneinander“ arbeiten und zu Instabilitäten des Messsystems führen würden, funktionierte der Regelvorgang ohne weitere Zusatzlösungen. Dies ist auf die stark unterschiedlichen Eigenfrequenzen der beiden Stellelemente zurückzuführen: Voice-Coil-Motoren zum Antrieb des großen Messtisches der NPM-Maschine und der Piezoaktuator zur Bewegung des AFM-Aufsatzes.

Die Regelungsfunktionalität des Messsystems wurde aus Sicherheitsgründen zunächst in der NPM-Maschine ohne AFM-Aufsatz getestet. In diesem Fall arbeitet der Sensor als ein optischer Autofokussensor, wobei die Position der Fokuslinse mit Hilfe des Piezoactuators geregelt wurde (siehe Abb. 6.9). Diese Arbeitsweise des Fokussensors kann auch in der Praxis sehr hilfreich sein, z.B., wenn Höhenunterschiede im kritischen Bereich der Fokussensorkennlinie ( $> 4 \mu\text{m}$ ) mit hohen Geschwindigkeiten ( $> 1 \text{ mm/s}$ ) gemessen werden sollen. In diesem Fall stellt der Piezoaktuator die Fokuslinse anhand seiner im Vergleich zur NPM-Maschine höheren Dynamik „schneller“ nach, sodass die Messoberfläche den Arbeitsbereich der Fokussensorkennlinie nicht verlässt.

Nachdem der Autofokusaufbau ohne Cantilever auf „Funktionstauglichkeit“ erfolgreich getestet wurde, konnte der Fokussensor mit Hilfe des AFM-Aufsatzes zum Fokus-AFM-Sensor erweitert werden. Die praktische Realisierung des Fokus-AFM-Sensors ist in Abb. 6.10 zu sehen (ohne Kameramikroskop). Es gibt zwei Möglichkeiten der Justage des Laserstrahls zum Cantilever. Zum einen muss der Laserfokuspunkt genau auf die Rückseite des Cantilevers gebracht werden (X-Y Bewegung des Cantilevers), zum anderen muss der nötige Abstand Fokuslinse-Cantilever eingestellt werden (Z-Bewegung der Fokuslinse).

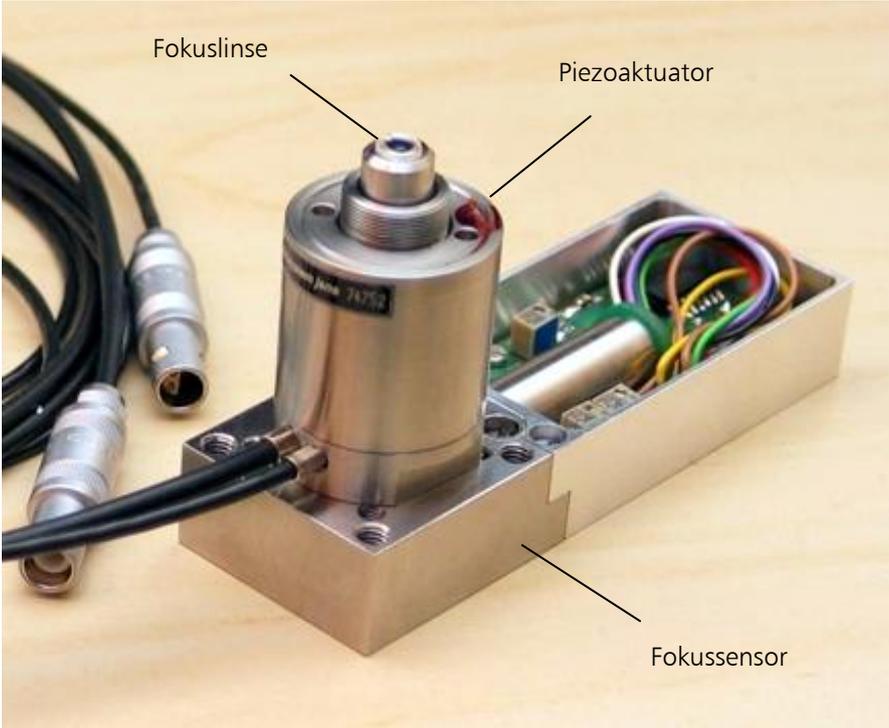


Abbildung 6.9: Autofokusvariante des Fokussensors

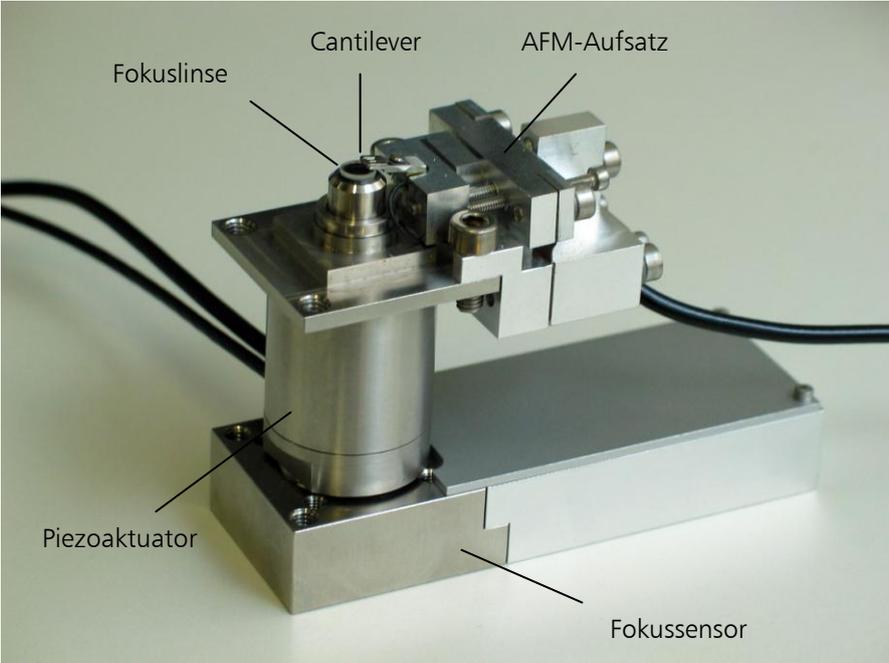


Abbildung 6.10: Praktische Realisierung des Fokus-AFM-Sensors auf der Basis des Fokussensors

Die Inbetriebnahme des Fokus-AFM-Sensors erwies sich insgesamt als komplizierter und aufwendiger im Vergleich zu anderen Einsatzvarianten des Fokussensors, was einerseits auf die Verwendung der sehr empfindlichen, leicht zerstörbaren Tastelemente (Cantilever) und andererseits auf eine zweifache elektronische Anbindung (zwei Meßsysteme) in die NPM-Maschine zurückzuführen ist.

### 6.2.2. Messtechnische Eigenschaften des Fokus-AFM-Sensors

Zuerst wird die Auflösung des aufgebauten Fokus-AFM-Sensors betrachtet. Der Piezoaktuator besitzt ein eigenes zusätzliches Messsystem auf der Basis von Dehnungsmessstreifen mit einer Auflösung von  $< 1$  nm. Das vertikale Auflösungsvermögen des Fokus-AFM-Sensors wird daher durch die Auflösungen der einzelnen Messsysteme (Fokussensor und DMS) definiert. Beide liegen bei  $< 1$  nm.

Die laterale Auflösung (Ortsauflösung) dagegen wird in diesem Fall durch die Geometrie der Cantileverspitze bestimmt und kann abhängig vom Cantilevertyp variieren (siehe Kap. 2.1.2).

Die praktischen Untersuchungen zur Messunsicherheit bei der Höhenmessung des Fokus-AFM-Sensors wurden ebenfalls auf bekannten Stufenhöhennormalen der PTB (siehe Kap. 5.4) durchgeführt. Diesmal wurde zur Auswertung eine Stufenbreite von  $5 \mu\text{m}$  verwendet, um die Leistungsfähigkeit des Messensors auch bei „schmalen“ Strukturen zu untersuchen.

Die Abbildung 6.11 zeigt eine Beispielmessung am C17 R27 Normal ( $69,1 \text{ nm} \pm 1,2 \text{ nm}$ ) der PTB. Die gemessene Stufenhöhe aus 20 Messlinien ( $1,5 \mu\text{m}$  Abstand zwischen einzelnen Scans) beträgt  $68,2 \text{ nm}$  mit einer erweiterten Messunsicherheit von  $0,9 \text{ nm}$  (für  $k = 2$ ).

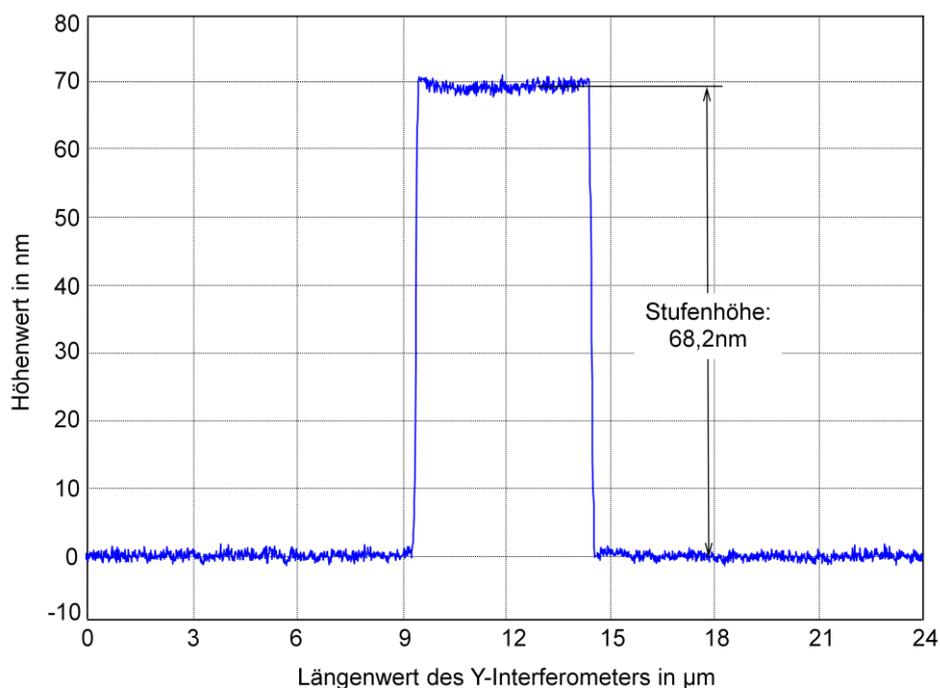


Abbildung 6.11: Linienscan des  $69,1 \text{ nm}$  Normal der PTB mit Fokus-AFM-Sensor

Eine entsprechende 3D-Darstellung dieser Messung ist in der Abbildung 6.12 zu sehen. Das Messfeld beträgt hier  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ , wobei zur Stufenhöhenauswertung laut ISO-Norm eine Linienlänge von etwa  $15\ \mu\text{m}$  bzw. eine Messfläche von  $15\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  genutzt wurde.

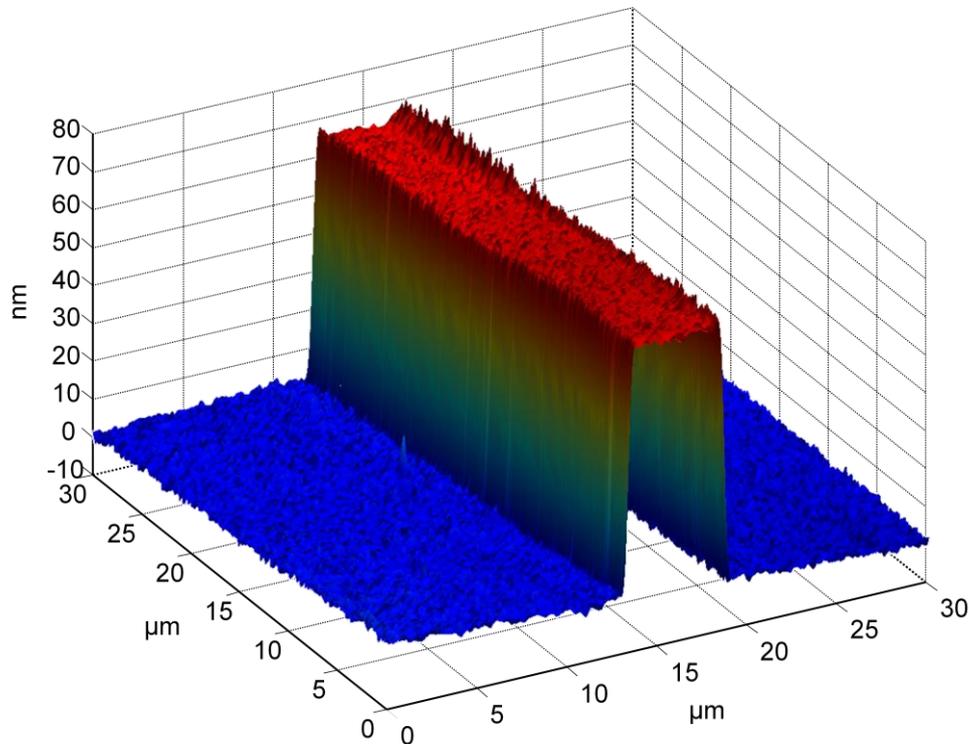


Abbildung 6.12: 3D-Messung des 69,1 nm Normals der PTB mit Fokus-AFM-Sensor

Ein weiterer, wichtiger messtechnischer Parameter ist wiederum die maximale Scangeschwindigkeit. Beim Fokus-AFM-Sensor sind die realen Geschwindigkeiten viel kleiner, als bei rein optischer (berührungsloser) Antastung oder auch beim Tastschnittmessverfahren. Das dynamische Verhalten des Fokus-AFM-Sensors wird durch die mechanischen Eigenschaften des Cantilevers begrenzt. Dies trifft besonders auf den Kontaktmodus des AFM zu, welcher auch beim beschriebenen Fokus-AFM-Sensor zur Anwendung kommt. Der so genannte „Tapping-Mode“ (Kapitel 2.1.2), wurde bisher nicht implementiert. Deshalb können noch keine konkreten Aussagen über die maximale Scangeschwindigkeit an dieser Stelle gemacht werden.

Auch die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjekts (Flankenwinkel- und Höhe, Rauheit usw.) hat wieder einen großen Einfluss auf die erreichbare Dynamik.

