Technische Universität Dresden

Optische Kalibrierung von diffraktiven Mikrospiegelarrays

Dirk Berndt

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:	Prof. DrIng. habil. Lienig		
Gutachter:	Prof. DrIng. Lakner	Tag der Einreichung:	12.11.2012
	Prof. Dr. rer. nat. Mokwa	Tag der Verteidigung:	29.05.2013

Kurzfassung

Diffraktive Mikrospiegelarrays sind eine seit Jahren etablierte innovative Lösung zur Beleuchtungsmodulation im UV-Spektralbereich. ortsaufgelösten Sie werden hauptsächlich als Schlüsselbauelement in mikrolithografischen Industrieanlagen eingesetzt. Gegenwärtige Untersuchungen befassen sich mit der Erweiterung der Technologie hin zu multispektralen Anwendungen, beispielsweise in der Mikroskopie zur strukturierten Objektausleuchtung. Aufgrund des diffraktiven Arbeitsprinzips mit Phasenmodulationen im Nanometerbereich sowie der Vielzahl von Einzelspiegeln mit individuellem Auslenkverhalten stellt die präzise Ansteuerung der Bauelemente eine wesentliche Herausforderung dar. In diesem Kontext steht die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens im Fokus dieser Arbeit, das die Gesamtheit von mehreren Tausend oder auch Millionen Mikrospiegeln abhängig von gewünschtem Beleuchtungsmuster und -wellenlänge auf korrekte Kippwinkel einstellen kann. Der gewählte Ansatz liegt in einem Messund Korrekturverfahren aller Einzelspiegelverkippungen. Die als Kalibrierung bezeichnete Methode nutzt ein Weißlichtinterferometer zur profilometrischen Charakterisierung der elektromechanischen Übertragungsfunktionen der Aktuatoren, wodurch erstmalig auf diesem Themengebiet der multispektrale Bauelementeinsatz gewährleistet werden kann. Zentrales Ergebnis der Kalibrierroutine ist eine Reduzierung der Streuung der Spiegelverkippungen um einen Faktor größer fünf. Direkte Folge sind erheblich verbesserte optische Projektionsmuster, aufgenommen an einem parallel entwickelten optischen Lasermessplatz mit spektral verschiedenen Quellen. Nachgewiesen wurden Veraleich zum unkalibrierten Ausgangszustand Kontrastverdoppelungen, im Homogenitätssteigerungen und die Sicherstellung der Abbildung von mindestens 64 Graustufen. Die Ergebnisse dokumentieren einerseits die Leistungsfähigkeit von diffraktiven Mikrospiegelarrays in multispektralen Umgebungen mit sehr guten Abbildungseigenschaften. Gleichzeitig konnte die wesentliche Grundlage für einen deutlich erweiterten Einsatz optischer Mikrosysteme im stark wachsenden Anwendungsbereich der diffraktiven Optik bzw. der Ultrapräzisionsoptik geschaffen werden.

Abstract

For many years diffractive micromirror arrays have been an established solution for spatial light modulation in the ultraviolet spectral range. They are mainly used for micro lithographic industrial applications. Current research activities are focused on the technology transformation into multispectral applications, e.g. in microscopy for structured object illumination. Because of the diffractive working principle with analogue mirror tilting actuation for phase modulation as well as the multitude of single mirrors with individual characteristics, a key challenge is the precise control of the device on the nanometre scale. In this context, the focus of the following work is on the development and validation of an algorithm to continuously adjust the tilts of all micromirrors in real time to obtain the desired illumination pattern for a particular wavelength. An approach was found which is based on a measurement and compensation algorithm for all single mirror tilts. The chosen calibration routine is based on using a white light interferometer for the profilometric characterisation of the actuators electro-mechanical transfer functions. The multispectral device application is ensured only because of the use of this method, which can reduce the standard deviation of the mirror tilts by a factor greater than five. Subsequent results show extensively enhanced optical projection patterns, recorded with an optical laser setup comprising different spectral sources, which has been developed in parallel. Compared to an uncalibrated device doubled contrast ratios, enhanced homogeneities, and optical imaging with at least 64 levels of grey have been demonstrated. The results obtained reveal the usability of single diffractive micromirror arrays in multispectral environments with excellent imaging properties. Simultaneously, the optical performance increased in a way that diffractive MEMS may enter now the fast-growing application fields of diffractive optics and ultra-precision optics.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von 2008 bis 2012 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS in Dresden, Geschäftsfeld "Spatial Light Modulators" und unter der hochschulseitigen Betreuung des Instituts für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden.

Eine solche Arbeit ist selbstredend nicht ohne die Mithilfe anderer zu bewältigen. Ein herzliches Dankeschön gilt all denjenigen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung auf verschiedenen Wegen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Neben zahlreichen Kolleginnen und Kollegen im direkten Arbeitsumfeld, auf deren Unterstützung ich mich jederzeit verlassen konnte, gilt darüber hinaus mein besonderer Dank:

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubert Lakner vom Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, Lehrstuhl für optoelektronische Bauelemente und Systeme der TU Dresden für die Betreuung sowie Begutachtung der Arbeit,
- Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa vom Institut f
 ür Werkstoffe der Elektrotechnik, Lehrstuhl Mikrostrukturintegration der RWTH Aachen f
 ür die Bereiterkl
 ärung zur Begutachtung der Arbeit,
- Herrn Jörg Heber für die aufopferungsvolle Unterstützung, Förderung und die Betreuung im Tagesgeschäft in Form von Diskussionen, Anregungen, kritischer Reflexion und Ratschlägen über den gesamten Entstehungszeitraum der Arbeit,
- Herrn Dr. Michael Wagner für die jederzeitige Unterstützung und Anregungen.

Nicht zuletzt ist mir der Dank an meiner lieben Familie, meiner Freundin Christine sowie meinen treuen Freunden ganz besonders wichtig, die mir die ganze Zeit den Rücken stärkten und auf die ich mich immerzu verlassen konnte.

Dirk Berndt Dresden, November 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung			1			
2	Grur	Grundlagen und Stand der Technik					
	2.1	MEMS	S-Mikrospiegelbauelemente	5			
		2.1.1	Historische Entwicklung optischer MEMS	6			
		2.1.2	Mikrospiegelbauelemente und ihre Anwendungen	8			
		2.1.3	Herstellung der Mikrospiegelbauelemente	16			
		2.1.4	Beispielbauelement für MEMS-Kalibrierung	17			
	2.2	Displa	30				
	2.3	Das n	nenschliche Auge	32			
3	MMA	MMA-Charakterisierung					
	3.1	Profile	ometrische Messtechnik	36			
	3.2	Chara	akterisierung der optischen Funktionalität	37			
4	Kon	Konzeptionelle Betrachtungen zur Kalibrierung von MMA-					
	Bau	element	en	39			
	4.1	Zielse	etzung der MMA-Kalibrierung	41			
	4.2	Stand	l der Technik Mikrospiegelarraykalibrierung	44			
		4.2.1	Optische Kalibrierung	45			
		4.2.2	Profilometrische Kalibrierung	46			
	4.3	Auton	Automatisierte profilometrische Kalibrierung				
	4.4	Anwendung der Kalibrierdaten4					
5	Entv	vicklung	g zur profilometrischen MEMS-Kalibrierung	52			
	5.1	Messstation zur profilometrischen Charakterisierung					
	5.2	Ermittlung von Einzelspiegelauslenkungen5					
	5.3	Erarbo	eitung der Kalibrieralgorithmen	56			
		5.3.1	Ermittlung eines geeigneten Arbeitspunktes	57			
		5.3.2	Aufnahme einzelner Stützpunkte der Auslenkkurve	60			
		5.3.3	Datenregression zur analytischen Beschreibung des Auslenkverhaltens	63			
		5.3.4	Auswahl einer Approximationsfunktion	64			
		5.3.5	Vollständige Abrasterung des MMA-Bauelements	68			
		5.3.6	Zusammenfassung der Kalibrierprozedur	68			
	5.4	Ergeb	onisse der Kalibrierung	70			

6	Validierung der optischen MEMS-Eigenschaften mit multispektraler optischer Charakterisierung			
	6.1	Charakterisierungskonzept	74	
	6.2	Optisches Systemdesign		
		6.2.1 Auswahl der Beleuchtungsquellen	76	
		6.2.2 Laserstrahlkombinier-Einheit	77	
		6.2.3 Strahlhomogenisierung und Divergenzkontrolle	78	
		6.2.4 Reflektive MMA-und Fourierebenenabbildung	84	
		6.2.5 Kamerasystem	87	
		6.2.6 Gesamtsystem	88	
	6.3	Messplatzsteuerung	89	
	6.4	MMA-Abbildungseigenschaften des Charakterisierungsaufbaus	91	
		6.4.1 Abbildung der Fourierebene	92	
		6.4.2 Abbildung MMA-Intensitätsmuster	94	
	6.5	Spektrale Kontrastmessungen		
	6.6	Ergebnisse der profilometrischen Kalibrierung	100	
		6.6.1 Einfluss auf Kontrastmessungen	101	
		6.6.2 Einfluss auf optische Projektionsmuster	105	
		6.6.3 Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen	109	
7	Zusan	nmenfassung und Ausblick	112	
Abkür	zungs	verzeichnis	114	
Forme	elverze	ichnis / Symbole	116	
Litera	turverz	eichnis	117	
Anhar	ng A	Auflösungsvermögen Charakterisierungsaufbau	125	

1 Einleitung

Erst in den letzten 20 Jahren haben Mikrosysteme in unserer modernen Welt in einer Vielzahl von Anwendungen Einzug gehalten [1–3]. Vor allem auf die Automobilindustrie ist das enorme Wachstum zurückzuführen. In Airbags verbaut Beschleunigungssensoren in Mikrosystembauweise – als wohl populärster Vertreter der Gruppe – trugen entscheidend zur Verbreitung bei. Unter einem Mikrosystem versteht man im Allgemeinen ein stark miniaturisiertes Gerät oder Bauelement. Verwendung finden sie typischerweise als Sensoren zur Erfassung von physikalischen Größen oder als Aktoren zur Wandlung beziehungsweise Änderung von physikalischen Größen oder Energien. Auch Kombinationen beider Typen sind verbreitet. Die meisten derzeit eingesetzten Mikrosysteme basieren auf einer siliziumbasierten Halbleiterelektronik und integrieren im System Elektronikkomponenten zur Steuerung oder Auswertung der Sensor- und Aktorkomponenten. Für Systeme, die elektrische und mechanische Komponenten vereinen, etablierte sich der Begriff MEMS (mikro-elektro-mechanische Systeme). Verfügt ein MEMS zusätzlich über die Eigenschaft Licht zu beeinflussen oder abzulenken, demzufolge einer optischen Funktionalität, so spricht man von optischen MEMS oder MOEMS (mikro-opto-elektro-mechanische Systeme).

Mikrosysteme und im Speziellen MOEMS lassen sich nicht mehr klassischen Ingenieurwissenschaften wie Elektrotechnik oder Maschinenbau zuordnen. Ihre Beschreibung hinsichtlich Aufbau, Wirkungsweise und Einsatzgebiet stellt ein komplexes Arbeitsfeld dar, welchem am ehesten der interdisziplinäre Charakter der Mechatronik gerecht wird. Da eine mechatronische Betrachtungsweise den Vorteil bietet das breite Aufgabenspektrum aus einer einzigen fächerübergreifenden Sichtweise zu beschreiben (alle relevanten MEMS-Gebiete sind ebenso Felder der Mechatronik), wird dieser Blickwinkel in den folgenden Untersuchungen vorrangig aufgegriffen.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden hochintegrierten Systeme in Form von Mikrospiegelarrays sind der Gruppe der MOEMS zuzuordnen. Bei den Bauelementen wird durch eine elektrische Ansteuerung ein mechanischer Aktuator (Spiegel) bewegt, der zur Modulation von Licht eingesetzt wird. Verfügt ein solches System über eine Vielzahl von Spiegeln (teilweise über 1 Mio.), spricht man von einem Mikrospiegelarray, im Englischen als micro mirror array (MMA) bezeichnet. Die Abkürzung MMA ist in der Literatur geläufiger als die deutsche Übersetzung und wird daher im Verlauf der Arbeit verwendet.

Anwendung finden die untersuchten MMAs in komplexen mechatronischen Systemen als Flächenlichtmodulatoren (spatial light modulator - SLM) für verschiedene optische Aufgabenbereiche. Durch die individuell beweglichen Spiegel, die direkt auf einem elektronischen Schaltkreis (CMOS) integriert sind, lässt sich einfallendes Licht ortsaufgelöst modulieren und somit flächig variable Muster mit hoher Wiederholrate erzeugen. Der Begriff Licht bezeichnet im weiteren Sinne elektromagnetische Wellen zum Beispiel im Spektralbereich von Ultraviolett (UV) über den sichtbaren Bereich (VIS) bis ins nahe Infrarot (NIR). Das ursprüngliche Anwendungsgebiet der untersuchten MMAs in einer Ausführung als Array von analog auslenkbaren Kippspiegeln liegt in der optischen Mikrolithografie. Die Spiegelarrays werden seit mehreren Jahren erfolgreich als zentrales Bauelement in Anlagen zur lithografischen Maskenherstellung eingesetzt. Die typische Arbeitswellenlänge der Maschinen liegt im tiefen UV-Bereich bei 248 nm, die Bildwiederholrate bei 2 kHz [4]. Die untersuchten SLMs wurden ursprünglich für diese Aufgabe und diesen Spektralbereich entwickelt und optimiert.

Die Etablierung der MMAs am Markt, deren zuverlässiger Betrieb sowie die Vorteile eines programmierbaren Hochgeschwindigkeits-Lichtmodulators führten zwangsläufig zu dem Wunsch der Überführung in weitere Anwendungen. Eine neue Generation von MMAs greift diese Forderung auf und zielt auf einen universellen Einsatz ab [5]. In Mikroskopsystemen, die vorrangig in der Halbleiterinspektion und den Biowissenschaften eingesetzt werden, ist eine variable Objektbeleuchtung mit SLMs vorstellbar. Je nach Einsatzgebiet wird mit unterschiedlichen Beleuchtungswellenlängen gearbeitet. Ziel ist, den kompletten spektralen Arbeitsbereich (von UV über VIS bis NIR) mit einem SLM zu modulieren. Dieser erweiterte Aufgabenbereich stellt höchste Anforderungen an das Bauelement selbst. Simulationen konnten nachweisen, dass SLMs diesen Anforderungen genügen können. Voraussetzung dafür ist - neben technologischen Eigenschaften wie der breitbandigen Spiegelreflektivität - die hochpräzise Positionierung aller Mikrospiegel im Array. Erfahrungen etablierter MMA-Entwicklungen zeigen allerdings, dass die theoretisch daraus abgeleiteten optischen Eigenschaften in der Praxis nicht direkt realisierbar sind. Beispielsweise limitieren Schlitzreflexionen und Oberflächenrauigkeiten der Spiegel die optischen Betriebseigenschaften. Einen weiteren, im Vergleich dazu noch größeren beschränkenden Punkt stellt das individuell unterschiedliche elektro-mechanische Verhalten von Spiegel zu Spiegel im Array dar. Bekannt sind statistische und systematische Streuungen der Einzelspiegelauslenkungen im Nanometerbereich. Aufgrund der Vielzahl von Prozessschritten in der Herstellung, den kleinen Dimensionen im Mikrometer- und Nanometerbereich sowie der großen Anzahl von Einzelspiegeln ist trotz stetig fortschreitender Prozessoptimierung eine individuelle Spiegelcharakteristik unvermeidlich.

Exakt dieser Fakt wird in dieser Arbeit aufgegriffen. Erst die hochpräzise Kontrolle aller Spiegel im Array ermöglicht die Ausschöpfung des vollen Bauelementpotentials und die Schließung der derzeit vorhandenen Lücke. Eine wesentliche optische Anforderung an Mikrospiegelarrays stellt der erreichbare Bildkontrast in den abzubildenden Beleuchtungsmustern dar. Qualitativ hochwertige und kontrastreiche Bilder hängen direkt von einer präzisen Spiegelansteuerung ab und sind für die neuen Einsatzfelder in der Mikroskopie sowie weiteren Anwendungsgebieten Grundvoraussetzung für einen Einsatz MMAs. Ansatz der Der dieser Arbeit zur Erschließung des Bauelementpotentials ist eine mechatronische Betrachtungsweise der MEMS, die gleichzeitig die optischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften sowie eine angepasste Ansteuerung in ihrer gesamten Komplexität parallel betrachtet. Nicht die Entwicklung neuer Prozesstechnologien oder die Optimierung bestehender, sondern ein neuer und im Vergleich dazu deutlich schnellerer Ansatz ist wesentlicher Gegenstand dieser Arbeit. Ein messtechnisches Korrekturverfahren der individuellen Spiegelcharakteristik als abschließender Technologieschritt, auch bezeichnet als Bauelementkalibrierung, wird in der vorliegenden Arbeit entwickelt und deren Wirkungsweise eingehend untersucht.

Daraus abgeleitet sind für die MMA-Kalibrieruntersuchungen folgende drei wesentliche Ziele:

- Etablierung des MMA-Einsatzes in einer multispektralen Arbeitsumgebung
- Kontrastwerte der Projektionsmuster deutlich größer 100, bis zu 1000
- Intensitätstreue von Graustufendarstellungen der Projektionsmuster von 1/64

Vor allem der erstgenannte Punkt stellt die zentrale Neuerung im Vergleich zum bisherigen MMA-Einsatz in der Lithografie dar und ist als Schlüsselkriterium für eine Mikroskopsystemen anzusehen. erfolgreiche Applikation in Ein geeignetes Kalibrierverfahren soll erstmals den Weg zu einem universellen und multispektralen MMA-Einsatz mit variabler Beleuchtungswellenlänge ebnen. Die beiden übrigen Ziele beschreiben konkrete optische Parameter der Projektionsmuster, die durch die Kalibrierung im kompletten spektralen Arbeitsbereich mit dem MMA erreicht werden sollen. Während das Ziel der Kontrastwerte zunächst im Fokus dieser Arbeit stand, kristallisierte sich erst im Laufe der Untersuchungen die zunächst weniger beachtete Forderung an die Grauwertabbildung als ein ebenso zentrales Kalibrierziel heraus, da die Beleuchtungsmuster zugleich definierten Homogenitätsanforderungen unterliegen. Aus den genannten optischen Zielparametern lassen sich direkt Anforderungen an die Spiegelpositioniergenauigkeit formulieren: Für die Kontrastwerte gilt, dass die Exaktheit der eingestellten Spiegelauslenkungen besser als einem Hundertstel der verwendeten Beleuchtungswellenlänge (λ /100) betragen muss, für die Graustufenintensitätstreue müssen gar λ /400 als zulässige Auslenkungsabweichung erreicht werden (detaillierte Berechnungen siehe Kapitel 4.1).

Ziel der Dissertation ist die Entwicklung eines universell einsetzbaren und automatisiert ablaufenden Kalibrierverfahrens, welches den MMA-Einsatz in einem breiten spektralen Arbeitsfeld gewährleistet. Parallel soll das derzeitige Bauelementpotential deutlich besser ausgeschöpft werden, um die beschriebenen optischen Parameter zu erreichen. Zur Verifizierung der Arbeitsergebnisse findet eine zweigleisige Strategie Anwendung. Die miteinander verknüpften mechanischen und optischen MEMS-Parameter werden jeweils einzeln charakterisiert und anschließend vergleichend bewertet.

Erster Schwerpunkt der Arbeit bildet die Verfahrensentwicklung einer profilometrischen Kalibrierung der Bauelemente mit Einzelspiegelauflösung. Verwendung dafür findet eine hochauflösende Weißlichtinterferometer-Messstation (WLI), mit deren Hilfe für

jeden einzelnen Mikrospiegel das elektro-mechanische Übertragungsverhalten zeitaufgelöst ermittelt wird. Im Anschluss an diese Kalibrierung sollen exakte mechanische Auslenkungen ohne systematische und mit deutlich verringerten statistischen Streuungen einstellbar sein, die individuellen Vorauslenkungen und variablen Federsteifigkeiten der Spiegel sind zu kompensieren.

Um die resultierenden Kontrast- und Grauwerte zu beurteilen, ist ein Laser-Messplatz zur direkten optischen Charakterisierung der MEMS-Bauelemente erforderlich. Die Entwicklung dieses Messplatzes ist zweiter Schwerpunkt der Arbeit. Ziel ist es, in ausgedehnten Spektralbereich angelehnt an die Applikation einem _ Kontrastuntersuchungen durchzuführen und die durch die WLI-Kalibrierung erreichbaren Kontraststeigerungen sowie die Grauwerttreue zu quantifizieren.

Die Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in fünf Kapitel. Für einen ersten Überblick beschreibt Kapitel 2 die allgemeinen Grundlagen von MEMS-Bauelementen. Die in dieser Arbeit genutzten Kippspiegelarrays werden ebenfalls in diesem Abschnitt im vorgestellt. Kapitel 3 befasst Detail sich mit zwei Standard-MMA-Charakterisierungskonzepten, zum einen der Vermessung der mechanischen Spiegelpositionen und zum anderen der Charakterisierung der optischen Projektionsmuster. Im Anschluss werden in Abschnitt 4 Kalibrierkonzepte erläutert, wobei die konkrete Umsetzung eines der Konzepte im Kapitel 5 detailliert beschrieben wird. Zur Verifizierung der Kalibrierung schließt sich Kapitel 6 an, in dem ein optischer Lasermessplatz vorgestellt und der Einfluss der Kalibrierung auf die Projektionsmuster analysiert wird. Den Abschluss bildet Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Im diesem Kapitel werden Grundlagen und der Stand der Technik von MEMS-Mikrospiegelbauelementen sowie Displaytechnologien erläutert. Damit soll die Einordnung des Inhaltes und der Zielstellungen der vorliegenden Arbeit erleichtert werden. Die Eigenschaften des menschlichen Auges werden in einem weiteren Abschnitt kurz dargestellt und an den Technologien gespiegelt.

2.1 MEMS-Mikrospiegelbauelemente

Ende der 70er, Anfang der 80er Jahre begann eine Entwicklung der klassischen Mikroelektronik in eine neue Richtung, deren Ende heute noch nicht absehbar ist [2], [6]. Mit den gleichen Herstellungsprozessen aus der Mikroelektronikfertigung begannen die Pioniere zusätzlich zu den elektronischen Komponenten die Bauteile um neue Bestandteile zu erweitern. Mit der Zeit verschob sich die primäre Funktionalität einzelner miniaturisierter Baugruppen von elektrischen zu anderen Anwendungen, was als Beginn der Mikrosystemtechnik angesehen werden kann. Viele Mikrosysteme vereint ein sogenannter CMOS-kompatibler Herstellungsprozess. Demzufolge finden nach wie vor die klassischen Herstellungsverfahren der Mikroelektronik (im Wesentlichen Beschichten, Strukturieren und Ätzen) Anwendung. Ausgehend von Halbleiterscheiben (sogenannte Wafer, in den meisten Fällen aus kristallinem Silizium) werden verschiedene Strukturierungsprozesse durchgeführt, um die Zielfunktionalität der Bauteile zu realisieren. Der Begriff MEMS (mikro-elektro-mechanisches System) wurde Mitte der 1980er Jahre erstmals von einer Gruppe an der Universität Utah geprägt und vereint Mikroelektronik mit mechanisch beweglichen Komponenten. Anfangs als Zweig der Mikrosystemtechnik entwickelte sich dieses Feld als eigenständige zukunftsweisende Technologie [6]. Getrieben vor allem durch die ersten Anwendungen als Druck- und Beschleunigungssensor wurden mehr und mehr Anwendungen adressiert. Die enorme Marktentwicklung mit jährlichen Zuwachsraten von knapp 20 % in den letzten Jahren zeigt Abbildung 2.1.



Total market for 26 MST/MEMS products, 2004-2009

*Other are: microreaction, chip cooler, MEMS memories, liquid lenses, microspectrometer, wafer probes, micro-mirrors for optical processing, micro-pumps, micromotors, chemical analysis systems

Abbildung 2.1: Prognose MEMS-Marktentwicklung aus dem Jahr 2005 [7]

Mit beginnender Kombination von MEMS mit optischen Funktionalitäten und Anwendungen wurde im Zeitraum der 1990er Jahre der Begriff MOEMS (mikro-elektromechanisches System) geprägt [8], wobei schon mehr als 15 Jahre in diesem Wissenschaftszweig geforscht wurde. Geboren aus den noch jungen Feldern MEMS und Mikrooptik konnten MOEMS schnell nachweisen, eine attraktive Lösung für vielfältige optische Problemstellungen hinsichtlich Funktionalität, Performance und Kosten zu sein [6]. Bereits in diesem Zeitraum war abzusehen, dass in der neuen Familie an miniaturisierten optischen Systemen ein enormes Potential steckt, um photonische Systeme zu revolutionieren und in neue Anwendungsfelder zu führen, beispielsweise in der optischen Datenübertragung. Anfangs stellten MOEMS noch miniaturisierte Versionen von makroskopischen Systemen dar, deren Vorteil hauptsächlich in der preisgünstigen Kombination aus Elektronik und Sensor bzw. Aktor lag. Über die Jahre wurden neue MOEM-Systeme entwickelt und in neue Anwendungsfelder geführt, zu denen kein makroskopischer Gegenpart existiert [9]. Einen sicher nicht vollständigen Überblick aus dem Jahr 2006 über MOEMS-Anwendungen im Allgemeinen und die Marktentwicklung ist in [10] aufgezeigt. Einsatz finden MOEM-Systeme unter anderem in der optischen Datenübertragungstechnik (beispielsweise als optischer Schalter), in Spektrometern, als IR-Bildsensor, in Barcode-Lesegeräten und in Projektionssystemen.

2.1.1 Historische Entwicklung optischer MEMS

Die ersten MEMS-Mikrospiegelbauelemente als eine bedeutende Untergruppe der MOEMS führen auf das Jahr 1980 zurück, noch lange bevor der MOEMS-Begriff

bekannt war. Peterson beschreibt in [11] einen Torsions-Scannerspiegel auf Siliziumbasis (Abbildung 2.2), der schon einige Gemeinsamkeiten mit den heute gebräuchlichen Scannerspiegeln aufweist, beispielsweise das elektrostatische Antriebsprinzip.



Abbildung 2.2: Einer der erster MEMS-Scannerspiegel; Grafik links zeigt REM-Aufnahme, Grafik rechts zeigt Spiegeldimensionen in cm (aus [12])

Doch bereits einige Jahre vor der Publikation des MEMS-Scannerspiegels finden sich in der Literatur Artikel zu mikromechanischen Lichtmodulatorarrays basierend auf Silizium. Im Jahr 1975 beschreiben Thomas et al. in [13] eine für Projektionsschirme angewandte Spiegelmatrixröhre. Das Bauteil verfügt schon über beachtliche 500 Elemente und ermöglicht mit entsprechender Optik Projektionen mit Kontrastwerten von 15:1. Obwohl die elektrostatisch angetriebenen Membranelemente nicht direkt elektrisch angesteuert werden, sondern die Ladung über einen gerichteten Elektronenstrahl aufgebracht wird, spricht Toshiyoshi in [14] bereits von den ersten optischen MEMS. Zwei Jahre später, 1977, wurde ein weiteres mikromechanisches Lichtmodulatorarray basierend auf Silizium publiziert [15], welches bereits über direkt im Bauteil integrierte elektrische Kontaktierungsmöglichkeiten verfügt. Dabei handelt es sich um ein eindimensionales Array aus 16 mit SiO₂ beschichteten Membranen, die sich ähnlich wie ein Biegebalken durch Erzeugen von Kräften krümmen einzelnen (Abbildung 2.3). Die Membranen ließen sich individuell durch elektrostatische Kräfte um bis zu 8,5° verbiegen, sodass einfallendes Licht in unterschiedliche Richtungen reflektiert wird. Durch eine Blende im abbildenden Strahlengang war die Realisierung von hellen und dunklen Bildpunkten in einer Linie auf einer Projektionsfläche möglich. Ein zusätzlich eingebauter Galvanoscanner im System ermöglichte diese Beleuchtungslinie auf dem Schirm zu verschieben, sodass zweidimensionale Bilder mit 1 Bit Farbtiefe entstanden. Die Beleuchtungsmuster erreichten nach [15] bereits einen Kontrast von 8:1.



Abbildung 2.3: Erstes mikro-elektro-mechanisches Lichtmodulatorarray aus dem Jahr 1977. Die linke Grafik zeigt eine REM-Aufnahme des Arrays, die rechte Grafik erläutert die Anwendung in einem Projektionsaufbau [12].

Heute verbreitete MEMS-Mikrospiegelbauelemente und deren Anwendungsfelder werden in den nächsten Kapiteln kurz erläutert, um einen Überblick über am Markt gebräuchliche Technologien zu geben.

2.1.2 Mikrospiegelbauelemente und ihre Anwendungen

Unter der Bezeichnung Mikrospiegelbauelemente versteht man MEMS, die zur dynamischen Lenkung von Licht verwendet werden. Einsatz finden sie je nach Anwendung sowohl als Sensor, als auch – derzeit deutlich weiter verbreitet – als Aktor. Alle Bauelemente vereint die Fähigkeit Licht zu beeinflussen, wobei sich der Begriff Licht nicht nur auf den sichtbaren Spektralbereich beschränkt, sondern ebenfalls die angrenzenden Bereiche im UV und NIR einschließt. Die Lichtlenkung erfolgt durch mikromechanische Aktuatoren, im Allgemeinen bewegliche Spiegel. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Bauelemente ist die Anzahl der Aktuatoren. MEMS-Bauelemente mit einem Spiegel tragen typischerweise den Namen Scannerspiegel, bei Bauelementen mit mehreren Aktuatoren wird der Begriff Flächenlichtmodulator (englisch spatial light modulator – SLM) genutzt [6]. Aktuatoren in SLMs können sowohl in eindimensionaler als auch zweidimensionaler Anordnung positioniert sein.

Die am weitesten verbreiteten Bauformen von Mikrospiegelbauelementen sind Scannerspiegel und Mikrospiegelarrays mit digitalem und analogem Betriebsmuster. Sie adressieren vor allem Anwendungen in Projektionssystemen. Nähere Erläuterungen dazu erfolgen in den nächsten Unterkapiteln. Doch noch weitere Mikrospiegelbauelemente sind verbreitet. Als erster Vertreter sind sogenannte Grating Light Valves (GLV) zu nennen. GLV-Systeme sind eine geschützte Marke der Firma Silicon Light Machines. Die diffraktiven GLV-SLMs bestehen aus einer Vielzahl von miniaturisierten Metallbalken. Durch gezieltes Absenken dieser Balken entsteht ein veränderbares optisches Gitter, womit variable Beleuchtungsmuster erzeugt werden. Durch eine spezielle Projektionsoptik lassen sich diese Muster auf eine Leinwand abbilden. Hauptanwendungen dieser Systeme finden sich in der Bildprojektion und digitalen Drucktechnik [16], [17].

Auch Membranspiegelbauelemente sollen an dieser Stelle erwähnt werden. Unter dem Begriff "moving liquid mirrors" (MLM) wurden Untersuchungen vorangetrieben, die heute allerdings keine große Verbreitung mehr aufweisen [18].

Weitere Mikrospiegelbauelemente können der Literatur entnommen werden, unter anderem in [6]. In den folgenden drei Unterkapiteln werden die drei gängigsten Bauformen näher erläutert.

2.1.2.1 Scannerspiegel

Die bereits im vorangegangenen Kapitel vorgestellten MEMS-Scannerspiegel aus dem Jahre 1980 haben sich in der Vergangenheit deutlich weiterentwickelt. Heutige Bauformen vereinen feinste mechanische Strukturen mit Dimensionen von wenigen µm sowie Ansteuer- und teilweise Auswerteelektronik. Alle Scannerspiegel vereint das Vorhandensein eines beweglichen Spiegels, der sich je nach Bauform translatorisch aus der Spiegelebene heraus auf und ab oder rotatorisch um eine oder zwei Spiegelachsen bewegen lässt. Dadurch ist einfallendes Licht bei der rotatorischen Bauform ablenkbar, bei der translatorischen Bewegungsform ist die Phase modulierbar.



Abbildung 2.4: Bewegungsformen von Scannerspiegeln (nach [19])

Einsatz finden Scannerspiegel bereits heute in großen Stückzahlen in verschiedensten Anwendungen, beispielsweise seien hier genannt Laserdisplays, Barcode-Lesegeräten, Objekt-Identifikation, Spektroskopie, Endoskopie und Mikrodisplays [20]. Eine Vielzahl von physikalischen Antriebsprinzipien für die Spiegelbewegungen ist in der Literatur verzeichnet (elektrostatisch [11], [21], elektromagnetisch [22], [23], piezoelektrisch [24], elektro-thermal [25]) mit quasistatischer [11], [22–25] oder resonanter [21], [23] Ansteuerung. Je nach Antriebsprinzip, Bewegungsform und Anwendung unterscheiden sich Scannerspiegel teilweise erheblich hinsichtlich ihrer Eigenschaften. Die Spiegeldurchmesser betragen in der Regel einige 100 µm bis zu wenigen mm [21], [26], unabhängig davon ob eine runde oder rechteckige Spiegelfläche vorliegt. Rotatorisch aufgehängte Spiegel erreichen Auslenkwinkel von bis zu 40° [25], mit translatorischen Scannerspiegeln sind Hubamplituden von 1 mm realisierbar [26].