Die praktischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung des zusätzlichen Piezoaktuators zu einer deutlichen Verbesserung des dynamischen Verhaltens des Fokus-AFM-Sensors führt. Die maximal erreichten Scangeschwindigkeiten lagen (oberflächen- und strukturabhängig) in der Größenordnung bis zu  $70\ \mu\text{m/s}$  (zum Vergleich ca.  $1\ \mu\text{m/s}$  ohne Piezoaktor). Dieser Wert kann prinzipiell noch erhöht werden, wenn die Masse des AFM-

Aufsatzes (siehe Abb. 6.10) weiter verkleinert werden kann, da auch dieser während der Messung durch den Piezoaktuator mitbewegt werden muss.

Das thermische Verhalten des Fokus-AFM-Sensors setzt sich wieder aus der Temperaturabhängigkeit des Fokussensors (siehe Kap. 5.5) und dem thermischen Verhalten der AFM-Einheit (Piezoaktuator und AFM-Aufsatz) zusammen. Konstruktionsbedingt fällt die zweite Komponente mehr ins Gewicht als die erste. Neben der thermischen Ausdehnung spielt das temperaturbedingte Kriechen von Justageelementen des AFM-Aufsatzes eine erhebliche Rolle. Dabei beträgt allein die thermische Ausdehnung der AFM-Einheit ca. 500 nm/K. Die Temperatureigenschaften des Linearisierungskreises des Piezoaktuators wurden nicht näher untersucht.

Für den Einsatz des Fokus-AFM-Sensors im Subnanometerbereich ist eine präzise Temperaturregelung unerlässlich.

### 6.2.3. Ortsauflösungsvergleich des Fokussensors und fokussensorbasierten Stylus- und AFM-Sensoren

Bei den aufgebauten Messsensoren (Fokussensor, Stylussensor und AFM-Sensor) ist ein direkter Vergleich der Ortsauflösung möglich, da gleiche Randbedingungen durch die NPM-Maschine und den Fokussensor als Basissensor gegeben sind. Damit können optimale Einsatzbereiche für die jeweiligen Sensoren leichter bestimmt werden.

Wie in Kapitel 2, 5.3 bzw. 6.1.2 und 6.2.2 bereits dargelegt, liegen die erreichbaren Ortsauflösungen des Fokus-, Stylus- und AFM-Sensors bedingt durch ihre Antastmethode in unterschiedlichen Größenordnungen (entspr. Mikro- und Nanometerbereich). Auf den ersten Blick gibt es eine triviale Antwort: will man die größte laterale Auflösung erreichen, sollte man das AFM-Messprinzip nutzen. Das ist in vielen Fällen auch gerechtfertigt. Es gibt aber oft Messaufgaben, bei denen zwar eine laterale Submikrometerauflösung verlangt wird, welche dennoch mit optischen bzw. Tastschnittmessverfahren einfacher erreicht werden kann. Einfacher bedeutet in diesem Fall vor allem im Sinne der Zerstörbarkeit und des Verschleißes der AFM-Spitze.

Ein Beispiel dafür ist in der Abbildung 6.13 zu sehen. Hier wurden Ausschnitte eines Glasmaßstabs jeweils mit Stylus-, AFM- und Fokussensor gemessen. Dieser Glasmaßstab ist mit einem Ätzverfahren hergestellt worden, welches gewöhnlich eine gewisse Rauheit mit sich bringt. Der Fokus-AFM-Sensor (Bild 6.13 a) kann zwar die Struktur problemlos messen, ist aber durch seine nanometerkleine Messspitze „überempfindlich“ zur Oberflächenbeschaffenheit an den geätzten Stellen des Gitters.

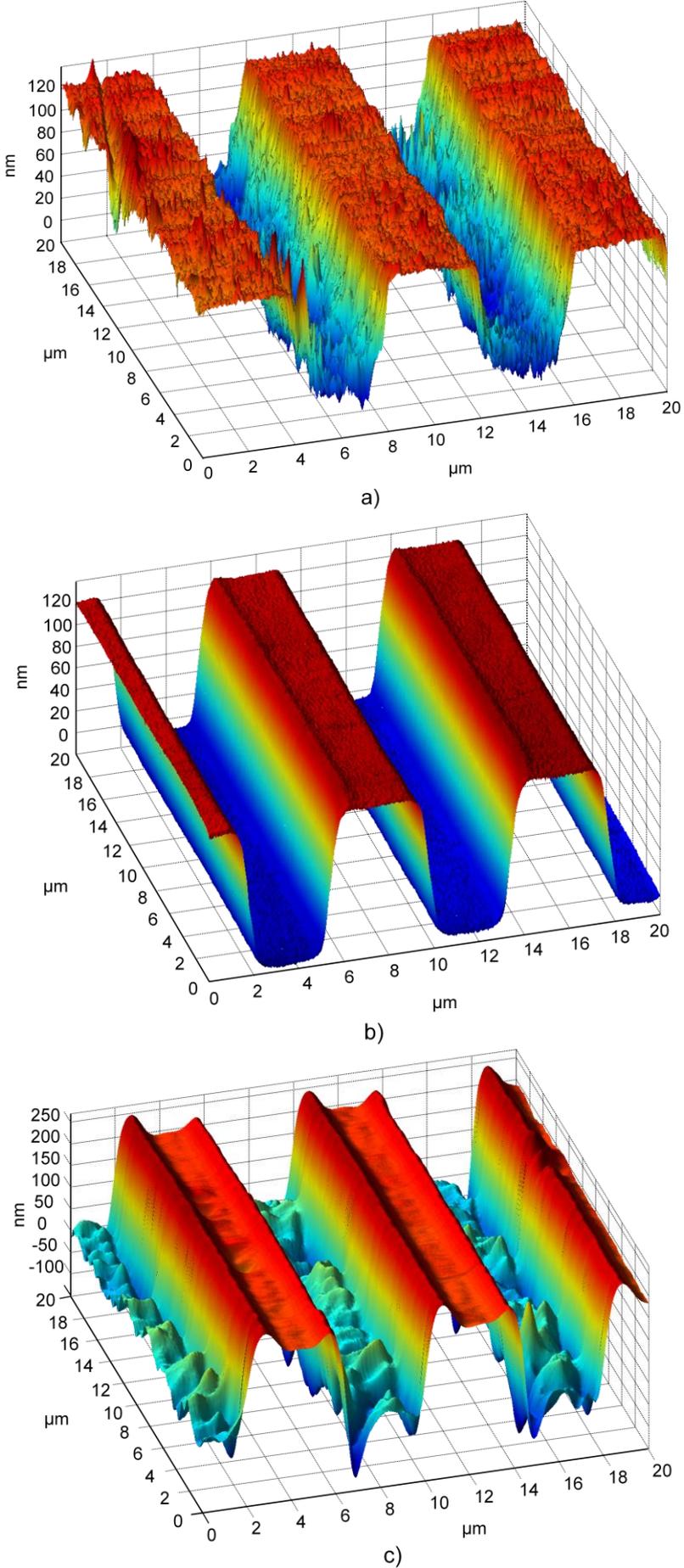


Abbildung 6.13: Messung eines Glasmaßstabs mit AFM-(a), Stylus- (b) und Fokussensor (c)

Der Fokus-Stylus-Sensor (Bild 6.13 b) hingegen „glättet“ die Messwerte der geätzten Oberfläche mit seinem großen Spitzenradius und gibt die Gittereigenschaften des Maßstabs viel deutlicher wieder. Die laterale Nanometerauflösung wird in diesem Fall durch die Messeigenschaften der NPM-Maschine und die genau bekannte Geometrie der Messspitze gewährleistet. Da die Geometrie der Messspitze in der Regel nicht genau bekannt ist, können sichere Aussagen nur zur Gitterperiode (nicht jedoch zum halben Gitterabstand) gemacht werden.

Auch eine hochgenaue optische Messung dieses Glasmaßstabs mit Hilfe des Fokussensors (Bild 6.13 c) ist möglich, obwohl durch die kleine Gitterkonstante und raue Ätzstellen komplizierte Beugungserscheinungen [78] das Messergebnis verfälschen. Die Periode des Gitters kann in diesem Fall trotzdem nanometergenau bestimmt werden (wird im Kapitel 7.4 detailliert dargestellt). Die gemessene Tiefe der Struktur wird dagegen komplett falsch gemessen: ca. 190 nm statt ca. 130 nm (siehe Stylus- bzw. AFM-Messung). Der Grund dafür liegt darin, dass an den erhöhten Chromschichten des Glasmaßstabs andere Phasensprünge auftreten als an den dazwischen liegenden geätzten Glasflächen. Auch andere optische Messverfahren, wie z.B. Weißlichtinterferenzmikroskopie, weisen gleiche Probleme bei der Messung solcher Messobjekte auf. Die Abbildung 6.14 zeigt ein Beispiel dafür. Hier wird eine Halbleiterstruktur mit einem

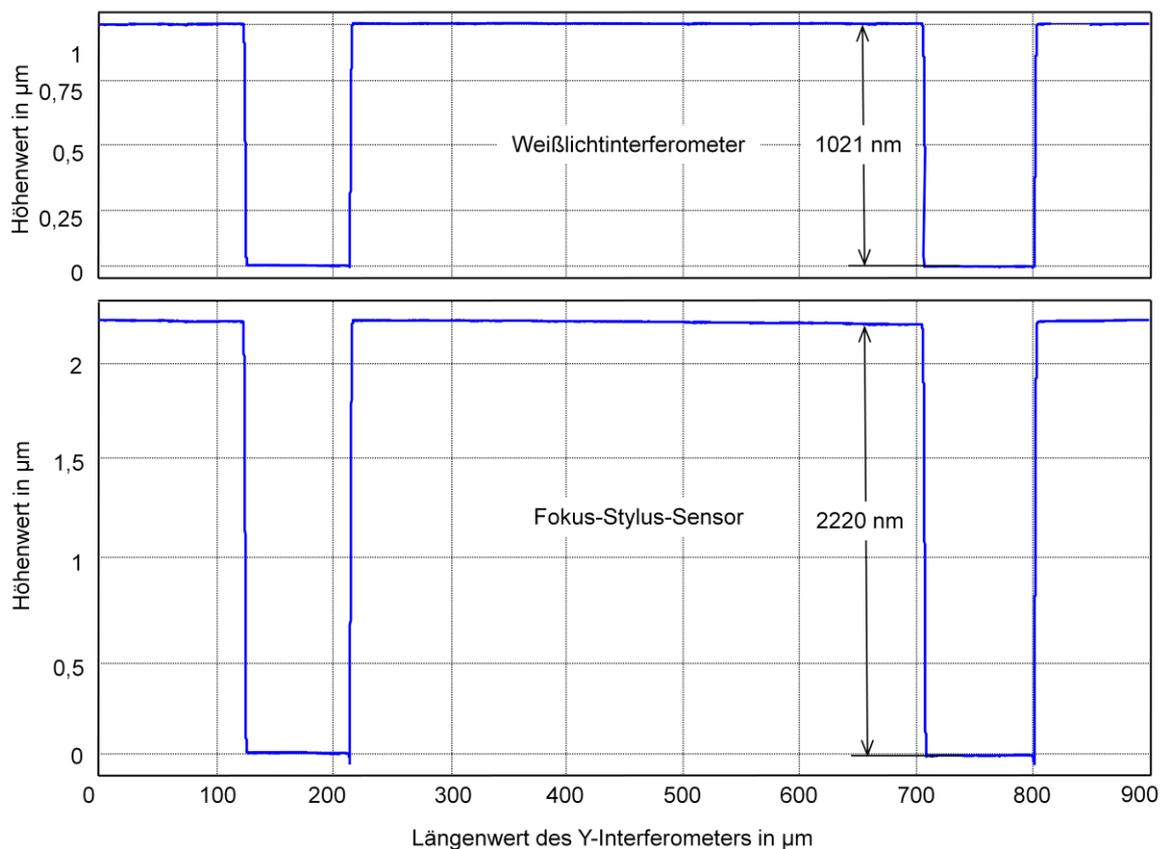


Abbildung 6.14: Messung gleicher Halbleiterstruktur mit Weißlichtinterferometer (optisch) und Fokus-Stylus-Sensor (taktile)

Weißlichtinterferometer (Mirau-Typ) und mit aufgebautem Fokus-Stylus-Sensor an gleicher Stelle gemessen. Die Höhenwerte unterscheiden sich mehr als um Faktor 2: 2220 nm bei taktiler und 1021 nm bei optischer Messung.

Die aufgeführten Beispiele machen außerdem deutlich, dass eine Wechselwirkung mit der Messoberfläche bei unterschiedlichen Antastprinzipien im Submikrometer- bzw. Nanometerbereich eine außerordentlich wichtige Rolle spielt.

### 6.3. Kapitelzusammenfassung

Im Kapitel 6 wurden die taktilen Sensoren des aufgebauten Nanosensorsystems vorgestellt: der Fokus-Stylus-Sensor und der Fokus-AFM-Sensor. Hierbei wurden konstruktive und messtechnische Eigenschaften dieser Sensoren detailliert behandelt und verglichen, unter anderem Messprinzip, Aufbau und Auflösungsvermögen.

Am Ende des Kapitels erfolgte außerdem eine Gegenüberstellung der drei Sensoren des Nanosensorsystems am Beispiel einer Messung eines Glasmaßstabs.

Im nächsten Kapitel werden repräsentativ spezifische Anwendungsbeispiele und mögliche Einsatzbereiche des Fokussensors als Basissensors des entwickelten Nanosensorsystems vorgestellt und diskutiert.

## 7. Anwendungsbeispiele des Fokussensors zur Oberflächenmessung

### 7.1. Verwendung eines LWD-Objektivs zur Messungen mit Fokussensor

Wie in Kapitel 3.3 und 4.3 dargelegt, wird eine optimale Funktion des Fokussensors nur bei Verwendung einer Objektivlinse mit einer ausreichenden numerischen Apertur ( $NA \approx 0,60$ ) gewährleistet. Solche Linsen zeichnen sich bekanntlich durch kleine Brennweiten von ca. 3-3,5 mm und entsprechend durch kleine Arbeitsabstände von ca. 1,5-2 mm aus. Diese Werte stellen besonders bei dynamischer, scannender Arbeitweise ein großes Problem dar. Hier handelt es sich zum einen um den Sicherheitsaspekt der Messungen und zum anderen um eine Höhen-Beschränkung bei der Messung von Proben mit größeren Höhendifferenzen.

Im ersten Fall besteht eine erhöhte Kollisionsgefahr zwischen Messobjekt und Fokuslinse, falls aus irgendwelchem Grund (Bedienungsfehler oder ungünstige Oberflächenbeschaffenheit) während einer Messung der optische Kontakt zur Messoberfläche (siehe Kapitel 5.1.2) verloren geht. Da der Arbeitsabstand Messobjekt-Fokuslinse im Vergleich zum maximalen Z-Hub der NPM-Maschine kleiner ist, kann es dabei zu einer Kollision kommen.