Abbildung 2.5: Beispiele hergestellter Scannerspiegel; linke Seite: elektrothermal angetriebener rotatorisch beweglicher Spiegel [25]; rechte Seite: elektrostatisch angetriebener translatorischer Spiegel [26]

2.1.2.2 Mikrospiegelarrays mit digitalem Betriebsmuster

Unter dieser Überschrift sind MOEM-Bauelemente zusammengefasst, die über eine Vielzahl beweglicher Einzelspiegel mit je zwei definierten Positionszuständen im Betrieb verfügen. Üblicherweise existiert zu den beiden Betriebszuständen eine weitere Position im Ruhe- bzw. nicht angesteuerten Modus. Das Feld der digitalen Mikrospiegelarrays wird weltweit bestimmt von der Firma Texas Instruments mit ihren unter dem Namen DMD (Digital Micromirror Device) geführten Mikrospiegelarrays. Texas Instruments hält zahlreiche Patente zur DMD-Technologie und Anwendungen, die vor allem auf Projektionstechniken setzen (beispielsweise [27–29]). Heutiges Hauptanwendungsgebiet von DMDs sind Projektoren aller Arten und Größen, angefangen von Pikoprojektoren über handelsübliche Geräte für Heim- oder Konferenzanwendungen bis hin zu Kinoprojektoren [30]. Jeder Spiegel im Array steuert ein Bildpixel auf der Leinwand. Dies hat zur Folge, dass für Projektionsbilder im HDTV-Format das Array über ebenso viele Mikrospiegel verfügen muss, demnach rund 2 Mio. Mittlerweile sind DMDs mit Auflösungen von 4160 x 2080 Spiegeln erhältlich [30], [31].

DMD-Bauelemente verfügen über kippbar gelagerte Spiegel mit je nach Bauform variablen Kantenlängen, heutzutage sind 7,6 μ m [32], 10,8 μ m und 13,6 μ m üblich [33]. Unter den Spiegelplatten befindliche Elektroden erzeugen elektrostatische Kräfte, die den Spiegel definiert kippen lassen. Typischerweise werden Winkel von ± 12° erreicht [34]. Im Betrieb befindet sich jeder Spiegel immer in einem der beiden Kippzustände (+ 12° oder – 12°), daher spricht man von einem digitalen Betriebsmuster.

Der vereinfachte Spiegelaufbau ist in Abbildung 2.6 auf der linken Seite dargestellt. Es handelt sich um einen sogenannten Mehrlagenaufbau, wobei verschiedene Ebenen für

unterschiedliche Funktionen ausgelegt sind. Den Unterbau bildet ein CMOS-Substrat, das die elektrische Kontaktierung und Ansteuerung jedes Spiegels sicherstellt. Direkt auf diese Strukturen ist der mechanische Spiegelaufbau integriert, der durch mikrosystemtechnische Verfahren hergestellt wird. Rot in der Abbildung dargestellt sind die Torsionsfedern (Hinges), die für die Beweglichkeit der mechanischen Struktur verantwortlich sind. Nach oben schließt eine hocheffizient verspiegelte Platte ab, der sogenannte Mikrospiegel.

Das Bilderzeugungsverfahren der Bauelemente basiert auf reiner Strahlenoptik. Beleuchtet werden die Bauelemente typischerweise mit einer Weißlichtquelle. Befindet sich ein Mikrospiegel in der + 12°-Stellung wird Licht durch eine Projektionsoptik auf eine Bildfläche, beispielsweise Leinwand, projiziert (Abbildung 2.6 rechte Seite). Im entgegengesetzten Fall bei – 12°-Spiegelposition erfolgt die komplette Spiegelreflexion in eine im Gerät befindliche Strahlfalle. Die Leinwand erreicht an dieser Spiegelposition keine Strahlung der Quelle, es entsteht ein schwarzer Bildpunkt. Jeder Spiegel übernimmt somit die Funktion eines optischen Schalters, einfallendes Licht wird entweder in die Projektionsoptik oder in die Strahlfalle abgelenkt.



Abbildung 2.6: Mechanischer Aufbau und Abbildungsprinzip eines DMDs [35]; Auslenkwinkel von ± 10° waren im Jahr der Veröffentlichung 1997 noch Stand der Technik

Flächig betrachtet werden folglich durch gezielte Verkippung aller Spiegel im Array variable Muster in Form von Schwarz-Weiß-Bildern auf der Bildfläche erzeugt. Um für

heutzutage typische Projektionsaufgaben relevant zu sein, müssen zusätzlich Intensitätsabstufungen (Graustufen) und Farben in die Projektionsbilder integriert werden. Ersteres wird über eine binäre Pulsweitenmodulation realisiert. Binäre Pulsweitenmodulation bedeutet die Projektion von wechselnd schwarzen und weißen Bildpunkten mit unterschiedlichen zeitlichen Anteilen in schneller Folge (bis zu 32,5 kHz [33], abhängig vom DMD-Typ), die das menschliche Auge aufgrund seiner Trägheit als Grauwerte wahrnimmt. Typische DMD-Systeme erreichen eine Farbtiefe von 8 Bit (256 Grauwerte) oder 10 Bit (1024 Grauwerte) [35]. Abhängig von der Schaltfrequenz der Bauelemente und der gewünschten Farbtiefe sind somit bis zu mehrere 100 variable Graustufenmuster pro Sekunde realisierbar. Um eine farbliche Projektion zu gewährleisten, finden zwei unterschiedliche Systemformen Anwendung. Im ersten System wird ein mit Farbfiltern, die jeweils nur spezielle Spektren der Weißlichtquelle passieren lassen, besetztes Farbrad genutzt. So sind sequentiell grüne, blaue und rote Abbildungen realisierbar, die in schneller Folge für das menschliche Auge als bunte Vollfarbbilder erscheinen. Die zweite Systemform verwendet drei DMD-Bauelemente, je eins für die drei Grundfarben. Die einzelnen Strahlen werden im System überlagert, um ein Vollfarbbild zu erzeugen.

Heutige DMD-Bauelemente werden neben dem Massenmarkt Projektionstechnik noch in zahlreichen Nischenmärkten eingesetzt. Beispiele sind volumetrische Displays, Lithografie und Mikroskopie für bildgebende Applikationen [10], sowie Sensoranwendungen hauptsächlich für die 3D-Vermessung [36–38]. Aktuelle DMDs sind nicht nur in der Lage im sichtbaren Spektralbereich zu arbeiten, sondern können breitere Spektralbereiche von 365 bis 2000 nm modulieren [30], [33]. Eine Modulation des UV-Wellenlängenbereichs kleiner 365 nm ist bis heute nicht zuverlässig realisiert.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass Texas Instruments nicht der einzige Anbieter von Mikrospiegelarrays mit digitalem Betriebsmuster ist. Am Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie beispielsweise sind Arrays von 128 x 128 Spiegel mit einer Kantenlänge von 100 µm hergestellt worden [39].



Abbildung 2.7: Digitales Mikrospiegelarray vom Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (Bilder aus [40])

2.1.2.3 Mikrospiegelarrays mit analogem Betriebsmuster

Diese Gruppe von Bauelementen unterscheidet sich im Wesentlichen von den im vorangegangen Kapitel vorgestellten in der geänderten Betriebsform. Bei digitalen Mikrospiegelarrays existieren zwei stabile Spiegelpositionen, solche mit analogem Betriebsmuster verfügen über eine Vielzahl stabiler Spiegelpositionen, theoretisch gar unendlich viele. Diese Eigenschaft ermöglicht vollständig andere Einsatzgebiete für die Bauelemente. Jeder Einzelspiegel wird nicht wie bei den digital betriebenen Spiegelarrays bis zu einem Anschlag bewegt, sondern verharrt an einer mittleren Position, bei der sich ein Kräftegleichgewicht aus Antriebs- und Rückstellkraft einstellt. Je nach Größe der Antriebskraft variiert die Position des Gleichgewichts. Die Eigenschaft der analogen Spiegelpositionierbarkeit erfordert allerdings einen Mehraufwand im Systemaufbau und der MMA-Ansteuerung. Je nach Anwendungsfall überwiegen die Stärken der digitalen oder analogen Ansteuerung und müssen individuell abgewogen werden.

Zu den bereits vorgestellten Kippspiegelarrays, die ebenfalls mit analogem Betriebsmuster existieren. gibt es als weitere bedeutende Gruppe die Senkspiegelarrays. Ebenso eine Kombination aus Kipp- und Senkfunktion wurde realisiert [41]. Senkspiegelarrays in MEMS-Bauweise zeichnen sich durch eine Vielzahl von individuell absenkbaren Mikrospiegeln aus. Verbreitung finden diese Bauelemente vor allem in der flächigen Modulation der Phase eines Lichtstrahls, oft Gebrauch findet hierzu die Bezeichnung Adaptive Optik oder Wellenfrontkorrektur. Genutzt werden kann dies überall wo eine Phasenkorrektur oder -anpassung von Licht notwendig erscheint. Phasenverzerrungen treten beispielsweise in der Atmosphäre der Erde auf, somit sind Phasenkorrekturen in der Astronomie gängige Praxis. Gleichfalls terrestrische Anwendungen, beispielsweise in der Augenheilkunde, optischer Datenübertragung oder Laserpulsformung sind Einsatzfelder von Senkspiegelarrays. Einen guten Überblick über diese und weitere Anwendungsfelder beschreiben Gehner et al. in [42]. Mehrere Forschergruppen weltweit betätigen sich auf dem Feld der MEMS-Senkspiegelarrays und haben Prototypen und marktreife Produkte entwickelt. Eine Auswahl ist in den Quellen [42-46] verzeichnet. Aufgrund sehr unterschiedlicher Anwendungsfelder sind ebenso die Ausführungsformen sehr breit gefächert. Die Spiegelanzahl variiert zwischen 2 x 2 [43] und 512 x 128 [46], ebenso die Kantenlänge einer Einzelspiegelplatte zwischen 3 µm [46] und 400 µm [45]. Entscheidend für die Anwendung ist die Hubhöhe eines Mikrospiegels, die sich zwischen 75 nm [46] (geeignet für DUV-Modulation) über 400 nm [42] (noch ausreichend für die Modulation von sichtbarem Licht) bis zu 9,4 µm [43] bewegt. Die Spiegelplatten sind wahlweise durch eine Membran verbunden [43], [45] oder segmentiert [42], [44-46].



REM-Aufnahme eines 17-Segment-

17-Segment- REM-Aufnahme eines Einzelspiegels der Kantenlänge 40 μm (aus [42])

Abbildung 2.8: Beispiele von Senkspiegelarrays

Wesentlich weniger verbreitet sind analog betriebene Kippspiegelarrays. Entwicklungen finden derzeit hauptsächlich noch am Fraunhofer IPMS in Dresden (Deutschland) und am IMEC in Leuven (Belgien) in Zusammenarbeit mit ASML in Veldhoven (Niederlande) statt. Der Aufbau der Einzelspiegel ähnelt denen von DMDs, mit dem Unterschied, dass die Spiegelkippachse nicht diagonal zum Spiegelraster, sondern parallel zu einer Spiegelkante verläuft. Ebenso fehlen in der Regel Landezonen bzw. –elektroden oder Aufschlagpunkte, die Spiegelplatten haben nur direkten Kontakt zu den Torsionsfedern. Die Kräfte zum Verkippen der Spiegel werden ebenfalls elektrostatisch durch unter den Spiegeln platzierter Elektroden erzeugt.

Am Fraunhofer IPMS werden derzeit verschiedene Typen von analogen Kippspiegelarrays mit sogenannten 2-Ebenen-Spiegeln hergestellt [47], [48]. Diese Bauform ähnelt den heutigen DMDs, bei denen die Spiegel- und Federebene voneinander getrennt sind. Wesentlicher Vorteil in diesem Aufbau ist die getrennte Optimierbarkeit beider Ebenen sowie die Erhöhung des optischen Füllfaktors. Abbildung 2.9 zeigt REM-Aufnahmen zweier beispielhafter MMAs in dieser Bauform. Deutlich zu erkennen sind im unteren Teil der linken Abbildung die Elektroden- sowie die Federebene. Darüber werden die Mikrospiegel im Raster von 16 µm integriert, wovon sich ca. 1 Mio. auf dem kompletten Bauelement befinden [48]. Konzipiert wurden die Spiegelarrays für den Einsatz im tiefen UV-Wellenlängenbereich bei 193 nm bis 248 nm, um in lithografischen Maschinen zur Maskenherstellung eingesetzt zu werden [47]. Aufgrund der relativ kurzen Wellenlänge und des diffraktiven Arbeitsprinzips ist es ausreichend, die Spiegel nur bis ca. 0,5° zu verkippen, um die Beleuchtungsintensität vollständig zu modulieren. Im Gegensatz zu den beschriebenen quadratischen Spiegelarrays entwickelte das Fraunhofer IPMS zudem Spiegel im hexagonalen Design. Das in Abbildung 2.9 rechts dargestellte MMA wurde speziell für neue Anwendungen mit kontinuierlich emittierenden Lasern hoher Energiedichte entwickelt. Die Spiegel wurden ausgelegt. um Licht in einem breiten Wellenlängenbereich von DUV bis NIR zu modulieren.





Ausschnitt aus MMA mit 1 Mio. 16 µm-Spiegel in 2-Ebenen-Technologie, im unteren Bildteil wurden Spiegel entfernt (aus [48])

MMA mit hexagonalem Spiegeldesign in 2-Ebenen-Technologie (aus [49])

Abbildung 2.9: REM-Aufnahmen verschiedener am Fraunhofer IPMS gefertigter MMAs

Das IMEC hat in der jüngeren Vergangenheit im Gegensatz zum Fraunhofer IPMS und Texas Instruments vor allem sogenannte Einlagenspiegel entwickelt, wie sie früher ebenfalls von beiden Unternehmen hergestellt wurden [50], [51]. Dies bedeutet, dass sich die Spiegelplatte und die Torsionsfedern in einer Ebene befinden. REM-Aufnahmen beispielhafter Mikrospiegel sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt den Ausschnitt eines Arrays aus 16 x 16 Spiegeln mit einer Kantenlänge von 20 µm [52]. Die Neigung der angesteuerten Spiegel beträgt bis zu 3,5°, was einem Höhenunterschied am Spiegelrand im Vergleich zu unausgelenkten Spiegel von knapp 400 nm entspricht. Im rechten Teil der Abbildung 2.10 ist ein Querschnitt durch ein anderes am IMEC gefertigtes MMA zu sehen, sodass sowohl die Einzelspiegel, als auch der elektronische Unterbau sichtbar werden. Gezeigt ist das derzeitig größte Mikrospiegelarray mit 11 Mio. individuell adressierbaren Einzelspiegeln der Kantenlänge 8 µm. Das IMEC entwickelte dieses Bauelement in Zusammenarbeit mit ASML für eine maskenlose lithografische Anwendung im tiefen UV-Bereich bei einer Wellenlänge von 193 nm [53]. Aufgrund der kurzen UV-Wellenlänge ist es ausreichend die Spiegel nur um ca. 0,6° zu verkippen, um den Beleuchtungsstrahl in seiner Intensität vollständig zu modulieren.



Einzelne 20 µm-Spiegel in einem 16 x 16-Spiegelarray (aus [52])



Schnittbild von integriertem MMA mit 8 µm-Spiegeln oberhalb der CMOS-Elektronik (aus [54])

Abbildung 2.10: REM-Aufnahmen verschiedener am IMEC gefertigter MMAs

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden hauptsächlich an einem weiteren im Fraunhofer IPMS entwickelten analogen MMA durchgeführt. Die Vorstellung der Bauelementmerkmale und Anwendungen erfolgt in Kapitel 2.1.4.

2.1.3 Herstellung der Mikrospiegelbauelemente

An dieser Stelle soll ein kurzer und grober Einblick in die Herstellungsverfahren der Mikrospiegelbauelemente gegeben werden. Detailliert lassen sich die Methoden unter anderem in [2], [6], [12], [21], [48], [55] studieren. Typischerweise findet als Ausgangbasis für MEMS ein Wafer, eine kristalline ca. 1 mm dicke Siliziumscheibe Verwendung, die als Substrat oder Objektträger dient. In der Folge wird das Substrat in einer Vielzahl von Prozessschritten strukturiert, um die elektrischen und mechanischen Geometrien zu erzeugen. Zahlreiche Verfahren werden angewandt, um sowohl Material aufzubringen als auch abzutragen. Meist erfolgt die Strukturierung einer einzigen Schicht nach folgendem Ablaufschema:

- Aufbringen eines Fotolacks
- Strukturübertragung durch Belichtung des Lacks mit oder ohne einer Maske (Lithografie)
- Entfernung der belichteten (Positivlack) oder unbelichteten (Negativlack) Bereiche
- Halbleiterprozessschritt (z. B. Dotieren, Ätzen, Abscheiden) in den unbelackten Bereichen
- Entfernung des restlichen Lacks
- ggf. Planarisierung bzw. Reinigung

Dieser Ablauf wiederholt sich mehrere Male, bis sämtliche gewünschten elektrischen und mechanischen Strukturen erzeugt sind. Es existiert eine Vielzahl von Abwandlungen dieses Prozessablaufs bis hin zu alternativen Strukturierungsmethoden, beispielsweise der LIGA-Technik (LIGA steht für Lithografie, Galvanik, Abformung) oder Opferschichttechnik. In der mechanischen Strukturerstellung wird zusätzlich unterschiedlichen Waferbearbeitungsformen zwischen zwei grundsätzlich unterschieden. der Volumenund der Oberflächenmikromechanik. Die Volumenmikromechanik bearbeitet den Siliziumwafer in seiner vollen Dicke, typisch sind sogar komplette Durchbrüche von der Vorder- zur Rückseite. Im Gegensatz dazu verändert die Oberflächenmikromechanik, wie es der Name bereits impliziert, nur die Oberfläche des Wafers. Das Silizium wird nur bis zu einer Tiefe von wenigen um bearbeitet. Gleichfalls ordnet sich das Aufbringen neuer Schichten in die Gruppe der Oberflächenmikromechanik ein.

Abschließende Prozessschritte aller Mikrospiegelbauelemente sind das Zersägen der Wafer, um die einzelnen, meist parallel gefertigten Bauelemente zu separieren. Es folgt die elektrische Kontaktierung sowie die Montage auf einem Objektträger, dieser Prozessschritt wird meist als Packaging bezeichnet.

Insgesamt ist die Herstellung eines Mikrospiegelbauelements ein sehr komplexer und zeitaufwendiger Prozess. Teilweise sind mehrere hundert Prozessschritte in der Herstellung notwendig. Dies führt zu Durchlaufzeiten im Reinraum von mehreren Monaten, bis das fertige Produkt einsatzbereit ist. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich auf einem Wafer in der Regel mehrere Bauelemente befinden, sodass sich bis zu einige hundert parallel prozessieren lassen. Trotz der enormen Herausforderungen in der Herstellung werden die Prozesse heutzutage so gut beherrscht, dass Mikrospiegelbauelemente in großen Stückzahlen mit hoher Zuverlässigkeit gefertigt werden.

2.1.4 Beispielbauelement für MEMS-Kalibrierung

Das dieser Arbeit zu Grunde liegende Mikrospiegelarray-Bauelement wird in diesem Kapitel vorgestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die entwickelten Messplätze, Verfahren und Methoden sich nicht auf dieses MMA beschränken, sondern so gestaltet wurden, dass sie adaptierbar für andere Bauelementtypen sind, wie in der Praxis bereits teilweise realisiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit beschränken sich hingegen alle dargestellten Ergebnisse auf nur einen Bauelementtyp. Dieses MMA fungiert somit als Stellvertreter einer ganzen Gruppe von MMA-Bauelementen.

Konkret handelt es sich um ein Mikrospiegelarray mit um eine Achse kippbar gelagerten Spiegeln, sogenannten Torsionsspiegeln. Eine wesentliche Eigenschaft stellt das analoge Auslenkungsvermögen dar, es sind somit beliebig viele Neigungswinkel für jeden Einzelspiegel individuell einstellbar. Entwickelt wurde das Bauelement vollständig am Fraunhofer IPMS in Dresden im Rahmen des EU-Projektes MEMI (Micromirror Enhanced Micro-Imaging) [5].

2.1.4.1 Mikrospiegelarray-Anwendungsgebiet

Hinter dem MEMI-Projekt steht eine Mikroskopieanwendung, von der wesentliche Bauelementeigenschaften abgeleitet sind. Konkret besteht die Herausforderung in der Anpassung von Mikroskopsystemen für die Halbleiterindustrie und Mikrobiologie, sodass die zu untersuchenden Objekte variabel beleuchtet werden können. Bisher ist Stand der Technik für eine variable Objektbeleuchtung die Nutzung sogenannter Schattenmasken. An einem Wechselsystem im Mikroskop-Beleuchtungsstrahlengang ist eine endliche Zahl verschiedener Schattenmasken montiert, die die unterschiedliche Objektbeleuchtung gewährleisten (siehe Abbildung 2.11).



Abbildung 2.11: typische Beleuchtungsblenden (Schattenmasken) in der Mikroskopie

Für die Halbleiterindustrie und Mikrobiologie reichen teilweise diese festen Beleuchtungsmuster nicht aus. Ziel ist eine komplett variable Beleuchtung der Mikroskopobjekte in Echtzeit. Man verspricht sich dadurch vor allem eine Qualitätssteigerung der Mikroskopiebilder, z. B. in Bezug auf den Kontrast. Die gezielte Beleuchtung interessierender Objektbereiche kann örtlich die Auflösung deutlich erhöhen. Der zweite nur in der Mikrobiologie relevante Effekt ist die Vermeidung von lichtinduzierter Zelländerung bei der Untersuchung lebender Organismen, auch als Lichttoxizität und Lichtbleichung bezeichnet. Der Effekt tritt beispielsweise auf, wenn außerhalb des Fokus liegende Zellen beleuchtet werden. Ein Beispiel für die Lichtempfindlichkeit lebender Organismen ist in Abbildung 2.12 verzeichnet. Mit einer gesteuerten bzw. gelenkten Beleuchtung lässt sich gezielt nur der interessierende Bereich der Probe untersuchen, alle anderen Regionen bleiben nahezu unbeeinflusst.



Abbildung 2.12: Lichtinduzierte Zellbeeinflussung. Linkes Bild a) skizziert eine 3D-Anordnung von zu mikroskopierenden Zellen. Mikroskopbilder bei verschiedenen Beleuchtungsszenarien sind in den Bildern b) und c) dargestellt. In diesem Beispiel sind das Zellwachstum und die Zellteilung in Abbildung c) deutlich beeinträchtigt. [5], [56], [57]

Der Schlüssel für die variable Mikroskopbeleuchtung im Projekt MEMI liegt in der Ersetzung der Schattenmasken durch zwei programmierbare SLMs. Einer der beiden SLMs ist das dieser Arbeit zugrundeliegende MMA. Ein optisches Modul mit beiden SLMs, welches an ein bestehendes Mikroskopsystem angekoppelt wird, ersetzt die Schattenmasken und erzeugt die gewünschte variable ortsaufgelöste Probenbeleuchtung (siehe Abbildung 2.13).



Abbildung 2.13: Mikroskopsystem mit variabler Beleuchtung aus dem Projekt MEMI [5]

2.1.4.2 Eigenschaften des MMA-Bauelements

Ein wesentliches Merkmal des neu entwickelten MMAs ist die Fähigkeit, einen breiten Spektralbereich zu modulieren. Diese Eigenschaft resultiert aus den unterschiedlichen Anwendungen in der Halbleiterinspektion und Biowissenschaften. Unterschiedliche Einsatzgebiete erfordern verschiedene Arbeitswellenlängen. Ziel ist indessen alle Anwendungen mit einem SLM abdecken zu können. Während traditionell am Fraunhofer IPMS vor allem MMAs für den tiefen UV-Bereich (λ = 193 nm bis 248 nm) entwickelt wurden, ist dieses Bauelement als absolutes Novum für einen sehr breiten Spektralbereich DUV - VIS - NIR (tiefes Ultraviolett - sichtbar - nahes Infrarot) ausgelegt. Ziel ist die vollständige Modulation von Wellenlängen im Bereich λ = 248 nm bis 1000 nm. Die neuen Anforderungen äußern sich neben einer optimierten Spiegelbeschichtung für spektral breitbandige hohe Reflektivitäten vor allem in einem erweiterten Auslenkbereich. Der optische Zusammenhang zwischen Spiegelauslenkung und Beleuchtungswellenlänge wird erst in Kapitel 2.1.4.4 erläutert, an dieser Stelle sei jedoch vorweg genommen, dass die notwendige Spiegelauslenkung (Höhenunterschied am Spiegelrand zwischen ausgelenkter und nichtausgelenkter Spiegelposition) für eine vollständige Intensitätsmodulation einem Viertel der Beleuchtungswellenlänge betragen muss. Das Design der neuentwickelten Bauelemente ist auf Auslenkungen bis 300 nm ausgelegt, während traditionelle Fraunhofer IPMS-MMAs nur Auslenkungen kleiner 100 nm erreichten.

Bei quadratischen Spiegeln im 16 μ m-Raster entsprechen 300 nm-Auslenkungen Spiegelneigungen von mehr als 2°, die analog, somit mit beliebig vielen Zwischenstufen, kontrolliert werden. Das komplette Bauelement verfügt über 256 x 256 Spiegel, insgesamt somit ca. 65500 individuell adressierbare Pixel. Zusätzlich umgibt diesen Bereich ein Rahmen von zehn Spiegeln an jeder Seite, die allerdings nicht einzeln ansteuerbar sind (sogenannter passiver Rand). Summiert beträgt die Spiegelarrayfläche rund 4,4 x 4,4 mm².

Einen kompletten Überblick über die Entwicklung, das Design und die Eigenschaften des neuartigen MMAs beschreiben Schmidt et al. in [58]. Eine zudem oft in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung ist 64k-MMA oder 64k-Bauelement, wobei k für den in der Informationstechnologie üblichen Faktor 1024 steht.



Abbildung 2.14: Fotografie des 64k-MMAs mit 256 x 256 analog kippbaren Mikrospiegeln

2.1.4.3 Aufbau und Ansteuerprinzip des MMAs

Basis des vorgestellten 64k-MMAs ist ein anwendungsspezifischer hochintegrierter elektronischer Schaltkreis (ASIC), der die individuelle Adressierung der Mikrospiegel realisiert. Er wird direkt auf dem Wafer in CMOS-Technologie gefertigt. Der analoge ASIC besteht im Wesentlichen aus einem DRAM-artigen Aufbau, wobei jedem Mikrospiegel eine DRAM-Zelle zugeordnet ist. Eine Zelle besteht typischerweise aus einem Kondensator zur Speicherung von Ladungsträgern und einem Transistor, der die Kondensatorladung und –entladung steuert. Die Kondensatorladung wird an eine Elektrode unterhalb der Spiegelplatte weitergeleitet, um die Spiegelbewegungskräfte zu erzeugen. Jeder Transistor ist mit Zeilen- und Spaltenleitungen verbunden (auch Wort- und Bitleitung genannt), um gezielt angesteuert zu werden. Der große Vorteil dieser Technologie ist die Speicherfähigkeit großer Datenmengen, bei gleichzeitig schnellem individuellem Zugriff auf einzelne Speicherzellen. Eine stark vereinfachte Skizze des analogen DRAM-artigen ASICs ist in Abbildung 2.15 dargestellt.



Abbildung 2.15: Prinzipbild der DRAM-artigen Spiegelansteuerung [59]. Pro Mikrospiegel M existiert eine DRAM-Zelle (bestehend aus Kondensator C und Transistor T) verbunden mit einer Adressierungselektrode E. Die Transistoransteuerung erfolgt über Zeilenleitungen G und Spaltenleitungen A.

Neben der Spiegeladressierung dient der ASIC als Träger des direkt darüber befindlichen mechanischen Spiegelaufbaus. Die Spiegel sind in Opferschichttechnologie als 2-Ebenen-Spiegel ausgeführt. Die oberste Ebene stellt die Spiegelplatte selbst dar, direkt darunter liegt die Federebene bestehend aus zwei Torsionsfedern. Die Verbindung zum ASIC stellen zwei Pfosten her. Der komplette Zwischenraum ist nach der Entfernung der herstellungsbedingten Opferschicht mit Luft gefüllt. Abbildung 2.16 illustriert den prinzipiellen mechanischen 2-Ebenen-Aufbau. Abbildung 2.17 dagegen zeigt REM-Aufnahmen der gefertigten Strukturen, teilweise mit entfernten Spiegelplatten, um die sonst verborgenen Ebenen sichtbar zu machen.



Abbildung 2.16: Aufbau eines Einzelspiegels in 2-Ebenen-Technologie



Abbildung 2.17: REM-Aufnahmen der Spiegeloberfläche (links). Rechts sind Spiegel entfernt zur Veranschaulichung der verborgenen Elektrodenund Federstrukturen [58].

Bewegungen des Spiegels, im konkreten Fall Verkippungen, werden durch elektrostatische Kräfte erzeugt. Die Kräfte entstehen durch elektrisch geladene Teilchen, die Wechselwirkungen sind im Coulombschen Gesetz beschrieben. Der physikalische Effekt wird ausgenutzt, indem Potentialunterschiede zwischen dem Spiegel und den darunter liegenden Elektroden erzeugt werden. Die resultierende anziehende Kraft F für einen idealen Plattenkondensator ist in Gleichung (2.1) beschrieben (aus [60], ε Dielektrizitätskonstante, A Elektrodenfläche, U Spannung, z Abstand Elektrode-Spiegel).

$$\mathsf{F} = \frac{\varepsilon^* \mathsf{A}^* \mathsf{U}^2}{2^* z^2} \tag{2.1}$$

Je größer der Potentialunterschied U ist, desto größer ist die anziehende Kraft, der Spiegel beginnt sich zunehmend zu neigen. Dem entgegen wirkt das Rückstelldrehmoment der Torsionsfedern, welches laut Hookeschen Gesetz linear mit dem Kippwinkel wächst. Die Spiegelplatte befindet sich somit immer im Drehmomentengleichgewicht aus elektrostatischem Moment (erzeugt durch die elektrostatische Kraft und Hebelarm) und Federrückstellmoment. Ein für dieses Gleichgewicht typischer Verlauf der Spiegelneigung über dem Potentialunterschied ist in Abbildung 2.18 dargestellt. Deutlich ist der immer stärker zunehmende Neigungswinkel mit Erhöhung des Potentialunterschiedes zu erkennen.



Potentialunterschied Spiegelplatte-Elektrode



Ab einer gewissen Spiegelauslenkung, die im Wesentlichen von der designten Federsteifigkeit und dem Abstand zwischen Spiegelplatte und dem Unterbau abhängt, gilt das beschriebene Gleichgewicht nicht mehr. Im steilen Verlauf der Kennlinie, bei hohen Spannungen beziehungsweise Auslenkungen, kippt der Spiegel schlagartig zu größeren Auslenkungen hin bis er auf dem Unterbau aufsitzt. Dieser Punkt variiert von Spiegel zu Spiegel und kann nur näherungsweise abgeschätzt werden. Teile der Spiegel lassen sich vom Unterbau nicht mehr lösen und verbleiben permanent, unabhängig von den angelegten Spannungen in dieser Position. Das Phänomen ist bei Mikrospiegeln bekannt und wird als pull-in (Umkippen) und sticking oder stiction (Anhaften, Festkleben) bezeichnet [52], [61], [62].

Wie Abbildung 2.16 bereits zu entnehmen ist verfügt jeder Aktuator nicht nur über eine Elektrode unterhalb der Spiegelplatte, sondern unter jeder Spiegelhälfte einer eigenen. Allerdings kann nur eine der beiden genutzt werden, um die Spiegel gezielt und individuell so wie oben beschrieben anzusteuern. Diese Elektrode heißt Adresselektrode und wird im Verlauf der Arbeit oft mit AD abgekürzt. Die zweite Elektrode, auch Rückstellelektrode genannt (Abkürzung CE – counter electrode), verfügt nicht über die Möglichkeit der individuellen Pixeladressierung, sondern ist lediglich identisch für alle Spiegel im Array konfigurierbar. Sie ist trotzdem im Spiegelaufbau von großer Bedeutung, um beispielsweise zur Adresselektrode hin vorausgelenkte Spiegel in die Nullage zurückzuziehen. Dritte im System verfügbare Elektrode ist die Spiegelplatte selbst (Abkürzung ME – mirror electrode). Ebenso ist diese Elektrode nicht individuell einstellbar, sondern nur global für das komplette MMA. Genutzt wird sie, um die Potentialunterschiede und damit Kräfte zwischen Spiegel und den beiden übrigen Elektroden zu erhöhen, indem eine negative Spannung angelegt wird. Durch diese Dreierkombination an Elektroden erweitert sich das einzustellende Kräftegleichgewicht auf elektrostatische Rückstellelektroden- und Federrückstellkraft auf der einen und elektrostatischer Adresselektrodenkraft auf der anderen Seite. Die typischerweise deutlich höhere Adresselektrodenspannung im Vergleich zur Rückstellelektrodenspannung ist hingegen entscheidend für die individuelle Spiegelneigung.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird indes nicht weiter von der Neigung oder Verkippung der Spiegel gesprochen, sondern es wird vorrangig der Begriff Auslenkung genutzt. Dies hat vor allem physikalische Gründe, auf denen das diffraktive optische Arbeitsprinzip gründet. Unter Auslenkung versteht man den Höhenunterschied am Spiegelrand im Vergleich zur nicht ausgelenkten Spiegellage. Es existiert ein einfacher geometrischer Zusammenhang zwischen Spiegelneigung und Auslenkung (siehe Abbildung 2.19). Mathematisch ist die Auslenkung d über die Formel (2.2) beschrieben. Die angegebenen 8 µm entsprechen der Hälfte der Spiegelkantenlänge von 16 µm.

$$d = \sin \alpha * 8 \mu m \tag{2.2}$$



Abbildung 2.19: Elektrodenanordnung und Spiegelneigung bzw. -auslenkung

2.1.4.4 Fourier-optisches Abbildungsprinzip

Allein strahlenoptisch kann mit dem 64k-MMA kein variables Intensitätsbild projiziert werden. Dazu sind die Spiegelauslenkungen von 2° zu gering. Das MMA selber wirkt aufgrund seiner rasterförmigen Spiegelanordnung als optisches Reflexionsgitter, an dem Beugung auftritt. Werden Spiegel nun verkippt, bleibt die Gitterkonstante, demzufolge das Spiegelraster identisch, die Oberfläche verändert sich jedoch zu einem sägezahnähnlichen Profil. Ein Gitter mit diesem Oberflächenprofil wird als Blaze-Gitter bezeichnet [63]. Es handelt sich um ein reines Phasengitter, dessen höchste Effizienz erreicht ist, wenn der wellenlängenabhängige Beugungswinkel und der Einfallswinkel übereinstimmen. Ein MMA kann somit als variables Blaze-Gitter zur Phasenmodulation betrachtet werden, abstimmbar auf verschiedene Wellenlängen. Aufgrund dieser Eigenschaften spricht man bei den MMAs vom diffraktiven, optischen dementsprechend beugungsbasierten Arbeitsprinzip.

Um variable Beleuchtungsmuster zu projizieren, reicht hingegen die reine Phasenmodulation der Lichtwellen nicht aus. Da das menschliche Auge und Kameras

typischerweise nur auf den Amplitudenanteil des Lichts empfindlich sind, ist dessen Modulation notwendig. Mithilfe einer speziellen optischen Anordnung ist die Umwandlung realisierbar. Genutzt wird dafür die optische Fouriertransformation mit Filterung in der Fourierebene. Die Fourieroptik im Allgemeinen ist ein Teilbereich der Optik mit Berücksichtigung des Wellencharakter des Lichts, dessen Theorie und Mathematik beispielsweise in [64] studiert werden kann. Im konkreten Fall wird das Wissen ausgenutzt, dass bei einer Abbildung mit dünnen Linsen bei einer einfallenden kohärenten Lichtwelle eine optische Fouriertransformation durchgeführt wird [64]. entsteht in der Brennebene der Linse auf der Bildseite Dadurch die Fouriertransformierte des Objektes, was dem Beugungsbild des Objektes entspricht. Die anschließende Rücktransformation in den Ortsraum mit einer weiteren dünnen Linse erzeugt ein perfektes aber gedrehtes 1:1-Abbild des Objektes, wenn alle Abstände zwischen Ebenen und Linsen jeweils der Brennweite f der Linsen entsprechen. Der zugehörige optische Aufbau, auch 4F-Anordnung genannt (wegen dem Abstand der vierfachen Linsenbrennweite zwischen Objekt- und Bildebene), ist in Abbildung 2.20 skizziert.



Abbildung 2.20: Fourier-optisches Eins-zu-eins-Abbildungsprinzip mit Transformation in die Fourierebene und Rücktransformation in den Ortsraum

Wird allerdings das Beugungsbild in der Fourierebene manipuliert, z. B. durch einen Filter oder eine Blende, so kann gleichfalls das optische Abbild in der Bildebene verändert werden. Ergebnis ist in der Bildebene die gefilterte Intensität der Originalversion aus der Objektebene (siehe Abbildung 2.21).



Abbildung 2.21: 4F-Anordnung mit Flächenfilter in der Fourierebene zur Manipulation der Intensität in der Bildebene

Diese Anordnung in Abbildung 2.21 bildet die Grundlage für das optische Abbildungsprinzip diffraktiver MMAs. Das phasenmodulierte Bild in der Objektebene, kommend vom SLM, wird fouriertransformiert, gefiltert und rücktransformiert. Es entsteht ein intensitätsmoduliertes Bild in der Bildebene welches abhängig ist vom phasenmodulierten Eingangsbild und der Art und Position des Flächenfilters. Im praktisch einfachsten Fall befinden sich alle Spiegel in nicht ausgelenkter Position bei d = 0, das vom MMA reflektierte Licht wird in die nullte Beugungsordnung gelenkt und passiert vollständig den Flächenfilter. Bei ausgelenkten Spiegeln dagegen wird Licht teilweise oder komplett, je nach Spiegelverkippung, in höhere Ordnungen gebeugt. Für die Bildentstehung werden dagegen alle höheren Ordnungen in der Fourierebene herausgefiltert, mithin geblockt, dadurch entstehen in der Bildebene graue oder schwarze Bildbereiche. Der dargestellte Filtertyp ist ein Tiefpassfilter und lässt nur Frequenzkomponenten kleiner dem Spiegelraster passieren. Diese Methode limitiert zwar teilweise das optische Auflösungsvermögen, ermöglicht hingegen gleichzeitig Grauwertabbildungen in Echtzeit, bedingt durch das kontinuierliche Auslenkverhalten der Spiegel. Praktisch übernimmt die Aufgabe des Flächenfilters eine einfache runde oder rechteckige Aperturblende die so positioniert wird, dass die nullte Beugungsordnung in der Mitte passieren kann, die erste und alle höheren Ordnungen indessen geblockt werden. Einen typischen Aufbau zur Veranschaulichung des Prinzips der Bildentstehung mit Fourierfilterung bei diffraktiven MMAs skizziert Abbildung 2.22.



Abbildung 2.22: optisches Abbildungsprinzip diffraktiver MMAs mit optischer Fourierfilterung (nach [65])

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die Anordnung der Bildpunkte in der Bildebene im Vergleich zum Originalobjekt erhalten bleibt, abgesehen von der Bilddrehung. Individuell erzeugt allerdings jeder Einzelspiegel sein eigenes Beugungsbild in der Fourierebene, es summieren sich an dieser Position alle Einzelbeugungsbilder auf. Durch diesen Effekt ist die Intensität jedes einzelnen Bildpixels durch die Verkippung des zugehörigen Mikrospiegels einstellbar.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Spiegelauslenkung und Intensität in der Bildebene ist durch folgende Formel beschrieben:

$$I \propto sinc^2 \left(\frac{4\pi}{\lambda} d\right).$$
 (2.3)

I repräsentiert die Intensität in der Bildebene, λ die Beleuchtungswellenlänge und d die Spiegelauslenkung wie in Gleichung (2.2) beschrieben. Die Herleitung dieser Gleichung basierend auf Gitterbeugung in Kombination mit Filterung im Fourierraum ist ausführlich dargestellt in [65] und [66]. Maximale Intensität wird erreicht bei d = 0, das Array fungiert dann als ebener Spiegel. Minimale Intensität in der Bildebene im Gegensatz dazu wird bei Vielfachen von einem Viertel der Wellenlänge erreicht (d = n*λ/4). In diesen Fällen ist die Blaze-Bedingung erfüllt und alles Licht wird ausschließlich in höhere Ordnungen gebeugt, die vom Flächenfilter geblockt werden. In allen Zwischenbereichen, demzufolge bei Auslenkungen ungleich null und Vielfachen von $\lambda/4$, erfolgt die Beugung in mehrere Ordnungen. In diesen Fällen wird ein Teil der Lichtmenge vom Fourierfilter geblockt, der andere Teil wird hindurchgelassen, es entstehen graue Bildpunkte. Den kontinuierlichen Intensitätsverlauf abhängig von der Spiegelauslenkung analog zu Gleichung (2.3) beschreibt Abbildung 2.23. Der typische Arbeitsbereich für diffraktive MMAs mit der beschrieben Filteranordnung liegt bei Auslenkwerten zwischen d = 0 nm und d = $\lambda/4$, da in diesem Bereich eine vollständige Intensitätsmodulation zwischen weiß über grau bis zu schwarz gewährleistet ist. Besonders die direkte Grauwerterzeugung ohne Zeitmultiplexen von binären Intensitätswerten hebt diese Technologie deutlich von den digital betriebenen Mikrospiegelarrays ab und verschafft einen enormen Geschwindigkeitsvorteil bei der Erzeugung von Graustufenbildern.



Abbildung 2.23: Intensitätsverlauf in der Bildebene abhängig von der Spiegelauslenkung [65]

Kontrastwerte der Beleuchtungsmuster, die nach Formel (2.4) als das Verhältnis der maximalen zur minimalen Intensität definiert sind (Bezeichnung im Englischen "contrast ratio" [67]), spielen eine wichtige Rolle für die Anwendungen der MMAs. Eingehende theoretische und experimentelle Untersuchungen hierzu wurden von Heber et al. in [65] vorgenommen. Theoretisch werden bei der Annahme eines idealen Spiegelarrays unendlich große Kontrastwerte erreicht, praktisch betrachtet beeinflussen dagegen vier wesentliche Parameter die Kontrastwerte:

- Spektrale Breite der Beleuchtung
- Streuung der Spiegelauslenkungen
- Reflexionen an Schlitzen und Pfostenlöchern
- Oberflächenrauheit und -verkrümmung der Spiegel

Alle vier Parameter sind zudem abhängig von der Beleuchtungswellenlänge, je kürzer diese ist, desto größer ist die Auswirkung der Parameter auf die Kontrastwerte. Die

beiden letztgenannten Punkte sind hauptsächlich beeinflusst vom Design und der Technologie der Bauelemente und sind ausschließlich in diesen Bereichen manipulierbar. Gleiches gilt für die Spiegelauslenkungsstreuung bis auf die Ausnahme, dass die Streuung zusätzlich durch ein messtechnisches Korrekturverfahren eindämmbar ist. Exakt dieses Korrekturverfahren (Kalibrierung) ist wesentlicher Gegenstand dieser Arbeit. In der Mikrolithografie bei λ = 248 nm sind bisher Kontrastwerte von 50-70 gefordert und seit Jahren als Stand der Technik mit analogen Mikrospiegelarrays realisiert [65].

$$C = \frac{I_{max}}{I_{min}}$$
(2.4)

2.1.4.5 MMA-Systemeigenschaften

Eine wichtige Eigenschaft der 64k-MMAs ist deren gepulstes Betriebsmuster. Im Normalbetrieb sind die Spiegel nicht kontinuierlich sondern zyklisch für eine definierte Zeit ausgelenkt (typischerweise einige 10 µs, erweiterbar bis 1 s), siehe Abbildung 2.24. Die übrige Zykluszeit, in der die Spiegel nicht verkippt sind, wird benötigt, um die Steuerspannungen für das nächste Muster zu übertragen. Diese Zeitspanne wird als Ladephase bezeichnet. Das Tastverhältnis von Auslenk- zu Ladephase ist variabel wählbar und beträgt bis zu 1:1 (50 % Duty-Cycle).



Abbildung 2.24: Timingverhalten des MMAs mit Ladephase und Auslenkphase

Von entscheidender Bedeutung für den Betrieb der MMA-Bauelemente ist deren Geschwindigkeit. Geschwindigkeit meint an dieser Stelle die Anzahl von verschiedenen Mustern, die in einem definierten Zeitbereich erzeugbar sind. Dies hängt im Wesentlichen vom Design des CMOS und mechanischen Aufbaus, aber vor allem von einer notwendigen Ansteuerelektronik ab. Die speziell für das 64k-MMA entwickelte Elektronik ist für Bildwiederholraten von bis zu 1 kHz ausgelegt, somit beträgt die Gesamtzykluszeit mindestens 1 ms. Die Steuerungselektronik als essentieller Bestandteil des Gesamtsystems stellt das Bindeglied zwischen Anwender-PC und MMA-Bauelement dar. Hauptbestandteil sind zwei Elektronikfunktionseinheiten. Die

erste Einheit sichert die digitale Signalverarbeitung durch ein FPGA-Modul, die zweite Einheit erzeugt die analogen Datenspannungen durch Operationsverstärker. Sämtliche analogen Elektrodenspannungen bis zu 26 V mit einer Auflösung von 10 Bit werden individuell für jeden Mikrospiegel von der Steuerung generiert und zeitgerecht zur Verfügung gestellt. Weitere Hardwaresignale realisieren eine synchrone Bewegung aller Mikrospiegel in der Auslenkphase mit externen Geräten wie beispielsweise Lasern oder einem Kamerasystem.

Neben den Hardwaresignalen fungiert die Steuerungselektronik obendrein als Softwareschnittstelle. Kommuniziert wird über die Hochgeschwindigkeitsschnittstellen USB 2.0 oder Ethernet. Alle Steuersignale und die gewünschten Projektionsmuster werden auf diesen Pfaden übertragen, von der Elektronik zwischengespeichert und verarbeitet. Die Übertragung der notwendigen Signale an das Mikrospiegelbauelement ist über ein 25 cm langes Flexkabel realisiert. Eine Abbildung der Systemelektronik ist nachfolgend dargestellt.



Abbildung 2.25: Steuerungs- und Kommunikationselektronik für 64k-MMA

2.2 Displaytechnologien

Die flächige variable Bilderzeugung ist heutzutage eine Standardtechnologie und hat in vielfältigen Anwendungen in unserem Alltag Einzug gehalten. Angefangen bei digitalen Armbanduhren, über Mobilfunkdisplays, Computermonitoren, Fernsehgeräten, Projektoren bis hin zu großflächigen mehrere 10 m² großen Bildschirmen sind variable Bilder in allen Größen und Qualitäten erzeugbar. Ebenso groß wie die Breite der Anwendungen sind die Bildschirmgröße und die zugrunde liegende Technologievielfalt. Historisch beginnend bei der Kathodenstrahlröhre (CRT) wurden über die letzten Jahrzehnte aufgrund des technischen Fortschritts und gestiegener Anforderungen immer neue Technologien am Markt platziert. Dies führt unter anderem dazu, dass der
Displaymarkt ein sehr dynamischer Markt ist, wo jeder Anbieter versucht, sich mit Innovationen von der Konkurrenz abzuheben.

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick geben über den Stand der Technik einer Auswahl verschiedener Displaytechnologien, wie beispielsweise LCD-Monitoren (Flüssigkristallbildschirmen), Plasmabildschirmen und DLP-Projektoren. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, orientiert sich jedoch an den derzeit am weitesten verbreiteten Technologien. Im Vordergrund stehen deren optische Eigenschaften, um einen Vergleich zu den Eigenschaftsanforderungen bei dem 64k-MMA zu ziehen. Aufbau und Funktionsweise der Technologien kann in eingehender Literatur studiert werden, beispielsweise in [68] und [69].

Es stellt sich nun die Frage, anhand welcher Kriterien die Displaytechnologien vergleichbar sind. Komplette Bücher beschäftigen sich mit dieser komplizierten Thematik, um möglichst objektiv zu vergleichen [67]. Unterscheidungsmerkmale sind beispielsweise Helligkeit, Kontrast, Auflösung und Farbwiedergabe. Die Angaben der Hersteller zu diesen Punkten sind zumindest kritisch zu betrachten. Dies trifft vor allem auf den Kontrast zu, da weder der Kontrast selber eindeutig definiert ist noch dessen Messung. Jeder Hersteller wendet seine eigene Messmethode an, um vor allem aus Marketinggründen möglichst hohe Werte zu erreichen. Diese Problematik wird unter anderem in [70–72] aufgegriffen und dargestellt. Die Forderungen in der Literatur gehen teilweise soweit, komplett auf Kontrastangaben zu verzichten. Selbst herstellerunabhängige Vergleiche verschiedener Displaytechnologien führen zu unterschiedlichen Ergebnissen (siehe Tabelle 2.1), wobei anzumerken ist, dass die Vergleiche unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, zu sodass technologischen Fortschritten nur bedingt Rechnung getragen werden konnte.

Quelle	Soneira [73]		DeBoer [74]	Gurski et al. [75]	
	Kontrast	ANSI-Kontrast	Kontrast	Kontrast	
CRT	15000:1	schlecht	höchster		
LCD	1000:1	sehr gut	mittel	3000:1	
LCoS	4000:1	sehr gut	mittel		
PDP	4000:1	mittel	hoch	4000:1	
DLP	2500:1	mittel	sehr hoch	2500:1	
OLED			sehr hoch	100:1	

Tabelle 2.1: Kontrastangaben aus unterschiedlichen Quellen über verschiedene Displaytechnologien

Ergänzend zu den in der Tabelle aufgeführten Technologien sei aufgrund des zu diffraktiven MMAs ähnlichen optischen Abbildungsprinzips das Grating Light Valve

genannt. Nach [16] beträgt der Kontrast im sichtbaren Spektralbereich bis zu 300:1. Im Durchschnitt aller Technologien betragen die Werte wenige tausend zu 1. An diesem Wert orientiert sich die Maximalkontrastanforderung dieser Arbeit von bis zu 1000:1.

Eine weitere für diese Arbeit interessante Displayeigenschaft ist die Farbwiedergabe. Nahezu alle Technologien geben pro Farbkanal eine Auflösung von 8 Bit an, selten sind auch 10 oder 12 Bit angegeben. Bei drei Farbkanälen (rot, grün, blau) mit je 8 Bit Auflösung ergeben sich somit theoretisch 16,8 Mio. unterschiedlich darstellbare Farben. Bei einer monochromatischen oder Grauwert-Bildwiedergabe führen die 8 Bit Farbtiefe zu 256 Helligkeitsabstufungen. Diese Abstufungen sind linear zwischen weiß und schwarz verteilt, berücksichtigen nicht das Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges (siehe nächstes Kapitel).

Ohnehin sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, alle dass nahezu Bildschirmtechnologien für das menschliche Auge optimiert sind. Dies bedeutet vor allem, dass sie ausschließlich Bilder im sichtbaren Spektralbereich (380 bis 780 nm) wiedergeben. Ebenso die Farbtiefe bzw. -anzahl, Bildwiederholraten und Helligkeit orientieren sich stark an den physiologischen Eigenschaften des menschlichen Wahrnehmungssystems, um ein darauf möglichst optimal abgestimmtes Bild zu erzeugen.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Mikrospiegelarray geht darüber hinaus, ist nicht für das menschliche Auge, sondern für den technischen Einsatz optimiert. Dies resultiert, bedingt durch die Anwendung in der Mikroskopie, in einem deutlich breiteren Spektralbereich und einer mehr als 10-fach schnelleren Bildwiederholrate. Die Anforderungen an die Grauwertwiedergabe dagegen reduzieren sich bei diffraktiven MMAs auf 6 Bit [76].

2.3 Das menschliche Auge

Ergänzend zum vorangegangenen Kapitel gibt dieses Kapitel eine kurze Einführung über die physiologischen Eigenschaften des menschlichen Auges. Obwohl die dieser Arbeit zugrunde liegende Anwendung technisch basiert und unabhängig vom menschlichen Auge ist, so existieren doch zahlreiche Parallelen. Darüber hinaus ist während des Charakterisierungsprozesses der "optische Eindruck" des Auges mehrfach unablässig. Aus diesen Gründen ist ein Basisverständnis des menschlichen Sehvermögens Voraussetzung, auch um Quervergleiche zur Technik zu ermöglichen.

Das menschliche Auge an sich ist ein sehr komplexes Organ, welches allein allerdings noch nicht ausreicht, um optische Sinneseindrücke zu erzeugen. Vielmehr besteht das menschliche Sehvermögen aus einem vielschichtigen Zusammenspiel aus Auge, Sehnerv und Gehirn. Der rein optische Teil erfolgt im Auge durch eine Abbildung der Umwelt auf die Netzhaut. Dort wird die Projektion von Sinneszellen (Fotorezeptoren) detektiert und über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet. Das Gehirn verarbeitet die übertragenen Signale entsprechend. Das Auge ist ein hochempfindliches aber gleichzeitig sehr anpassungsfähiges Organ. Es kann hochauflösende vollfarbige stereoskopische Bilder an das Gehirn liefern. Das menschliche Auge arbeitet über einen sehr großen Intensitätsbereich von 11 bis 14 Dekaden, Leuchtdichten von $L_V = 0,0000003$ bis 30000 cd/m² oder mehr sind verarbeitbar [67]. Dieser enorm breite Intensitätsbereich wird allerdings nicht gleichzeitig abgedeckt, das Auge adaptiert sich auf eine mittlere Leuchtdichte, was ein wenig Zeit beansprucht. Bei entsprechender Dunkelanpassung reichen wenige Photonen aus, um detektiert zu werden. Fokussiert werden Gegenstände in Entfernungen von 75-100 mm bis zum Unendlichen [67]. Von Mensch zu Mensch variieren diese Parameter.

Empfindlich ist das Auge im Spektralbereich von ca. 380 bis 780 nm. Das normale Farbsehen ist durch drei Typen von Sinneszellen realisiert, die zusammengefasst als Zapfen bezeichnet werden. Jeder Zapfentyp verfügt über einen unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitsbereich mit Spitzensensitivitäten bei 575 (rot), 535 (grün) und 445 nm (blau) [67]. Ein weiterer Sinneszellentyp, die Stäbchen, dienen der Detektion von Hell-Dunkel-Kontrasten bei geringen Lichtintensitäten. Je nach einfallender Lichtintensität wirken verstärkt Stäbchen oder Zapfen für die Detektion der Bilder im Auge. Die spektrale Empfindlichkeit des Auges unterscheidet sich in beiden Fällen, dies wird als Tag- bzw. Nachtsehen bezeichnet (photopisches bzw. skotopisches Sehen), siehe Abbildung 2.26. In beiden Fällen liegt die größte Empfindlichkeit bei grünen Wellenlängen.



Abbildung 2.26: Spektrale Empfindlichkeit des Auges nach CIE [77], [78]

Neben dem Farbsehen ist für diese Arbeit vor allem die Unterscheidung von monochromatischen Helligkeitsunterschieden von besonderem Interesse. Üblicherweise sind monochromatische Bilder als Graubilder dargestellt, die weiß und schwarz sowie eine begrenzte Anzahl Abstufungen dazwischen (Grauwerte) enthalten. Das menschliche Auge nimmt die Abstufungen zwischen weiß und schwarz aufgrund des Weber-Fechner-Gesetzes logarithmisch auf. Praktisch bedeutet dies, dass Helligkeitsunterschiede bei geringen Leuchtdichten deutlich stärker wahrgenommen

werden als der gleiche Helligkeitsunterschied bei großen Leuchtdichten. Die Wahrnehmungsschwelle von Helligkeitsunterschieden wird als Kontrastempfindlichkeit bezeichnet und hängt neben der Leuchtdichte von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab, beispielsweise räumliche oder zeitliche Frequenzen der betrachteten Muster bzw. Bilder [69], [79]. Eine für diese Arbeit wichtige Eigenschaft des menschlichen Auges stellt die gleichzeitige Wahrnehmbarkeit von Helligkeitsunterschieden dar. Nach Lin et al. [80] ist die Wahrnehmbarkeit des Auges beim Betrachten eines Bildes auf nur knapp 60 Grauwerte beschränkt. Ebenso nennen Gonzalez und Wintz [79] mit 64 Graustufen als Minimalwert für digital erzeugte Bilder orientiert an der Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen einen ähnlichen Wert. Dieser Wert ist vor allem für die Displaytechnologie von großer Bedeutung, denn moderne Bildschirme sollten über eine etwas bessere Farbtiefe verfügen als vom Mensch wahrnehmbar, um den bestmöglichen optischen Eindruck zu gewährleisten. Mit heutzutage typischen 8 Bit Farbtiefe ist dies hinreichend realisiert.

3 MMA-Charakterisierung

Während des kompletten Mikrospiegelarray-Herstellungsprozesses, der sich über mehrere Wochen bis Monate hinzieht, finden laufend Funktionstests und prozessbegleitende Charakterisierungsschritte statt. Dabei sind sowohl technologische Prozessparameter wie Schichtdicken, Oberflächenrauigkeiten und Schichtspannungen von Interesse als auch elektrische Funktionsprüfungen, beispielsweise Kurzschlusstests oder Messungen von Kontaktwiderständen. Hauptgegenstand dieses Kapitels und ebenso der gesamten Arbeit ist im Vergleich dazu allerdings die Charakterisierung des komplett fertiggestellten Produktes. Trotz permanenter Prozessüberwachung ist die Funktionstüchtigkeit und Leistungsfähigkeit der gefertigten MMAs nicht vollkommen sichergestellt. Eine abschließende Bauelementbewertung ist daher zwingend erforderlich.

Typischerweise kann zu Beginn des Charakterisierungsprozesses davon ausgegangen werden, dass die elektrische Funktionalität der Bauelemente gewährleistet ist. Elektronikfehler sind üblicherweise schon auf Waferlevel identifizierbar, die betroffenen Bauteile werden bereits an dieser Stelle aussortiert. Hingegen ist im Normalfall nach der Fertigung die Funktionalität und Beschaffenheit des Spiegelaufbaus noch nicht sichergestellt. Die Bandbreite reicht von unbeweglichen bis zu hypermobilen Spiegeln. Ungewünschte Kopplungen zwischen Einzelspiegeln sind ebenfalls ein bekannter Fehlerfall. Zudem ist die Spiegelverkippung im unangesteuerten Zustand, die sogenannte Vorauslenkung, zunächst nicht erschlossen jedoch von entscheidendem Interesse. Weiterhin verlangen etwaige Einzelspiegelverkrümmungen und Oberflächenrauigkeiten wie auch die globale Bauelementebenheit Beachtung, da sie die optischen MMA-Eigenschaften direkt beeinflussen. In jedem Fall existiert eine zunächst unbekannte Streuung der elektromechanischen und geometrischen Spiegelcharakteristik, die sich auf die optische MMA-Funktionalität entscheidend auswirkt.

Der genannte Ausgangszustand verlangt nach MMA-Charakterisierungskonzepten zur Beurteilung der Bauelementleistungsfähigkeit. Hier zahlt sich die mechatronische Betrachtungsweise aus, sowohl elektrische, als auch mechanische und optische Charakterisierungen sind sinnvoll und notwendig. Abgesehen von elektrischen Überprüfungen rücken zwei Konzepte in den Fokus. Zum einen können die Mikrospiegelarrays profilometrisch, zum anderen optisch vermessen werden. Beide Charakterisierungsergebnisse stehen in direkter Korrelation. Die Methoden werden in den nachfolgenden Kapiteln ausführlicher diskutiert.

3.1 Profilometrische Messtechnik

Unter dem Stichwort der profilometrischen Messtechnik versteht sich vor allem die Vermessung der Mikrospiegelarray-Oberflächentopografie im Mikro- und Nanometerbereich. Zum Einsatz kommen vornehmlich kommerzielle Messgeräte wie Mikroskope und Interferometer. Hauptsächlich geometrische Eigenschaften der Mikrospiegelarrays sind auf diesem Weg direkt charakterisierbar. In Kombination mit einer geeigneten Spiegelansteuerung ist darüber hinaus bei einer Messfolge die Beweglichkeit der Mikrospiegel analysierbar. Das komplette elektromechanische Übertragungsverhalten jedes Einzelspiegels kann durch Anwendung dieser Methode ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist eine geeignete Synchronisation zwischen Messgerät und MMA-Bauelement.

Ein häufig genutzter Messgerättyp zur MEMS-Charakterisierung sind Weißlichtinterferometer (WLI) [61], [81–83]. Die Geräte zeichnet die Verwendung einer spektral breitbandigen Quelle mit kurzen Kohärenzlängen aus, während andere Interferometer typischerweise hochkohärentes Laserlicht verwenden. Interferenzmuster entstehen bei WLIs nur, wenn die Länge von Referenz- und Objektstrahl bis auf wenige Mikrometer identisch sind. In diesem kleinen Bereich ist die Objektoberfläche detailgetreu nachbildbar. Das berührungslose Messverfahren eignet sich besonders gut, um hochaufgelöste Oberflächentopografien im Nanometerbereich bei relativ großen Messfeldern im Bereich bis zu wenigen Millimetern zu ermitteln.

Markt verschiedene kommerzielle Am sind Messgeräte verfügbar. Der interferometrische Aufbau ist in den meisten Fällen in Form eines Michelson- oder Mirau-Interferometers realisiert. Die linke Seite der Abbildung 3.1 skizziert einen WLI-Aufbau in Form eines Michelson-Interferometers. Der Strahl einer Weißlichtquelle wird an einem Strahlteiler aufgeteilt, ein Teil beleuchtet die Messprobe, der zweite Teil beleuchtet einen planen Referenzspiegel. Die von beiden Objekten reflektierten Strahlen werden wieder übereinandergelegt und das entstandene Interferenzmuster mit einem Bildsensor aufgenommen. Während einer Messung wird der Abstand z des Objektivs zur Messprobe oder zur Referenz kontinuierlich verändert. Für jede Höhenposition wird ein Bild in Form eines 2D-Interferenzbildes zwischengespeichert. Die Ortspunkte, die sich gerade im Fokus befinden, erscheinen auf den Interferenzbildern besonders kontrastreich. Extrahiert man aus dem Stapel von Interferenzbildern die Werte eines einzelnen Sensorpixels, so ergibt sich ein Intensitätsverlauf wie die durchgezogene Linie in Abbildung 3.1 rechte Seite. Durch Bildung der Einhüllenden dieses Kurvenverlaufs (gestrichelte Linie) und Ermittlung der Maxima ist die Höhe z_0 der Probe an diesem Ortspunkt relativ einfach bestimmbar. Bei jedem Sensorpixel ist dieser Kurvenverlauf entlang der z-Achse weiter nach links oder rechts verschoben, was auf eine unterschiedliche Höhe des Messobjektes an diesem Punkt zurückzuführen ist. Höhenunterschiede der Messobjekte von mehreren Mikrometern sind mit dem weißlichtinterferometrischen Verfahren direkt und eindeutig bestimmbar.



Abbildung 3.1: Prinzip der Weißlichtinterferometrie. Der Verlauf des Interferogramms I(z) eines jeden Sensorpixels hängt wesentlich von der Probentopografie ab. (Grafik aus [84])

Weißlichtinterferometer liefern ebenso wie andere profilometrische Messgeräte ein kontinuierliches Höhenprofil der Messprobe. Für die Charakterisierung von MMA-Bauelementen müssen die relevanten Parameter im Anschluss aus dem Höhenprofil extrahiert werden. Von Interesse sind oft Spiegelgeometrien wie beispielsweise dessen Verkrümmung und die Spiegelverkippung. Zur Ermittlung der interessierenden Parameter existieren geeignete Methoden zur automatisierten Analyse der WLI-Daten, diese werden in Kapitel 5.2 näher erläutert.

3.2 Charakterisierung der optischen Funktionalität

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Konzepte zur profilometrischen Charakterisierung können immer nur als Zwischenschritt im vollständigen Charakterisierungsprozess betrachtet werden. Obwohl bekanntlich ein direkter Zusammenhang zwischen den geometrischen Spiegelparametern und der optischen Abbildung besteht, entscheidend für einen späteren Einsatz ist die MMA-Abbildungsqualität. Die profilometrische Charakterisierung gibt schon eindeutige Hinweise auf das optische Leistungsvermögen, eine Charakterisierung dessen scheint dennoch unumgänglich, da gewisse optische Effekte profilometrisch nicht vorhersagbar sind. Dieser Abschnitt widmet sich Konzepten zur Bewertung der optischen MMA-Parameter.

Grundprinzip zur Beurteilung der optischen Funktionalität ist die Realisierung eines Aufbaus ähnlich dem Abbildungsprinzip diffraktiver MMAs (siehe Kapitel 2.1.4.4). Von Interesse ist vor allem die Analyse der Beleuchtungsmuster in der Bildebene, dennoch teilweise zusätzlich der Beugungsmuster in der Fourierebene. Zwei vereinfachte Aufbauten zur Analyse der Bild und Fourierebene skizziert Abbildung 3.2. Wesentlicher Bestandteil beider Aufbauten ist eine Beleuchtungsquelle, die kohärentes Licht mit geringer numerischer Apertur aussendet. Dieses Licht wird über einen Strahlteiler auf das Bauelement gelenkt. Die Fourier-optische Abbildung ist mit Sammellinsen und einer Blende realisierbar. In beiden Aufbauten werden die interessierenden Ebenen mit einer Kamera aufgezeichnet und entsprechend ausgewertet.



Abbildung 3.2: Skizzierte Aufbauten zur Charakterisierung der optischen MMA-Funktionalität

Von Bedeutung bei der optischen Charakterisierung ist vor allem die Analyse der Kamerabilder. Aussagen lassen sich unter anderem treffen im linken Aufbau über

- die Intensitätshomogenität,
- die Abbildungsauflösung,
- die Grauwertwiedergabe und
- Kontrastwerte,

im rechten Aufbau über

- die Anordnung und Intensitätsverteilung der Beugungsordnungen,
- die Beleuchtungsdivergenz,
- die Beleuchtungswellenlänge und die
- die MMA-Justage.

Darüber hinaus ist mit dem linken Aufbau in Abbildung 3.2 direkt das Übertragungsverhalten von Spiegelspannungen zu Projektionsmusterintensitäten ermittelbar. Unabhängig von einer profilometrischen Charakterisierung kann zudem auf diesem indirekten Weg die mittlere elektro-mechanische Auslenkkurve berechnet werden.

Von besonderer Bedeutung bei der Charakterisierung des optischen Spiegelarrayleistungsvermögens ist das diffraktive Abbildungsprinzip. Alle diffraktiven, also beugungsbasierten optischen Effekte stehen bekanntermaßen in engem Zusammenhang mit der verwendeten Wellenlänge. Demzufolge variieren die MMA-Eigenschaften abhängig von der genutzten Laserwellenlänge. Vor diesem Hintergrund sind alle optischen MMA-Parameter in engem Zusammenhang mit der eingesetzten Laserquelle zu betrachten.