Im zweiten Fall können solche Strukturen bzw. Oberflächenformen nicht angetastet werden, welche mit ihren geometrischen Gegebenheiten den Arbeitsabstand der Fokuslinse überschreiten (z.B. Stufenhöhen  $> 2$  mm).

Eine wirksame Abhilfe wurde durch Verwendung eines so genannten LWD-Objektivs (LWD steht aus dem Englischen für Long Working Distance) geschaffen. Die LWD-Objektive zeichnen sich durch extrem große Arbeitsabstände bei großer Numerischer Apertur (NA) und werden verbreitet in der Mikroskopie benutzt, um „räumlich ausgedehnte“ Proben zu untersuchen, bzw. um das Probenhandling beim Mikroskopieren zu erleichtern. Diese Eigenschaft wird durch eine besondere Aufweitungsoptik erreicht. Das führt als Folge allerdings auch zu einer Vergrößerung der Geometrie des Objektivs.

Zum Einsatz im Fokussensor kam ein 50x LWD-Objektiv der Firma Nikon [84] mit einer NA von 0,55, einer Brennweite von 4 mm und einem Arbeitabstand von 10,1 mm. Die bisherige Objektivlinse des Fokussensors hat zum Vergleich folgende Parameter:  $NA = 0,60$ ,  $f = 3,3$  mm, Arbeitsabstand = 1,8 mm.

Das LWD-Objektiv wird mit Hilfe eines Adapters in das Gehäuse des Fokussensors eingeschraubt. So ist ein einfacher Wechsel zwischen Fokuslinse (Abb. 4.8) und LWD-Objektiv ohne weiteres

möglich. Die Abbildung 7.1 zeigt den Fokussensor mit dem LWD-Objektiv in der NPM-Maschine. Der Abstand zum Messobjekt entspricht hier dem realen Arbeitsabstand des Objektivs (10,1 mm). Damit ist es ohne weiteres möglich mit Hilfe dieses Objektivs den vollen Arbeitsbereich der NPM-Maschine in Z-Richtung von 5 mm abzudecken und eine Bewegung der Spiegelecke ohne Kollisionsgefahr zu ermöglichen (maximaler Hub: ca. 7 mm).

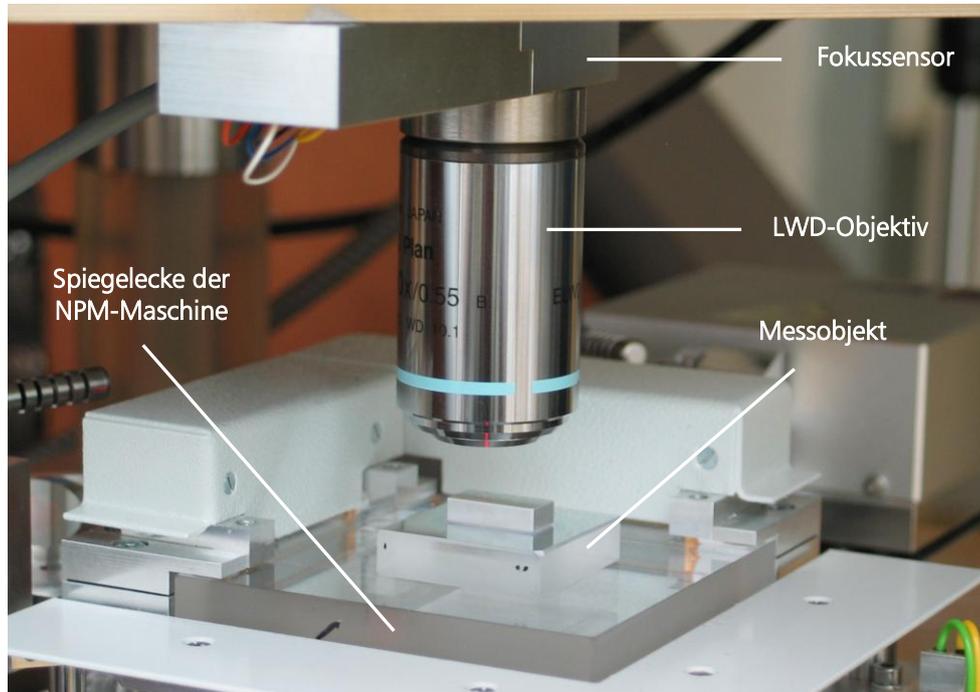


Abbildung 7.1: Fokussensor kombiniert mit einem LWD-Objektiv integriert in die NPM-Maschine

Im Weiteren wurden auch die messtechnischen Eigenschaften, insbesondere der Kennlinienverlauf des Fokussensors in Kombination mit dem LWD-Objektiv, überprüft und mit der klassischen Variante verglichen. Erwartungsgemäß konnten dabei keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden die meisten der hier gezeigten Messbeispiele in Kombination mit beschriebenem LWD-Objektiv durchgeführt, da Sicherheit und Komfort während der Messungen deutlich höher als bei Verwendung des kleinen Arbeitsabstandes sind.

## 7.2. Messung von Stufenhöhen im Millimeterbereich

Einer der großen Vorteile der Kombination NPM-Maschine-Fokussensor besteht in der Möglichkeit, die Messungen mit nanometergenauer Höhenauflösung im Millimeterbereich (bis max. 5 mm) durchzuführen. Dazu wurden spezielle Stufenhöhennormale hergestellt. Diese sind

in Form zweier angesprengten Teile (Basis und Stufe) aus Quarzglas realisiert worden. Die Basisteilgröße beträgt jeweils 30 x 30 x 8 mm, die angesprengten Stufen sind 16 x 8 x 1..5 mm groß (siehe Abb. 7.2). Damit stehen insgesamt 5 Stufen mit ca. 1, 2, 3, 4 und 5 mm Höhe zu Verfügung. Die Quarzoberfläche der Normale wurde nachträglich verspiegelt. Durch die höhere Reflexion kann damit eine höhere Auflösung erreicht werden (siehe Kapitel 5.3).

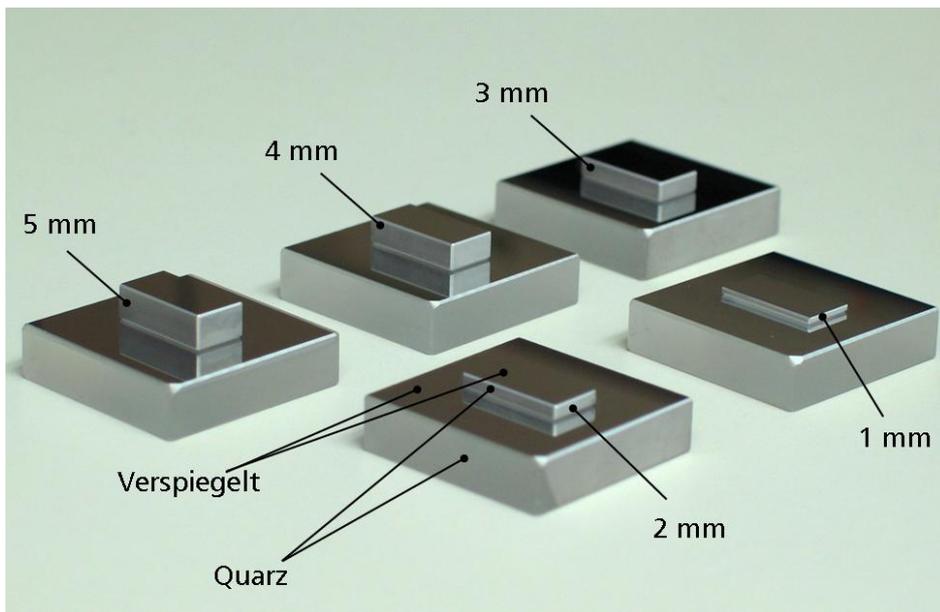


Abbildung 7.2: Stufenhöhennormale aus Quarzglas

Die Stufenhöhenmessungen wurden entsprechend der ISO-Norm 5436-1 [74] in der Weise durchgeführt, dass sich jede Scanlinie aus drei Einzelscans zusammensetzt. Solche Arbeitsweise ist bei allen Stufenhöhenmessungen notwendig, deren Höhe größer als  $3,5\ \mu\text{m}$  beträgt (siehe Kapitel 5.1.2). Dieses Messprinzip wird aus der Abbildung 7.3 ersichtlich. Hier ist als Beispiel eine Messung der 2 mm-Stufenhöhe dargestellt. Eine einzelne Messung verläuft folgendermaßen:

- Position 1: Startpunkt, Annäherung zur Oberfläche (Positioniermodus der NPM-Maschine);
- Position 2: Kontakt zur Oberfläche, Start des ersten Scanvorgangs;
- Abschnitt 2-3: Erster Einzelscan der ISO-Auswertung (Messmodus der NPM-Maschine);
- Position 3: Lösen des Kontakts zur Oberfläche, Start der Bewegung zum zweiten Messabschnitt (Positioniermodus);
- Position 4: Annäherung zur Oberfläche (Positioniermodus);
- Position 5: Kontakt zur Oberfläche, Start des zweiten Scanvorgangs;
- Abschnitt 5-6: Zweiter Einzelscan der ISO-Auswertung (Messmodus der NPM-Maschine);

Position 6: Lösen des Kontakts zur Oberfläche, Start der Bewegung zum dritten Messabschnitt (Positioniermodus);

Position 7: Annäherung zur Oberfläche (Positioniermodus);

Position 8: Kontakt zur Oberfläche, Start des dritten Scanvorgangs;

Abschnitt 8-9: Dritter Einzelscan der ISO-Auswertung (Messmodus der NPM-Maschine);

Position 9: Lösen des Kontakts zur Oberfläche, Ende der Messung.

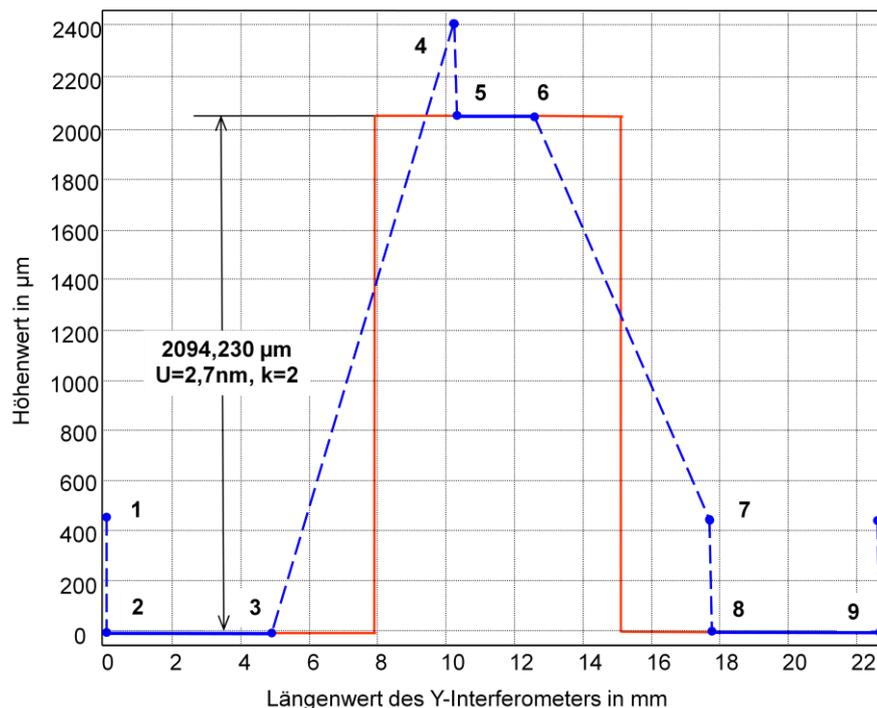


Abbildung 7.3: Prinzip von Stufenhöhenmessung im Millimeterbereich  
(rot – Stufe, blau - Bewegung der NPM-Maschine)

Eine erfolgreiche Messung bei dieser „halbautomatischen“ Messweise ist nur dann möglich, wenn vorab die ungefähre Höhe der Stufe bekannt ist, damit die Positionierbewegungen 2-4 und 6-7 korrekt durchgeführt werden können. Außerdem sollten alle drei Einzelscans (2-3, 5-6 und 8-9) symmetrisch bezüglich der Stufenkante gewählt werden, um die ISO-Normforderungen nicht zu verletzen. Dies ist vor jeder Messung durch eine Kantenpositionsbestimmung durchzuführen.

Eine 20-malige Messung der 2 mm Stufe (an gleicher Stelle) zeigte eine erweiterte Messunsicherheit von nur  $\pm 2,7 \text{ nm}$  (für  $k = 2$ ). Auch bei Messung von anderen Stufenhöhen dieser Bauart sind ebenfalls sehr hohe Reproduzierbarkeiten erreicht worden.

Eine Reihe weiterer Informationen bezüglich der Messung der beschriebenen Normale kann in [85] gefunden werden.

### 7.3. Einsatz des Fokussensors zur Tröpfchenmessung

Die in diesem Kapitel aufgeführten Untersuchungen wurden im Rahmen eines Verbundprojekts Pikofluidik an der TU-Ilmenau durchgeführt. Es handelte sich hierbei unter anderem um die Problematik der Dosierungsgenauigkeit von kleinsten Flüssigkeitsmengen (Tröpfchen mit Pikolitervolumen). Als eine der möglichen Methoden zur Tröpfchenvermessung wurde die Verwendung des Fokussensors vorgeschlagen.

Der Ausgangspunkt dieser Methode liegt in der Abhängigkeit des Volumens eines auf eine Planoberfläche aufgetragenen Tröpfchens von seiner Höhe und seinem Durchmesser. Diese zwei Parameter eines Tröpfchens können z.B. berührungslos mit Hilfe der NPM-Maschine mit integriertem Fokussensor bestimmt werden. Dazu werden lediglich einige Linienscans über die Tröpfchenoberfläche benötigt, mit der Annahme, dass die Tröpfchen symmetrisch sind, was in diesem Fall durch ein kleines Volumen (Pikoliter) und durch das Dosierungsprinzip (Pipettenkonstruktion) gewährleistet wird. Allerdings können nur vergleichbar „flache“ Tröpfchen (mit einem Benetzungswinkel von max.  $20^\circ$ ) auf diese Weise abgetastet werden, wobei der Benetzungswinkel (Kontaktwinkel) sich durch Wahl eines entsprechenden Trägermaterial in gewissen Grenzen beeinflussen ließ.

Erste praktische Untersuchungen haben ein interessantes Phänomen dieses Messverfahrens offenbart (vgl. Abbildung 7.4). Hier werden einzelne zeitäquidistante Scans eines langsam verdunstenden Wassertröpfchen dargestellt: die Messlinien 1 bis 5 wurden jeweils mit 30 sec Zeitabständen an gleicher Stelle aufgenommen. Die letzte Messung 5 (blau) ist fehlerbehaftet und demonstriert die Messgrenze dieses Messverfahrens. Der Fehler entsteht durch das Fokussensormessprinzip. Der Laserstrahl des Fokussensors wird ab einer kritischen Höhe des Wassertröpfchens von etwa  $30\ \mu\text{m}$  zusätzlich von der Trägeroberfläche so stark reflektiert, wodurch das Messsignal des Fokussensors beeinflusst und verfälscht wird. Das spiegelt sich in einer scheinbaren sprunghaften Vergrößerung des Tröpfchenvolumens wieder. Damit beträgt das kleinste messbare Tröpfchenvolumen umgerechnet ca. 17 bis 20 nl.

Auch bei entspiegelten Trägerplatten konnte dieses „Durchfokussierungseffekt“ nicht verhindert werden. So wurden Möglichkeiten zur Unterdrückung dieses Störreflexes untersucht. Letztendlich konnte gezeigt werden, dass die Tröpfchen auch im Pikoliter-Bereich gemessen werden können. Voraussetzung dazu sind möglichst gleiche Brechungsindizes des Tröpfchens und der Trägerplatte. Zunächst wurde erfolgreich ein Tröpfchen aus Immersionsflüssigkeit untersucht, das eine Brechzahl von 1,515 aufweist. Damit besitzen Trägerplatte und Tröpfchen die gleiche Brechzahl. Die Trägeroberfläche unter dem Tröpfchen wird dadurch für den Fokussensor "unsichtbar", es kommt keine störende Reflexion des Laserlichtes mehr und der Effekt der Durchfokussierung wird verhindert. Die Abbildung 7.5 zeigt eine 3D-Messung von Immersionsöltröpfchen.

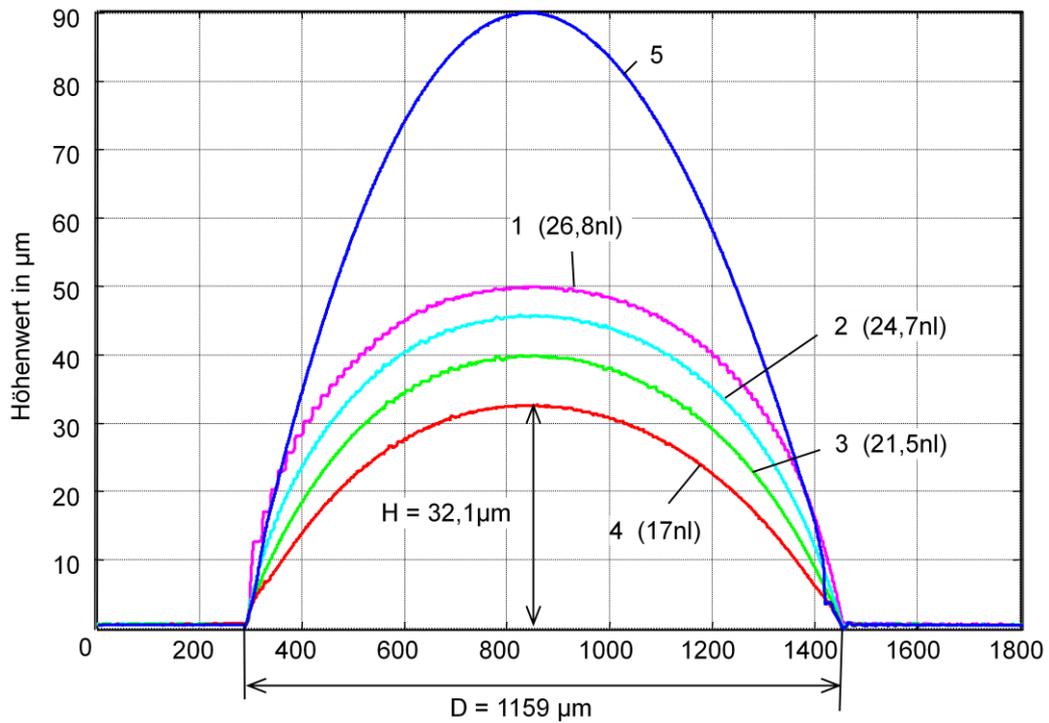


Abbildung 7.4: Messung eines verdunstenden Wassertropfchen

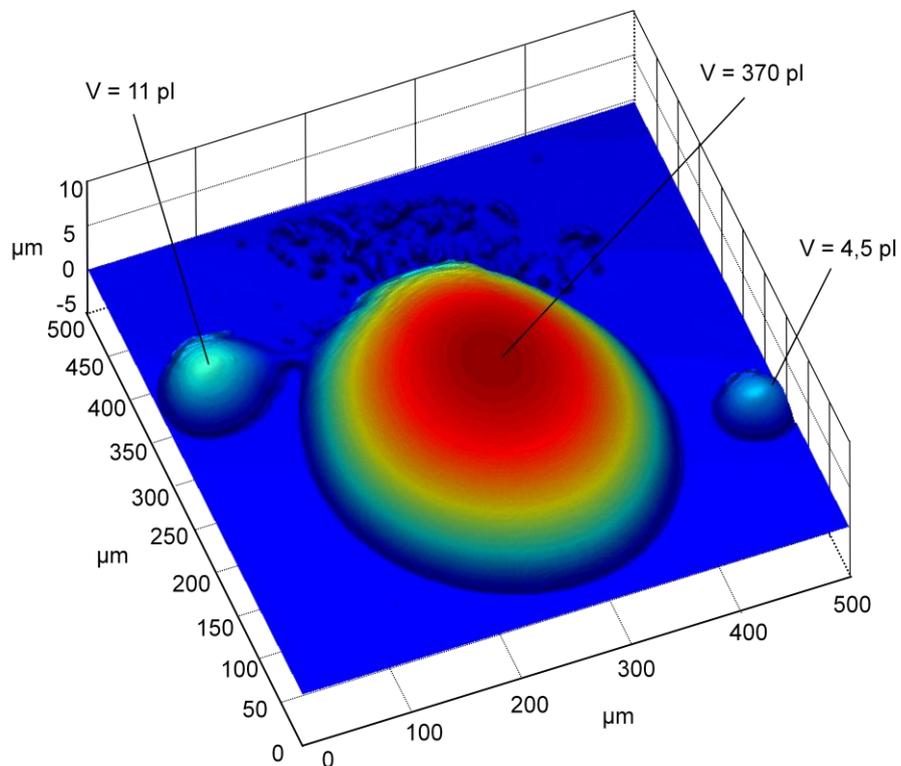


Abbildung 7.5: Immersionsöltröpfchen gemessen mit Fokussensor

Will man Wassertröpfchen untersuchen, muss die Brechzahl der Trägerplatte möglichst auf  $n = 1,33$  von Wasser reduziert werden. Diese seltene Voraussetzung ist nur bei einigen Materialien wie Kristallen (Natriumfluorid ( $\text{NaF}$ ,  $n = 1,32$ ) und Magnesiumfluorid ( $\text{MgF}_2$ ,  $n = 1,38$ )) der Fall [86]. Hier tritt allerdings wieder ein anderer Nachteil auf: die Löslichkeit dieser Kristalle (Salze) in Wasser (4,22 g/100g für Natriumfluorid bzw. 0,002 g/100g für Magnesiumfluorid). Diesbezüglich konnten keine weiteren Untersuchungen durchgeführt werden, da spezielle klimatische Bedingungen (vor allem höchste Feuchtigkeit) erforderlich wären.

Der geschilderte Durchfokussierungseffekt stellt generell ein großes Problem bei den optischen Messverfahren dar. Es ist daher notwendig vor jeder Messung die Probenmaterialien zu analysieren, sonst können die Messergebnisse bei einigen Materialkombinationen komplett verfälscht interpretiert werden. Solche fehlerhafte Messung treten zum Beispiel auch bei der Messung einer auf Silizium aufgetragenen Siliziumdioxid-Schicht auf. Die mit Fokussensor gemessene Schichthöhe betrug schichthöhenabhängig zum Teil weniger als die Hälfte von dem realen Wert. Hier ist ein gleicher Durchfokussierungseffekt aufgetreten, da Siliziumdioxid für den Laserstrahl des Fokussensors transparent ist, das Silizium selbst jedoch einen hohen Reflexionsgrad aufweist. Weitere Beispiele diesbezüglich können aus [78] entnommen werden.

#### 7.4. Pitchmessung mit Fokussensor

Obwohl der Fokussensor mit seiner begrenzten lateralen Auflösung nur bedingt zur Breiten- bzw. Pitchmessungen geeignet ist (siehe Kap. 5.3), demonstriert folgender Versuch, dass bei einigen speziellen Anwendungen trotzdem eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden kann.

Die Messungen wurden an einem Auflösungsnormal der PTB [87] durchgeführt. Als Referenzstruktur diente dabei ein rechteckiges Gitter geätzt in einem Siliziumchip mit einer nominalen Pitchgröße von  $80 \mu\text{m}$  und einer Länge von etwa 2 mm. Es wurde eine Linie etwa in der Mitte des kalibrierten Bereichs über die ganze Gitterlänge 10 Mal nacheinander gescannt. Für jede Scanbewegung (Linie) wurden die mittlere Pitchgröße und dann die erweiterte Messunsicherheit (aus 10 Wiederholungen) berechnet (siehe Abbildung 7.6). Der mit dem Fokussensor und der NPM-Maschine ermittelte Wert liegt mit  $(80.002 \text{ nm} \pm 2,1 \text{ nm})$  im Bereich der erweiterten Messunsicherheit ( $U = \pm 1,2 \text{ nm}$ ) der PTB-Messung ( $80.001,2 \text{ nm}$ ).

Außerdem zeigte diese Messung auch ein praktisches Beispiel der Einsatzmöglichkeit des Fokussensors zur Messung von steilkantigen Strukturen mit einer Tiefe von ca.  $3,5 \mu\text{m}$ . Die Scans wurden dabei im Unterschied zu Kapitel 7.2 im dynamischen Modus durchgeführt ohne den Kontakt zur Probe zu unterbrechen.

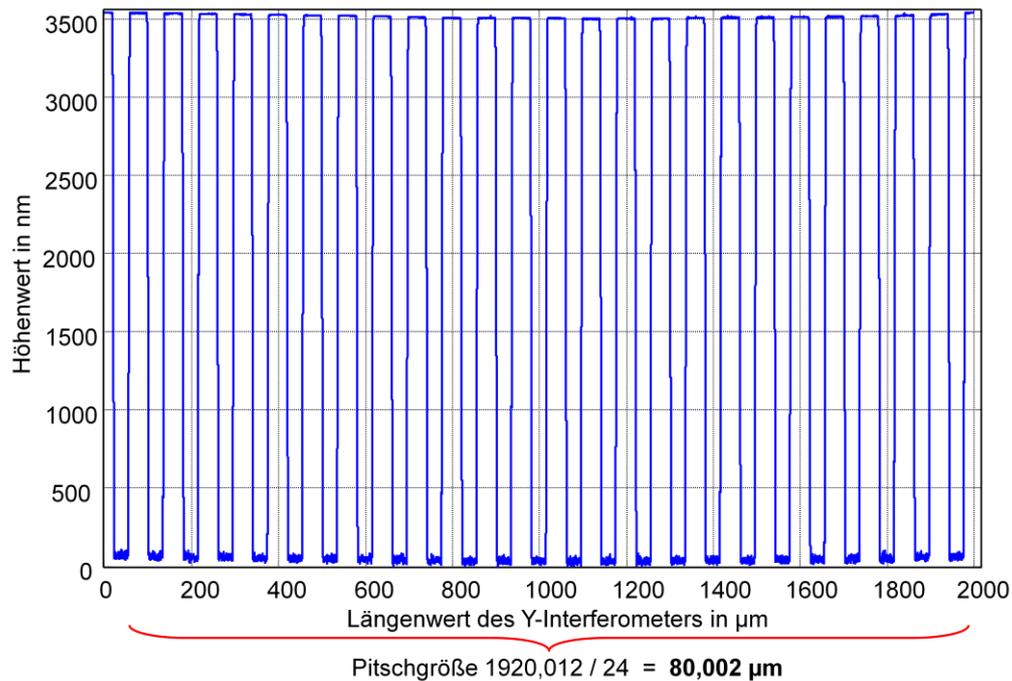


Abbildung 7.6: Pitchmessung mit Fokussensor auf einem Auflösungsnormal

Diese Messung bestätigte auch, dass bei der Antastung von Kanten ab  $1 \mu\text{m}$  Höhe die Überschwingeramplitude (siehe Kapitel 5.4) kontinuierlich abnimmt [78]. Bei der vorliegenden Messung ( $3,5 \mu\text{m}$  Höhe, Abb. 7.6) sind keine Überschwinger zu beobachten.

Anschließend wurde zum Vergleich derselbe Versuch mit dem bereits im Kapitel 6.1 vorgestellten Fokus-Stylus-Sensors wiederholt. Die erreichte Pitchgröße betrug in diesem Fall  $80.000,5 \text{ nm}$  und lag damit ebenfalls im Bereich der PTB-Tolerenz. Die erweiterte Messunsicherheit für die 10-malige Wiederholung dieser Messung ergab wieder einen sehr guten Wert von  $\pm 1,9 \text{ nm}$ . Beide Versuche sowie auch PTB-Messung sind mit einem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  (95%) angegeben.

## 7.5. Anwendung des Fokussensors zur Kalibrierung der Z-Spiegels der NPM-Maschine

Eine wichtige Voraussetzung, um höchste metrologische Genauigkeit der NPM-Maschine zu gewährleisten, bildet die Kenntnis und die Stabilität der Topographie der Oberflächen der beweglichen Messspiegelecke der Maschine [64, 65]. Für diesen Zweck wurden für die X-, Y- und Z-Spiegel der Spiegelecke anhand genauer Topographievermessung entsprechend drei Korrekturfunktionen ermittelt. Diese Funktionen sind in der DSP-Einheit der NPM-Maschine

abgelegt und dienen der kontinuierlichen Korrektur der Topographieabweichungen der Messspiegel während jeder Messbewegung. Ein großes Problem dabei besteht aber darin, dass die Spiegelecke lediglich im ausgebauten Zustand und unbelastet vermessen wurde. Nach dem Einbau in die NPM-Maschine können jedoch mechanische Spannungen auftreten, welche zu einer Deformation der Spiegelecke führen können. Als Folge werden die Messungen mit systematischen Fehlern behaftet, da die zuvor aufgenommenen Korrekturen nicht mehr stimmen. Somit es ist unbedingt notwendig die Spiegelkorrekturen im eingebauten Zustand zu überprüfen. Die Problematik der „in situ“-Topographievermessung der Messspiegel auf der Basis eines Kalibrierinterferometers ist zurzeit Gegenstand intensiver Untersuchungen am Institut [88].