4 Konzeptionelle Betrachtungen zur Kalibrierung von MMA-Bauelementen

Die Kalibrierung von einzelnen Bauteilen oder ganzen Systemen ist in der heutigen technisierten Welt eine weit verbreitete Aufgabe. Vor allem im Feld der Messtechnik finden Kalibrierungen stets Anwendung, aber ebenso in anderen Bereichen wie beispielsweise bei Monitoren können Kalibrierungen stattfinden. In manchen Produktgruppen dient eine Kalibrierung lediglich zur Erhöhung der Genauigkeit bzw. Bestimmung der Unsicherheit, andere Produkte erfordern gar eine Kalibrierung, um überhaupt den bezweckten Nutzen zu gewährleisten. Demzufolge wird die Kalibrierung teilweise essenzieller Bestandteil des Produktherstellungsprozesses, so zum Beispiel bei CCD-Kameras, um verlässliche Messergebnisse zu gewährleisten.

Generell beschreibt die Kalibrierung eines Messsystems nach DIN 1319-1 [85] den Zusammenhang zwischen Messwert und wahrem Wert. Die Kalibrierung selber nimmt keinen verändernden Einfluss auf ein Messgerät vor, sie bildet lediglich dessen Abweichung vom Normal ab. Oft bildet die Kalibrierung die Grundlage zur Ermittlung von Kalibrierfaktoren, einer Korrektionstabelle oder Kalibrierfunktion, mit deren Hilfe die Abweichung kompensierbar ist. Die Messabweichungsbestimmung inklusive deren Korrektur wird hingegen im allgemeinen Sprachgebrauch häufig zusammengefasst als Kalibrierung bezeichnet.

Neben der klassischen Verwendung kristallisierte sich für den Begriff Kalibrierung ein zweiter Nutzungsbereich heraus. In technischen Anwendungen bestehend aus einer Vielzahl von Einzelsystemen beschreibt eine Kalibrierung eher die Abstimmung der einzelnen Komponenten untereinander, um die Arbeitsweise des Gesamtsystems zu gewährleisten oder zu verbessern. Beispielhaft seien digitale Kameras genannt, bei denen eine Vielzahl von Einzelpixel so aufeinander abgestimmt wird, dass sie ein ähnliches Verhalten aufweisen [67], [86].

Übertragen auf Flächenlichtmodulatoren bedeutet eine Kalibrierung die messtechnische Erfassung der Abweichung der Intensitäten der generierten Modulationsmuster vom Zielwert. Dies kann sowohl global für mittlere Intensitätswerte des gesamten SLMs erfolgen als auch ortsaufgelöst für Einzelpixel oder kleinere Bereiche des SLMs. Deutlich exakter jedoch messtechnisch aufwendiger ist eine Vermessung aller Einzelpixel im Array. Je nach Anwendungsfall kann eine Kalibrierung das Leistungsvermögen des SLMs verbessern oder gar zur notwendigen Voraussetzung für den Einsatz werden.

Im konkreten Fall von diffraktiven Spiegelarraybauelementen ist das Ziel der Kalibrierung die Schaffung der Voraussetzungen für deren Einsatz in hochkomplexen multispektralen optischen Systemen. Trotz bestmöglicher Technologie und stetig fortschreitender Prozessoptimierung sind die bereits an mehreren Stellen dieser Arbeit

erwähnten herstellungsbedingten individuellen Spiegelcharakteristika unvermeidlich, die direkten Einfluss auf die optischen Anwendungen nehmen. Der zusätzliche Prozessschritt der Kalibrierung als Schnittstelle zwischen Technologie und optischer Applikation bietet hingegen die Möglichkeit zur Ermittlung der Einzelspiegelcharakteristik sowie im Anschluss zur Kompensation des individuellen Verhaltens. Abbildung 4.1 skizziert die MMA-Kalibrieraufgabe für Spiegel im unausgelenkten Zustand. In der Ausgangssituation ist eine gewisse Auslenkungsverteilung bedingt durch Spiegelvorauslenkungen deutlich sichtbar. Deren Vermessung und Korrektur führt zu definierten Auslenkzuständen. Darüber hinaus ist nicht nur ein kalibrierter Zustand angestrebt, sondern erst eine Vielzahl solcher Zustände ermöglicht das multispektrale Arbeiten der MMAs.



Abbildung 4.1: Gegenstand der MMA-Kalibrierung am Beispiel unausgelenkter (ebener) Spiegel [57]

Zieht man die elektrische Ansteuerung der Spiegel im Zusammenhang mit der Kalibrierung in Betracht, so ergibt sich für jeden Spiegel eine unterschiedliche Ansteuerspannung, um einen einheitlichen Auslenkzustand einzustellen. Abbildung 4.2 verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel zweier Einzelspiegel mit sichtbar unterschiedlicher Auslenkkurve. Die Kalibrieraufgabe für analoge MMAs besteht somit in der Vermessung der dargestellten Auslenkkurven, für jeden einzelnen Spiegel, um im Nachhinein definierte Auslenkzustände durch individuelle Steuerspannungen zu realisieren.



Abbildung 4.2: Kalibrieraufgabe: Ermittlung individueller Ansteuerspannungen für definierte Auslenkzustände

4.1 Zielsetzung der MMA-Kalibrierung

Die Zielsetzungen der MEMS-Kalibrierung wurden bereits in der Einleitung formuliert, sollen an dieser Stelle jedoch noch einmal wiederholt und vertieft dargelegt werden. Als zentrales Ziel dieser Arbeit steht die Entwicklung eines Kalibrierverfahrens, um das MMA-Bauelement erstmalig in einer multispektralen Arbeitsumgebung einzusetzen. Grundvoraussetzung dafür ist eine wellenlängenunabhängige Kalibriermethode, der man mit einer Lösung vom optischen Abbildungsprinzip, und stattdessen mit einer Betrachtung der mechanischen Spiegelverkippung begegnet. In diesem Unterkapitel liegt der Fokus allerdings auf den beiden optischen MMA-Zieleigenschaften, die mithilfe der Kalibrierung angestrebt sind:

- Kontrastwerte der Projektionsmuster deutlich größer 100, bis zu 1000
- Intensitätstreue von Graustufendarstellungen der Projektionsmuster von 1/64.

Weiterhin sind in der Einleitung konkrete Spiegelauslenkungstoleranzen genannt, die in Zusammenhang zu den formulierten Zielen stehen:

- für die Kontrastwerte eine Auslenkgenauigkeit von $\lambda/100$
- für die Graustufendarstellung eine Auslenkgenauigkeit von $\lambda/400$.

Aufbauend auf den dargestellten Grundlagen wird die Herkunft der vier Zahlenwerte im Folgenden erläutert. Zunächst liegt das Augenmerk auf dem Kontrastwert. Der angegebene Wert von deutlich größer 100 bezieht sich auf den kompletten spektralen Arbeitsbereich der MMA-Bauelemente, demnach von DUV bis NIR. Nach Heber et al. [65] sind mit zunehmender Wellenlänge größere Kontrastwerte zu erwarten, da sich der Einfluss von Spiegeloberflächenrauigkeiten und Schlitzeffekten mit der Wellenlänge zunehmend verringert. Vor allem im sichtbaren und IR-Spektralbereich sind daher Kontrastwerte bis zu 1000 zu erwarten. Die nachfolgenden Berechnungen greifen auf diesen Wert zurück, da er den größten Teil des Zielspektralbereichs abdeckt. Im Vergleich zu anderen Projektions- bzw. Displaytechnologien reiht sich der Kontrastwert von 1000:1 im Mittelfeld ein (siehe Kapitel 2.2), im UV-Bereich übertrifft er die bisherigen Zielwerte von 50 – 70 [65].

Ausgehend von der dargestellten Problematik in den Displayspezifikationen, was sich überhaupt hinter dem Begriff Kontrast verbirgt und vor allem wie diese nachvollziehbar gemessen und verglichen werden können, wird an dieser Stelle kurz das Vorgehen bei den hiesigen MMA-Bauelementen erläutert. Der Kontrast beschreibt nach Formel (2.4) das Verhältnis von maximal gemessener Beleuchtungsmusterintensität zu minimaler Intensität, wird im Englischen auch "contrast ratio" oder "full on/off-contrast" bezeichnet. Zur experimentellen Bestimmung werden nacheinander ein weißes Bild in das MMA geschrieben (Spiegel mit Nullauslenkung d = 0) gefolgt von einem schwarzen Bild (Spiegel mit Auslenkung d = $\lambda/4$). Die beiden mit der Kamera aufgezeichneten Bilder werden im Anschluss so ausgewertet, dass die Kontrastintensitätswerte aus allen Kamerapixelwerten in einer bestimmten Fläche der Projektionsmusters gemittelt werden. Die Messungen finden automatisiert in völliger Dunkelheit statt, um von der Kamera detektiertes Streulicht zu vermeiden, welches sich direkt auf die Kontrastwerte auswirkt.

Um von dem Zielkontrast auf eine Abschätzung der zulässigen Auslenkgenauigkeit zu schließen, bedarf es der Kombination aus Kontrastformel (2.4) und Intensitäts-Auslenkkurve (2.3). Die maximale relative Intensität I_{max} von 1 wird bei einer Spiegelauslenkung d = 0 erreicht. Weicht die Spiegelauslenkung d geringfügig um Δd ab, so hat dies kaum Einfluss auf den Intensitätswert. Anders verhält es sich bei der minimalen Intensität I_{min}. Im Idealfall hat I_{min} bei d = $\lambda/4$ den Wert null, der Kontrastwert geht in diesem Fall gegen Unendlich. Eine reale Abweichung von d um Δd hat hingegen großen Einfluss auf den minimalen Intensitätswert und damit zugleich auf den Kontrast.

Maximaler Kontrastwert im idealen Fall:

$$C_{\max} = \frac{I_{\max}(d)|_{d=0}}{I_{\min}(d)|_{d=\frac{\lambda}{4}}} \longrightarrow \infty$$
(4.1)

Realer Kontrast mit Unsicherheitsterm Δd :

$$C_{\max} = \frac{I_{\max}(d)|_{d=\Delta d}}{I_{\min}(d)|_{d=\frac{\lambda}{4}+\Delta d}} = \frac{\operatorname{sinc}^{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda} * \Delta d\right)}{\operatorname{sinc}^{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda} * \left(\frac{\lambda}{4} + \Delta d\right)\right)} \approx \frac{1}{\operatorname{sinc}^{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda} * \left(\frac{\lambda}{4} + \Delta d\right)\right)}$$
(4.2)

Gleichung (4.2) kann nicht eindeutig nach Δd umgestellt werden, dennoch ist Δd numerisch bei einem Kontrastziel von $C_{max} = 1000$ berechenbar. Bei $\Delta d \approx \lambda/120$ ist ein solcher Kontrast realisierbar. Da es sich zunächst nur um eine erste Abschätzung handelt wird dieser Wert grob auf $\lambda/100$ gerundet. Der Kontrastwert ist bei dieser Angabe unabhängig von der im System verwendeten Wellenlänge λ . Das Formelzeichen λ kürzt sich aus Gleichung (4.2) vollständig heraus, es verbleibt folgende Gleichung:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \left(4\pi \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{120} \right) \right)} \approx 1000$$
(4.3)

Im weiteren Verlauf wird das zweite Kalibrierziel näher beleuchtet, die Intensitätstreue der Graustufendarstellungen von 1/64. Anders formuliert bedeutet dieses Ziel, dass die Projektionsmuster bis zu 64 verschiedene Graustufen wiedergeben können müssen. Dieser Wert orientiert sich vor allem an den Spezifikationen der Applikation. Sowohl bei mikroskopischen, als auch lithografischen Anwendungsfällen sind 64 Graustufen als Zielwert formuliert. Obwohl die MMA-Applikationen keine für das menschliche Auge sichtbaren Projektionsaufgaben umfassen, so liegt der Wert im Bereich dessen, was das menschliche Auge in einem Bild erfassen kann.

Zur Beurteilung der notwendigen Spiegelauslenkgenauigkeit für dieses Ziel ist die Betrachtung der Intensitäts-Auslenkkurve (Gleichung (2.3)) sowie deren grafische Darstellung in Abbildung 2.23 zweckmäßig. Es ist bereits bekannt, dass bei d = $\lambda/4$ die minimale Intensität erreicht wird. Wären im Wertebereich von d = 0 ... $\lambda/4$ die 64 Graustufen linear verteilt, so ergäbe sich bereits eine zulässige Stufenbreite von d = $\lambda/256$ (256 = 4 * 64). Tatsächlich besitzt die Intensität keine lineare Abhängigkeit von der Spiegelauslenkung, sondern folgt der sinc²-Funktion. Zur Beurteilung der zulässigen Auslenkungstoleranz ist der steilste Anstieg dieser Abhängigkeit zu betrachten, da sich dort eine Auslenkungsänderung am stärksten auf die Intensität auswirkt. Dieser markante Punkt wiederum ist nur numerisch zu ermitteln und liegt bei ca. I ≈ 0,55. Ebenso nur numerisch bestimmbar ist der Anstieg an diesem Punkt, er liegt bei ca. m ≈ -6,79/ λ . Es ergibt sich daraus folgende Gleichung:

$$m_{max} = \frac{\Delta I}{\Delta d} \approx -\frac{6,79}{\lambda}$$
(4.4)

Wird Gleichung (4.4) nach Δd umgestellt und ΔI durch den anvisierten Graustufenzielwert von 1/64 ersetzt, so ergibt sich die erforderliche Genauigkeit für d von $\Delta d \approx \lambda/435$.

$$\Delta d_{\min} = \frac{\Delta I}{m_{\max}} = \frac{\frac{1}{64}}{-\frac{6,79}{\lambda}} \approx \frac{\lambda}{435}$$
(4.5)

Der Einfachheit halber wurde dieser Wert auf λ /400 gerundet, wohl wissend, dass für die exakte Abbildung von 64 Graustufen dieser Wert noch nicht gänzlich ausreicht. $\Delta d = \lambda$ /400 reicht theoretisch für rund 59 verschiedene Graustufen.

Zusammengefasst bleibt festzustellen, dass beide genannten Ziele, obwohl sie gänzlich unterschiedliche optische Zielparameter formulieren, sich in MMA-spezifische Auslenkwerte umrechnen lassen. Die höhere Anforderung an die Spiegelauslenkungen stellt eindeutig die Wiedergabe der Grauwerte dar, obwohl die Kalibrieruntersuchungen zunächst nur mit dem Kontrastziel starteten.

4.2 Stand der Technik Mikrospiegelarraykalibrierung

Das Gebiet der Kalibrierung analog betriebener MMAs ist ein relativ junges mit nur wenigen bekannten und etablierten Verfahren. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass analoge Mikrospiegelarrays keinen Massenmarkt adressieren und nur eine Nische im Feld der MOEM-Systeme besetzen. Ebenso überschaubar wie die Verbreitung der Systeme ist demzufolge das Feld von Ansätzen zur Kalibrierung. Nichtsdestotrotz existieren Verfahren und Methoden, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Noch davor lohnt sich ein Blick zu Kalibrierkonzepten alternativer SLM-Technologien, die allesamt vor der gleichen Aufgabe stehen, definierte Projektionsmuster möglichst detailgetreu und pixelgenau umzusetzen.

Aufgrund der großen Hersteller- und Anwendervielfalt finden sich bei LCoS-Systemen (Flüssigkristall-SLMs) die meisten Themen mit Bezug zur Kalibrierung, unabhängig LCoS-Systeme ihre Anwendung in davon ob die der Phasenoder Intensitätsmodulation finden. Eine gute Übersicht über den Stand der Technik dazu geben Otón et al. in [87]. Die beiden verbreitetsten Kalibrierverfahren basieren auf interferometrischem Phasenschiebeverfahren [87-89] und der Fourier-Beugungsmusteranalyse binärer Phasengitter [90]. Manche Kalibrieransätze widmen sich ausschließlich gemittelten SLM-Kennlinien [87], [89], andere kalibrieren jedes Pixel im Array [88], [91]. Bemerkenswert ist die erreichbare Genauigkeit durch die Kalibrierung, Xun et al. sprechen in [88] über einen verbleibenden Phasenfehler von 0,06* λ (quadratischer Mittelwert), entsprechend ca. $\lambda/20$.

Eine Kalibrierung von LCD-SLMs kann analog zu LCoS-Bauelementen mit den gleichen genannten Methoden realisiert werden, wie beispielsweise von Bereron et al. [92] und Martínez-León et al. [93] beschrieben. Ebenso sind diverse Grating Light Valve Kalibrierungen in der Literatur verzeichnet [94–96]. Bei den letztgenannten erfolgt eine Einzelpixelanalyse mithilfe von optischen Intensitätsdetektoren, um das elektro-optische Übertragungsverhalten aufzuzeichnen und entsprechend pixelgenau zu korrigieren. Eine Pixelkorrektur in Echtzeit, folglich im Betrieb in der Maschine ist sogar realisierbar.

SLMs in Form von digital betriebenen Mikrospiegelarrays (DMDs) benötigen von Haus aus keine Kalibrierung in Form von einer Korrektur der Einzelspiegelauslenkungen. Die Spiegel verfügen im Betrieb nur über zwei definierte Auslenkzustände, die mit mechanischen Anschlägen fixiert sind. Wohl aber mittlere Intensitätswerte (Grauwerte), die durch Pulsweitenmodulation der beiden Auslenkungen realisiert sind, können vermessen und ggf. angepasst werden. Es finden sich in der Literatur einige Ansätze zur Vollfarbkalibrierung beziehungsweise –korrektur von DMD-Systemen in Projektoren, beispielsweise in [97], [98].

Nach dem kurzen Überblick über Kalibriermethoden alternativer SLM-Systeme wird sich im Folgenden auf Verfahren für analoge Mikrospiegelarrays konzentriert. Teile der bereits genannten Methoden finden dort gleichfalls Anwendung.

4.2.1 Optische Kalibrierung

Unter dem Stichwort optische Kalibrierung werden Verfahren zusammengefasst, die einen direkten Zusammenhang zwischen elektrischem Steuersignal und optischem Projektionsmuster herstellen. Dazu werden die Projektionsmuster elektronisch mit einer Kamera aufgezeichnet und entsprechend ausgewertet.

Aus dem Hause der Firma Micronic stammt ein seit Jahren etabliertes Verfahren, beschrieben von Luberek, Sandström et al. in [76] und [99]. Die Methode zeichnet sich durch eine iterative Kalibrierung verschiedener diskreter Graulevel (typischerweise 4 bis 10) aus. Konkret wird die Spiegelspannung sukzessive variiert bis das detektierte Intensitätsbild die gewünschte mittlere Intensität und Homogenität aufweist. Besonderes Augenmerk liegt auf den Projektionsmustern "weiß" und "schwarz", die nicht bei dem absoluten Maximum bzw. Minimum der Intensitätsmuster liegen, sondern als ein sehr heller bzw. dunkler Grauwert definiert werden. Dieses Vorgehen reduziert zwar den möglichen Kontrastumfang, führt hingegen zu einer erhöhten Stabilität der Kalibrierprozedur. Die gespeicherten Spannungstabellen der kalibrierten Grauwerte können im Anschluss noch ergänzt werden durch analytisch berechnete Zwischenstufen.

Kalibriert wird bei der Micronic-Methode direkt in der Maschine (Maskenschreiber). Der große Vorteil dabei liegt in der Einbeziehung möglicher Quelleffekte und -inhomogenitäten sowie durch Optiken im System hervorgerufene Störung. Typischerweise werden zur Steigerung der Ablaufgeschwindigkeit eine Vielzahl von Spiegeln im Kamerafeld gleichzeitig kalibriert. Obwohl mehrere Kamerapixel einen Einzelspiegel abbilden, ist dennoch aufgrund optischer Beschränkungen keine Einzelspiegelauflösung realisiert. Durch geeignete Algorithmen wird gleichwohl jeder Spiegel individuell angepasst.

Abbildung 4.3 demonstriert die Wirkungsweise der Kalibriermethode an Intensitätsbildern eines beispielhaften Grauwerts. Nachgewiesen wurde bei der Weißintensität eine Reduzierung in der Streuung der Homogenität von 10 % auf weniger als 0,25 %.





Intensitätsmuster vor KalibrierungIntensitätsmuster nach KalibrierungAbbildung 4.3: Wirkung der Kalibrierung nach Micronic-Methode (aus [76])

Die größten Nachteile dieser Methode sind die ausschließliche Fixierung auf die Maschine mit der darin befindlichen Laserquelle, ein teilweise unsicheres Konvergenzverhalten sowie ein erheblicher Zeitbedarf, weil diskrete Graustufen einzeln kalibriert werden müssen. Weiterhin ist keine direkte Aussage über die tatsächlichen Auslenkungen von Einzelspiegeln vornehmbar, sondern ausschließlich über Reflektivitäten von kleinen Spiegelarraybereichen. Gleichwohl stellt diese von Micronic entwickelte Methode das einzige derzeit vorhandene und praxiserprobte Verfahren zur vollständigen MMA-Kalibrierung dar.

Alternativ zur Micronic-Methode ist ein weiteres optisches Kalibrierverfahren in der Literatur verzeichnet. Wang et al. beschreiben in [100] die Weiterentwicklung der Micronic-Kalibrierung mit konkretem Bezug zur Applikation der optischen maskenlosen Lithografie. Wang erhöht die Kalibrierempfindlichkeit durch gezielte Ansteuerung der umgebenden Pixel mithilfe analytischer Modelle. Bemerkenswert ist die Durchführung der Untersuchungen an einem Senkspiegelarray, dies beweist die Adaptierbarkeit der Prozedur auf unterschiedlich arbeitende, analoge Mikrospiegelarrays.

4.2.2 Profilometrische Kalibrierung

Einen wesentlich universelleren Ansatz zur MMA-Kalibrierung stellt die profilometrische Vermessung der Spiegeltopografie im Vergleich zur optischen Charakterisierung dar. Unabhängig von der späteren Applikation und der genutzten Wellenlänge werden losgelöst vom optischen MMA-Arbeitsprinzip nur mechanische Bauelementeigenschaften wie Spiegelverkippung oder –verformung bestimmt.

Alle bisher bekannten Ansätze beruhen auf interferometrischen Messverfahren, meist Weißlicht- oder Phasenschiebeinterferometrie. Anwendung dafür finden typischerweise kommerziell erhältliche Interferometer.

Bekannt ist, dass die Firma ASML an MMA-Kalibrierkonzepten arbeitet oder zumindest gearbeitet hat. Hinweise dazu finden sich beispielsweise in [101]. Verwendung findet ein Weißlichtinterferometer der Firma Zygo. Details zur Kalibrierprozedur oder zu Ergebnissen sind allerdings nicht bekannt. In drei inhaltlich nahezu identischen Patenten beschreiben Latypov und Poultney von ASML ein weiteres Kalibrierverfahren basierend auf Shearing-Interferometrie [102], [103], [104]. Eine ergänzende Patent-anmeldung von den gleichen Autoren setzt die Überlegungen fort [105]. Mithilfe von Apodisationsverfahren in der Projektionsoptik soll die Auflösung verbessert werden. Es ist nicht bekannt, ob die Patentanmeldungen oder Teile davon in die Praxis überführt wurden.

Ebenso beschäftigt sich das belgische Forschungsinstitut IMEC, teilweise in Zusammenarbeit mit ASML, intensiv mit der profilometrischen Charakterisierung von Mikrospiegelarrays. Mehrere Veröffentlichungen zur Bauteilvermessung mit Hilfe von Weißlichtinterferometern beschreiben den Stand der Arbeiten [53], [83], [106], [107]. Am IMEC werden ebenso Weißlichtinterferometer der Firma Zygo sowie Veeco

genutzt, eine dokumentierte Kalibrierprozedur oder deren Ergebnisse sind allerdings nicht veröffentlicht.

Am Fraunhofer IPMS bestehen mehrere Vorarbeiten zur profilometrischen MMA-Kalibrierung. Vor allem in zwei Diplomarbeiten [108], [109] wurden erste Nachweise für Machbarkeit einer profilometrischen Kalibrierung erbracht. die Aus dem interferometrisch gewonnenen Höhenprofil der Spiegeloberfläche, welches bis zu 250 Einzelspiegel abbilden konnte, werden die einzelnen Spiegel ausgeschnitten und deren Auslenkung analytisch bestimmt. Als Kalibrieransatz wurden zwei unterschiedliche Algorithmen gewählt. Im ersten Fall wurden definierte Zielauslenkungen iterativ angenähert, das zweite Verfahren vermisst die komplette elektromechanische Spiegelauslenkkurve an einer Vielzahl von Stützpunkten und beschreibt diese in einer analytischen Funktion. Die erste Methodik verspricht eine höhere Kalibriergenauigkeit an den definierten Auslenkzuständen, das zweite Verfahren begünstigt das universellere Einstellen aller denkbaren Auslenkzustände im kalibrierten Bereich. Nur die letztgenannte Methode erlaubt die vollständige Beschreibung des individuellen elektromechanischen Übertragungsverhaltens für alle kalibrierten Einzelspiegel.

Alle genannten profilometrischen Verfahren eint, dass noch keine vollständige Bauelementkalibrierung dokumentiert und veröffentlicht ist. Vor allem die große Anzahl von Einzelspiegeln und die zeitaufwendige Vermessung immer nur eines begrenzten SLM-Bereichs standen diesem Ziel bisher im Weg. Zudem stellen die hohen Anforderungen an die Robustheit der Algorithmen eine bisher unüberwundene Herausforderung dar.

4.3 Automatisierte profilometrische Kalibrierung

In diesem Kapitel werden Konzepte zur automatisiert ablaufenden profilometrischen MMA-Kalibrierung erarbeitet. Grundlage bilden die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Verfahren, vor allem jene, die am Fraunhofer IPMS entwickelt wurden.

Bevor eine Kalibrierung starten kann, ist zunächst das elektrische Spiegelansteuerprinzip nach Abschnitt 2.1.4.3 und Abbildung 2.16 zu beachten. Jeder Einzelspiegel verfügt über drei Elektroden (Adress-, Spiegel- und Rückstellelektrode), wobei nur die Adresselektrode individuell angesteuert werden kann. Spiegel- und Rückstellelektrode (globale Spannungselektroden) sind nur für das gesamte Bauelement einheitlich wählbar, bestimmen indes massiv das individuelle Einzelspiegel-Auslenkverhalten mit. Aus diesem Grund ist die Angabe einer Spiegelauslenkkurve (bestehend aus einem Satz von Adresselektrodenspannungen und zugehörigen Auslenkungen) nur in Kombination mit den gewählten globalen Spannungsparametern vollständig. Dies hat zur Folge, dass als erster Schritt jeder Kalibrierung die globalen Spannungswerte bestimmt und definiert werden müssen. Die Spiegel- und Rückstellelektrodenwerte werden als Arbeitspunkt bezeichnet. die zugehörige Routine als Arbeitspunktbestimmung. Während der kompletten restlichen Kalibrierung und der späteren Nutzung des MMAs bleiben diese Spannungswerte stets unverändert.

Nach gefundenem Arbeitspunkt beginnt die individuelle Vermessung von Einzelspiegeln. Ein Messfeld des Weißlichtinterferometers kann gleichzeitig mehrere Hundert bis Tausend Einzelspiegel abbilden. Typischerweise werden alle Spiegel im Messfeld parallel kalibriert, um einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber einer sequenziellen Abarbeitung zu gewinnen. Die Einzelspiegelauslenkungen lassen sich über geeignete Algorithmen aus dem kontinuierlichen Oberflächenprofil des MMAs innerhalb der Messdatei analytisch extrahieren.

Je nach verwendetem Kalibrieralgorithmus beginnt eine Serie von Messungen, um entweder iterativ einzelne Auslenkungen oder die komplette Auslenkungskurve zu kalibrieren. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Erfassung der vollständigen Spiegelauslenkkurve deutliche Vorteile hinsichtlich Kalibriergeschwindigkeit und dem universellen MMA-Einsatz bietet bei trotzdem hinreichender Genauigkeit [108]. Aus diesen Gründen wird sich im weiteren Verlauf der Arbeit auf diesen Algorithmus gestützt. Dessen ungeachtet ist ein Umstieg von der Kennlinienvermessung zu einer iterativen Methode jederzeit möglich.

Die Aufnahme einer kompletten Spiegelkennlinie skizziert Abbildung 4.4. Eine vollständige Beschreibung des Auslenkverhaltens schließt eine Messung der Nullauslenkung der gewünschten Zielauslenkung sowie oder zulässigen Maximalauslenkung ein. Die Anzahl der Zwischenmessungen ist variabel gestaltbar. Die mit einem x gekennzeichneten Mess- oder Stützpunkte beschreiben die ermittelten Auslenkungen di an den eingestellten Spannungen Ui. Sind alle Messungen erfolgt, werden die Wertepaare zwischengespeichert oder es startet direkt eine Datenregression, um den Auslenkungsverlauf mit einer analytischen Funktion beschreiben zu können. Bestimmt werden Koeffizienten einer vorher definierten Funktion, um das Übertragungsverhalten möglichst exakt mathematisch abzubilden.



Abbildung 4.4: Verteilung von Stützpunkten bei verschiedenen Spiegelspannungen U_i über der Spiegelauslenkkurve [57]

Abbildung 4.4 beschreibt den Vorgang für nur einen Einzelspiegel. Die Messungen und Auslenkungsermittlungen erfolgen in der Praxis parallel für eine Vielzahl von Spiegeln, die Datenregressionen im Anschluss hingegen sequentiell für jeden Spiegel individuell.

Da ein WLI-Messfeld nur eine begrenzte Anzahl von Spiegeln gleichzeitig charakterisieren kann, ist eine Abrasterung des kompletten Spiegelarrays unerlässlich. Praktisch realisiert wird dies durch Verfahrbewegungen des MMAs unter dem Objektiv oder der Bewegung des WLI-Messkopfes. Über einen vorher definierten Pfad wird so die komplette Spiegelfläche abgerastert. Die in jedem Messfeld gewonnenen Auslenkungsdaten beziehungsweise Kalibrierkoeffizienten werden entsprechend der jeweils aktuellen MMA-Position in eine Datenmatrix einsortiert. Den Schlusspunkt des Kalibrierverfahrens bildet die Speicherung der gewonnenen Kalibrierdaten bzw. -koeffizienten in eine Datei, um für einen späteren Einsatz wieder zur Verfügung zu stehen.



Abbildung 4.5: Vereinfachtes Ablaufprinzip der profilometrischen MMA-Kalibrierung mit Ermittlung des kompletten Spiegelauslenkverhaltens [57]

Abbildung 4.5 umreißt den Ablauf einer kompletten Kalibrierung. Nicht dargestellt ist die Arbeitspunktbestimmung oder –definition zu Beginn des Verfahrens. Der Vermessung der Spiegelauslenkkurven in einzelnen Messfeldern folgt eine geschickte Abrasterung des vollständigen Spiegelarrays, um alle Einzelspiegel messtechnisch zu erfassen. Zu jedem Spiegel werden Koeffizienten einer analytischen Funktion durch Datenregression ermittelt, um das gemessene Auslenkverhalten möglichst detailgetreu mathematisch nachzubilden. Die Speicherung der gewonnenen Koeffizienten schließt die Prozedur ab. Alle dargestellten Teilschritte sind vollkommen automatisierbar. Voraussetzung dafür ist die vollständige softwareseitige Kontrolle des Kalibriersystems bestehend aus Weißlichtinterferometer, MMA-Ansteuerelektronik und gegebenenfalls weiterer Hardware für die Synchronisation der Komponenten, wie zum Beispiel Funktionsgeneratoren.

4.4 Anwendung der Kalibrierdaten

Ziel für den Endanwender ist eine möglichst einfache, komfortable und sichere Nutzung der MMAs mit den dazugehörigen Kalibrierdaten. Vor allem der letztgenannte

Punkt Sicherheit stellt sich als ein enorm wichtiges Kriterium heraus, um den hochempfindlichen Bauelementen keine Schädigungen durch fehlerhafte Ansteuerung zuzuführen. Dank einer Kalibrierung wäre zu keinem Zeitpunkt die manuelle Einstellung einer Spiegelspannung notwendig, damit ist die Gefahr von "falschen" Spannungen sowie des Sticking-Phänomens nahezu ausgeschlossen. Aus dieser Sichtweise erhöht eine Kalibrierung nicht nur die optischen Eigenschaften des Bauelements, sondern zudem dessen Sicherheit im Betrieb. Die beiden erstgenannten Punkte – einfache und komfortable Nutzung – spielen vor allem in der Hinsicht eine Rolle, dass sie die Hemmschwelle für die Nutzung der Kalibrierdaten deutlich senken sollen. Nur eine unkomplizierte und schnelle Verwendung führt zum erfolgreichen und fehlerfreien Einsatz der Daten.

Die Kalibrier- beziehungsweise Koeffizientendatei selbst erfordert eine so universelle Gestaltung, dass sie unabhängig vom genutzten Anwendersystem Verwendung finden kann. Eine beschränkte Nutzung nur am WLI-Kalibriersystem wäre nicht zweckmäßig. Am sinnvollsten erscheint eine Verarbeitung der Kalibrierdaten in der MMA-Ansteuerelektronik. Realisiert werden kann dies durch einen einmaligen Ladevorgang der Kalibrierdatei in die Elektronik zu Beginn der Verwendung des MMA-Systems. Alle weiteren Berechnungsschritte - von den gewünschten Intensitätsverteilungen bis zu Einzelspiegelspannungen - erfolgen intern ohne das Zutun des Endanwenders. Alternativ zur elektronikinternen Verrechnung der Daten ist weiterhin ein zweites Konzept denkbar, alle Berechnungen vorab offline durchzuführen und anschließend die Spannungsparameter an die MMA-Elektronik zu übertragen. Diese Methode setzt allerdings detailliertes Wissen über den Aufbau der Koeffizientendatei sowie aller Berechnungsschritte voraus. Das Fehlerrisiko einer Offline-Aufbereitung der Kalibrierdaten für den Endanwender ist deutlich erhöht, sodass die Vorteile der elektronikinternen Verrechnung demgegenüber deutlich überwiegen.