Darüber hinaus wurde auch die Einsatzmöglichkeit des Fokussensors zur Spiegelkalibrierung untersucht. Messprinzip- und konstruktionsbedingt ist es bei einer solchen Anwendung zunächst nur möglich, den Z-Spiegel der Spiegelecke zu überprüfen.

Der Kalibrierungsvorgang verläuft dabei als eine ganz normale Flächenmessung mit dem Fokussensor. Gemessen wird ein 25 mm x 25 mm großer Ausschnitt eines Präzisionsplanspiegels, dessen Topographie durch eine Referenzmessung mit einem Phasenschiebeinterferometer der Firma Zygo [89] äußerst genau bekannt ist. Die in der DSP-Einheit zuvor abgespeicherte Topographiekorrektur des Z-Spiegels der Spiegelecke wird für diesen Versuch auf Null gesetzt. Damit werden zunächst Z-Werte ohne Topographiekorrektur aufgenommen. Als Messergebnis kommt dabei eine Überlagerung (Differenz) zwischen den Topographien des Z-Spiegels der NPM-Maschine, gemessen mit Z-Interferometer, und des Referenzplanspiegels, gemessen mit Fokussensor, heraus.

Bei der Messung handelte es sich um ein Flächenscan mit 168 x 168 Messpunkten in X und Y Richtung. Diese Auflösung wurde so ausgewählt, damit sie mit der Auflösung der Referenzmessung mit Zygo-Interferometer übereinstimmt. Somit können beide Messungen direkt verglichen bzw. gegenübergestellt werden.

Eine wichtige Aufgabe bei der Messung besteht darin, Temperaturänderungen während des Messvorganges möglichst gering zu halten. Dies wurde einerseits durch eine aktive Temperaturregelung der Messumgebung mit Hilfe eines Thermostats gewährleistet. Gleichzeitig wurden die Scans mit maximal möglicher Geschwindigkeit von 5 mm/s ausgeführt, um die Messzeit zu reduzieren. In diesem Fall beträgt ein Flächenscan mit 168 Messlinien über 25 mm x 25 mm ca. 15 min. Diese Messung wurde außerdem mehrmals wiederholt, damit sich die Temperaturregelung des Thermostats unter realen Bedingungen stabilisieren konnte. Das Vorliegen von Temperaturdriften wurde durch mehrmalige Differenzbildung zwischen einzelnen Messungen überprüft.

Die um die Topographie des Referenzspiegels korrigierte Topographie des Z-Spiegels der NPM-Maschine ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

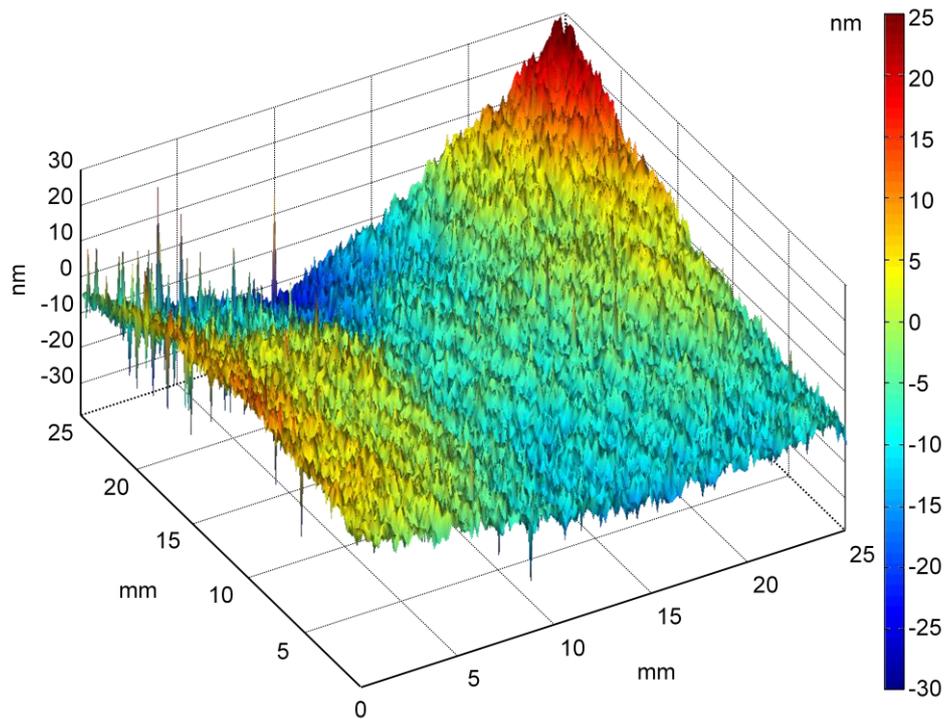


Abbildung 7.7: Topographie eines unkorrigierten Z-Spiegels der NPM-Maschine.  
(gemessen mit Fokussensor)

Für die daraus resultierende Oberflächenform des Z-Spiegels wird eine Korrekturfunktion interpoliert, welche dann in die DSP-Einheit der NPM-Maschine eingespeichert wird. Die Richtigkeit der Korrektur kann mit einer weiteren Messung überprüft werden, in dem der gleiche Referenzplanspiegel gedreht vermessen wird. Die Abbildung 7.8 zeigt die Restabweichungen, nachdem vom Messergebnis die Referenzspiegelform subtrahiert wurde. Im idealen Fall sollte an dieser Stelle eine gleichmäßige Fläche mit Werten um Null herauskommen. In der Realität bleiben aber noch leichte „Unebenheiten“ in der Größenordnung von ca.  $\pm 7$  nm, was trotzdem im Vergleich zur unkorrigierten Ausgangsform mit Abweichungen von ca.  $\pm 28$  nm (Abb. 7.7) zu einer etwa vierfachen Verbesserung führt.

Analysiert man die Fehlereinflüsse und Messbedingungen, kommt man zum Rückschluss, dass die Güte der Spiegelkorrektur nach diesem Verfahren noch weiter verbessert werden kann. In dem dargestellten Versuch lag das Problem in der Größe und Oberflächenqualität des Referenzplanspiegels. Die Spiegelabmessungen betragen 40 mm x 40 mm. Mit der NPM-Maschine kann „nur“ ein Bereich von 25 mm x 25 mm erfasst werden. Es war trotz aufwendiger Justierung nicht möglich, genau die gleichen Bereiche mit dem Fokussensor und dem Zygo-Interferometer zu vermessen. Der geschätzte Versatz beider Messflächen zueinander betrug etwa 0,5 mm (in X- sowie Y-Richtung). Folglich können die gemessenen Topographien des Z- und Referenzplanspiegels nicht sauber getrennt bzw. subtrahiert werden, was zu Verfälschungen bei der Topographiebestimmung und entsprechend bei der Korrektur führt.

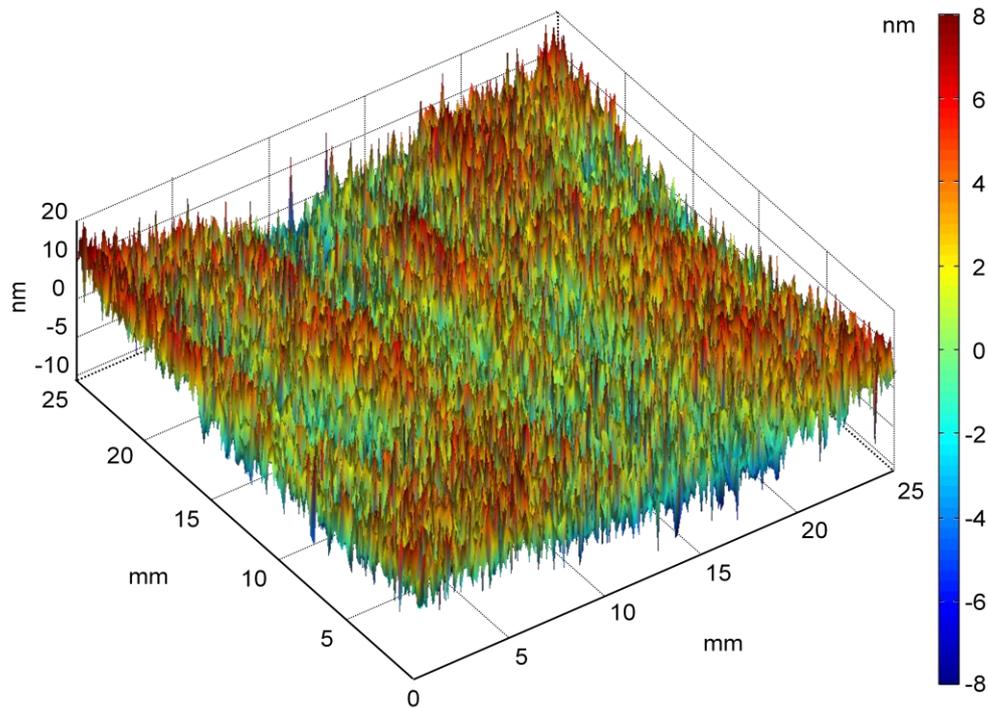


Abbildung 7.8: Topographie eines korrigierten Z-Spiegels der NPM-Maschine.  
(gemessen mit Fokussensor)

Einen Fehlereinfluss haben auch kleine Kratzer oder Dellen, die bei der Messung mit dem Fokussensor Überschwinger verursachten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es gelungen ist, den Z-Spiegel der Spiegelecke der NPM-Maschine in eingebautem Zustand mit Hilfe des Fokussensors zu kalibrieren. Um höchste Präzision erreichen zu können, sollten entsprechende Referenzobjekte (Referenzspiegel) hergestellt werden, bei denen die Lage der 25 mm x 25 mm - großen kalibrierten Referenzplanfläche mit hoher Reproduzierbarkeit aufgefunden werden kann. Dies kann z.B. mit Hilfe von Referenzmarkierungen erreicht werden, welche mit dem Kameramikroskop des Fokussensors mikrometergenau lokalisiert werden können. Außerdem sollte die Oberfläche der Referenzobjekte keine Unregelmäßigkeiten bzw. Beschädigungen aufweisen.

## 7.6. Weitere Einsatzmöglichkeiten des Fokussensors

Die Einsatzvielfältigkeit des Fokussensors wurde durch eine ganze Reihe unterschiedlicher Messanwendungen nachgewiesen. Einige von ihnen wurden bereits in früheren Kapiteln vorgestellt.

### 7.6.1. Messungen an optischen Teilen

Durch das berührungslose Antastprinzip des Fokussensors wurden besonders häufig Aufgaben zur Messung von Objekten aus der Optik angestrebt. Hier spielte die Fähigkeit des Fokussensors im Verbund mit der NPM-Maschine sehr große Flächen von max. 25 mm x 25 mm nanometergenau und berührungslos abzurastern eine sehr wichtige Rolle. Die Abbildung 7.9 stellt ein Beispiel solcher großflächigen Messung dar. Hier wurde an einer Fresnel'schen Konvexlinse eine Messfläche von 25 mm x 25 mm abgescannt. Die Messung dauerte ca. 35 min (400 x 400 Messpunkte bei einer Messgeschwindigkeit von 6 mm/s). Einen Linienscan über die Mitte dieser Linse ist in der Abbildung 7.10 zu sehen. Bei diesem 25 mm-Scan mit einem Messpunkteabstand von 30 nm wurde eine Datenmenge von 65 MB aufgenommen.

Ein anderes Anwendungsbeispiel ebenfalls aus der Linsenvermessung zeigt die Abbildung 7.11. Hier handelt es sich um einen Linsenarray, bei welchem die Gitteranordnung von mehreren Mikrolinsen und deren Radius überprüft werden sollte. Dank der vergleichbar „flachen“ Geometrie der Linsen (Durchmesser ca. 0,9 mm, Höhe ca. 18  $\mu\text{m}$ ) konnte bei diesem Versuch ebenfalls eine sehr hohe Messgeschwindigkeit von 6 mm/s erreicht werden. Daher dauerte diese Messung über eine Fläche von 13 mm x 13 mm (13 x 13 Linsen) mit einer Auflösung von 1000 x 1000 Messpunkten nur ca. 65 min. Die aufgenommene Datenmenge beträgt in diesem Fall ca. 64 MB.