Im Folgenden werden die notwendigen Berechnungsschritte bei Nutzung einer Kalibrierdatei, unabhängig davon ob sie offline oder elektronikintern ausgeführt werden, kurz erläutert. Üblicherweise liegt zunächst das gewünschte Beleuchtungsmuster in Form eines Graustufen-Bitmaps vor. Ausgehend von einem solchen Bitmap finden die nachstehenden Schritte statt:

- 1. Laden der Bitmap-Datei
- Umwandlung der Bitmap-Daten in Intensitätsdaten, skaliert im Bereich von 0 (schwarz) bis 1 (weiß)
- Ermittlung der notwendigen Spiegelauslenkungen durch Umkehrung der Gleichung (2.3) (sinc²-Funktion unter Berücksichtigung der verwendeten Beleuchtungswellenlänge)
- 4. Berechnung der Spiegelspannungen aus Spiegelauslenkungen, Kalibrierfunktion und Kalibrierkoeffizienten (aus Koeffizientendatei)
- 5. Übertragung der Spannungen an das MMA-Bauelement

Abbildung 4.6 veranschaulicht den beschriebenen Ablauf grafisch. Die vereinfachte Darstellung verbirgt allerdings Details, die eine Realisierung des Ablaufs deutlich

erschweren. Zu nennen ist beispielsweise Punkt 3, die Umkehrung der Gleichung (2.3). Die Umkehrfunktion ist notwendig, um neben "weiß" und "schwarz" auch sämtliche Graustufen exakt darzustellen. Zum eindeutigen mathematischen Zusammenhang I(d) existiert jedoch keine Umkehrfunktion, kein analytischer Zusammenhang d(I). Eine numerische Berechnung der Auslenkungen d bei gegebener Intensität I ist möglich, jedoch für alle Spiegel zeitaufwendig. Alternativ bietet sich die Nutzung einer im Voraus erstellten Wertetabelle an. Ein weiterer zentraler Punkt im Algorithmus ist die Berücksichtigung der Beleuchtungswellenlänge λ im System. Im Abschnitt 2.1.4.4 wurde bereits dargelegt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ und der Spiegelauslenkung d für feste Beleuchtungsintensitäten existiert. Kürzere Wellenlängen erfordern geringere Auslenkungen und umgekehrt. Die Kenntnis von λ ist daher unablässig und muss im Berechnungsschritt 3 bekannt sein.



Abbildung 4.6: Vereinfachte Darstellung zur Anwendung der Kalibrierdaten für optimierte Spiegelauslenkungen

Erst nach Implementierung dieses kompletten Ablaufs können die Kalibrierdaten für jedes beliebige Beleuchtungsmuster (auch mit Graustufendarstellung) und variablen Wellenlängen verwendet werden.

5 Entwicklung zur profilometrischen MEMS-Kalibrierung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln der Stand der Technik erarbeitet sowie theoretische Konzeptüberlegungen zur Kalibrierung vorgenommen wurden, beginnt mit diesem Kapitel die Beschreibung der praktischen Umsetzung. Dargestellt werden Hard- und Software sowie realisierte Algorithmen der Kalibrierstation. Diesen Punkten folgt die Vorstellung der Kalibrierergebnisse sowie deren Diskussion.

5.1 Messstation zur profilometrischen Charakterisierung

Den essentiellen Bestandteil der Kalibrierstation bildet ein Weißlichtinterferometer vom Typ Zygo NewView 7300 (siehe Abbildung 5.1). Mit dem verwendeten Messmodus "Scannende Weißlichtinterferometrie" sind kontaktlose dreidimensionale Oberflächenmessungen in hoher Geschwindigkeit möglich. Der Hersteller Zygo gibt die vertikale Auflösung mit < 0,1 nm an bei Messfeldern mit einer lateralen Ausdehnung bis zu 14 mm [110]. Verschiedene Zusatzobjektive gewährleisten die direkte Vergrößerung der untersuchten Objekte vergleichbar zu einem herkömmlichen Mikroskop. Integriert im System ist ein motorisierter xy-Verschiebetisch, auf dem die Messproben platziert werden. Mit einer Kamera der Auflösung 992 x 992 Pixel werden die Weißlichtinter-ferogramme aufgenommen und durch die Gerätesoftware entsprechend ausgewertet.



Abbildung 5.1: Weißlichtinterferometer Zygo NewView 7300 genutzt als Basis der Kalibrierstation (aus [110])

Neben dem Weißlichtinterferometer inklusive seiner Funktionsgruppen umfasst die Kalibrierstation hardwareseitig folgende zusätzliche Komponenten:

- MMA-Bauelement mit Steuerungs- und Kommunikationselektronik
- Funktionsgenerator
- Steuer-PC.

Abbildung 5.2 skizziert den Systemaufbau bestehend aus den genannten Komponenten. Der Funktionsgenerator ist in der Grafik der Übersicht halber nicht dargestellt, seine Aufgabe umfasst hauptsächlich die Bereitstellung von Signalen zur Synchronisation der anderen Komponenten. Einen besonderen Stellenwert ist dem Steuercomputer einschließlich seiner Kontrollsoftware beizumessen, er stellt im kompletten System die Mastereinheit dar. Seine Aufgaben umfassen:

- Sicherstellen der Interaktion zwischen allen Systemkomponenten
- Empfangen und analysieren der gemessenen MMA-Oberflächenprofile
- Bereitstellung der Spiegelsteuerspannungen abhängig vom Auslenkungsmuster
- Durchführung aller relevanten Berechnungen.

Die Software wurde eigenhändig in der Programmierumgebung Matlab entwickelt. Alle Hardwarekomponenten werden über die Software kontrolliert und ferngesteuert.



Abbildung 5.2: Vereinfachte Darstellung des Kalibriersystems einschließlich Datenkreislauf [57]

Eine MMA-Topografiemessung folgt immer dem gleichen Ablaufschema. Der Steuercomputer bereitet eine Matrix aus Spiegelspannungen entsprechend dem gewünschten Auslenkmuster vor. Die Datenmatrix wird per Software an die MMA-Steuerelektronik übertragen, dort in analoge Spannungswerte umgewandelt und direkt an das Spiegelarray weitergeleitet. Es folgt die Auslenkung der Spiegel und zeitgleich eine WLI-Messung. Die Übertragung der WLI-Messdaten an den Steuercomputer schließt eine Einzelmessung ab. Durch die automatisierte Analyse der Messdaten und daraus Ableitung eines neuen Datensatzes an Spiegelspannungen lässt sich ein Kreislauf im Kalibriersystem implementieren, der kontinuierlich abläuft und in einer Folge von Einzelmessungen das Bauelement selbstständig vermisst.

Eine besondere Herausforderung im Systemaufbau stellt neben dem adäquaten Handling größerer Datenmengen überdies die Synchronisation aller Einzelkomponenten dar. Die Spiegelauslenkung erfolgt nicht kontinuierlich sondern gepulst zu diskreten Zeitpunkten bei einer Taktfrequenz von bis zu 1 kHz. Folge dessen ist die Notwendigkeit eines dynamischen beziehungsweise zeitaufgelösten Messmodus des WLIs, der synchron zur Spiegelauslenkung erfolgen muss. Wesentliche Komponente zur Realisierung der Synchronisationsaufgabe stellt ein Funktionsgenerator dar, der als Taktgeber die Zeitpunkte der Spiegelauslenkung und WLI-Messung aufeinander abstimmt. Abbildung 5.3 veranschaulicht das typischerweise am WLI angewandte Taktschema.



Das Startsignal für die MMA-Steuerungslektronik sowie das Triggersignal der WLI-Messung generiert der Funktionsgenerator. Das Startsignal kennzeichnet den Beginn einer sogenannten Ladephase, in der die Musterdaten in Form von analogen Spannungen an das MMA übertragen werden. Dieser Vorgang dauert ca. 820 µs, somit den Großteil einer Periode von 1 ms. Es schließt sich eine definierte Wartezeit von 10 µs an bis schließlich alle Einzelspiegel für 35 µs ausgelenkt sind. Die ersten näherungsweise 20 µs dieser Auslenkphase werden für einen Einschwingvorgang der Spiegel benötigt, bis alle Spiegel stabil in einer Ruheposition verharren. Während der ausgelenkten Ruhephase der Spiegel erfolgt der Triggerimpuls des Funktionsgenerators für die WLI-Beleuchtungsquelle. Diese kurzen Lichtpulse entsprechen über einen längeren Zeitraum betrachtet einer stroboskopischen Beleuchtung des MEMS-Bauelements. Der Taktzyklus wiederholt sich mehrere 100 bis 1000 Mal, bis eine Weißlichtinterferometermessung vollständig abgeschlossen ist (Dauer ca. 3 - 4 s).

5.2 Ermittlung von Einzelspiegelauslenkungen

Ausgangspunkt für die Ermittlung der Spiegelauslenkungen ist eine Messdatei des WLIs. Sie umfasst zwei Datensätze: Einer enthält die gemessenen Höhenbeziehungsweise Oberflächendaten, der Zweite beschreibt die Intensitätsdaten. Die Höhendaten enthalten Informationen der Objektoberfläche im Subnanometerbereich, die Intensitätsdaten beschreiben das reflektierte Licht des untersuchten Objektes. Abbildung 5.4 zeigt beide Datensätze einer beispielhaften WLI-Messdatei. Charakterisiert wurde ein Teilbereich eines 64k-Spiegelarrays bei ca. 100 nm ausgelenkten Spiegeln.





Die Messdaten zeigen ein typisches während der Kalibrierung aufgenommenes Messfeld. Eine Fläche von ca. 1,3 x 1,3 mm² wird gleichzeitig vermessen, das Gebiet umfasst 78 x 78 Einzelspiegel zuzüglich Randbereiche. Demzufolge werden exakt 6084 Spiegel in einem Messfeld erfasst und parallel vermessen. Bei 992 x 992 Kamerapixeln verbleiben weniger als 13 x 13 Pixel pro Spiegel. Berücksichtigt man Schlitze zwischen den Spiegeln und einen Sicherheitsbereich von 1-2 Pixel falls das Bild pixelweise verrückt, so verbleiben nur weniger als 10 x 10 Pixel die zur Analyse der einzelnen Spiegel herangezogen werden können. Eine weitere Erhöhung der Spiegelanzahl im Messfeld durch eine geringere WLI-Vergrößerung ist aus diesem Grund bei gleichbleibender Kameraauflösung kaum realisierbar.

Berücksichtigt man nun das vom WLI zur Verfügung gestellte kontinuierliche Höhenprofil, so ist zunächst eine spezielle Routine zur automatisierten Extraktion der Einzelspiegelinformationen unausweichlich. Die von Novak et al. in [111] beschriebenen Segmentierungsverfahren zur musterbasierten Datenanalyse bilden die Grundlage der angewandten Methode. Während der Kalibrierung wurde ein auf Musterfaltung basierendes Vereinzelungsverfahren zur Unterteilung des kontinuierlichen Höhenprofils in einzelne Bereiche angewandt. Jeder der Bereiche repräsentiert einen Einzelspiegel. Pfostenlöcher in der Spiegelmitte und Schlitze zwischen den Spiegeln wurden entfernt, um die interessierenden Daten zu isolieren (Abbildung 5.5). Die Segmentierung erfolgt anhand der Intensitätsdaten, die unabhängig von der geringen Spiegelverkippung nahezu unverändert bleiben. Dank der eindeutigen Korrelation zwischen Pixeln der Höhen- und Intensitätsdaten sind die vereinzelten Bereiche direkt auf die Höhendaten übertragbar.



Abbildung 5.5: Veranschaulichung der Segmentierung der Rohhöhendaten, um Einzelspiegelinformationen zu extrahieren

In einem zweiten Schritt folgt die Analyse der segmentierten Regionen durch eine individuelle Regression der Höhendaten an allen Spiegelplatten. Zuvor findet noch die Kompensation einer möglichen globalen Verkrümmung der Messdaten statt. Unter Nutzung der Verkippung der Spiegelplatten kann die jeweilige Auslenkung direkt berechnet werden.

Der Segmentierungs- und Analysevorgang ist in einer Funktionsbibliothek in der Programmiersprache C abgebildet. Die Bibliothek ist eine über Jahre gewachsene hausinterne Software basierend auf Untersuchungen von Tanneberger [112]. Die Weiterentwicklung der Bibliothek war nicht Gegenstand dieser Dissertation, wohl aber deren intensive Nutzung und kritische Reflexion. Eine vereinfachte Version wurde sogar für Testzwecke in die eigene Matlab-Programmierung übersetzt und eingefügt.

Die komplette Datenanalyse aller ca. 6000 Einzelspiegel im Messfeld benötigt nur wenige Sekunden und stellt somit kein Hindernis für eine automatisiert ablaufende und zeitlich überschaubare Kalibrierprozedur dar.

5.3 Erarbeitung der Kalibrieralgorithmen

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen Teilschritte einer automatisiert ablaufenden Kalibrierung vorgestellt sowie deren Umsetzung diskutiert. Wesentliche Grundlage bildet das im Konzeptkapitel bereits vorgestellte Ablaufschema aus Abbildung 4.5. In die Praxis überführt wurde ausschließlich das Kalibrierverfahren zur Vermessung der kompletten Auslenkkurven aufgrund der in Abschnitt 4.3 genannten

Vorteile. Die Implementierung der Algorithmen erfolgte ausschließlich in der Programmierumgebung Matlab unter Einbeziehung diverser externer Bibliotheken.

Startpunkt jeder Kalibrierung ist die Festsetzung der Auslenkspezifikationen. Orientiert an der Mikroskopieanwendung für das 64k-MMA, wo Wellenlängen bis in den nahen Infrafotbereich (λ = 1000 nm) genutzt werden, ergibt sich eine notwendige Auslenkungsforderung bis zu 250 nm (bei d = $\lambda/4$ erstes Minimum der optischen sinc²-Übertragungsfunktion). Ein praxistauglicher Spiegelauslenkbereich zur vollständigen Modulation der Beleuchtungsquelle beträgt demnach d = 0 ... 250 nm.

5.3.1 Ermittlung eines geeigneten Arbeitspunktes

Aufgabe der Ermittlung des Arbeitspunktes (globale Rückstell- und Spiegelelektrodenspannung) ist die Sicherstellung, dass alle Spiegel im Array den Zielauslenkungsbereich vollständig abdecken. Doch bevor die Prozedur im Detail erläutert wird, ist das Verständnis der Wirkungsweise beider Elektroden notwendig. Betrachten wir zunächst einen Einzelspiegelaufbau mit den darunter befindlichen Elektroden:



Abbildung 5.6: Darstellung Einzelspiegel mit Elektrodenanordnung

Ausschließlich die Adresselektrode steuert die individuelle Spiegelauslenkung im Betrieb. Der zulässige Spannungsbereich liegt bei $U_{AD} = 0 \dots 26$ V. Spiegel- und Rückstellelektrode verfügen über einen Wertebereich von $U_{ME} = U_{CE} = -10 \dots +10$ V. Entscheidend für die Spiegelverkippung ist jeweils die Potentialdifferenz zwischen Adress- und Spiegelelektrode (U_A) sowie Rückstell- und Spiegelelektrode (U_R). Ausgehend von einem idealen Aktuator mit nicht vorhandener Vorauslenkung neigt sich der Spiegel in die Richtung der größeren Potentialdifferenz, aufgrund der größeren Spannungen meist Richtung Adresselektrode. Sind beide Potentiale Null oder gleich groß, sollte der Spiegel in seiner nichtausgelenkten Lage verharren.

Die anziehende Wirkungsrichtung der Kräfte ist wesentlicher Grund für das Vorhandensein der Rückstellelektrode. Ausgehend von einem realen Bauelement mit statistischen Vorauslenkungen um den Nullpunkt, könnte andernfalls bei positiver Vorauslenkung niemals die Nullauslenkung eingestellt werden. Mit der Rückstellelektrode wird durch Anlegen einer Spannung demzufolge die Voraussetzung geschaffen, dass alle Spiegel die Nullauslenkung erreichen. Alle Spiegelauslenkungen können bei einer Adresselektrodenspannung $U_{AD} = 0 V$ durch Erhöhung der Rückstellelektrodenspannung U_{CE} auf eine Spiegelauslenkung kleiner d < 0 nm eingestellt werden (siehe Abbildung 5.7).



Abbildung 5.7: Einfluss der Rückstellelektrodenspannung U_{CE} auf die Spiegelauslenkung

Die Spiegelelektrode wirkt gleichermaßen auf die beiden Potentialunterschiede U_A und U_R, sodass zunächst die Frage nach deren Nutzen steht. Unter Berücksichtigung von Gleichung (2.1), die einen quadratischen Zusammenhang zwischen der elektrostatischen Kraft und dem Potentialunterschied beschreibt ($F \sim U^2$), wird der Einfluss von U_{ME} deutlich. Legt man das Ziel möglichst hohe Auslenkungen erreichen zu wollen zugrunde, so sind große elektrostatische Kräfte und damit große Elektrodenpotentialunterschiede notwendig. Durch Anlegen einer negativen Spannung an die Spiegelelektrode U_{ME} können auf einfache Art und Weise die Potentialunterschiede U_A und U_R deutlich vergrößert werden. Der Vorteil darin liegt in den nun geringeren notwendigen Adresselektrodenspannungen, was vor allem aus technologischer Sicht bei dem genutzten Hochvolt-CMOS Vorteile bringt.

Zusammenfassend bleibt zu den beiden Arbeitspunktspannungen festzustellen, dass sie in erster Linie folgende Verantwortlichkeiten übernehmen:

- Rückstellelektrodenspannung für kleine Auslenkungen
- Spielelektrodenspannung für große Auslenkungen.

An einer beispielhaften Auslenkkurve eines einzelnen Spiegels ist die beschriebene Abhängigkeit grafisch illustriert (Abbildung 5.8). Kurve 1 skizziert die Ausgangslage mit einer Auslenkkurve bei den Arbeitspunktspannungen $U_{ME} = U_{CE} = 0$ V. Im Wertebereich der zulässigen Adresselektrodenspannungen kann nur ein eingeschränkter Auslenkungsbereich adressiert werden. Durch Erhöhung der Rückstellelektrodenspannung U_{CE} (Kurve 2) bewegt sich die Kennlinie zu kleineren Auslenkwerten hin, sie wird in der Grafik entlang der Ordinate "nach unten gezogen". Eine zusätzliche Verringerung der Spiegelspannung U_{ME} bewirkt einen steileren Kennlinienverlauf (Kurve 3), bis schließlich der gesamte Zielauslenkungsbereich durch zulässige Adresselektrodenspannungen adressierbar ist.



Abbildung 5.8: Verlauf einer Einzelspiegelkennlinie bei unterschiedlichem Arbeitspunkt

Anhand der beschriebenen Wirkungsweise der Arbeitspunktspannungen wurde eine Routine zur Bestimmung eines optimalen Arbeitspunktes entwickelt. Im Wesentlichen gliedert sich die Prozedur in die beiden bereits erwähnten Teilschritte: Zunächst wird U_{CE} bei $U_{AD} = U_{ME} = 0$ V so lange erhöht, bis alle Spiegel eine Auslenkung kleiner dem kleinsten Kalibrierziel (in der Regel d_{min} = 0 nm) aufweisen. Ist U_{CE} unter diesen Bedingungen ermittelt beginnt die Ermittlung von U_{ME} unter Berücksichtigung des maximalen Kalibrierziels. U_{AD} wird auf einen Spannungswert festgesetzt, bei dem die Spiegel im Mittel den Zielauslenkwert erreichen sollen (z. B. U_{AD} = 20 V). U_{ME} wird im Anschluss solange verringert, bis die Spiegel im Messfeld diesen mittleren Wert aufweisen. Es wird nicht mit der maximalen Adressspannung gearbeitet, um einen gewissen Sicherheitsbereich im Betrieb des MMAs zu gewährleisten.

Theoretisch stellt sich die Frage, warum die Prozedur nicht eingespart werden kann, indem U_{CE} auf den größten möglichen Wert und U_{ME} auf kleinsten zulässigen Wert festgesetzt wird. Dem ist zum einen entgegenzuhalten, dass bei sehr großer Rückstellelektrodenspannung unter Umständen nicht mehr das maximale Auslenkziel erreichbar ist, die Spiegel sind zu stark negativ vorgespannt. Der zweite Grund betrifft die Spiegelspannung U_{ME}, bei deren minimalem Wert eventuell das maximale Kalibrierziel schon bei halber Adresselektrodenspannung erreicht ist. Dies wäre kein kritisches Szenario, allerdings wird der Dynamikbereich von U_{AD} unnötig verringert.

Grundproblem der Arbeitspunktbestimmung ist die Tatsache, dass die globalen Spannungen für alle Spiegel im Array gelten, jedoch nur anhand einer Auswahl von Spiegeln wie beschrieben bestimmt werden. Im Extremfall wäre es notwendig alle Spiegel im Array auf das Erreichen der beiden Grenzauslenkungen hin zu testen. Aus Zeitgründen wird diese Methode stark verkürzt. Praktisch realisiert ist die Bestimmung der Arbeitspunktspannungen an einem Messfeld, bestehend aus ca. 6000 Einzelspiegeln. Zur Überprüfung der ermittelten Werte erfolgt eine Kontrollmessung an zwei weiteren (oder wahlweise mehr) Positionen im Array, die sich aufgrund von Erfahrungswerten in MMA-Bereichen mit sehr steifen und sehr sensitiven Spiegelfedern befinden. Sollte sich bei einer der Kontrollmessungen herausstellen das nicht alle Zielauslenkungen erreicht sind, so werden die Spannungen U_{CE} und U_{ME} an diesen Positionen entsprechend angepasst.

Die komplette Prozedur läuft völlig autonom ab, wenn der Zielauslenkungsbereich, die Start- und Grenzspannungen sowie die Messpositionen im Array bekannt sind. Die Anzahl notwendiger Einzelmessungen hängt im Wesentlichen vom implementierten Vorwissen über das Bauelementverhalten ab. Ist über das exakte MMA-Verhalten nur wenig bekannt. SO ist eine defensive Herangehensweise mit kleineren Startspannungen, kleineren Spannungsschritten und mehr Kontrollpositionen empfehlenswert. Diese Prozedur kann durch eine geschickte Wahl der Startparameter erheblich abgekürzt werden. Ein praktisch ermittelter Durchschnittswert führt zu etwa 15 Einzelmessungen bis zum erfolgreichen Abschluss der Arbeitspunktbestimmung.

5.3.2 Aufnahme einzelner Stützpunkte der Auslenkkurve

Nach der erfolgreichen Ermittlung des MMA-Arbeitspunktes, der im weiteren Verlauf der Kalibrierung stets unverändert bleibt, beginnt die Vermessung der Einzelspiegel. Wie in Abbildung 4.4 dargestellt wird eine Auslenkungskurve durch Messungen an mehreren Punkten der Kurve repräsentiert. Ziel ist, den gewünschten Auslenkungsbereich mit jedem Einzelspiegel vollständig abzudecken, ohne den Spiegel zu weit auszulenken und ein Sticking-Verhalten zu riskieren. Von Interesse ist vor allem die Anzahl und Verteilung der Messpunkte auf der Kurve. Die Anzahl hat wesentlichen Einfluss auf die Kalibrierdauer, jedoch ebenso wie die Verteilung auch auf die Kalibriergenauigkeit.

Betrachten wir zunächst die Verteilung der Stützpunkte auf der Auslenkkurve. Zwei Messpunkte erklären sich von selbst, einer bei oder nahe unterhalb des kleineren Auslenkziels, der Zweite nahe oder knapp oberhalb des größeren Auslenkziels. Denkbar sind Verteilungen der restlichen Stützpunkte zwischen den beiden in oder Auslenkungsschritten, äquidistanten Spannungssowie eine adaptive Stützpunktverteilung in Abhängigkeit der bis zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen Werte. Abbildung 5.9 illustriert die unterschiedliche Platzierung der Messpunkte in äquidistanten Abständen auf der Kennlinie. Leicht ist die Grundproblematik dieser Methodik erkennbar, aufgrund des nichtlinearen stark ansteigenden Kennlinienverlaufs ergeben sich teilweise sehr große Spannungs- bzw. Auslenkungsabstände benachbarter Messpunkte. In diesen Bereichen wird die Kennlinie nach der Datenregression nur unzureichend exakt analytisch abgebildet.



Abbildung 5.9: Methoden zur Verteilung der Messpunkte auf Auslenkkennlinie

Trotz der genannten Problematik sind beide beschriebenen Methoden implementiert worden. Die Verteilung der Stützpunkte in äquidistanten Spannungsschritten stellt sich als wenig problematisch dar, beginnend mit der kleinstmöglichen Adresselektrodenspannung werden weitere Messungen in fest definierten Spannungsschritten aufgenommen, bis die Spiegel das maximale Auslenkziel erreicht haben. Problematisch gestaltet sich diese Methode, wenn d_{max} nahe der designten Maximalauslenkung der Mikrospiegel liegt. Die großen Auslenkungssprünge im zunehmenden Kennlinienverlauf erhöhen die Gefahr massiv, dass Spiegel zu weit gekippt werden, in das Sticken geraten und permanent unbeweglich bleiben.

Bei der alternativen Stützpunktverteilung mit äquidistanten Auslenkungsschritten tritt diese Gefahr nicht auf. Allerdings stellt sich zunächst die Frage, wie sollen die Messpunkte in festen Auslenkungsschritten verteilt werden, wenn die Kennlinie des Spiegeln noch völlig unbekannt ist? Praktische Abhilfe schafft eine Schätzung des Kurvenverlaufs anhand von zwei Startmessungen, bei einer sehr kleinen und einer mittleren Adressspannung. Anhand folgender empirischer Formel

$$d = a_1 + a_2 * U^{2,3}$$
 (5.1)

werden aus den zwei Messungen die beiden Koeffizienten a_1 und a_2 berechnet. Die notwendigen Adressspannungen sind im Folgenden durch Umstellen der Gleichung (5.1) problemlos für alle restlichen Zielauslenkungen berechenbar. Mit dieser Hilfsrechnung, wohlgemerkt für jeden Spiegel individuell, erwies sich die äquidistante Auslenkungsmesspunktverteilung als praktisch problemlos realisierbar.

Der große Vorteil der zweiten beschriebenen Methode liegt neben der Gleichverteilung der Stützpunkte über dem Auslenkungsbereich vor allem in der dichteren Anordnung der Messpunkte bei großen Spannungen, da in dem Bereich der steile Kurvenverlauf zu großen Auslenkungsänderungen bei nur geringen Spannungsänderungen führt. Weiterhin befindet sich die λ /4-Auslenkung, zuständig für schwarze Beleuchtungsmuster, im sensitiven doch gut abgedeckten Bereich der großen Spannungen. Gerade

um hohe Kontrastwerte zu erzielen ist die exakte Spiegelpositionierung um die $\lambda/4$ -Position von großer Bedeutung. Im Gegensatz dazu sind Weißbereiche im Intensitätsbild dank der nahe Null sehr flachen sinc²-Übertragungsfunktion von d zu I (Gleichung (2.3)) weniger empfindlich auf kleinere Änderungen der Spiegelauslenkung.

Zusammengefasst bildet die äquidistante Stützpunktverteilung das Bauelementverhalten im Betrieb besser ab: Unkritischere kleine Auslenkungen sind weniger exakt abgebildet, große Auslenkungen und somit Adressspannungen sind im Betrieb eher kritisch und werden durch die erhöhte Stützpunktanzahl besser repräsentiert. Aus diesen Gründen und den Nachteilen der äquidistanten Spannungsschritte hat sich das Verfahren der Messpunktverteilung in gleichen Auslenkungsschritten auf der Kennlinie in der Praxis eindeutig durchgesetzt.

Eingangs bereits erwähnt wurde eine weitere Methode zur adaptiven Verteilung der Stützpunkte auf der Kennlinie. Hier sind unzählige praktische Varianten denkbar, alle vereinen die Ermittlung der nächsten Stützpunktposition abhängig von den vorangegangenen Messungen, für jeden Einzelspiegel individuell. Im Vergleich zu den bisher diskutierten Methoden werden vor der Kennlinienaufnahme nicht alle Messpunkte exakt festgesetzt. Wesentlicher Vorteil diese Methodik ist eine bessere Vorhersage Stützpunktposition, weil der nächsten vor allem das Extrapolationsverhalten umso genauer wird, je mehr Messungen bereits in die Approximationsfunktion der Auslenkkurve eingeflossen sind. Praktisch für Testzwecke realisiert wurde folgende Variante: Drei Messpunkte sind zunächst fixiert auf eine kleine Spannung und zwei mittlere, doch unterschiedliche Spannungen. Beginnend mit diesen drei Messpunkten werden die Koeffizienten der späteren Kalibrierfunktion per Datenregression numerisch ermittelt. Darauf aufbauend ist die Spannung des nächsten Stützpunktes auf der Kennlinie genau in der Mitte zwischen der bisher höchsten und der Zielauslenkung einfach zu berechnen. Bei jedem weiteren Stützpunkt wird die Prozedur mit einer erneuten Datenregression wiederholt. der maximalen Zielauslenkung wird sich in immer kleineren Schritten genähert bis eine Schwelldifferenz zum Ziel erreicht ist. Auch hierbei ist der oben genannten Problematik Rechnung getragen, sodass bei den kritischen hohen Auslenkungen und Spannungen die Stützpunkte deutlich dichter liegen. Praktische Anwendung findet diese Methode allerdings nicht, da der drastisch erhöhte Zeitbedarf durch die wiederholte Datenregression und die zunächst undefinierte Anzahl an Messpunkten durch den geringen Gewinn an der Stützpunktvorhersagegenauigkeit nicht kompensiert wird.

Für alle Methoden der Messpunktverteilung zur Kennlinienaufnahme stellt sich die Frage, wie viele Messungen notwendig sind, um das Auslenkverhalten hinreichend genau zu beschreiben? Weniger Messpunkte verkürzen den Zeitbedarf der Prozedur, erhöhen indes die Unsicherheit bei der späteren Datenregression. Ein praktisch ermittelter, auf Erfahrungen basierter Wert liegt bei zehn Einzelmessungen und wurde bei allen im Weiteren diskutieren Kalibrierungen angewandt. Eine Optimierung der Stützpunktanzahl ist ein noch offener Punkt für künftige Untersuchungen und lässt auf eine Verringerung des notwendigen Zeitbedarfs hoffen.

5.3.3 Datenregression zur analytischen Beschreibung des Auslenkverhaltens

Ergebnis der vorangegangen Stützpunktaufnahme ist eine Sammlung von meist zehn Messpaaren (Adressspannung und Spiegelauslenkung) für jeden Einzelspiegel. Nun gilt es diesen großen Datensatz zu verkleinern und für die weitere Nutzung aufzubereiten. Der Schlüssel dazu liegt in der Abbildung der Messpunkte durch eine analytische Funktion. Wesentliche Aufgabe der Funktion ist die möglichst reale Approximation der Messungen. Eine zielgenaue Abbildung der Messungen durch eine Interpolationsfunktion ist nicht sinnvoll, mögliche Messungenauigkeiten würden ebenso exakt abgebildet, vor allem aber wären mehr Koeffizienten zur Beschreibung der Interpolationsfunktion notwendig.

Die Berechnung der Approximationsfunktion, genauer der Koeffizienten der Funktion, stellt eine klassische Optimierungs- oder Minimierungsaufgabe dar, die vor allem numerisch zu lösen ist. Ziel ist die Abstände der Messpunkte zur ermittelten Funktion möglichst minimal zu halten. Ein gängiges Annäherungsverfahren ist die Methode der kleinsten Quadrate, bei der die Summe der Quadratabweichungen an den Messpunkten das Minimierungskriterium ist.

Die genutzte Programmierumgebung Matlab bietet von Haus aus eine Reihe von Lösungsalgorithmen (Solver) für Optimierungsaufgaben an. Vor allem die Programmerweiterung "Optimization Toolbox" bietet eine Fülle von Lösungsalgorithmen für verschiedenste Problemstellungen, siehe nachfolgende Tabelle.

Constraint	Objective Type					
Туре	Linear	Quadratic	Least Squares	Smooth nonlinear	Nonsmooth	
None	n/a (<i>f</i> = const, or min = -∞)	quadprog	lsqcurvefit, Isqnonlin	fminsearch, fminunc	fminsearch	
Bound	linprog	quadprog	Isqcurvefit, Isqlin, Isqnonlin, Isqnonneg	fminbnd, fmincon, fseminf	fminbnd	
Linear	linprog	quadprog	lsqlin	fmincon, fseminf		
General smooth	fmincon	fmincon	fmincon	fmincon, fseminf		
Discrete	bintprog					

Tabelle 5.1: Matlab-Solver der Optimization-Toolbox [113]

Da diese Toolbox jedoch nicht zum Basis-Programminhalt gehört und nicht uneingeschränkt im Haus verfügbar war, wurde sich für einen alternativen Algorithmus entschieden. Die Wahl fiel auf die Funktion "nlinfit", einen nichtlinearen Datensolver

nach der Methode der kleinsten Quadrate. Der hinterlegte Lösungsalgorithmus stammt von Levenberg-Marquardt [114]. Die mathematischen Hintergründe sind in [115] erläutert.

Die verwendete Funktion nlinfit hat sich im Laufe der Kalibrieruntersuchungen als zuverlässige und schnell rechnende Methode etabliert. Eine Optimierung zum Beispiel hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit durch einen alternativen Algorithmus (mitgelieferte Matlabfunktion oder selbst implementierter Algorithmus) kann jederzeit untersucht werden, erscheint unter den derzeitigen Voraussetzungen dennoch nicht notwendig.