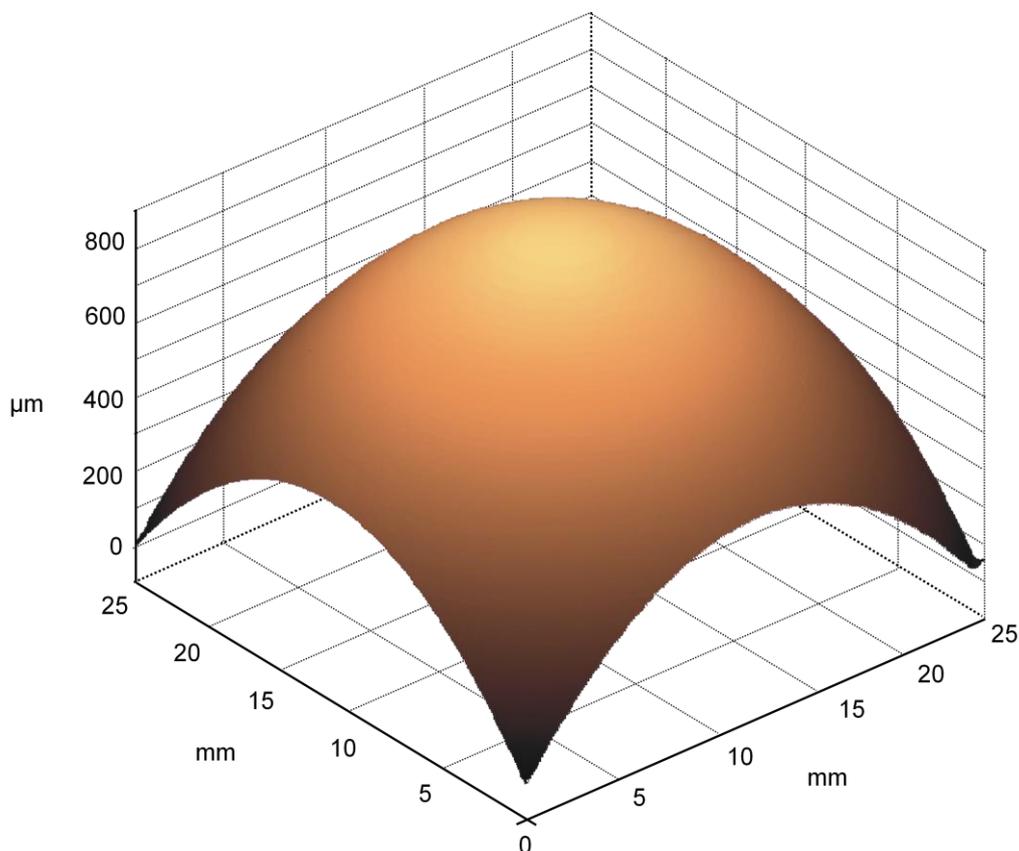


Abbildung 7.9: Messung einer Fresnel-Konvexlinse (Messfläche 25 mm x 25 mm)

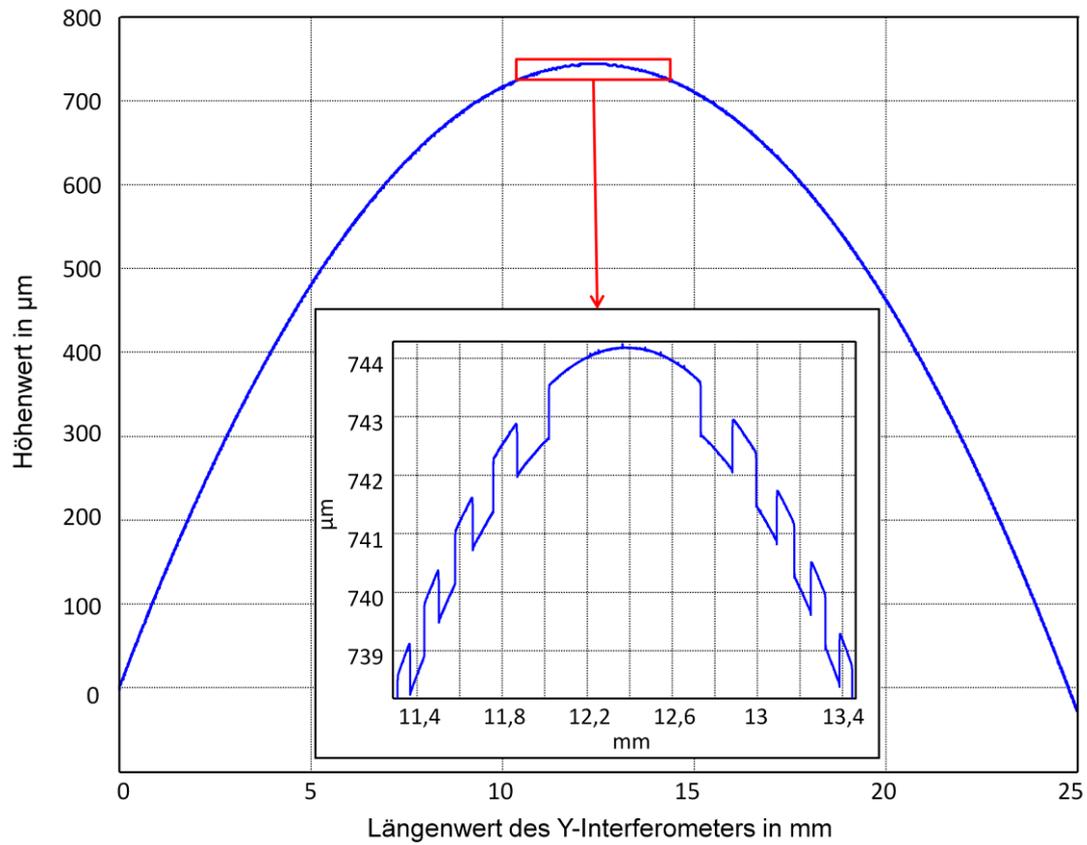


Abbildung 7.10: Linienscan über die Mitte der Fresnel-Konvexlinse

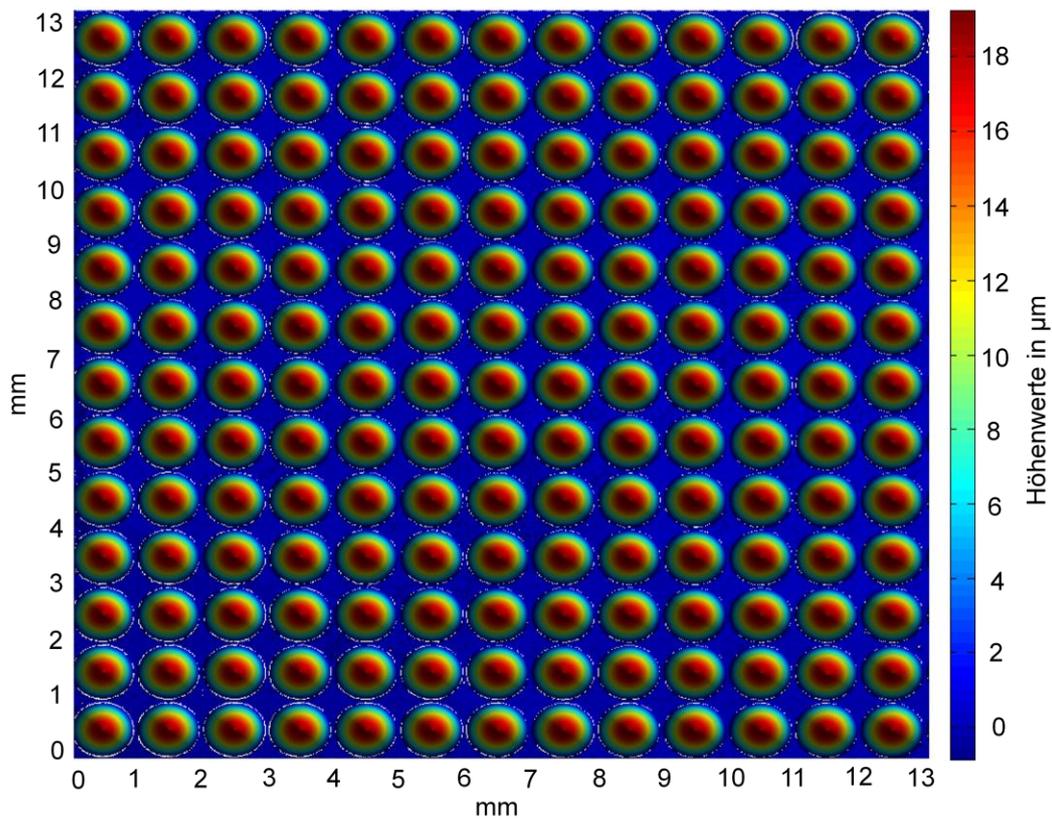


Abbildung 7.11: Messung eines Linsenarray

Der gemessene Gitterabstand für die in diesem Messbeispiel erfassten 169 Mikrolinsen beträgt 999.557,2 nm mit einer Standardabweichung von 361,6 nm. Der Radius und die Höhe der Linsen wurden entsprechend mit  $421.901,9 \text{ nm} \pm 708,8 \text{ nm}$  und  $18.292,1 \text{ nm} \pm 89,6 \text{ nm}$  festgestellt.

Auch die Messung von Mikrooptiken kann mit Hilfe des Fokussensors unproblematisch durchgeführt werden. Als Beispiel dafür dient eine Messung an einem Fresnel-Mikrolinsenarray (Abbildung 7.12). Dabei konnte die Geometrie und Anordnung der Mikrolinsen erfolgreich wiedergegeben und mit Sollwerten verglichen werden.

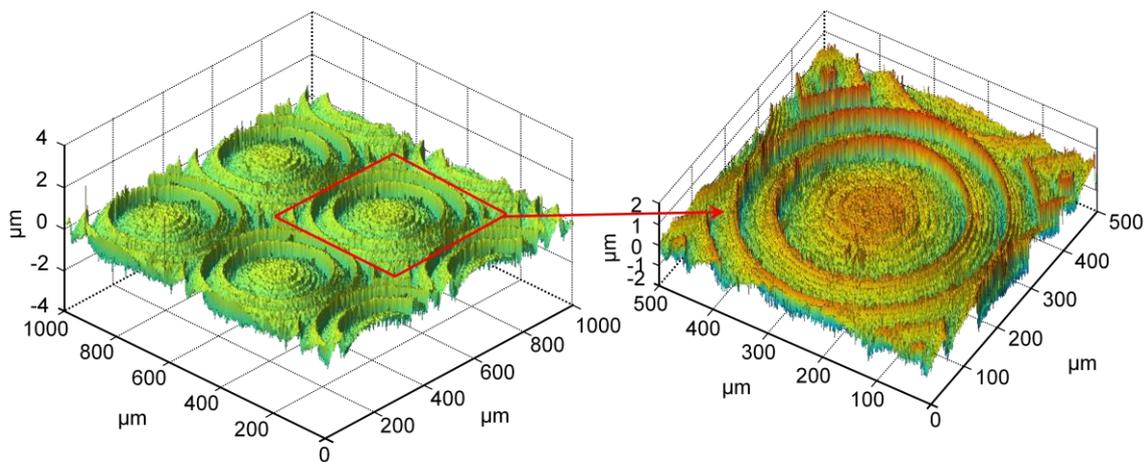


Abbildung 7.12: Messung eines Fresnel-Mikrolinsenarray

### 7.6.2. Messung von mechanischen Teilen

Eine ebenfalls sehr breite Palette von unterschiedlichen Messaufgaben bieten die mikromechanischen Objekte. Hierbei ist meist keine Nanometer-Messaufösung erforderlich. Vielmehr wird aber auf die Berührungslosigkeit, Robustheit, Dynamik und Komfort der Messungen geachtet. In solchen Fällen eignet sich der Fokussensor besonders gut zur Form- und Geometriebestimmung eines Objektes oder zur Lokalisierung und Charakterisierung von Defekten und Beschädigungen. Beschränkt sind dagegen die Möglichkeiten des Fokussensors bei der Bestimmung von Oberflächenrauheiten. Hier stellen optische Faktoren wie Beugung- und Interferenzeffekte eine massive Beschränkung dar (siehe Kapitel 5.4). Sie verfälschen die realen Rauheitswerte besonders bei feinrauer Objektflächenstruktur.

Nachfolgend werden einige repräsentative Beispiele aus der Messung von mikromechanischen Objekten dargestellt.

Die Abbildung 7.13 zeigt zwei Anwendungen des Fokussensors, welche aus der Härtemesstechnik kommen. Das erste Bild zeigt die Spitze eines Diamant-Eindringkörpers, hier

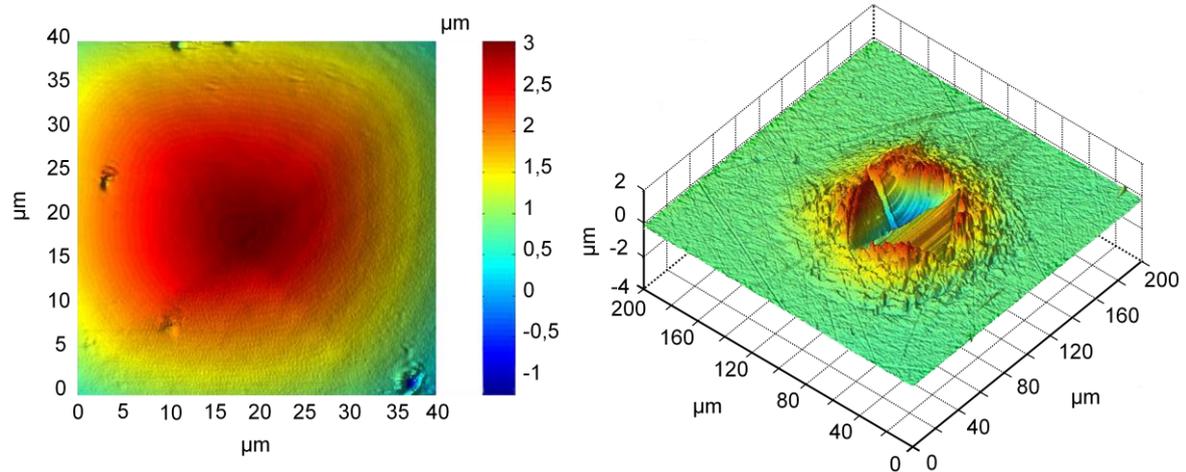


Abbildung 7.13: Messungen eines Eindringkörpers (a) und eines Eindringabdruckes (b)

wurden die Geometrie der Spitze analysiert und die vorhandenen Defekte lokalisiert. Die Messung konnte nur im Bereich von  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$  durchgeführt werden, da darüber hinaus der Neigungswinkel der Flanken für den Fokussensor zu hoch wurde. Das zweite Bild demonstriert eine entsprechende Eindringstelle des Diamant-Eindringkörpers. Dabei wurden die Eindringparameter charakterisiert.

Drei weitere Messungen sind in der Abbildung 7.14 und 7.15 zu sehen. Hier wurden unterschiedliche mikromechanische Präzisionsteile gemessen: ein Mikrozahnrad (Abb. 7.14 links), ein Dehnungsmessstreifen (Abb. 7.14 rechts) und eine Druckmembran eines Drucksensors (Abb. 7.15). Hierbei handelte es sich ebenfalls um Geometrie- und Defekteuntersuchung. Das Interessante bei der Zahnradmessung ist, dass die NPM-Maschine dabei im Positioniermodus (ohne Kontakt zur Probe, siehe Kap. 5.1.2) arbeitete. Das bedeutet, die Probe wird in konstanter Z-Position bewegt, welche sich im Fokusbereich (Messbereich) des Fokussensors befindet. Die Höhenauswertung erfolgt nur anhand des Messsignals des Fokussensors. Dieser Messmodus

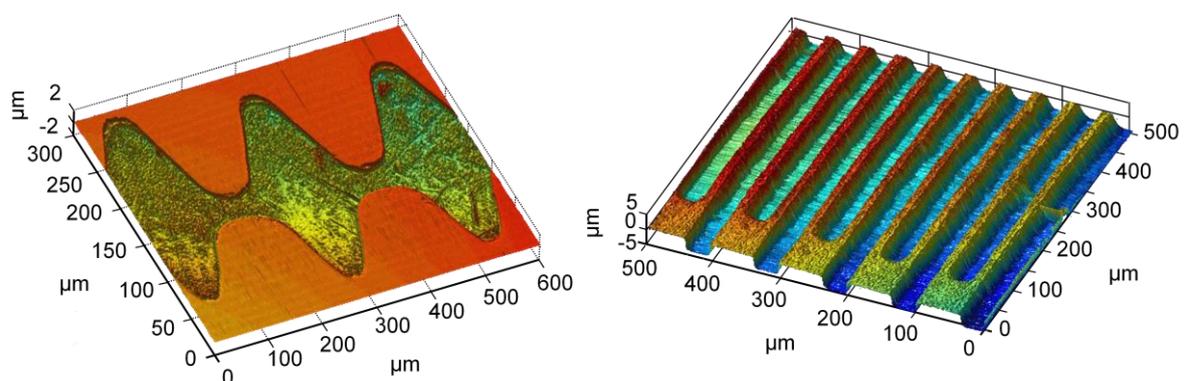


Abbildung 7.14: Messungen eines Mikrozahnrades (a) und eines DMS (b)

wurde deswegen ausgewählt, da die Höhe des Zahnrades den Messbereich des Fokussensors um vielfaches überstieg (kein Kontaktmessmodus möglich). In diesem Fall bringen alle Messwerte, welche „außerhalb“ des Zahnrades liegen, keine Höheninformation und werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Solche Parameter wie Zahnform, Zahnperiode und Oberflächenbeschaffenheit sind daher problemlos auswertbar.

Die Dehnungsmessstreifenmessung konnte dagegen komplett im Kontaktmodus durchgeführt werden und offenbarte unter anderem ein Defekt des Messgitters.

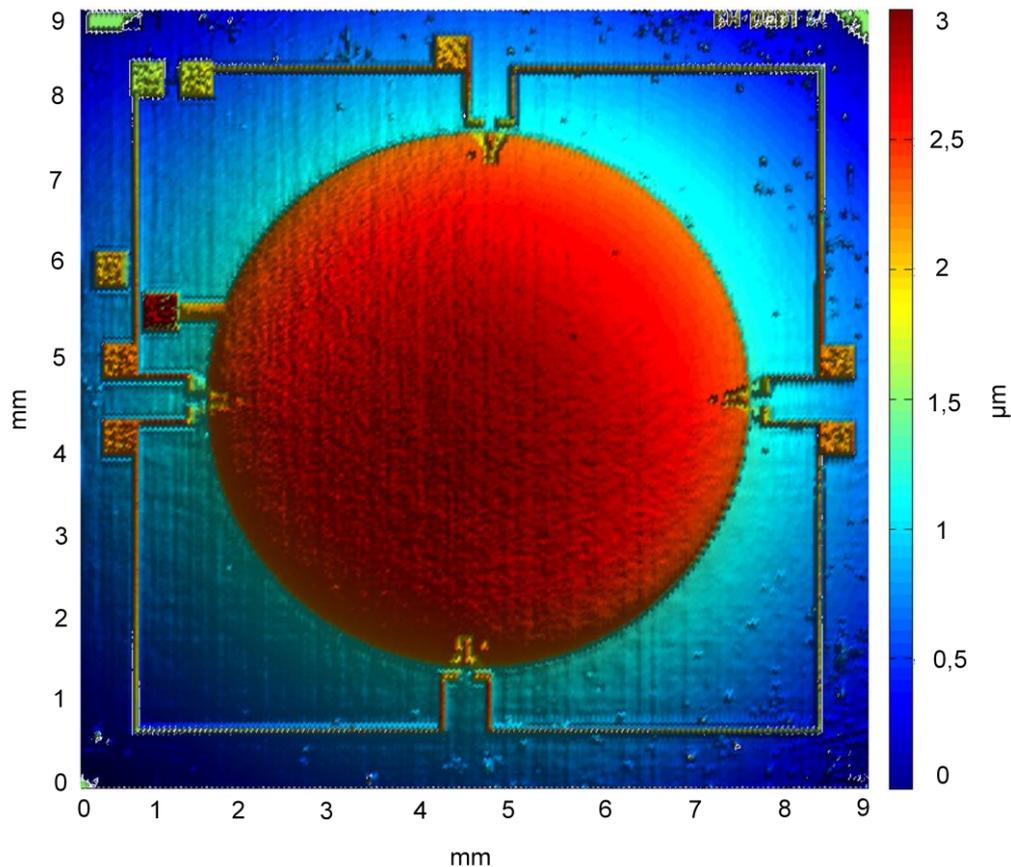


Abbildung 7.15: Messung eines Drucksensors

Bei der Messung des Drucksensors wurden Geometrie, Wölbung und Rauheit der Druckmembran bestimmt. Dabei kamen ein Durchmesser von  $6.378,0553 \mu\text{m}$  (Standartabweichung:  $\pm 150,9 \text{ nm}$ ) und eine Wölbung von  $668,2 \text{ nm}$  (Standartabweichung:  $\pm 50,1 \text{ nm}$ ) heraus. Für die Rauheit wurden folgende Werte bestimmt:  $R_a = 5,4 \text{ nm}$ ,  $R_q = 6,8 \text{ nm}$  und  $R_z = 52,3 \text{ nm}$ .

Zum Schluss soll noch eine Anwendung des Fokussensors in der Halbleitertechnologie beschrieben. Hier bestand die Aufgabe einen ca.  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  großen Silizium-Wafer zu messen, bei welchem mittels Low Pressure- Chemical Vapor Deposition (LPCVD) eine ca.  $100 \text{ nm}$

dicke Silizium-Nitrid-Schicht abgeschieden wurde. Während dieses Prozesses entstanden Spannungen in der Schicht, was zur Durchbiegung des Wafers führte. Die Größe dieser Deformation konnte mit Hilfe des Fokussensors ermittelt werden (siehe Abb. 7.16). Sie betrug an der gemessenen Stelle 770 nm.

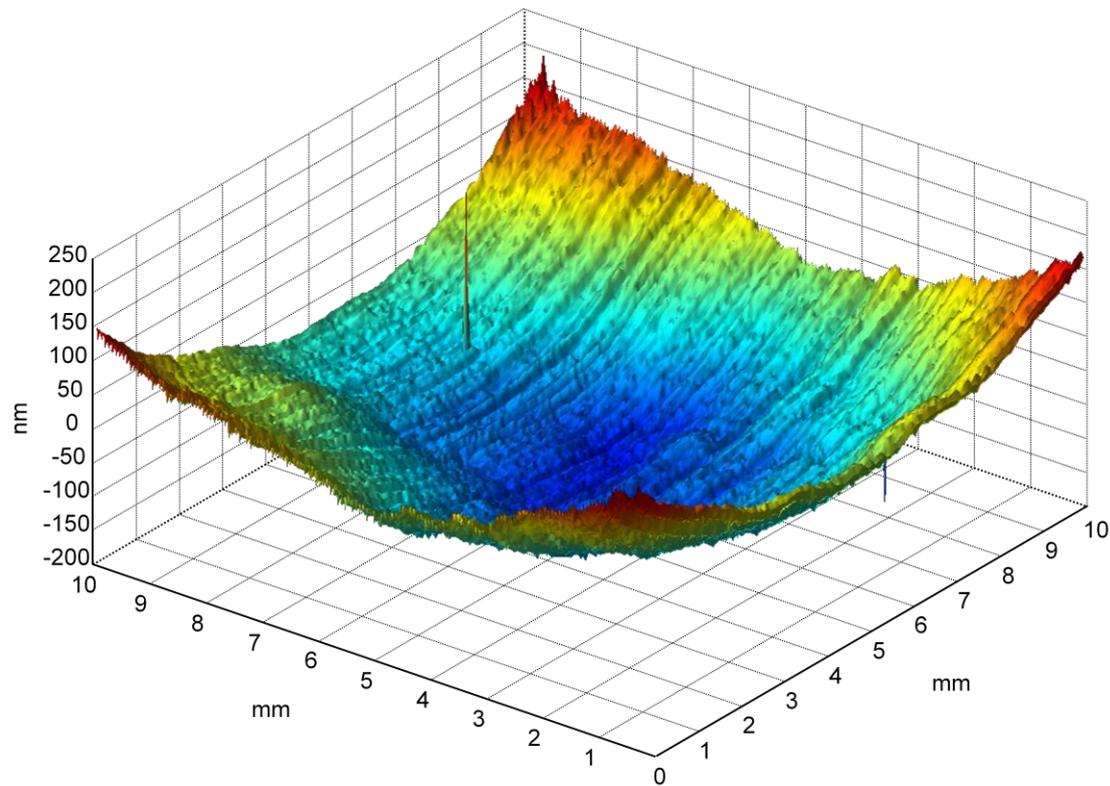


Abbildung 7.16: Messung der Durchbiegung eines Silizium-Wafers

## 7.7. Kapitelzusammenfassung

Im Kapitel 7 wurden einige spezifische Anwendungsbeispiele und mögliche Einsatzbereiche des Fokussensors als berührungslosen Basissensor des entwickelten Nanosensorsystems dargestellt. Hierbei wurden repräsentative Beispiele aus den Messungen an optischen, mechanischen und flüssigen Objekten angeführt.

Außerdem wurde in diesem Kapitel Verwendung eines LWD-Objektivs am Fokussensor besonders für die Anwendungen in der NPM-Maschine empfohlen und begründet.

## 8. Zusammenfassung

Die Motivation für die vorliegende Arbeit bestand darin, ein Nanosensorsystem auf der Basis eines berührungslosen optischen Antastsensors (Basissensors) für hochpräzise Profilhöhenmessungen zu entwickeln, welches vor allem auf Messanwendungen in der NPM-Maschine abgestimmt ist. Dadurch wurden sehr hohe Anforderungen zur Höhenauflösung, Messunsicherheit und Stabilität dieses Basissensors gestellt.

Auf der Basis grundlegender Untersuchungen ist es gelungen einen solchen Antastsensor in Form eines Fokussensors aufzubauen, dessen Parameter die gestellten Anforderungen und Aufgaben bestens erfüllt. Dazu gehören z.B. eine Auflösung  $< 1 \text{ nm}$ , ein Fokusspot von ca.  $0,6 \mu\text{m}$ , ein Arbeitsabstand bis  $10 \text{ mm}$  und Scangeschwindigkeiten bis  $6 \text{ mm/s}$  bei Nanometerreproduzierbarkeit.

Die Verwendung einer Hologram-Laser-Unit als ein zentrales Bauelement des Fokussensors in Verbindung mit speziell entwickelten und angepassten elektrischen und mechanischen Lösungen ermöglichte die Realisierung einer sehr kompakten und vergleichbar einfachen Konstruktion des Sensors. Dadurch konnte eine hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit des Messsystems erreicht werden. Von großer Bedeutung war in dieser Hinsicht auch die Verwendung der Nullindikatormessmethode. Sie hat sich, wie durch praktische Untersuchungen gezeigt werden konnte, als optimale Methode für die hochdynamischen und hochauflösenden Anwendungen im großen Messvolumen der NPM-Maschine von  $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$  erwiesen.

Die messtechnischen und metrologischen Eigenschaften des aufgebauten Fokussensors wurden umfassend untersucht. Unter anderem wurden Reproduzierbarkeitsmessungen auf kalibrierten Stufenhöhennormalen durchgeführt, die eine hohe Übereinstimmung mit Kalibrierwerten der PTB von  $< 1,3 \text{ nm}$  zeigten. Es wurde eine Temperaturstabilität des Sensors von ca.  $70 \text{ nm/K}$  nachgewiesen. Eine ganze Reihe weiterer praktischer Messbeispiele demonstrieren wichtige Eigenschaften des Fokussensors und zeigen die großen Vorteile, aber auch die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten.

Ferner wurde ein kompaktes Kameramikroskop entwickelt und mit dem Fokussensor kombiniert. Dadurch wird eine Beobachtung des Antast- und Messvorganges und damit ein sehr schnelles Auffinden interessierender Messfelder in großen Bereichen ermöglicht.

Um das angestrebte Nanosensorsystem zu schaffen und demgemäß die Anwendungsbreite des Fokussensors zu erhöhen, wurden schließlich zwei taktile Antastsensoren auf der Basis des Fokussensors aufgebaut und untersucht: ein Fokus-Stylus-Sensor und ein Fokus-AFM-Sensor.

Somit konnten leistungsfähige Alternativen für verschiedene Beschränkungen des Fokussensors (laterale Auflösung, Beugungserscheinungen an Kanten) aufgezeigt werden. Der modulare Aufbau der Sensoren und des Kameramikroskops erlaubt dabei einen schnellen und komfortablen Wechsel zwischen den einzelnen Antastmethoden. Die ausgezeichneten messtechnischen Eigenschaften beider taktilen Sensoren wurden ebenfalls mit zahlreichen praktischen Messbeispielen untermauert.

Wichtiges Ziel weiterer Untersuchungen auf dem Gebiet optischer Sensoren muss die Erhöhung der lateralen Auflösung sein. Einen direkten Weg bietet die Verkleinerung der Spotgröße des Fokussensors durch Verwendung von kurzwelligen Laserquellen (z.B. blauer) mit gleichzeitiger Erhöhung der numerischen Apertur des Objektivs. Indirekt kann die Ortsauflösung durch eine Art „optischer Entfaltung“ des Messergebnisses erreicht werden, welche mit Hilfe geeigneter Algorithmen realisierbar ist. Wichtige Voraussetzungen dazu sind mit dieser Arbeit geschaffen worden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Mahr GmbH, *MarSurf*, <http://www.mahr.de/index.php?NodeID=158&SourceID=341>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [2] MIKROMASCH, *AFM Probes*, [http://www.spmtips.com/spm\\_probes](http://www.spmtips.com/spm_probes), (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [3] David J. Whitehouse, *Surfaces and their measurement*, Kogan Page Science, London, 2004
- [4] P. Hariharan, *Optical interferometry*, 2. ed. – Amsterdam, Academic Press, 2003
- [5] Taylor Hobson, *Talysurf CCI Systems*, <http://www.taylor-hobson.com/non-contact-profilers.html>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [6] *Das Philips VLP System*, Philips Technische Rundschau, 33 Jahrgang, 1973/74, Nr. 7, S. 189-205.
- [7] G. Bouwhuis, J. Braat, *Principles of Optical Disc Systems*, Bristol/New York: Hilger, 1985.
- [8] D.K. Cohen: *Analysis of methods for detecting focus error in optical data storage systems*, Tucson, Univ. of Arizona, Ph.D. Dissertation, 1987.
- [9] D.R. Marshall: *A focus sensing method with improved pattern noise rejection*, Proc. SPIE Vol.1499, Optical Data Storage '91, 1991, S. 332-339.
- [10] J.E. Elliot, L. Mickelson: *Optical transducer and focusing system*, United States Patent US4152586.
- [11] M.S. Wang, T.D. Milster: *Crosstalk cancellation using differential wax-wane focus servo technique*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, 1993, S. 5277-5283.
- [12] T.D. Milster, M.S. Wang, F.F. Froehlich, J.L.Kann, J.P.Treptau, K.E.Erwin: *Differential spot-size focus servo*, Proc. SPIE Vol.1499, Optical Data Storage '91, 1991, S. 348-353.
- [13] C. Bricot, J.C. Leheureau: *Fokussiereinrichtung*, deutsches Patent DE2501124.
- [14] C. Bricot, J.C. Leheureau, C. Puech, F. le Carvenec: *Optical readout of videodisc*, IEEE transactions on consumer electronics, CE-22, 1976, S. 304-308.
- [15] P. Kramer; P.E. Day, G. Bowhuis: *Vorrichtung zum Auslesen eines flachen reflektierenden Aufzeichnungsträgers*, deutsches Patent DE2322725.
- [16] G. Bowhuis, T.J. Hazendonk: *Optoelektronisches Fokusfehler Detektionssystem*, deutsches Patent DE2914122.
- [17] M. Mansuripur: *Analysis of astigmatic focusing and push-pull tracking error signals in magneto-optic disk systems*, Appl. Opt. 26, Issue 18, 1987, S. 3981-3986.
- [18] B. Hnilicka, A. Besançon-Voda, H-J. Schröder: *Modelling the focus error signal generation in a DVD player*, IMACS Multiconference Computational Engineering in Systems Applications, CESA IMACS-IEEE/SMC conference, Lille, 2003, S. 11 – 18.