5.3.4 Auswahl einer Approximationsfunktion

Ebenso wie bei den Regressionsalgorithmen existiert eine Vielzahl möglicher Approximationsfunktionen zur analytischen Beschreibung der Auslenkkennlinie. Zu diesem Themenfeld sind bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt worden, die unter anderem in [108], [109] dokumentiert sind. Die Ergebnisse sind nur eingeschränkt auf die 64k-MMA-Kalibrierung übertragbar, da es sich um einen neuen Bauelementtyp mit geändertem mechanischem Aufbau und deutlich erweitertem Auslenkbereich handelt.

Die Approximationsfunktion soll hauptsächlich so gestaltet sein, dass sie folgende drei Anforderungen erfüllt:

- möglichst exakte Abbildung der Messpunkte,
- so wenig Koeffizienten wie nötig (um Speicherbedarf für Kalibrierkoeffizienten zu reduzieren),
- mathematisch und numerisch einfache Handhabbarkeit,
- einfache Spannungsermittlung / -berechnung bei gegebener Auslenkung.

In [108] wurde ein weiteres zentrales Thema bezüglich der Approximation dargelegt: Die notwendige analytische Umkehrbarkeit der Funktion. Im späteren Bauelementbetrieb ist es zwingend erforderlich zu einer gegebenen Auslenkung die zugehörige Spannung zu berechnen. Bezüglich eines typischen Kennlinienverlaufs d(U), wie ihn beispielsweise Gleichung (5.1) beschreibt, muss für die Gleichung eine eindeutige Umkehrfunktion existieren, andernfalls könnte die korrekte Spannung ausschließlich mit zeitaufwändigen numerischen Methoden bestimmt werden. Deutlich vorteilhafter erscheint deshalb die Approximation des inversen Kennlinienverlaufs U(d) (Abbildung 5.10). Mit einer Funktion dieser Form kann zu jeder Auslenkung die Adressspannung direkt und schnell berechnet werden. Alle im Folgenden getesteten Approximationsfunktionen beschreiben aufgrund dessen den inversen Kennlinienverlauf.



Abbildung 5.10: typischer Kennlinienverlauf d(U) und inverse Darstellung U(d) genutzt für Kalibrierung

Ausgehend von der dritten genannten Anforderung an die Approximationsfunktion, der numerisch einfachen Handhabbarkeit, bietet sich direkt die Funktionsklasse der Polynome an. Für erste Einschätzungen und Tests ist dieser Funktionstyp tatsächlich gut geeignet, da sie zusätzlich sehr schnell berechenbar und in Matlab bereits vorimplementiert ist. Ferner zeigten Untersuchungen in [108] jedoch erst eine hinreichende Approximationsgenauigkeit bei hohen Polynomgraden, damit einer Vielzahl notwendiger Koeffizienten, was der zweiten Anforderung an die Approximationsfunktion entgegensteht.

Mit zugeschnittenen Funktionen, die bereits einen ähnlichen charakteristischen Verlauf wie die inverse Kennlinie aufweisen, lassen sich Koeffizienten einsparen. Im Verlauf der Kalibrierexperimente kamen folgende Approximationsfunktionen zum Einsatz:

zugeschnittene
Polynomfunktion:
$$U(d) = U_0 + A * \sum_{i=1}^{n} \left[\overline{p_i} * \left(\frac{1}{f} * (d - d_0) \right)^i \right]$$
(5.2)

Torsionsspiegelfunktion: $U(d) = U_0 + \sqrt{\frac{f_0(d-d_0) * d^2}{\ln \frac{H-d}{H} + \frac{H}{H-d} - 1}}$ (5.3)

Ellipsenfunktion:
$$U(d) = U_0 + (U_{pull_in} - U_0) \sqrt{1 - \frac{(d_{pull_in} - d)^2}{(d_{pull_in} - d_0)^2}}$$
 (5.4)

Zugeschnittene Polynomfunktion:

Dieser Funktionstyp stellt eine Anpassung eines klassischen Polynoms dar. Setzt man die Koeffizienten $U_0 = d_0 = 0$ und A = f = 1 so erhält man die bekannte Form eines Polynoms. Entwickelt wurde die Funktion aus einer Taylorreihe, erweitert um einzelne Koeffizienten, um eine praktische Annäherung an den Kurvenverlauf zu realisieren. Hintergrund der Verwendung ist eine universelle Kennlinienabbildung in zwei Schritten: Mit den Koeffizienten p_i wird grob der Kurvenverlauf beschrieben, die restlichen vier Parameter U₀, d₀, A und f werden zur individuellen Anpassung der Einzelspiegel an den groben Kennlinienverlauf genutzt. Die Bestimmung der Parameter p_i erfolgt einmalig zu Beginn der Kalibrierung, sie repräsentieren einen gemittelten Kurvenverlauf aller Spiegel eines Bauelements und tragen die Bezeichnung globale Koeffizienten. Die beiden Offsetterme U₀ und d₀ sowie der Amplitudenterm A und der Frequenzterm f modulieren den mittleren Kennlinienverlauf für jeden Spiegel individuell, sodass die Messpunkte und die Funktion nahezu deckungsgleich gebracht werden. Sie werden auch als lokale Koeffizienten bezeichnet. Über den Polynomgrad n kann die Anpassungsfähigkeit der Polynomfunktion an den Kurvenverlauf variiert werden. Die nachfolgende Tabelle beschreibt experimentelle Untersuchungen zur Abweichung verschiedener Polynomfunktionen von einer experimentell ermittelten Auslenkkurve mit 20 Stützpunkten über einen Auslenkbereich von 0 bis 300 nm.

Grad Polynom	Max. ∆d in nm	Std. ∆d in nm	Max. ΔU in V	Std. ∆U in V
2	7,764	4,187	0,690	0,265
3	4,873	2,684	0,302	0,140
4	5,076	1,756	0,123	0,065
5	2,855	0,816	0,149	0,046
6	2,842	0,822	0,149	0,046
7	2,661	0,822	0,140	0,045
8	2,629	0,785	0,137	0,044
9	2,504	0,783	0,131	0,044

Tabelle 5.2: Abweichungen Polynomfunktion von 20 Messpunkten auf Auslenkkurve

Leicht ist den Daten zu entnehmen, dass ab dem Polynomgrad 5 kaum noch eine weitere Verbesserung in der Regressionsgenauigkeit zu beobachten ist. Aus Sicherheitsgründen und weil die globalen Koeffizienten nicht der Anforderung unterliegen, so wenig Koeffizienten wie nötig zu verwenden, wurde der Polynomgrad 6 für alle Kalibrierversuche mit der angepassten Polynomfunktion ausgewählt.

Torsionsspiegelfunktion:

Die aufgezeigte Torsionsspiegelfunktion (5.3) hat ihren Ursprung in Untersuchungen von [116]. Hintergrund ist der Versuch der physikalischen Beschreibung des elektromechanischen Übertragungsverhaltens eines Mikrokippspiegels. Die grobe Beschreibung des Kurvenverlaufs, den bei der angepassten Polynomfunktion die globalen Koeffizienten übernehmen, ist bei dieser Funktion bereits in der Funktionskonstruktion integriert. Vier Spiegelparameter bilden das individuelle Einzelverhalten ab. Neben wiederum zwei Offsettermen U₀ und d₀, die eine Kurvenverschiebung entlang der kartesischen Achsen realisieren, existierten die Parameter f₀ und H. Sie sind angelehnt an physikalische Spiegeleigenschaften, f₀ repräsentiert eine Pseudo-Spiegelfederkonstante, H den Abstand zwischen der Spiegelplatte und der Elektrode.
Ellipsenfunktion:

Aufgrund der Ähnlichkeit zur geometrischen Form der Ellipse kann die Ellipsenfunktion als heuristischer Ansatz zur Beschreibung des Kurvenverlaufs verstanden werden. Die dargestellte Form (5.4) repräsentiert bereits eine angepasste Ellipsengleichung, um den Pull-In-Punkt (Vgl. Kapitel 2.1.4.3) der Auslenkkurve besser vorherzusagen. U₀ und d₀ besitzen die gleichen Charakteristika wie bei den beiden bisher beschriebenen Approximationsfunktionen, U_{pull_in} und d_{pull_in} sind an den Scheitelpunkt der Ellipse angelehnt und charakterisieren die Stelle, bei dem der Spiegel in den Pull-In-Bereich der Kennlinie gerät.

Vergleich und Auswahl der Approximationsfunktion:

Das wesentliche gemeinsame Merkmal aller drei Funktionen stellen die vier Koeffizienten zur individuellen Spiegelbeschreibung dar. Zwei der vier Parameter weisen sogar die identische Aufgabe auf, eine Verschiebung der Kennlinie entlang der beiden Koordinatenachsen zu realisieren, um beispielsweise Vorauslenkungen zu kompensieren. Folgerichtig tragen sie die gleichen Namen U₀ und d₀.

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der angepassten Polynomfunktion zu den beiden übrigen Funktionen stellt das Vorhandensein von lokalen und globalen Koeffizienten dar. Dadurch ist die Funktionsgruppe flexibler anpassbar an das charakteristische MMA-Verhalten, was je nach Sichtweise sowohl als Vor-, gleichwohl auch als Nachteil ausgelegt werden kann. In jedem Fall ist durch die zusätzliche Ermittlung der globalen Parameter ein erhöhter Mess- und Rechenbedarf während der Kalibrierung notwendig. Die Torsionsspiegelfunktion zeichnet sich vor allem durch ihre Nähe zur physikalischen Beschreibung des elektromechanischen Übertragungsverhaltens aus, was bis heute nicht vollständig analytisch realisiert ist. Das größte Verdienst der Ellipsenfunktion ist die näherungsweise Vorhersagbarkeit der Lage des Pull-In-Punktes, der im Laufe der Charakterisierung und der Anwendung in jedem Fall nicht überschritten werden darf.

Entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Kalibrierfunktion war jedoch ein anderes: Die numerische Handhabbarkeit der Funktion. Aufgrund der Wurzelausdrücke bei der Torsionsspiegel- und Ellipsenfunktion waren während der numerischen Koeffizientenermittlung teilweise negative Werte im Wurzelausdruck aufgetreten, die zu komplexen Funktionswerten führten. Sobald dieser Fall einmalig eintrat rechnete der Matlab-Solver in den darauffolgenden Regressionsschritten mit komplexen Werten weiter, auch wenn eine rein reelle Lösung vorhanden wäre. Der verwendete Matlab-Solver "nlinfit" bietet keine Möglichkeit, zum Beispiel durch Setzen von Randbedingungen, diesen Zustand zuverlässig zu vermeiden. Aus diesem Grund fiel die Wahl der Approximationsfunktion auf die einzige Funktion ohne Wurzelausdruck, die zugeschnittene Polynomfunktion.

5.3.5 Vollständige Abrasterung des MMA-Bauelements

Eingangs beschrieben wurde die Größe eines WLI-Messfeldes, welches ca. 6000 Einzelspiegel gleichzeitig vermessen kann. Zur vollständigen Kalibrierung eines MMAs mit ca. 65000 Spiegeln ist demzufolge eine Verfahrprozedur zur Bewegung des MMAs bezüglich des Mikroskopmesskopfes unerlässlich. Das verwendete WLI vom Typ Zygo verfügt über einen fernsteuerbaren motorisierten Kreuztisch unter der Objekthalterung, der eine automatisierte Bewegung des Bauelements ermöglicht. Nach einer Initialisierungsprozedur, bei der die Lage der Mikrospiegel bezüglich des Kreuztisches vermessen wird, kann im Anschluss jede beliebige Spiegelposition im Array programmatisch angefahren werden.

Im Zuge der Kalibrierung wird die Spiegeloberfläche mäanderförmig abgerastert und die einzelnen Messfelder zu einer großen Matrix zusammengesetzt, bis alle Mikrospiegel vermessen wurden. Die Abrasterung verläuft völlig autonom, wenn die MMAund Messfeldgrößen bekannt sind. Für die 64k-MMA ergeben sich bei 256 x 256 MMA-Spiegeln und 78 x 78 Spiegel im Messfeld 4 x 4 = 16 Messfelder zur kompletten Charakterisierung.

5.3.6 Zusammenfassung der Kalibrierprozedur

Die beschriebenen Teilschritte der Kalibrierprozedur sind in Abbildung 5.11 übersichtlich dargestellt.



Abbildung 5.11: Ablaufschema einer vollständigen MMA-Kalibrierung

Der gesamte Ablauf ist in der Programmierumgebung Matlab implementiert und beinhaltet die vollständige Kontrolle und Synchronisation des MMAs und des Weißlichtinterferometers.

Jede MMA-Charakterisierung am WLI setzt zunächst eine Prozedur zur Verknüpfung von Kreuztischpositionen zu Spiegelkoordinaten voraus, um stets über die aktuell im Messfeld liegenden Spiegelkoordinaten informiert zu sein. Die Prozedur trägt den Namen "Initialisierung des Kreuztisches". Es folgt die Bestimmung des Arbeitspunktes, der globalen Spannungswerte für die Spiegel- und Rückstellelektrode, die im weiteren Verlauf der Kalibrierung nicht mehr abgeändert werden. Obwohl die Werte für alle Spiegel im Array gelten, erfolgt die Ermittlung an nur einem Messfeld. An zwei weiteren Messfeldern werden die Korrektheit lediglich überprüft und die Daten gegebenenfalls angepasst.

Dem angeschlossen ist eine Prozedur zur Bestimmung der globalen Kalibrierkoeffizienten. Auch hier wird die Ermittlung an nur einem Messfeld in der MMA-Mitte vorgenommen, obwohl die Koeffizienten für alle Spiegel im Array gelten. Konkret dienen eine Vielzahl von Messpaaren (meist 20 Paar) verteilt auf den Auslenkkennlinien aller Spiegel im Messfeld als Grundlage zur Berechnung einer repräsentativen mittleren Auslenkkurve für das ganze Bauelement. An die bestimmte mittlere Kennlinie wird eine Ausgleichsfunktion (Polynomfunktion 6. Grades) angenähert, die ermittelten Polynomkoeffizienten entsprechen den sieben globalen Kalibrierkoeffizienten.

Im Anschluss beginnt die Vermessung aller Einzelspiegel. Pro Messfeld wird das Auslenkverhalten typischerweise durch zehn Einzelmessungen bei unterschiedlichen Adressspannungen abgebildet. Die folgende nichtlineare Datenregression durch die "nlinfit" zur der Matlabfunktion Bestimmung vier Spiegelkoeffizienten der Kalibrierfunktion (5.2) benötigt für ein Messfeld (ca. 4000 Spiegel werden parallel kalibriert) in etwa einen Zeitbedarf von 30 Sekunden. Ist dieser Ablauf für ein Messfeld abgeschlossen wird direkt das nächste angefahren und dort die Prozedur wiederholt. In mäanderförmigen Bahnen wird auf diese Weise das komplette MMA abgerastert bis alle Spiegel vermessen wurden.

Für jedes Messfeld werden nur die ermittelten Koeffizienten der kalibrierten Spiegel in einer Datenmatrix zwischengespeichert. Ist das gesamte Bauelement abgerastert und alle Mikrospiegel charakterisiert, erfolgt die Speicherung aller Koeffizienten in eine Kalibrier- beziehungsweise Koeffizientendatei. Neben den lokalen Kalibrierkoeffizienten enthält die Kalibrierdatei zudem die globalen Koeffizienten sowie die Arbeitspunktspannungen. Gestaltet ist die Datei in einem universellen Datenformat, sodass ein einfaches Einlesen auf verschiedenen Plattformen problemlos möglich ist. Die Kalibrierkoeffizienten sind nicht als ASCII-Zeichenkette hinterlegt, sondern werden in ein binäres Datenformat umgewandelt. Dies verringert erheblich den notwendigen Speicherbedarf der Kalibrierdatei. Alles in allem besitzt eine 64k-Kalibrierdatei eine Größe von ca. 1 MByte.

Der komplette beschriebene Kalibrieralgorithmus kann vollständig autonom ablaufen. Nur die Kreuztischinitialisierung benötigt noch eine manuelle Zuordnung der Spiegelkoordinaten zu den Tischkoordinaten. In Summe ist ein Zeitbedarf von ca. 45 Minuten bei den genannten Stützpunktzahlen zu planen, bis das 64k-MMA vollständig kalibriert ist.

5.4 Ergebnisse der Kalibrierung

Ziel der profilometrischen MMA-Kalibrierung war die exakte Auslenkung aller 65536 Mikrospiegel im Array innerhalb des Anwendungsarbeitsbereichs zwischen 0 und 250 nm. Anhand von Kontrollmessungen am gleichen für die Kalibrierung genutzten Weißlichtinterferometer-Systemaufbau werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Kalibrierung im kompletten relevanten Auslenkungsbereich untersucht und teilweise am unkalibrierten Ausgangszustand gespiegelt.

Der Ablauf der Verarbeitung der Ergebnisse entspricht dem in Kapitel 4.4 und Abbildung 4.6 beschriebenen Vorgang, mit nur einem Unterschied: Die Umrechnung von Intensitätsdaten in Auslenkungswerte entfällt. Ausgangspunkt sind direkte Vorgaben für Zielauslenkungen. Nachdem einmalig die Kalibrierdatei ins System geladen ist, liegen die Kalibrierkoeffizienten erneut in Matrixform für weitere Verrechnungsschritte vor. Die Berechnung der individuellen Spiegelspannungen erfolgt durch einfaches Einsetzen der Spiegelkoeffizienten und der Zielauslenkung in Gleichung (5.2), wobei nunmehr der approximierte inverse Kennlinienverlauf die Berechnung wesentlich vereinfacht.

Zunächst liegt das Augenmerk auf der korrekten Nachbildung des applikationsbedingten Auslenkbereichs von 0 bis 250 nm. In 50 nm-Auslenkungsschritten wurden Kontrollmessungen mit kalibrierten Spiegeln innerhalb eines Messfeldes vorgenommen. Die gemessenen mittleren Auslenkungen aller ca. 6000 Spiegel im Messfeld sowie deren Abweichung vom Sollwert zeigt Abbildung 5.12.



Abbildung 5.12: Überprüfung der Kalibriergenauigkeit bei verschiedenen Zielauslenkungen (Daten berechnet aus ca. 6000 Mikrospiegel) [57]

Die Grafik auf der linken Seite illustriert die gemessenen mittleren Auslenkungen über dem Zielwert. Unterschiede beziehungsweise Abweichungen beider Größen sind so gering, dass eine zweite gezoomte Darstellung notwendig wird (rechte Seite). Das rechte Diagramm veranschaulicht die gemessenen Auslenkungsdifferenzen (Istwert -Sollwert) in Form von Mittelwert und Streuung über den jeweiligen Zielauslenkungen. Hier wird deutlich ersichtlich, warum in der linken Grafik keine Abweichungen erkenntlich sind, die mittleren gemessen Auslenkungen liegen bei jeder Kontrollmessung weniger als 0,5 nm neben dem Zielwert. Die dargestellte Streuung komplettiert das hervorragende Ergebnis. Die schwarzen Balken repräsentieren ± der dreifachen Standardabweichung, somit liegen, ausgehend von einer Normalverteilung der gemessenen Auslenkungen, mindestens 99,7 % aller Spiegel innerhalb von ± 3 nm vom Zielwert entfernt, teilweise sogar deutlich darunter. Die näherungsweise Normalverteilung der Spiegelauslenkungen zeigt Abbildung 5.13. Das Kalibrierziel für die Kontrastwerterzeugung (Auslenkgenauigkeit von $\lambda/100$) ist somit eindeutig erfüllt. Selbst das Ziel $\lambda/400$ für die Graustufendarstellung ist bei berechneten Standardabweichungen kleiner 1 nm zumindest für den sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich deutlich erfüllt, bei UV-Beleuchtung bewegen sich die Messwerte um den Zielwert (σ_{Ziel} = 248 nm / 400 = 0,62 nm; $\sigma_{Messung}$ = 0,47 nm bis 0,82 nm (bei $d_{Ziel} = 100 \text{ nm bzw. } d_{Ziel} = 50 \text{ nm})$).

Ergänzend zu den gezeigten Messdaten ist vor allem ein direkter Vergleich von unkalibriertem zu kalibriertem MMA-Zustand von Interesse. An dieser Stelle sei noch einmal angemerkt, dass ohne MMA-Kalibrierung beziehungsweise ohne detaillierte Vorkenntnisse des MMA-Auslenkverhaltens unkalibrierte Auslenkzustände nahe einer Zielauslenkung, jedoch jenseits der Nullauslenkung gar nicht einstellbar sind. Es ist beispielhaft ohne Kalibrierung völlig unklar, welche Adressspannung die Spiegel benötigen, um im Mittel eine Auslenkung von 150 nm einzunehmen. Je nach MMA-Typ können Spannungswerte zwischen 10 und 20 V zu diesem Ziel führen. Erst eine iterative Näherung oder detailliertere Vermessung des Bauelements (mittlere Kennlinie oder komplette MMA-Kalibrierung) führt zu den notwendigen Werten.

Abbildung 5.13 dargestellte Vergleich zeigt farblich Der in illustriert die Spiegelauslenkungen im gesamten Array vom kalibrierten und unkalibrierten Bauelement bei einer Zielauslenkung von 250 nm, ausreichend zur Modulation von infraroten Beleuchtungsquellen mit λ = 1000 nm. Gut ist in den beiden oberen Grafiken anhand der x- und y-Achse die MMA-Größe von 256 x 256 Einzelspiegeln erkennbar, die Farbskala beschreibt die Spiegelauslenkungen in nm. Praktisch gemessen wurde zuerst der kalibrierte Zustand mit mäanderförmiger Bauelementabrasterung analog zur Kalibrierung, nachdem für jeden Spiegel individuell die Adressspannung berechnet wurde. Durch Mittelwertbildung aus allen Adressspannungen konnte ein identischer Spannungswert direkt im Anschluss für alle Spiegel verwendet werden, dies führt zu dem unkalibrierten Zustand auf der linken Seite. Deutlich erkennbar durch die farbliche Verteilung ist die extreme Änderung der Auslenkungshomogenität zwischen beiden Zuständen. Ursprünglich sind eine globale Verteilung und lokale Streuungen der Auslenkungen zu beobachten. Der Übergang zu kalibrierten Spiegeln entfernt fast vollständig sämtliche Verteilungen durch die passende Ansteuerung mit individuellen Spiegelspannungen. Die untere Histogrammdarstellung unterstreicht den erzielten Effekt. Die absolute Streuung der gemessenen Auslenkungen verringert sich um einen Faktor größer 10. Die verbliebene Standardabweichung der gemessenen Auslenkungen von σ_d = 1,68 nm liegt zudem klar unterhalb des Kalibrierziels von $\lambda/400$ = 2,5 nm.



Abbildung 5.13: Vergleich gemessene unkalibrierte und kalibrierte MMA-Spiegelauslenkungen bei einer Zielauslenkung von 250 nm [57]

Alle dargestellten Messungen sind repräsentative Ergebnisse der Kalibrierung durchgeführt an je einem 64k-MMA, konnten jedoch an mehreren anderen Bauelementen reproduziert werden.

Ausgehend von den gezeigten Messergebnissen ist die Wirksamkeit der Kalibrierung eindeutig belegt. Ferner steht die Erkenntnis, dass der profilometrische Kalibrieraufbau gleichfalls zur Kontrolle der Ergebnisse problemlos einsetzbar ist. Die Einstellung jeder gewünschten Auslenkung in einem sehr breiten Bereich ist individuell für jeden Spiegel mit nur geringer Abweichung vom Zielwert nachweislich realisierbar. Die formulierten, die Auslenkung betreffenden, Kalibrierziele werden klar erreicht und teilweise deutlich übertroffen.

6 Validierung der optischen MEMS-Eigenschaften mit multispektraler optischer Charakterisierung

Neben der profilometrischen MMA-Charakterisierung wird in diesem Kapitel die Verifizierung der Kalibrierung in einem Projektionsaufbau anhand der optischen MMA-Abbildungseigenschaften beschrieben. Ein solcher Aufbau ist an die Anwendung der MMAs angelehnt, bei der letztendlich die Güte der generierten Projektionsmuster über einen Einsatz der Bauelemente entscheidet. Eine Charakterisierungseinheit zur Analyse der erzeugten Muster, mit und ohne angewandter Kalibrierung, ist daher notwendiger und integraler Bestandteil der MMA-Bauelemententwicklung. Dieses gibt Kapitel eine Übersicht über die Systementwicklung des optischen Charakterisierungsmessplatzes. Neben dem Messplatzdesign sind vor allem die angeknüpften Ergebnisse von besonderem Interesse, sollen sie doch die Wirkungsweise der Kalibrierung unterstreichen. Angelehnt an die Kalibrierziele sind Kontrastmessungen sowie die detailgetreue vorzugsweise Erzeugung von Grauwertmustern in diesem Kapitel aufgeführt.

Obwohl auch die Weißlichtinterferometrie exakt betrachtet eine optische MEMS-Charakterisierungsmethode ist, unterscheidet sich die hiesige Methode doch davon. Die direkte Vermessuna einzelner grundlegend mechanischer Spiegelverkippungen ist nicht mehr möglich, nur indirekt ist eine Rückrechnung auf die Werte näherungsweise denkbar. Stattdessen werden die Fourier-optisch projizierten Intensitätsbilder mit einem Kamerasystem aufgenommen und softwareseitig ausgewertet. Zahlreiche optische Effekte, die unabhängig von der reinen Spiegelverkippung sind, beeinflussen das erzeugte Bild und sollen ebenso die Berücksichtigung finden. Dennoch haben WLI-charakterisierten Spiegelauslenkungen den größten Einfluss auf die Beleuchtungsmuster, daher stellt die optische Charakterisierung eine zweckmäßige Methode zur Beurteilung der profilometrischen Kalibrierung dar.

Die nachfolgend dargestellte Messsystementwicklung wurde bereits detailreich in [117] beschrieben. Explizit erwähnt sei an dieser Stelle, dass dank der Unterstützung der beteiligten ersten fünf Kollegen im optischen Designprozess, der Fokus des Verfassers dieser Arbeit auf die Auswahl der opto-mechanischen Systemkomponenten, den Aufbau des Messplatzes mit der Systemsteuerung, inklusive der Überprüfung und gegebenenfalls Korrektur der optischen Konzepte sowie die Durchführung aller weiteren experimentellen Arbeiten gelegt werden konnte.

6.1 Charakterisierungskonzept

Ausgehend von den Ausführungen in Abschnitt 3.2 "Charakterisierung der optischen Funktionalität" wird ein Aufbau erarbeitet, der folgende voneinander unabhängigen Aufgaben abdeckt und Operationsmodi realisiert:

- detaillierte Aufnahme und Analyse von programmierten MMA-Beleuchtungsmustern
- multispektrale Graubild- und Kontrastmessungen innerhalb des Wellenlängenbereichs von 250 nm bis 800 nm
- wahlweise Aufnahme der Fourier- oder Bildebene
- Analyse der MMA-Muster bei definierten teilweise kohärenten oder inkohärenten Beleuchtungs-/Abbildungsbedingungen
- variable zeitliche Auflösung der dynamischen MMA-Abbildungsleistung.

Alle Messmodi korrespondieren mit den Anforderungen der Mikroskopanwendung.

Der letztgenannte Punkt ist dank der breiten Funktionsvielfalt der MMA-Steuerungselektronik (siehe Abschnitt 2.1.4.5) relativ einfach umzusetzen. Ähnlich dem WLI-Messplatz ist die Synchronisierung aus MMA, Beleuchtungsquelle und Detektor (Kamera) mit Software und wenigen Hardwareverbindungen zur Übertragung von Triggersignalen notwendig. Ebenso analog zum WLI-Messplatz stellt ein Computer als zentrale Steuereinheit das Kernelement des Messsystems dar. Detaillierte Ausführungen hierzu folgen in Abschnitt 6.3.

Wesentlich komplexer ist die Fragestellung des optischen Systemkonzepts. Besonders der große spektrale Arbeitsbereich der diffraktiven Bauelemente stellt eine Herausforderung dar. Ein transmissiver Systemaufbau führt automatisch aufgrund der chromatischen Aberration an Linsen zu unerwünschten Abbildungsfehlern oder alternativ sehr komplexen Linsensystemen. Reflektive Systeme können in diesem Punkt Abhilfe schaffen, ziehen hingegen einen deutlich erhöhten Platzbedarf nach sich. Die notwendigen Einzelschritte und –komponenten in der optischen Systementwicklung sind detailliert im nachfolgenden Abschnitt 6.2 dargestellt.

6.2 Optisches Systemdesign

Das diffraktive Abbildungsprinzip der MMAs definiert wesentliche Grenzen für einen geeigneten Charakterisierungsaufbau. Dies beinhaltet vor allem folgende Punkte:

- eine angemessene Beleuchtungsdivergenz, die die Trennung der MMA-Beugungsordnungen in der Fourierebene zur Filterung ermöglicht
- MMA-Abbildung mit Tiefpassfilterung, um die phasenmodulierte Beleuchtungswelle am MMA in Intensitätsmuster in der Bild- bzw. Kameraebene zu überführen
- homogene MMA-Beleuchtung zur unverfälschten Musteranalyse.

Mit monochromatischer Laserbeleuchtung ist ein direktes Systemdesign für alle genannten Punkte relativ problemlos möglich. Wesentliche Funktionsgruppen können dabei wie folgt aufgebaut werden:

- Beleuchtungsstrahlhomogenisierung durch Mikrolinsenarrays (fly's eye condensor), rotierendem Diffusor oder Stabintegrator [118–124]
- Köhlersches Beleuchtungssystem für Divergenz- und Aperturkontrolle [125]
- Fourierfilter durch Blende zur MMA-Abbildung [64].

Eine vereinfachte Darstellung des monochromatischen Systemlayouts mit den genannten Einzelkomponenten zeigt die nachfolgende Abbildung.



Abbildung 6.1: Vereinfachter Systemaufbau für monochromatische MMA-Charakterisierung [117]

Ziel der hiesigen Messplatzentwicklung ist die Überführung der Funktionsgruppen in ein achromatisches Layout. Wie bereits angesprochen existieren zwei grundverschiedene Ansätze zur Realisierung:

- ein transmissiver Aufbau mit chromatisch korrigierten Linsensystemen
- ein reflektiver Aufbau mit breitbandig reflektierenden Spiegeln.

Der erhöhte Platzbedarf im reflektiven Ansatz stellt kein prinzipielles Problem dar, der notwendige Bedarf ist im Vorfeld einfach bestimmbar und trotzdem überschaubar. Neben den Aufwand- und Kostenfragen im transmissiven Linsenlayout drängt sich eine weitere Problemstellung auf: Für den UV-Wellenlängenbereich existiert deutlich weniger transmissives Linsenmaterial. Gerade für die Korrektur chromatischer Abbildungsfehler werden hingegen häufig eine Vielzahl verschiedener Kombinationen von Materialien genutzt. Die aufgeführten Gründe führten zur Entscheidung für die hauptsächliche Verwendung von reflektiven optischen Einzelkomponenten. Weitere Vorteile dieser Methode stellen die spätere mögliche Erweiterung des spektralen Arbeitsbereichs sowie ein problemloser Austausch einzelner Laserquellen dar.

Die Entwicklung des kompletten reflektiven Systemlayouts anhand der einzelnen Funktionsgruppen ist in den nachfolgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.2.1 Auswahl der Beleuchtungsquellen

Entsprechend den Anforderungen an die Charakterisierungseinheit und das MMA galt es geeignete Beleuchtungsquellen zu finden, die folgenden Eigenschaften genügen:

- Abdeckung des Spektralbereichs von λ = 250 nm bis 800 nm
- spektrale Breite einzelner Quelle möglichst klein (< 1 nm)
- möglichst kurze Kohärenzlängen (< 500 μm)
- geringe Beleuchtungsdivergenz (NA < 0,025)
- Modulierbarkeit mit 100 kHz und 100 % Auslöschungsverhältnis
- Berücksichtigung Fragen der Lasersicherheit (bevorzugt Laserklassen 1 und 2).

Betrachtet man allein die Punkte "kleine spektrale Breite" und "kurze Kohärenzlängen", so ist sofort ersichtlich, dass die Anforderungen teilweise im Widerspruch stehen und eine alle Punkte einhundertprozentig erfüllende Lösung nicht zu finden ist. Kompromisse sind notwendig und deren Auswirkungen auf die späteren MMA-Messungen werden abgewogen.

Zunächst in Betrachtung geriet ein sogenannter Supercontinuum-Laser, eine sehr leistungsstarke Weißlichtquelle im sichtbaren bis infraroten Spektralbereich. Das Ausgabespektrum ist durch Filter auf einzelne Laserlinien geringer Breite variabel einstellbar. Letztendlich sprachen Fragen der Lasersicherheit, der zu geringen Ausgangsleistung des gefilterten Spektrums sowie die zu große spektrale Breite einzelner Laserlinien gegen diesen Lasertyp.

Alternativ dazu blieb der Aufbau mit mehreren Einzelquellen, die nahezu gleichmäßig über den spektralen Zielbereich verteilt sind. Neben einer UV-und IR-Quelle ist eine begrenzte Zahl weiterer Laser im sichtbaren Spektralbereich notwendig. Letztendlich fiel nach intensiver Evaluierung die Wahl auf folgende fünf Laserquellen: UV-Excimer-Laser von TUI-Industrials, drei Laserdioden von Schäfter + Kirchhoff sowie ein Festkörperlaser von LaserComponents. Die Quelleigenschaften sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Lasertyp	Excimer	Laserdiode	Festkörperl.	Laserdiode	Laserdiode		
Wellenlänge	248 nm	405 nm	532 nm	680 nm	830 nm		
spektrale Breite	< 1 nm	ca. 1 nm	ca. 1,5 nm	ca. 2 nm	ca. 4 nm		
Kohärenzlänge	300 x 500 µm	< 250 µm	> 1 cm	< 250 µm	< 250 µm		
Divergenz	1 x 2 mrad		< 1 mrad				
Modulierbarkeit	1 kHz	100 kHz	3 kHz	100 kHz	100 kHz		
Ausgangsleistung	> 100 mW	1 mW	1 mW	1 mW	0,7 mW		
Laserklasse	4	2	2	2	1		

Tabelle 6.1: Laserquellen im optischen Charakterisierungssystem

Vor allem der Excimer-Laser hebt sich in dieser Auflistung durch seine scheinbar geringe Modulationsfrequenz und hohe Ausgangsleistung und damit Laserklasse 4 von den anderen Lasern und den Spezifikationen ab. Zumindest die Frequenzangabe von 1 kHz trügt, die Pulsdauer eines Laserpulses beträgt nur wenige Nanosekunden und erfüllt damit die Anforderungen zur MMA-Beleuchtung vollends. Der grüne Festkörperlaser mit 3 kHz Modulationsrate kann dagegen in Kombination mit einem MMA nur im kontinuierlichen Modus (cw-Modus) genutzt werden, die Anstiegs- und Abfallflanken der Laseremission im gepulsten Betrieb sind deutlich länger als die anvisierten MMA-Spiegelauslenkzeiten. Wenngleich nicht alle Laserquellen den Spezifikationen vollkommen genügen, so ist doch eine weitreichende MMA-Charakterisierung im multispektralen Bereich sichergestellt.

Die Fragestellung der Lasersicherheit war bei der Auswahl der Komponenten ein zusätzliches zentrales Thema. Das Tragen einer Schutzbrille, die alle verwendeten Wellenlängen blockt, existiert nicht und wäre zudem unzweckmäßig, da kein sichtbarer Spektralbereich mehr das Auge erreichen würde. Da jedoch bei Quellen der Laserklasse 1 und 2 ein Arbeiten ohne Schutzbrille zulässig ist, war ein Auswahlkriterium für die Laser im sichtbaren und IR-Spektralbereich gefunden. Laserklasse 1 und 2 zieht allerdings eine Ausgangsleistungsbeschränkung von 1 mW nach sich, was auf das weitere optische Systemdesign erheblichen Einfluss nimmt. Damit noch genügend Strahlungsenergie die Kamera erreicht, müssen alle weiteren optischen Komponenten auf bestmögliche Energieeffizienz optimiert werden. Im weiteren Verlauf des Systemdesigns wird immer wieder Bezug auf diesen Punkt genommen.

6.2.2 Laserstrahlkombinier-Einheit

Die Aufgabe dieser Funktionsgruppe umfasst die Vereinigung oder geometrische Überlagerung aller fünf Quellstrahlen, damit nur ein Strahlengang alle weiteren Baugruppen im System passieren muss. Besonders in Projektionsaufgaben werden häufig spezielle Prismen verwendet, um die drei Grundfarben rot, grün und blau zu überlagern [35], [124]. Die hiesige Aufgabe umfasst allerdings zwei zusätzliche Wellenlängen im nichtsichtbaren Spektralbereich, was eine individuelle Lösung verlangt. Realisiert wurde letztendlich eine sogenannte Einkoppelkaskade aus dichroitischen Spiegeln zur Überlagerung aller Einzelstrahlen zu einem gemeinsamen Strahlbündel. Die Anordnung der Kaskade mit den Laserquellen skizziert Abbildung 6.2 oben. Jedes Kaskadenelement verfügt über eine spezielle Interferenzschicht zur Reflexion einer definierten Wellenlänge und Transmission der bereits eingekoppelten Strahlen. Das untenstehende Diagramm verdeutlicht den hohen Energiedurchsatz um 97 % aller Quellen.



Abbildung 6.2: Einkoppelkaskade aus beschichteten Spiegeln zur Überlagerung der einzelnen Laserstrahlen. Im unteren Diagramm ist die gemessene Energie am Ende der Kaskade relativ zu den fünf Ausgangswerten des jeweiligen Lasers aufgetragen zur Verdeutlichung der hohen Effizienz der Baugruppe. [117]

6.2.3 Strahlhomogenisierung und Divergenzkontrolle

Dieses Kapitel beschreibt das Design der Strahlformung von der Laserquelle bis zum MMA für alle eingesetzten Quellen. Die Spezifikationen gibt das MMA selbst durch sein Fourier-optisches Abbildungsprinzip vor. Zwei Parameter sind für das Design von entscheidender Bedeutung: Die MMA-Beleuchtung soll möglichst homogen und unter bestimmten Divergenzbedingungen erfolgen.

Die Strahlhomogenisierung von Lasern stellt den ersten Untersuchungspunkt dar, die auf verschiedenen optischen Wegen realisiert werden kann, so zum Beispiel durch Mikrolinsenarrays [119–123], einen Integrationsstab [124], statische oder dynamische Diffusoren [120], [122], [123], diffraktive Elemente [126] oder Wellenleiterbündel [127]. Aufgabe ist jeweils aus einem beliebigen Ausgangsstrahlprofil (oft kreisförmiges Gaußprofil) ein definiertes Profil meist in Rechteckform (flat-top oder top-hat profile) abzuändern (Abbildung 6.3). Das Rechteckprofil verfügt über eine größere Fläche nahezu identischer Intensitätsverteilung.



Abbildung 6.3: Strahlformung durch Homogenisierereinheit; Beliebige Ausgangsprofile werden zu definierten Rechteckprofilen umgewandelt

Die Wahl der geeigneten Umformmethode hängt von verschiedensten Faktoren wie zum Beispiel physikalischen Parametern der Laserquelle, dem Zielprofil und dem vorhandenen Bauraum ab. Kriterien für die Auswahl der optimalen Methode waren

- ein achromatisches Homogenisierungsprinzip für mehrerer Laserquellen mit unterschiedlichen Strahlformen
- die nachgewiesene Funktionalität für DUV-Wellenlängen.

Während für das erste Kriterium noch mehrere der genannten Methoden in Frage kommen, favorisiert das zweite Kriterium die Methode der Mikrolinsenarrays (in Kombination mit Diffusoren), schließlich existieren schon Erfahrungen bei Excimer-Wellenlängen [120] bis hinunter zu 157 nm [123]. Den typischen in der Literatur oft verzeichneten Aufbau eines Homogenisierers mit Mikrolinsenarrays skizziert Abbildung 6.4. Die Anordnung trägt verschiedene Namen, so zum Beispiel abbildender Homogenisierer, Fliegenaugenkondensor (fly's eye condenser) oder Köhlerintegrator. Die Linsenarrays mit einem Rasterabstand im Millimeterbereich zerlegen den Ausgangsstrahl und wirken wir zahlreiche Einzelquellen. Die Feldlinse fokussiert alle Einzelstrahlbündel in die Bildebene, wo sie sich überlagern und im Idealfall das Rechteckprofil mit sehr homogener Intensitätsverteilung erzeugen. Da das entstehende Profil durch die reine Überdeckung der Einzelstrahlen gekennzeichnet wird, ist es umso homogener, je mehr Mikrolinsen in die Überlagerung einbezogen werden.



Abbildung 6.4: Abbildender Homogenisierer bestehend aus zwei Linsenarrays und einer Feldlinse

Polychromatisch betrieben würde der abbildende Homogenisierer aus Linsenarrays chromatische Fehler erzeugen, was die Homogenität des Strahlflecks in der Bildebene negativ beeinflusst. Ein chromatisch unabhängiges reflektierendes Pendant dazu besteht aus sogenannten Facettenarrays, die durch eine Vielzahl gitterförmig angeordneter sphärischer Mikrospiegel gekennzeichnet sind. Wird zudem die Feldlinse durch einen sphärischen Spiegel ausgetauscht, entsteht ein wie folgt skizzierter vollständig reflektiver Aufbau:



Abbildung 6.5: Reflektiver Aufbau eines abbildenden Homogenisierers bestehend aus zwei Facettenspiegelarrays und einem sphärischen Spiegel [117]

Problematisch für alle abbildenden Homogenisiereranordnungen ist stark kohärente Ausgangsstrahlung, wie sie typischerweise von Lasern emittiert wird. Das Linsenbeziehungsweise Facettenarray sorgt, wenn die Quellkohärenzlänge größer dem Arrayraster ist, für ungewünschte Interferenzeffekte in der Bildebene. Es existieren verschiedene Strategien zur Reduzierung oder gar Verhinderung der Interferenzmuster in der Bildebene. So können beispielsweise vor der Einheit rotierende Diffusoren [122], [123], [125] oder Linsenarrays [124] zur zeitlichen Integration der variierenden Interferenzmuster oder phasenverzögernde Bauelemente (Stufenelemente) [121], [128] platziert werden. Die für diese Arbeit genutzte kohärenzverringernde Methode basiert auf einem rotierenden Diffusor, wohl wissend, dass erhebliche Energie durch die Lichtstreuung verloren geht. Praktische Experimente zeigten dagegen, dass alle übrigen untersuchten Methoden (rotierendes Linsenarray, Stufenelemente, auch in Kombination) für die hinreichende Intensitätshomogenisierung aller Laserquellen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften noch nicht vollständig ausgereift sind und somit für den Einsatz zunächst nicht in Frage kamen.

Neben der Beleuchtungsstrahlhomogenität soll die Divergenz der Strahlung mit dieser optischen Funktionsgruppe auf geeignete Weise eingestellt werden. Die zulässige maximale Beleuchtungsdivergenz des MMAs errechnet sich vor allem aus der Gittergleichung für optische Gitter (6.1), wobei α den Ablenkwinkel, λ die Wellenlänge, p die Gitterkonstante und n die ganzzahligen Beugungsordnungen beschreibt. Setzt man k = 1 erhält man den Winkel zwischen 0. und 1. Beugungsordnung, der

gleichzeitig den maximalen MMA-Beleuchtungswinkel kennzeichnet, um im abbildenden Strahlengang die Beugungsordnungen noch sauber trennen zu können.

$$\sin \alpha = \frac{\lambda^* k}{p} \tag{6.1}$$

Ein probates Mittel zur Divergenzkontrolle, vor allem in der Mikroskopie weit verbreitet, ist ein Köhlersches Beleuchtungssystem [129]. Typischerweise besteht ein solches System aus zwei Linsen in konfokaler Anordnung, ergänzt um zwei Blenden zur Einstellung der Leuchtfleckgröße (Leuchtfeldblende) und Divergenz (Aperturblende).

Für das Design der Beleuchtungsfunktionsgruppe im Charakterisierungsaufbau kann ausgenutzt werden, dass in einem abbildenden Homogenisierer praktisch ein Köhlersches Beleuchtungssystem enthalten ist [122], [125]. Jede Facette wirkt in Kombination mit dem sphärischen integrierenden Spiegel (beziehungsweise Mikrolinse in Kombination mit Feldlinse) als einzelnes Köhlersches Beleuchtungssystem direkt nebeneinander. Das erste Linsen- bzw. Facettenarray unterteilt das einfallende Licht in eine Vielzahl einzelner Lichtquellen. Zusätzlich fungiert es durch sein Raster als Array von Leuchtfeldblenden und bestimmt die Größe und Form des Profils in der Bildebene. Das zweite Linsen- bzw. Facettenarray wird nahe dem Fokus des ersten Arrays platziert und wirkt als Array von Aperturblenden.

Ein zusätzlicher Köhlerscher Beleuchtungsaufbau wird folglich obsolet. Durch entsprechende Auslegung der Facettenarrays und des sphärischen Spiegels kann direkt in der Bildebene ein homogenes Strahlprofil sowie die gewünschte Divergenz eingestellt werden, weshalb das MMA direkt in dieser Ebene platziert wird. Die Designregeln folgend denen für transmissive Homogenisierer und sind hervorragend in der Literatur beschrieben [119], [122]. Die Berechnungen führten zu zwei Facettenspiegelarrays mit 30 x 30 Subaperturen, einer Brennweite von je f = 10 cm und einem Facettenraster von 1 mm (Abbildung 6.6). Für den sphärischen Spiegel ergab sich ein notwendiger Durchmesser von 50 mm mit einer Brennweite von f = 2 m.



Abbildung 6.6: Foto eines Facettenarrays mit 30 x 30 sphärischen Mikrospiegeln (f = 10 cm) im 1 mm Raster inklusive optomechanischer Halterung

81

Der beschriebene Homogenisiereraufbau ohne klassisches Köhlersches Beleuchtungssystem im Anschluss weist hingegen in Bezug auf die Manipulation der Leuchtfeldgröße und Divergenz einen entscheidenden Nachteil auf: Beide Größen sind nicht mehr durch Blenden variabel einstellbar, sondern sind durch die Facettenarraydimensionen fixiert auf die im Designprozess ermittelten Werte. In der MMA-Beleuchtungsanwendung stellt diese Tatsache für die Leuchtfeldgröße eine unkritische Situation dar, schließlich verbleiben die MMA-Größe und damit die zu beleuchtende Fläche konstant. Aufgrund des diffraktiven Abbildungsprinzips und damit von den Wellenlängen abhängigen Beugungswinkeln ist hingegen eine variable Divergenzeinstellung des MMA-Beleuchtungsstrahls gegebenenfalls notwendig. Relativ einfache Abhilfe für diese Problematik schafft die Variierung der Leuchtfleckgröße auf dem ersten Facettenarray. Es existiert ein direkter Zusammenhang zwischen Eingangsstrahldurchmesser beziehungsweise den wirkenden Facetten und der Divergenz in der Bildebene. Abbildung 6.7 veranschaulicht das Prinzip, der kleinere blaue Strahldurchmesser erzeugt im Vergleich zu dem roten einen geringeren Einfallswinkel in der Bildebene. Solange der Strahldurchmesser nicht 8 – 10 Facetten unterschreitet bleibt der Homogenisierungsgrad nahezu konstant [122]. Praktisch am einfachsten umgesetzt werden kann die Strahlvariation durch den Einsatz einer Irisblende am Eingang der Homogenisierereinheit. Nachteilig wirkt sich dabei allerdings der teilweise hohe Intensitätsverlust an der Blende auf den Energiedurchsatz aus. Alternativ, so wie im hiesigen Aufbau umgesetzt, bieten sich variable Strahlaufweiter für alle Laserquellen an.



Abbildung 6.7: Manipulation der Beleuchtungsdivergenz in der Bildebene durch Variation der beleuchteten Fläche des ersten Facettenarrays

Tabelle 6.2 illustriert Messergebnisse der Strahlformung und –homogenisierung mit dem beschriebenen reflektiven Aufbau anhand zweier beispielhafter Laserquellen. Zu Beginn weist der DUV-Excimerlaser eine rechteckförmige inhomogene Strahlverteilung auf. Die Homogenisierereinheit formt das Profil in eine quadratische Verteilung um, die jedoch noch keine gleichförmige Intensitätsverteilung zeigt (mittlere Bilderreihe). Vielmehr zeigt sich ein charakteristisches Streifenmuster, welches eine in der Literatur bekannte und oben beschriebene Interferenzerscheinung der einzelnen Facettenspalten darstellt [121]. Aus dem Interferenzbild können direkt Rückschlüsse auf die Kohärenzlängen der Laserquelle geschlossen werden. Im Fall des Excimerlasers scheint in einer Achse (vertikal) die räumliche Kohärenzlänge größer, in der zweiten Achse (horizontal) kleiner als das Raster der Facettenarrays zu sein. Dem folgt die Interferenz nur von übereinanderliegenden Facetten, die sich in der 1D-Gitterverteilung in der Bildebene ausdrücken.

Im sichtbaren und NIR-Spektralbereich zeigen die Quellen ein eher kreisrundes aber ebenso inhomogenes Strahlprofil, beispielhaft für die Laserdiode bei 680 nm in Tabelle 6.2 dargestellt. In der Bildebene entsteht eine 2D-Gitteranordnung von Intensitätspunkten, was auf die deutlich größeren Kohärenzlängen als das Facettenraster in beiden geometrischen Achsen zurückzuführen ist.

Laserquelle	Excimer-Laser	Laserdiode	
Wellenlänge	248 nm	680 nm	
Ausgangsstrahlprofil			
Profil in Bildebene des Homogenisierers			
Profil in Bildebene mit rotierendem Diffusor			

Tabelle 6.2: Ergebnis der Strahlformung und –homogenisierung mit dem reflektiven Beleuchtungsaufbau [117]

Trotz der unterschiedlichen Interferenzerscheinungen unterstreicht die untere Reihe der Tabelle 6.2 die ergänzende Wirkungsweise des rotierenden Diffusors. Insgesamt formt das reflektierende Homogenisierersystem inklusive Diffusor quadratische Intensitätsverteilungen beliebiger Laserquellen in einer sehr guten Homogenität mit einer Restunförmigkeit von weniger als 5 % (Standardabweichung).

Schlussendlich, als letzten Punkt der MMA-Beleuchtung ist eine Alternative zum polarisierenden Strahlteiler vor dem MMA gesucht (siehe Abbildung 6.1), um die Beleuchtung vollständig achromatisch und unter senkrechtem Einfallswinkel zu realisieren. Ausgenutzt werden kann dabei die Tatsache, dass eine geringe Abweichung vom Einfallswinkel um bis zu 5° keinen Einfluss auf die diffraktive MMA-Abbildung inklusive Fourierfilterung nimmt [117]. Aus diesem Grund kann der Strahlteiler einfach weggelassen werden, wenn das MMA direkt unter leicht schrägem Einfallswinkel nahe der Senkrechten beleuchtet wird.

6.2.4 Reflektive MMA-und Fourierebenenabbildung

Die Nutzung von MMAs für strukturierte Beleuchtungsanwendungen ist typischerweise mit einem Doppellinsensystem in 4F-Anordnung (siehe Abschnitt 2.1.4.4) und einem geeigneten Fourierfilter zwischen beiden Linsen realisiert [130], [131] (siehe auch Skizzen in Abbildung 2.22 und Abbildung 6.1). Das MMA selbst fungiert als programmierbares diffraktives optisches Element und erzeugt eine Phasenmodulation der Eingangslaserwelle. Durch optische Tiefpassfilterung im fouriertransformierten Raum des Phasenmusters können diese direkt in Intensitätsmuster mit beliebiger Graustufenauflösung umgewandelt werden. Die achromatische Ausführung der 4F-Anordnung mit zwei Spiegeln kann auf Basis zweier Off-Axis-Parabolspiegel realisiert werden.

Im hiesigen Aufbau wurde ein deutlich einfacherer Ansatz umgesetzt, ein einzelner sphärischer Spiegel kann die gleiche Abbildungsaufgabe auf eine Kamera übernehmen. Der größte Vorteil darin liegt in dem immens vereinfachten Justieraufwand, zwei sehr aufwendig zu justierende Off-Axis-Parabolspiegel [132], [133] sind durch einen einfach handhabbaren sphärischen Spiegel ersetzt. Ebenso positiv wirkt sich die Verringerung der Anzahl der optischen Komponenten auf den notwendigen Platzbedarf sowie optischen Durchsatz aus. Wie Abbildung 6.8 zu entnehmen ist, vergrößert bzw. verkleinert der sphärische Spiegel das MMA-Bauelement in die Kamerabildebene. Eine variable Irisblende, platziert in der Zwischenfokusebene des sphärischen Spiegels (Fourierebene), realisiert die optische Tiefpassfilterung zur Transformation der ausschließlich phasenmodulierten Lichtwelle vom MMA kommend in ein Intensitätsmuster. Der variable Blendendurchmesser gewährleistet beugungsbasierte Wellenlängenanpassung, die um die Abbildungsbedingungen im gesamten spektralen Bereich gleichmäßig einzustellen.



Abbildung 6.8: Reflektive MMA-Abbildung auf Kamera mit nur einem fokussierenden optischen Element (sphärischer Spiegel) inklusive Fourierfilterung [117]

Fragestellungen zu möglichen Abbildungsfehlern des sphärischen Spiegels konnten mit einer optischen Simulationsrechnung, durchgeführt von Kollegen, ausgeräumt werden [117]. Analog zum schrägen Strahleinfall auf das MMA ist eine maximal zulässige numerische Apertur (NA) nicht zu überschreiten, die die Grenze für eine noch fehlerfreie beugungsbegrenzte MMA-Abbildung darstellt. Die maximale numerische Apertur des gesamten Setups wird bestimmt durch den Beugungswinkel zwischen 0. und 1. Ordnung. Am einfachsten ist die Einhaltung dieser Randbedingung durch möglichst kleine Einfallswinkel auf den Spiegel gewährleistet. Bleibt diese Bedingung berücksichtigt, sind im Systemaufbau Einfallswinkel bis zu 5° zulässig, um noch sicher im kompletten Spektralbereich beugungsbegrenzte MMA-Abbildungen mit Einzelpixelauflösung zu realisieren, wohlgemerkt mit nur einem sphärischen Spiegel.

Nachdem das Systemlayout zur Abbildung der MMA-Muster auf eine Kamera vorgestellt wurde bleibt noch die Fragestellung offen, wie mit dem gleichen Systemaufbau die Fourierebene aufgezeichnet werden kann? Eine möglichst einfache Methode, die den bisherigen Aufbau nur minimal verändert, ist das wesentliche Anforderungsprofil für diese Aufgabe. Folgende Ansätze existieren hierzu:

- Versetzen der CCD-Kamera direkt in die Fourierebene
- Installation eines teildurchlässigen Spiegels zwischen sphärischem Spiegel und Fourierebene, zusätzlich Platzierung einer weiteren Kamera im Fokus des zweiten ausgekoppelten Strahlengangs
- Installation einer weiteren abbildenden Optik zwischen Fourierebene und Kamera

Während der erste Ansatz für die praktische Umsetzung ausfällt, da ein Versatz des Kamerasystems jeweils einen erheblichen Justieraufwand nach sich zieht, hat der zweite genannte Anstrich den Charme, Fourierebene und Bildebene gleichzeitig beobachten zu können. Letztendlich kann dieser Vorteil die mit einhergehenden Nachteile des Energieverlusts durch den teildurchlässigen Spiegel sowie die notwendige Anschaffung eines zweiten Kamerasystems nicht aufwiegen, sodass auch diese Methode verworfen wurde. Der dritte Ansatz scheint in seiner Einfachheit unübertroffen, eine einfache Sammellinse platziert vor der Kamera könnte die Fourierebene direkt auf die Kamera abbilden. Nur eine einfache mechanische Vorrichtung scheint notwendig, um die Linse in den Strahlengang zu bewegen (für Fourierabbildung) oder zu entfernen (für MMA-Abbildung). Solange monochromatische Untersuchungen durchgeführt werden, ist dies die Variante der Wahl.

Der hiesige Aufbau erfordert allerdings eine achromatische Lösung, um Farbfehler in der Abbildung mit einer Linse zu vermeiden. Je nach genutzter Laserquelle müsste bei einem Wellenlängenwechsel die Linse und Kamera neu justiert werden, um die Fourierebene scharf abzubilden. Der erste Ansatz führt aufgrund der bisherigen positiven Erfahrungen im reflektiven Systemdesign ebenso bei dieser Problemstellung zu der Idee, die Linse durch einen sphärischen Spiegel zu ersetzen. Gesucht ist demzufolge eine Variante der Strahlführung, bei der keine der bisherigen Komponenten in ihrer Position verändert werden muss. Die gefundene Lösung skizziert Abbildung 6.9.



Abbildung 6.9: Reflektive Abbildung der Fourierebene auf die Kamera durch zusätzlichen sphärischen Spiegel

Zwei plane Umlenkspiegel, wegen des verringerten notwendigen Bauraums zur Halterung auch in Form von Prismen möglich, lenken den Strahl aus dem bisherigen

Pfad auf einen sphärischen Spiegel und wieder zurück in den ursprünglichen Strahlverlauf. Der sphärische Spiegel ist fest installiert, die beiden Umlenkspiegel sind auf einem Bewegungssystem montiert, um wahlweise in den Strahlengang eingebracht oder entfernt zu werden.

Die Wirkungsweise des vorgestellten Aufbaus zur detaillierten Abbildung der MMA-Phasenmuster sowie der Beugungsmuster in der Fourierebene auf ein Kamerasystem ist in Kapitel 6.3 an Beispielen belegt. Letztendlich konnte dieser Abschnitt des Systemaufbaus ebenso vollständig mit reflektierenden Komponenten realisiert werden, sodass ein Arbeiten ohne chromatische Aberration im Multispektralbereich gewährleistet ist.

6.2.5 Kamerasystem

Zweifellos stellt neben dem MMA selbst das Kamerasystem eine Schlüsselkomponente des Aufbaus dar. Die zentrale Aufgabe ist nicht einfach nur MMA- und Fourierbilder aufzuzeichnen, sondern in einer solch ausreichenden Qualität zur Verfügung zu stellen, dass die aufgenommenen Bilder softwareseitig sicher und reproduzierbar auswertbar sind.

Die Sicherstellung der Bildqualität lässt sich vor allem an den Kamerakriterien Auflösung, Bildfeldgröße, Dynamikbereich, Rauschen und Linearität festmachen. Eine große Auflösung, in jedem Fall größer als die MMA-Spiegelanzahl, verspricht die detailliertere Analyse der Beleuchtungsmuster, eine große Bildfeldgröße (einhergehend mit Einzelpixelgröße) erhöht die Empfindlichkeit. Der Dynamikbereich ist vor allem für die Messung großer Kontrastunterschiede entscheidend, aber zugleich für die exakte Auflösung von Grauwerten. Das Rauschverhalten sowie die Linearität beeinflussen wesentlich die Unsicherheit oder im Umkehrschluss die Genauigkeit der aufgezeichneten Bilder.

Überdies ist eine spektrale Empfindlichkeit in der gesamten Anwendungsbreite UV-VIS-NIR eine weitere herausfordernde Spezifikation. Vor allem im UV-Bereich sind typische Kamerasysteme nur schwach empfindlich. Abhilfe schafft für diesen Bereich eine spezielle Beschichtung eines Glases vor dem Kamerachip, die als Lumogenschicht basierend auf dem Farbstoff Lumogen bezeichnet wird [134]. Die Schicht emittiert Strahlung im Wellenlängenbereich von grün (meist empfindlichster Bereich der Kamera), wenn sie mit Wellenlängen < 400 nm bestrahlt wird.

Zwei Bautypen von Kamerachips sind heutzutage weit verbreitet: CCD-Sensoren und CMOS-Sensoren. Die CCD-Technologie (charge-coupled device) basiert auf einem Array aus Fotodioden, die jeweils die einfallende Lichtenergie in elektrische Ladungsträger umwandeln und in einem sogenannten Potentialtopf zwischenspeichern. Seriell werden im Anschluss der Bildaufnahme die Ladungsträger ausgelesen und über einen Verstärker in eine Spannung proportional zur einfallenden umgewandelt. CMOS-Sensoren (korrekter Lichtenergie Name für diesen Kamerasensortyp: active pixel sensor) bestehen ebenfalls aus einem Array von Fotodioden, allerdings befindet sich hinter jedem Pixel direkt eine Ausleseschaltung, die die einfallende Lichtenergie in Spannungswerte umwandeln. Während CMOS-Kameras über eine vergleichsweise hohe Auslese- und Anzeigegeschwindigkeit der aufgenommenen Bilder verfügen, zeichnen sich CCD-Kamerasensoren durch deutlich geringere Empfindlichkeitsunterschiede zwischen den Pixeln sowie einen höheren Füllfaktor aus, der wiederum die Lichtempfindlichkeit steigert. Da das Kriterium Auslesegeschwindigkeit für den Charakterisierungsaufbau unerheblich ist, überwiegen eindeutig die Homogenitäts- und Empfindlichkeitsvorteile der CCD-Sensoren.

Ergebnis einer ausführliche Marktanalyse war folgendes Kamerasystem: Modell MicroLine ML1603 der Firma Finger Lakes Instrumentation. Enthalten ist ein CCD-Sensor der Firma Kodak, Modell KAF-1603 mit einer Auflösung von 1536 x 1024 Pixeln der Größe 9 µm². Das Kameramodell zeichnet sich vor allem durch seinen hohen Dynamikbereich mit einer digitalen Pixelauflösung von 16 Bit aus. Eine wie oben beschriebene Lumogenschicht gewährleistet die spektrale Empfindlichkeit im gesamten Arbeitsbereich. Eine externe Triggermöglichkeit stellt sicher, die Kamera im synchronisierten Betrieb zu Quellen und MMA betreiben zu können. Weiterhin verfügt das Modell über eine interne luftgekühlte Peltier-Temperaturregelung, die reproduzierbare Arbeitsbedingungen schafft. Zur Kommunikation mit dem Anwender-PC stehen eine USB-Schnittstelle sowie eine Softwarebibliothek zur vollständigen Fernsteuerung des Systems zur Verfügung.

Die Kameraeigenschaften sind softwareseitig durch eine eigene Kalibrierprozedur weiter verbesserbar, so sind Offsetwerte, Empfindlichkeitsunterschiede oder Linearitätsfehler größtenteils kompensierbar. Teile dieser Prozedur wurden bereits die der Offsetwerte umaesetzt. vor allem Kompensation (sogenanntes Dunkelrauschen) hat erheblichen Einfluss auf die später zu messenden Kontrastwerte. Eine komplette Kamerakalibrierung ist noch nicht realisiert und scheint aufgrund der bereits vorhandenen hohen Genauigkeit des Kameramodells für die anvisierten Aufgabenstellungen auch nicht notwendig. Für zukünftige höhere Kontrastziele oder Graustufenspezifikationen ist hingegen eine Realisierung der Prozedur unerlässlich.

6.2.6 Gesamtsystem

Um den Aufbau in seiner Gesamtheit effektiv zu gestalten, wurden alle Einzelkomponenten so dimensioniert, dass sie auf einem optischen Tisch Platz finden, jedoch noch genug Fläche zum Experimentieren und Variieren der Anordnungen verbleibt. Ein optischer Tisch mit den Abmaßen 3,0 x 0,9 m² stellt die Basisplattform für alle Aufbauten dar, nur der Excimer-Laser findet aufgrund seiner Größe und vor allem Strahlhöhe auf einem Extratisch Platz.

Abbildung 6.10 skizziert eine stark vereinfachte schematische Anordnung aller Funktionsgruppen auf der Grundplatte. Entscheidendes Merkmal des Aufbaus ist seine komplett reflektive Ausführung ab der Einkoppelkaskade, um die multispektrale MMA-Charakterisierung ohne chromatische Abbildungsfehler zu gewährleisten.





6.3 Messplatzsteuerung

Neben dem optischen Systemdesign ist das elektronische Ansteuerkonzept des Messplatzes von entscheidender Bedeutung, um MMA-Muster korrekt auf die Kamera abzubilden und aufzuzeichnen. Begründet im zeitdiskreten MMA-Betrieb bildet die geeignete Synchronisation zwischen MMA, Laser und Kamera eine zentrale Aufgabe, um eine stroboskopische Beleuchtung zu den Zeitpunkten der ausgelenkten Mikrospiegel sicherzustellen.

Grundsätzlich existieren verschiedene Varianten, um die Komponentensynchronisation zu gewährleisten. Sowohl basierend auf Hardwareverbindungen als auch durch geeignete Software ist die Aufgabe umsetzbar. Eine Schlüsselrolle nimmt in allen Varianten die MMA-Steuerelektronik ein, sie fungiert als Bindeglied zwischen MMA sowie Laser und Kamera. Aufgrund des Vorhandenseins von Triggerein- sowie -ausgängen ist ein Betrieb der Steuerelektronik im Master- und Slavemodus realisierbar. Wird die MMA-Elektronik im Slavemodus betrieben übernimmt ein Funktionsgenerator oder eine Software die Aufgaben der Masterkomponente im System.

Größte Flexibilität bildet die Kontrolle des Zusammenwirkens der Einzelkomponenten bei einer softwareseitig gelenkten Fernsteuerung. Gerade in der Aufbauphase des Charakterisierungssetups stellt ein universelles variantenreiches Ansteuerkonzept einen erheblichen Vorteil gegenüber festverdrahteten und daher weniger flexiblen Komponenten dar. Dieser Vorteil führte letztendlich zur Umsetzung des MMA-Betriebs im Slavemodus. Die Masterkomponente im System übernimmt eine Software, die mithilfe einer Multifunktionskarte im PC analoge und digitale Signale zur Verfügung stellen kann, die die übrigen Komponenten im System aufeinander abstimmt. Abbildung 6.11 skizziert das im Charakterisierungsaufbau umgesetzte Synchronisationskonzept mit dem PC als zentrale Steuereinheit. Angedeutet sind zudem potentielle Triggerausgänge an der Kamera sowie der MMA-Steuerelektronik, die für andere – testweise auch umgesetzte – Synchronisationsmodi genutzt werden können.



Abbildung 6.11: Messplatzsteuerung und –synchronisation

Mit einem PC als zentrale Steuerkomponente im Charakterisierungskonzept kommt der darauf laufenden Software eine entscheidende Bedeutung zu, da sie alle Einzelkomponenten im System fernsteuert. Sämtliche Algorithmen und mathematischen Analysen während des Charakterisierungsprozesses führt ebenfalls die gleiche Software aus. Die am WLI genutzte Programmierumgebung Matlab bietet sich für diese Aufgabe an, zumal zahlreiche Prozeduren (vor allem zur Kommunikation mit der MMA-Elektronik) wiederverwendbar sind. Alternativ dazu steht die Software LabView von National Instruments, die sich vor allem durch eine einfachere und deutlich umfangreichere Gestaltung Benutzeroberflächen von auszeichnet. Letztendlich gaben dieser Punkt und die Tatsache, dass Treiber für messtechnische Hardware (wie auch bei der Multifunktionskarte) häufig direkt für LabView angeboten werden, den Ausschlag für einen Umsetzung mit LabView.

Die eigens implementierte Software deckt das volle Aufgabenspektrum ab. Neben der Messplatzsteuerung und –synchronisation, der Datenaufbereitung und –auswertung sind autonome Abläufe zum Beispiel für die Kontrastmessungen implementiert. Die direkte Kommunikation zum Endanwender ist über eine grafische Benutzeroberfläche realisiert.