- 
- [19] S. Shen, D. Cui, X. Qian, Y. Shu: *Theoretical models and comparison of three focus detection methods*, Proc. SPIE Vol.2053, Third International Symposium on Optical Storage, 1992, S. 144-149.
- [20] S. Shen, D. Cui, X. Qian, Y. Shu: *Investigation of critical-angle focus error detection*, Proc. SPIE Vol.2053, Third International Symposium on Optical Storage, 1992, S. 155-159.
- [21] D. Lange, *Aufbau eines Interferenzoptischen Meßsystems mit berührungsloser Antastung der Messflächen nach dem Autofokusprinzip*, Diplom, Technische Universität Ilmenau, 1993.
- [22] H. Kogelnik, T. Li: *Laser beams and resonators*, Appl. Opt. 5, 1966, S. 1550-1567.
- [23] J. Tschirnich: *Fehlereinflüsse bei interferentiellen Längenmessungen mit Lasern*, Feingerätetechnik, 25.Jg., Heft 7/1976.
- [24] L. Bergmann, C. Schäfer: *Optik: Wellen- und Teilchenoptik*, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, Auflage 10, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 2004.
- [25] S. G. Stan: *The CD-ROM Drive: A Brief System Description*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [26] K. Mitsui et al.: *Development of a high resolution in-process sensor for surface roughness by laser beam*, Bulletin of the JSPE, 19(2), 1985, S. 142.
- [27] T. Kohno et al.: *Practical non-contact surface measuring instrument with one nanometer resolution*, Precision Engineering, 7(4), 1985, S. 231.
- [28] R. Brodmann: *Ein neuer optischer Feintaster und seine Anwendung*, Technische Rundschau, 39, 1987, S. 64-66.
- [29] A. Brown, U. Breitmeier: *Industrial applications of an optical profilometer*, Proc. SPIE Vol.954, Optical testing and metrology II, 1988, S. 200-207.
- [30] T. Kohno, N. Ozawa, K. Miyamoto, T. Musha: *High precision optical surface sensor*, Appl. Opt. 27, Issue 1, 1988, S. 103-108.
- [31] R. Gu, C. Xu, L. Lio, G. Shen: *Dynamical focusing electro-optical sensor system for measuring surface contours*, Proc. SPIE Vol.2053, Third International Symposium on Optical Storage, 1992, S. 169-174.
- [32] M. Visscher, K.G. Struik: *Optical profilometry and its application to mechanically inaccessible surfaces Part I: Principles of focus error detection*, Precision Engineering, 16(3), 1994, S. 192-204.
- [33] Z.W. Zhong, W.W. Tham: *Study of surface profile measurement using a CD optical pickup head*, Proc. SPIE Vol.4596, Advanced Photonic Sensors and Applications II, 2001, s. 48-53.
- [34] K.C. Fan, C.L. Chu, J.I. Mou: *Development of a low-cost autofocusing probe for profile measurement*, Meas. Sci. Technol. 12, 2001, S. 2137-2146.

- [35] H. Nishihara: *Recent studies of miniaturization of optical disk pickups in Japan*, Proc. SPIE Vol.1248, Storage and Retrieval Systems and Applications, 1990, S. 88-95.
- [36] H. Nishihara, T. Suhara, S. Ura: *Integrated-optical disc pickups*, Proc. SPIE Vol.1663, Optical Data Storage, 1992, S. 26-36.
- [37] Y. Kimura, S. Sugama, Y. Ono: *Compact optical head using a holographic optical element for CD players*, Appl. Opt. 27, Issue 4, 1988, S. 668-671.
- [38] M. Kato, T. Saimi, S. Kadowaki, Y. Komma: *Holographic servo-signal detection stabilized to the wavelength fluctuation and the mechanical misalignment in the optical heads*, Proc. SPIE Vol.1078, Optical Data Storage Topical Meeting, 1989, S. 122-126.
- [39] A. Ohba, Y. Kimura, S. Sugama, R. Katayama, M. Okada, Y. Ono, N. Nishida: *Compact magneto-optical disc head using reflection polarizing holographic optical element*, Proc. SPIE Vol.1078, Optical Data Storage Topical Meeting, 1989, S. 127-131.
- [40] M. Kato, S. Kadowaki, Y. Komma, Y. Hori: *Recent advances in optical pickup head with holographic optical elements*, Proc. SPIE Vol.1507, Holographic Optics III, 1991, S. 36-44.
- [41] R. Katayama, T. Nagano, S. Sugama, Y. Ono: *Compact optical head integrated with chip elements for CD-ROM drives*, Proc. SPIE Vol.1663, Optical Data Storage, 1992, S. 37-45.
- [42] T. Suhara, H. Nishihara: *Theoretical analysis of super-resolution readout of disc data by semiconfocal pickup heads*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, 1992, S. 534-541.
- [43] K.Y. Yang, S.W. Noh, E.J. Kim, T.W. Kim, T.K. Yoo: *Holographic optical head*, Proc. SPIE Vol.2338, Optical Data Storage, 1994, S. 276-281.
- [44] R. Katayama, Y. Komatsu, T. Nagano, A. Watanabe, K. Tada, H. Hotta, Y. Ono: *Compact magneto-optical head integrated with chip elements using double holograms*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, 1996, S. 362-368.
- [45] Y. Komma, S. Kadowaki, Y. Hori and M. Kato: *Holographic optical element for an optical disk head with spot-size detection servo optics*, Appl. Opt. 29, 1999, S. 5127.
- [46] M.O. Freeman, H.F. Shih, J.K. Wang, T.P. Yang, L. Hsu: *Robust focus and tracking detection for holographic digital versatile disc optical pickup-head modules*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, 1999, S. 1755-1760.
- [47] H.F. Shih, M.O. Freeman, J.J. Ju, T.P. Yang, Y.C. Lee: *Polarized diffractive optical element design for a multiple-beam optical pickup head*, Proc. SPIE Vol.4081, Optical Storage and Optical Information Processing, 2000, S. 220-225.
- [48] M. Irie: *Optical design of laser unit with polarized holographic element for digital versatile disc pickup*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, 2003, S. 461-465.
- [49] Y. Kurata, H. Yamaoka, T. Ishikawa: *CD optical pickup using a computer generated holographic optical element*, Proc. SPIE Vol.1139, Optical Storage and Scanning Technology, 1989, S. 161-168.

- [50] P. Coops: *Mass production methods for computer generated holograms for CD optical pickups*, Philips J. Res. 44, 1990, S. 481-500.
- [51] Y. Yoshida, T. Miyake, Y. Kurata, T. Ishikawa: *Tree beam CD optical pickup using a holographic optical element*, Proc. SPIE Vol.1401, Optical Data Storage, 1990, S. 58-65.
- [52] Y. Yoshida, T. Miyake, K. Sakai, Y. Kurata: *Optical pickup using blazed holographic optical element for video disc players*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, 1994, S. 3947-3951.
- [53] T. Miyake, Y. Yoshida, Y. Kurata, H. Sato: *Optical head*, European patent EP0457573.
- [54] Y. Yoshida, K. Minami, K. Okada, H. Yamamoto, T. Ueyama, K. Sakai, Y. Kurata: *Optical pickup employing a hologram-laser-photodiode unit*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, 2000, S. 877-882.
- [55] T. Ueyama: *Optical pickup device, optical disk recording/reproducing apparatus, and method of generating focus error signal*, European patent EP0777217.
- [56] K. Sakai: *Optical pickup device*, United States patent US6339562.
- [57] Y. Yoshida, K. Minami, A. Yoshimoto, H. Yamamoto, Y. Kurata: *Integrated hologram with an optical waveguide device for magneto-optical disk players*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, 1998, S. 4401-4404.
- [58] A. Köhler: *Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke*, Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und für mikroskopische Technik, Vol. 10, 1893, S. 433-440.
- [59] Molecular Expressions Website (Florida State University), *Koehler Microscope Illumination, Reflected Light*, <http://www.molecularexpressions.com/primer/anatomy/reflectkohler.html>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [60] H. Haferkorn, *Optik: Physikalisch- technische Grundlagen und Anwendungen*, 4. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2003.
- [61] Sumix Corporation, *Digital Camera CommandShot SMX-M72*, <http://optics.sumix.com/products/cameras/smx-m72.html>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011)
- [62] G. Schröder, *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen*, 9. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg 2002.
- [63] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, H.-J. Büchner: *Laserinterferometrische Nanomessmaschinen*, VDI Berichte, 1530 (Sensoren und Messsysteme 2000), VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 271–278.
- [64] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, W. Schott: *Operation and Analysis of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine*, Proceedings of 17th ASPE Annual Meeting, St.Louis, Missouri, 2002, S. 299–304.
- [65] T. Hausotte: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2002.

- [66] J.P.J. Heemskerk: *Noise in a video disk system: experiments with an (AlGa)As laser*, Appl. Opt. 17, Issue 13, 1978, S. 2007-2012.
- [67] B.I.J. Finkelstein, W.C. Williams: *Noise sources in magneto-optic recording*, Appl. Opt. 27, Issue 4, 1988, S. 703-709.
- [68] J. Guggenmos: *Minimization of laser diode relative intensity noise (RIN)*, Proc. SPIE Vol.1044, Optomechanical Design of laser Transmitters and Receivers, 1989, S. 260-267.
- [69] E.C. Gage, S. Beckens: *Effects of high frequency injection and optical feedback on semiconductor laser performance*, Proc. SPIE Vol.1316, Optical Data Storage, 1990, S. 199-204.
- [70] C.C. Wu, T.M. Yang, H.Y. Shih, J.C. Chen: *Diode laser noise reduction by high frequency modulation method in optical disk drive*, Proc. SPIE Vol.1816, Electro-Optic Computer Peripherals Technology, 1992, S. 65-71.
- [71] G.R. Gray, A.T. Ryan, G.P. Agrawal, E.C. Gage: *Control of optical feedback-induced laser intensity noise in optical data recording*, Optical Engineering Vol. 32, No 4, 1993, S. 739-745.
- [72] G.R. Gray, A.T. Ryan, G.P. Agrawal, E.C. Gage: *Optical feedback-induced chaos and its control in semiconductor lasers*, Proc. SPIE Vol.2039, Chaos in Optics, 1993, S. 45-57
- [73] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Sichtdickennormal*, Kalibrierschein 3918 PTB 02, Braunschweig 2002.
- [74] DIN EN ISO 5436-1, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen*, Ausgabe 2000-11.
- [75] A. Harasaki, J.C. Wyant: *Fringe modulation skewing effect in white light vertical scanning interferometry*, Appl. Opt. 39, Issue 13, 2000, S. 2101-2106.
- [76] M. Czaske, *Strukturbreitenmessung auf photolithographischen Masken und Wafern im Lichtmikroskop: Theorie, Einfluss der Polarisation des Lichtes und Abbildung von Strukturen im Bereich der Auflösungsgrenze*, PTB-Bericht, Braunschweig 1997, ISBN 3-89701-011-9.
- [77] S. Töpfer, R. Mastylo, G. Linß, E. Manske, O. Kühn, U. Nehse: *Edge Detection at Height Profiles with Nano Resolution*, Proceedings of 4th IEEE Conference on Nanotechnology, 17.-19. August 2004, München, S. 410-412.
- [78] H. Baitinger, *Untersuchungen zum Einfluss der Beugung auf die Kantendetektion mit einem Autofokussensor*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [79] Goodfellow GmbH, *Invar<sup>®</sup> - ausdehnungsniedrige Legierung Fe64/Ni36 - Materialinformationen*, <http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat2one.php?Language=G>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).

- 
- [80] Schott AG, *Produktinformationen ZERODUR®*, [http://www.schott.com/advanced\\_optics/german/our\\_products/zerodur/index.html](http://www.schott.com/advanced_optics/german/our_products/zerodur/index.html), (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [81] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Mikro-Konturnormal*, Kalibrierschein 5017 PTB 05, Braunschweig 2005.
- [82] Piezosystem Jena GmbH, *Ringaktoren R und RA*, [http://www.piezojena.com/de/site/Piezo-Aktoren---Nano-Positioniersysteme/Stapelaktoren/Serie-R-RA\\_225/](http://www.piezojena.com/de/site/Piezo-Aktoren---Nano-Positioniersysteme/Stapelaktoren/Serie-R-RA_225/), (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [83] M. Dambon, *Entwurf, Aufbau und Untersuchung des Antastsystems eines Rasterkraftmikroskops*, Studienarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [84] Nikon Corporation Instruments Company, *Brochures/Catalogs, Microscope Components for Reflected Light Applications*, <http://www.nikon-instruments.jp/eng/service/download/DLList.aspx?CID=1>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011)
- [85] E. Langlotz, *Metrologische Untersuchungen an der Nanomess- und Positioniermaschine*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [86] KORTH KRISTALLE GmbH, *Materialeigenschaften*, <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/25.html>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).
- [87] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Auflösungsnormal*, Kalibrierschein 4337 PTB 06, Braunschweig 2006.
- [88] M. Orlob, *Analyse und Vergleich der Topographie der Spiegelecken verschiedener Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit dem Kalibrierinterferometer*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [89] Zygo Corporation, *GPI Family of Interferometers*, <http://www.zygo.com/?/products/gpi/>, (zuletzt abgefragt 10.05.2011).