6.4 MMA-Abbildungseigenschaften des Charakterisierungsaufbaus

Zunächst soll an einem einfachen Beispiel die Arbeitsweise des Systemaufbaus zur Abbildung von MMA-Mustern anhand von Messdaten demonstriert werden. Ziel in dem Beispiel ist die Generierung eines "schwarzen" Bildes. Zur Verdeutlichung des MMA-Abbildungsprinzips wird der die aktive Spiegelfläche umgebende passive Rand von nur gemeinsam adressierbaren Spiegeln nicht ausgelenkt, sodass in der Bildebene um den schwarzen Bereich ein weißer Rahmen entsteht.

Die MMA-Oberfläche zeigt zunächst im schwarzen Bereich auf exakt d = $\lambda/4$ ausgelenkte Spiegel, damit die Blaze-Bedingung für höchste Beugungseffizienz des Gitters erfüllt ist (Abbildung 6.12 a). Die umgebenden Spiegel im Randbereich verbleiben unausgelenkt, sodass eine ebene Spiegelfläche entsteht. Die Messung des resultierenden Beugungsmusters, sichtbar in der Fourierebene (Abbildung 6.12 b), zeigt deutlich die Energieverteilung fast vollständig außerhalb der nullten Beugungsordnung in der Bildmitte. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Beugungsbildern eines Blaze-Gitters mit einem einzigen Beugungsmaximum verursacht durch die Periode des Gitterrasters sind mehrere Beugungsordnungen im Bild erkennbar. Ursache trägt das spezielle 64k-MMA-Auslenkschema mit zeilenweise alternierenden Kipprichtungen der Spiegel (siehe auch [130]). Resultat ist ein symmetrisches Beugungsbild mit gleichprominenten 1. Beugungsordnungen (+1. und -1.), auf die die Hauptintensitäten verteilt sind. Weiterhin sichtbar sind ober- und unterhalb der 1. Ordnungen sogenannte "halbe" Ordnungen, verursacht durch das alternierende Zeilenmuster und damit doppelter Rasterperiode (gleichbedeutend mit halber Frequenz und daher halben Abstand der Beugungsordnungen in der Fourierebene).



a) MMA-Topografie

b) Beugungsmuster in Fourierebene

c) Intensitätsmuster in Bildebene

Abbildung 6.12: Beispielhafte MMA-Bildentstehung: "schwarzes" Bild [117]

Die Fourierfilterposition in Abbildung 6.12 b zeigt an, dass nur die in der nullten Beugungsordnung verbliebene Intensität den Filter passiert, alle außerhalb des Kreises befindlichen Ordnungen werden geblockt (optische Tiefpassfilterung). Letztendlich demonstriert die Messung der Bildebene (Abbildung 6.12 c) durch das erwartete schwarze Bild, umgeben von einem weißen Rand, dass der Großteil der ursprünglichen Laserenergie vom Fourierfilter geblockt wird. Der Nachweis für die Arbeitsweise des Systemaufbaus, zur vollständigen Transformation der Informationen des Phasengitters beeinflusst durch die MMA-Topografie hin zu Intensitätsmustern in der Kamera ist damit erbracht. Sowohl die Verteilung der Beugungsordnungen in der Fourierebene, als auch die generierten Intensitätsmuster sind mit der Kamera aufnehmbar und für die automatisierte Auswertung verwendbar. Die Abbildung weiterer beispielhafter MMA-Muster erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

6.4.1 Abbildung der Fourierebene

Anhand der Beugungsbilder in der Fourierebene lassen sich auf einfache Weise zwei Aspekte studieren:

- die Änderung des Beugungswinkels abhängig von der Quellwellenlänge sowie
- die variable Intensitätsverteilung in unterschiedliche Beugungsordnungen abhängig vom eingeschriebenen MMA-Muster.

Darüber hinaus können ferner Aussagen getroffen werden zur verwendeten Quelldivergenz, somit teilweise ebenfalls über die Kohärenzbedingungen im Systemaufbau. In einigen der im Folgenden gezeigten Aufnahmen der Fourierebene mit entsprechenden Beugungsbildern sind die Kameraintensitäten zur besseren Visualisierung der Beugungsordnungen überhöht dargestellt.

Abbildung 6.13 demonstriert die Abhängigkeit des Beugungswinkels von der Wellenlänge, wie die Gittergleichung (6.1) theoretisch beschreibt. Da das Gitterraster p durch die Spiegelgröße stets unverändert bleibt, verhält sich der Sinus des Winkels zwischen 0. und 1. Beugungsordnung proportional zur Wellenlänge λ (bei kleinem Beugungswinkeln ist sin(α) $\approx \alpha$). Obwohl bei allen eingesetzten Wellenlängen exakt das gleiche MMA-Muster eingeschrieben wurde (Spiegelauslenkung ist an die Wellenlänge angepasst) und daher das gleiche Beugungsmuster erzeugt wird, skaliert der Abstand zwischen den Beugungsordnungen mit der Wellenlänge aufgrund der Winkeländerung. Bei UV-Bestrahlung mit $\lambda = 248$ nm sind daher sogar die ± 2 . Beugungsordnungen in der Kameraebene sichtbar.



Fourierebene λ = 405 nm

Fourierebene λ = 532 nm

Fourierebene λ = 680 nm

Abbildung 6.13: Aufnahmen der Fourierebene eines Schwarzbildes bei unterschiedlichen Quellwellenlängen (überhöhte Intensitätsdarstellung)

Die nachfolgende Bilderserie in Tabelle 6.3 veranschaulicht den zweiten oben genannten Punkt, die variable Anordnung und Intensitätsverteilung der Beugungsordnungen abhängig vom MMA-Muster. Die Serie von Schachbrettmustern mit unterschiedlich vielen Spiegeln, die einem Schachbrettfeld zugeordnet werden, bedeutet praktisch eine Änderung der Gittergrößen. Somit wird das Grundraster von 16 µm durch die Spiegelgröße sowie das doppel-zeilenweise Raster durch die alternierende Spiegelauslenkrichtung von dem variablen Musterraster überlagert, was sich in zusätzlichen Beugungsordnungen in der Fourierebene ausdrückt. Übertragen auf das diffraktive Abbildungsprinzip kann diese Erscheinung so interpretiert werden, dass zusätzliche Musterfrequenzen entstehen, die kleiner der Spiegelrasterfrequenz sind, somit die optische Tiefpassfilterung durch die Fourierblende überstehen und vollständig in die Bildebene abgebildet werden. Über diese Bilderserie hinausgehend ist somit festzustellen, dass jedes an das Mikrospiegelarray angelegte Muster ein individuelles Bild in der Fourierebene nach sich zieht.

Tabelle 6.3: Zusammenhang MMA-Muster und Intensitätsverteilung in verschiedene Beugungsordnungen am Beispiel von verschiedenen Schachbrettmustern (Aufnahmen der Fourierebene mit λ = 405 nm, überhöhte Intensitätsdarstellung der Messungen)

Musterbezeichnung	MMA-Muster	Fourierebene (Messung)
Schachbrett 1 Pixel		
Schachbrett 2 Pixel		
Schachbrett 3 Pixel		

Neben den in den Beispielen dargestellten Funktionen hat die Abbildung der Fourierebene einen anderen Hauptnutzen: Die Justierung des MMAs im Gesamtsetup sowie die Einstellung der Fourierblende. Jedes 64k-Bauelement, welches stets händisch im System eingesetzt wird, durchläuft zunächst einer Prozedur zu dessen Justierung. Dabei wird die Abbildung der Fourierebene genutzt um sicherzustellen, dass die nullte Beugungsordnung zentral die Fourierblende passiert. Eine asymmetrische Justierung der Blende bezüglich den Beugungsordnungen hätte eine inkorrekte Abbildung der MMA-Muster in der Bildebene zur Folge. Zweiter praktisch entscheidender Nutzen der Fourierebenenabbildung ist die gezielte Einstellung des Blendendurchmessers. Hintergrund ist die beschriebene wellenlängenabhängige Variabilität des Beugungswinkels. Durch die Anpassung des Öffnungsdurchmessers an die Wellenlänge können stets die gleichen Abbildungsbedingungen gewährleistet werden, unabhängig von der genutzten Laserquelle. Der typischerweise eingestellte Blendenradius liegt bei 1/3 bis 1/2 des Abstands zwischen 0. und 1. Beugungsordnung. Somit ist vor allem sichergestellt. dass die 1. Beugungsordnung deutlich außerhalb des Durchmessers liegt, um gualitativ hochwertige schwarze Bereiche in die Bildebene abzubilden.

Abbildung 6.14 veranschaulicht die Justierprozedur, die jedes im System neu eingesetzte 64k-MMA durchläuft. Bild a auf der linken Seite zeigt das noch dejustierte Beugungsbild eines Schachbrettmusters mit Schachfeldwechsel nach jedem Einzelspiegel bei weit geöffneter Blende (Quelle λ = 680 nm). Über die symmetrische Justierung (mittleres Bild b) und die Anpassung des Blendendurchmessers (Bild c) wird die reproduzierbare MMA-Abbildung unabhängig vom MMA und der Laserquelle gewährleistet.



a) dejustiertes Beugungs- b) symmetrisch justiertes c) Anpassung des bild Beugungsbild Blendendurchmessers

Abbildung 6.14: MMA-Justierung unter Zuhilfenahme der Abbildung der Fourierebene eines Schachbrettmusters (Aufnahmen mit λ = 680 nm, überhöhte Intensitätsdarstellung)

6.4.2 Abbildung MMA-Intensitätsmuster

In Abbildung 6.12 auf der rechten Seite ist bereits eine erste Aufnahme der Bildebene gezeigt. Beliebige weitere Muster können nun in das 64k-Bauelement geladen und dessen Abbildung mit dem Charakterisierungsaufbau aufgezeichnet und entsprechend

ausgewertet werden. Anhand von Testbildern ist die gute Abbildungsqualität des gesamten reflektiven optischen Aufbaus ohne direkt sichtbare Abbildungsfehler nachweisbar (Abbildung 6.15).





Abbildung 6.15: Abbildung eines Testbildes: a) Originalbild (im Format *.bmp), b) mit CCD-Kamera aufgezeichnetes Bild (Beleuchtung mit $\lambda = 680$ nm)

Während das gezeigte binäre (nur schwarz-weiße) Muster vor allem die Abbildungsqualität des Aufbaus charakterisiert, demonstriert die Aufzeichnung eines Graubildes besonders deutlich die Leistungsfähigkeit des MMAs selbst (Abbildung 6.16). Hierbei kommt der große Vorteil von diffraktiven MMAs im Vergleich zu den digitalen besonders deutlich zur Geltung, indem in Hochgeschwindigkeit (kHz-Bereich) und sehr präzise direkt Graubilder erzeugbar sind. Theoretisch reicht nur ein einzelner Laserpuls aus, um die nachfolgenden Bilder aufzunehmen. Da hingegen im System die Laserleistung beschränkt ist, werden die gezeigten Bilder über mehrere Laserpulse aufgezeichnet, um die CCD-Kamera entsprechend auszusteuern.

Die obere Reihe der nachfolgenden Abbildung zeigt ein Testmuster mit Graustufen, in jedem der vier Balken sind alle 256 Graustufen eines 8-Bit-Bitmaps enthalten. Die Bilder der unteren Reihe sollen die Fähigkeit des MMAs demonstrieren, jedes beliebige Graubild abbilden zu können.



Abbildung 6.16: Auswahl von aufgezeichneten Graubildern. Linke Seite: Originalbitmaps. Rechte Seite: Kamerabilder bei Beleuchtung mit λ = 680 nm

Die Abbildung beliebiger MMA-Muster (inklusive Graustufenbilder) über den vollständig reflektiven Aufbau auf die CCD-Kamera mit sehr guter Detailwiedergabe ist mit den gezeigten Bildern dokumentiert. Somit ist die Basis zur Auswertung der aufgezeichneten Bilder vollständig geschaffen, um Untersuchungen zum MMA-Kontrastverhalten sowie der Wirkungsweise der Bauelementkalibrierung durchzuführen.

Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle der Einfluss des Fourierfilters auf die Qualität der aufgezeichneten Bilder. Bekannt ist bereits, dass die optische Tiefpassfilterung verschiedene Ortsfrequenzen des MMA-Musters sowie des MMAs selbst herausfiltert bzw. passieren lässt. Je mehr Frequenzanteile in der Fourierebene herausgefiltert werden, desto weniger detailreich bzw. scharf ist das entstehende projizierte Bild. Schlussfolgernd daraus ist festzustellen, dass mit dem Öffnungsdurchmesser der Blende die Schärfe, und damit die Abbildungsqualität des entstehenden Bildes entscheidend beeinflusst werden kann. Eine ausführliche Experimentierreihe diesbezüglich inklusive zahlreicher Bilder ist in Anhang A aufgeführt. Die entstandenen Ergebnisse besagen kurz zusammengefasst:

- ist die Blende nahezu geschlossen, entsteht ein sehr unscharfes Bild (die meisten Frequenzanteile (vor allem hohe) werden herausgefiltert)
- mit zunehmendem Öffnungsdurchmesser passieren mehr Frequenzanteile den Filter, der Detailierungsgrad des projizierten Bildes nimmt stetig zu
- sobald ein Teil der ± 1. Beugungsordnung den Filter passiert, sinkt der Kontrast des Bildes erheblich
- die weitere Öffnung der Blende sorgt für immer kontrastschwächere Bilder, bis hin zu einem gleichmäßig ausgeleuchteten Bereich ohne jeden Kontrast

Ein Blendenradius von ¹/₃ bis ¹/₂ des Abstands zwischen 0. und 1. Beugungsordnung hat sich als am praxistauglichsten erwiesen. Allen bisher und im weiteren Verlauf der Arbeit aufgenommenen MMA-Projektionsbildern liegt diese Blendenöffnung zugrunde.

6.5 Spektrale Kontrastmessungen

Nachdem bereits im Laufe der Arbeit an verschiedenen Stellen der Begriff Kontrast auftauchte, vor allem auch in den Zielstellungen der Arbeit, widmet sich dieses Kapitel nun dem Thema etwas intensiver. Es wird vor allem das angewandte Messverfahren zur Bestimmung des MMA-Kontrastes ausführlich erläutert.

Zur Erinnerung, der Kontrastwert C ist in dieser Arbeit nach Gleichung (2.4) als das Verhältnis aus der gemessenen maximalen zur minimalen Intensität bestimmt. Für die Ermittlung des Wertes müssen demzufolge die beiden Intensitätswerte bekannt sein. Nach [67] und [69] kommen praktisch zwei Methoden zur Kontrastbestimmung in Frage. Zum Ersten werden auf dem Display nacheinander ein vollständig helles (weißes) und dunkles (schwarzes) Bild dargestellt, die gemessenen Helligkeiten im Anschluss ins Verhältnis gesetzt. Die zweite Methode, angelehnt an die amerikanische Norm ANSI IT7.215-1992, schreibt ein binäres Schachbrettmuster mit je acht weißen und schwarzen Feldern in das Display. Aus den gemessenen Helligkeiten in den weißen Feldern wird der Mittelwert gebildet und verkörpert die maximale Intensität, die minimale Intensität ermittelt sich entsprechend aus den schwarzen Feldern.

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Messprozedur orientiert sich stark an der erstgenannten Methode. Der entscheidende Unterscheidungspunkt liegt in der Anzahl der Messungen. Während für die oben beschriebene Methode zwei Einzelmessungen vollständigen Kontrastermittlung zur genügen, nutzt der MMA-Charakterisierungsmessplatz eine Serie von MMA-Bildern bei unterschiedlichen Spiegelansteuerungen. Mit Beendigung der Aufnahmeserie werden die Bilder mit maximaler und minimaler Intensität herausgefiltert und zur Kontrastberechnung ins Verhältnis gesetzt. Hintergrund dieses Verfahrens ist vor allem die ursprünglich vorhandene Unkenntnis über das Spiegelauslenkverhalten eines nichtkalibrierten Bauelements. Um die optimale Weiß- und Schwarzabbildung herauszufinden, erfolgt eine Serienmessung von Mustern mit zunehmender Spannung an der Adresselektrode. Demzufolge wird gleichzeitig die elektro-optische Übertragungsfunktion des MMA-Bauelementes experimentell ermittelt. Bei bereits kalibrierten Bauelementen sind nicht Spiegelspannungen sondern –auslenkungen die variable Größe der Serienmessung. Ergebnis ist die mechanisch-optische Übertragungsfunktion, so wie bereits in Abbildung 2.23 gezeigt. Nachfolgend sind zwei beispielhafte Messserien zur Kontrastbestimmung mit dem grünen Festkörperlaser für ein unkalibriertes (links) und ein kalibriertes (rechts) 64k-Bauelement dargestellt, die Intensitätswerte sind normiert auf den Wert der maximal gemessenen Intensität.



a) Kontrastmessung unkalibriertes MMA

b) Kontrastmessung kalibriertes MMA

Abbildung 6.17: Beispielhafte Serienmessung zur Bestimmung des MMA-Kontrasts eines unkalibrierten und kalibrierten 64k-Bauelements bei λ = 532 nm

Um sicherzustellen, dass die Einzelmessungen untereinander vergleichbar bleiben, erfolgt eine Intensitätskorrektur jeder Einzelmessung. Damit sollen geringfügige Abweichungen der Laserintensität sowie Variationen der Kamerabelichtungszeit ausgeglichen werden. Zur Anwendung kommt in der Praxis als Referenz der nichtangesteuerte passive Rand, der der Annahme unterliegt, dass die unveränderten Spiegel stets einen Bereich gleichbleibender Intensität in der Bildebene erzeugen. Testmessungen bestätigten diese Theorie, nur statistische Streuungen der Referenzintensität am passiven Rand wurden beobachtet, was auf die beiden oben genannten Ursachen zurückzuführen ist.

Ein weiterer Punkt hat erheblichen Einfluss auf die zu ermittelnden Kontrastwerte: Elektronische Kamerasysteme zeigen gewöhnlich einen Effekt, der als Dunkelstrom bezeichnet wird. Dabei entstehen durch thermisch bedingte Gitterschwingungen im CCD-Sensor der Kamera freie Ladungsträger, selbst wenn die Kamera nicht belichtet wird. Folglich entsteht selbst bei schwacher Sensorbeleuchtung (Schwarzbild) ein vergleichsweise großes Messsignal, welches erheblich die Kontrastwerte verringert. Dieser jede Messung überlagernde additive Term (Offsetterm) muss für exakte Messergebnisse bestimmt und von jeder Einzelmessung abgezogen werden. Demzufolge ist der erste Schritt jeder Kontrastmessung die experimentelle Bestimmung des Dunkelstroms. Praktisch realisiert ist dieser Vorgang durch eine Messung mit vollständig geschlossener Fourierblende, sodass keine Laserintensität die Kamera direkt erreicht. Die Korrektur jeder Einzelmessung um den Dunkelstrom und das Referenzmessfeld führt letztlich zu folgender Verrechnungsvorschrift:

$$I_{n_korr} = (I_n - I_{DS})^* \frac{\text{Ref}_0 - \text{Ref}_{DS}}{\text{Ref}_n - \text{Ref}_{DS}}$$
(6.2)

 I_n und Ref_n entsprechen den gemessenen Intensitäten der aktuellen Messung im Messund Referenzfeld, I_{DS} und Ref_{DS} charakterisieren den zuvor gemessenen Dunkelstrom im Mess- und Referenzfeld und hinter Ref₀ verbirgt sich die Intensität im Referenzfeld der ersten Messung der Serie.

Die praktische MMA-Kontrastbestimmung wird typischerweise an drei repräsentativen Messstellen auf dem Spiegelarray durchgeführt (Abbildung 6.18). Jede Messstelle umfasst ca. 20 x 20 Einzelspiegel, die gemessenen Intensitäten der Kamerapixel im Feld werden jeweils gemittelt. Der aus den Kontrastwerten der drei Messfelder berechnete Mittelwert bildet den globalen Kontrast für das komplette 64k-Bauelement.



Abbildung 6.18: Messfelder verteilt auf MMA zur Kontrastbestimmung

Zur Automatisierung und Sicherstellung des reproduzierbaren Ablaufs ist die beschriebene Kontrastbestimmungsprozedur vollständig in der Messplatzsteuersoftware implementiert, sodass autonom ein Kontrastwert eines MMAs ermittelt werden kann. Wird die besagte Routine unter Nutzung verschiedener Laserquellen angewandt, sind erstmals Aussagen zum multispektralen Kontrastverhalten diffraktiver Mikrospiegelarrays möglich. Abbildung 6.19 zeigt beispielhaft erstmalig das spektrale Kontrastverhalten über den ausgedehnten Spektralbereich DUV – VIS – NIR eines 64k-MMAs. Obwohl die einzelnen Messpunkte aufgrund der unterschiedlichen Charakteristiken der Laser (vor allem spektrale Breite) nur bedingt vergleichbar sind, so ist doch deutlich die Zunahme des Kontrastwertes mit der Wellenlänge erkennbar. Dieser Trend überrascht nicht, haben doch spezielle Bauelementeigenschaften wie Schlitzbreiten, Verkrümmungen oder Oberflächenrauigkeiten der Einzelspiegel bei kurzen Wellenlängen einen viel stärkeren Einfluss auf die erreichbaren Kontrastwerte [65]. Bemerkenswert sind zudem die absoluten Zahlenwerte, Kontrastwerte deutlich über 100 wurden für unkalibrierte diffraktive MMAs bisher noch nicht gemessen. Verglichen mit dem ebenso diffraktiv arbeitenden Grating Light Valve, welches ausschließlich für den sichtbaren Wellenlängenbereich designt wurde, liegen die erreichbaren Kontraste auf einem ähnlichen Level von 300 [16]. Da die dargestellten Werte noch von einem unkalibrierten MMA stammen, ist unter Verwendung der Kalibrierung eine Erhöhung der aufgezeigten Werte zu erwarten.



Abbildung 6.19: erstmalige spektrale Kontrastmessung eines unkalibrierten 64k-MMAs

6.6 Ergebnisse der profilometrischen Kalibrierung

In diesem Unterkapitel werden erstmals in dieser Arbeit die Kalibrierung sowie die optische Charakterisierung des 64k-MMAs vereint. Noch bevor der Einfluss der Bauelementkalibrierung auf die Kontrastwerte diskutiert wird, soll in der nachfolgenden Abbildung 6.20 der Einfluss der Kalibrierung auf die optisch erzeugten Bilder anhand von zwei Beispielmustern dargestellt werden.

Betrachtet man zunächst alle Bilder in Ihrer Gesamtheit so ist zu erkennen, dass sowohl die kalibrierten, als auch die unkalibrierten Abbildungen dem Originalbild sehr ähneln. Bei genauerer Betrachtung lassen sich hingegen schon mit bloßem Auge Unterschiede erkennen. Vor allem das binäre Testmuster zeigt unterschiedliche Homogenitäten der hellen unstrukturierten Flächen, im Graustufenbild mit der Ritterrüstung auf der rechten Seite fallen Verschiebungen der Grauwerte auf. Der Einfluss der MMA-Kalibrierung auf die optischen Projektionsmuster ist somit offensichtlich. Eine detaillierte Analyse der beobachteten Effekte sowie deren Ursachen und Hintergründe werden vor allem in Kapitel 6.6.2 erläutert. Der Kalibriereinfluss auf Kontrastwerte ist hingegen nicht direkt ersichtlich, die unkalibrierten Bilder erscheinen ebenso sehr kontrastreich. Mit exakten messtechnischen und analytischen Untersuchungen werden im direkt anschließenden Kapitel die gleichwohl vorhandenen Unterschiede herausgestellt.





6.6.1 Einfluss auf Kontrastmessungen

Wie von Heber et al. in [65] diskutiert wirken sich zahlreiche Faktoren auf das Kontrastpotential der MMAs aus. Die Kalibrierung beeinflusst nur einen dieser Punkte, die Streuung der Spiegelauslenkungen, allerdings mit dem größten Einfluss auf die Werte den entscheidenden Faktor. Kapitel 6.5 dieser Arbeit stellte zudem heraus, dass die Schwarzwerte von viel entscheidender Bedeutung als die Weißintensitäten für einen hohen Kontrastwert sind. Demzufolge scheint sich ein Vergleich zwischen

kalibrierten und unkalibrierten Schwarzwerten besonders zu lohnen, um den Kalibriereffekt zu untersuchen.

Das in Abbildung 6.21 aufgezeichnete Hybrid-Schwarzbild bestätigt die bisherigen Beobachtungen und Thesen. Die obere Hälfte des MMA-Ausschnitts zeigt einen unkalibrierten Bereich, die untere basiert auf kalibrierten Mikrospiegeln. Während im mit der Kamera aufgezeichneten Bild (linke Seite) noch kein Unterschied mit bloßem Auge zwischen den verschiedenen Bereichen zu erkennen ist, so offenbaren die Schnittbilder auf der rechten Seite den Kalibriereinfluss. Zu beobachten sind im Wesentlichen drei Effekte: Erstens sinkt die Streuung der Messwerte untereinander, zweitens verschwindet durch die Kalibrierung der systematische Verlauf der Messwerte hin zu einer relativ gleichbleibenden Linie, und drittens sinkt das absolute Niveau der Werte. Alle drei Beobachtungen sind auf die nun hochpräzise Einstellung der Spiegelauslenkungen zurückzuführen und sollten sich positiv auf die Kontrastwerte auswirken.



Abbildung 6.21: Optische Abbildung eines Schwarzbildes mit teilweise kalibriertem und unkalibriertem MMA (Aufnahme mit λ = 680 nm)

Die nachfolgende Grafik mit spektralen Kontrastmesswerten untermauert die gestellte Annahme. Abbildung 6.19 mit den Kontrastwerten eines unkalibrierten MMAs ist ergänzt um die Messwerte desselben Bauelements unter Anwendung der Kalibrierung. Es zeigt sich im Mittel eine allein durch die Kalibrierung erreichte Verdoppelung der Messwerte.


Abbildung 6.22: Spektraler Kontrastvergleich eines kalibrierten und unkalibrierten 64k-Bauelements

Betrachtet man die spektralen Kontrastmesskurven eines weiteren 64k-Bauelements, so ergibt sich folgende Grafik:



Abbildung 6.23: Spektraler Kontrastvergleich eines weiteren 64k-Bauelements (kalibriert und unkalibriert)

Im Vergleich zur Abbildung 6.22 zeigen die Messkurven in Abbildung 6.23 eine klar andere Charakteristik, wenngleich der kalibrierte MMA-Zustand zu deutlich höheren Kontrastwerten führt als der unkalibrierte. Die Suche nach den Ursachen beginnt bei den beiden MMAs selbst. Das MMA-Bauelement des ersten Diagramms ist ein speziell vergleichsweise für diese Messung ausgewähltes mit einer großen Spiegelverkrümmung. Bei dem zweiten gemessenen 64k-MMA liegen die Spiegelkrümmungen im typischen Normbereich, jedoch liegt eine höhere als gewöhnliche Vorauslenkung der Mikrospiegel vor. Mit diesem Wissen sind beide unkalibrierten Messkurven plausibel erklärbar, denn in diesem Zustand beschränkt vor allem die Spiegelvorauslenkung die erreichbaren Kontrastwerte. Durch die Kalibrierung wird dieser Haupteinflussparameter eliminiert, es treten andere in den Vordergrund, die für die maximal erreichbaren Kontraste verantwortlich sind.

Bei dem Bauelement aus Abbildung 6.22 ist nach der Kalibrierung der limitierende Faktor die erwähnte starke Spiegelkrümmung. Für das zweite MMA kann dieser Parameter aufgrund seines geringen Wertes nicht als Grenzwert gelten. Aus diesem Grund sind zunächst auch die sichtbar höheren absoluten Kontrastwerte zu beobachten, mit Werten teilweise deutlich über 1000 bei unterschiedlichen Wellenlängen. Fraglich ist dennoch der Kurvenverlauf mit dem Maximalkontrast bei der blauen Laserquelle und einem Abfall hin zu größeren Wellenlängen. Die Beobachtung steht im Gegensatz zur Annahme größer werdender Kontraste mit zunehmender Beleuchtungswellenlänge (siehe Kapitel 2.1.4.4).

In einer Serie von weiteren Kontrastmessungen mit unterschiedlichen MMAs war zudem zu beobachten, dass sich im blauen und UV-Spektralbereich die Messwerte deutlich von Bauelement zu Bauelement unterschieden, im langwelligen Spektralbereich zeigten dagegen viele Kontrastwerte kalibrierter MMAs auffallend ähnliche Werte wie in Abbildung 6.23. Alle betroffenen MMAs eint, dass sie über eine relativ geringe Einzelspiegelverkrümmung verfügen. Aus diesen Beobachtungen ist eine spezielle Messplatzcharakteristik festzustellen, bei der Kontrastwerte im langwelligen Spektralbereich in eine Sättigung gelangen. Schlussfolgernd daraus ist die Hypothese abgeleitet, dass die dargestellte kalibrierte Kontrastkurve aus Abbildung 6.23 im Wellenlängenbereich $\lambda > 500$ nm nicht das Bauelement selbst charakterisiert, sondern das derzeitige messbare Limit des gesamten Messplatzes darstellt. Messungen weiterer kalibrierter MMAs haben zu ähnlichen Messwerten geführt, solange die MMAs gewissen Eigenschaften wie geringer Spiegelverkrümmung genügten.

Neben den ähnlichen Messwerten unterschiedlicher MMAs ist ein weiterer thesenstützender Punkt zu finden, wenn man die optischen Eigenschaften der Laserquellen genauer betrachtet. Insbesondere die Breite des emittierten Spektrums wirkt sich bei dem diffraktiven Abbildungsprinzip der MMAs direkt auf die Abbildungsqualität und damit Kontrastwerte aus. Simulationen und Berechnungen bestätigen eine Abnahme der theoretisch erreichbaren Kontrastwerte mit zunehmender spektraler Breite der Beleuchtungsquelle [135]. Die fünf im Aufbau verwendeten Quellen weisen eine Zunahme der spektralen Breite mit der Wellenlänge auf. Die theoretischen Grundlagen decken sich mit den beobachteten MMA-Messwerten. Abschließende Klärung zum beobachteten Effekt wird der Tausch einer Quelle im langwelligen Spektralbereich durch eine spektral schmalbandigere bringen, ein entsprechendes Experiment befindet sich derzeit in Planung.

Umgekehrt hat diese Beobachtung zur Folge, dass das eigentliche Leistungsvermögen der Bauelemente hinsichtlich Kontrastwerten zumindest bei den langen Wellenlängen (> 500 nm) vermutlich noch deutlich höher liegt und derzeit mit dem Charakterisierungssetup nicht bestimmbar ist. Der erwarteten Kontraste in diesem Spektralbereich liegt bei bemerkenswerten Größen von deutlich über 1000, vor allem

nennenswert, wenn man die bisher in der Lithografie gebräuchlichen Werte von 50 bis 70 [65] zum Vergleich hinzuzieht. Unabhängig vom tatsächlichen Kontrastpotential der Bauelemente ist in jedem Fall festzustellen, dass die Kalibrierung sehr erfolgreich zur Erhöhung der MMA-Kontrastwerte beiträgt. Eine Verbesserung um den Faktor 2 erscheint eine realistische Größe zu sein, in Einzelfällen sind sogar deutlich größere Werte erreichbar. Letztlich bestimmt die Ausgangssituation des unkalibrierten Bauelements entscheidend den Verbesserungsfaktor, ist doch der maximale Kontrastwert hauptsächlich nicht mehr von der Streuung der Spiegelauslenkungen, sondern anderen Parametern wie den Quelleigenschaften oder der Spiegelkrümmung abhängig.

6.6.2 Einfluss auf optische Projektionsmuster

Die interessierende Fragestellung ist hier die Mustertreue bei der Abbildung beliebiger Bilder. In Abbildung 6.20 ist bereits ein erster plastischer Vergleich von aufgenommenen Projektionsmustern im kalibrierten und unkalibrierten Zustand gezeigt wurden. Während binäre Muster noch nahezu originalgetreu abgebildet werden, ist eindeutig zu erkennen, dass eine unkalibrierte Darstellung von Graustufenbildern nicht korrekt gelingt, der qualitative Bildeindruck ist deutlich getrübt im Vergleich zum Originalbild. Mehrere Ursachen führen zu dem beobachteten Ergebnis:

- Die unbekannten notwendigen Spannungen zur Abbildung von weißen und schwarzen Bildbereichen
- Die nichtlineare elektromechanische Übertragungsfunktion der Mikrospiegel
- Die sinc-Quadrat-Übertragungsfunktion von Spiegelauslenkungen zu Bildintensitäten

Vor allem die beiden letztgenannten Punkte führen bei einer linearen Übersetzung von Graulevel in Spiegelspannungswerte zu einer fehlerhaften Übertragung auf die resultierenden Intensitätswerte.

Besser vergleichbare Zustände erhält man bei Bildern mit nur einer einzigen Intensität, wenn durch iterative Prozesse die notwendige mittlere Spannung für den unkalibrierten Zustand ermittelt wurde, um eine ähnliche mittlere Intensität wie bei kalibrierten MMA-Mustern zu erhalten. Ein solches Muster wurde bereits für den Schwarzzustand gezeigt (Abbildung 6.21) und Unterschiede zwischen den kalibrierten und unkalibrierten MMA-Bereichen dargestellt. Eine weitere Abbildung von einem Muster mittlerer Intensität soll weitere Kalibriereffekte aufzeigen (Abbildung 6.24). Betrachtet man nur die Aufnahme des MMA-Ausschnitts auf der linken Seite ist direkt ein Phänomen ersichtlich: Die Homogenität des kalibrierten Bereichs ist deutlich erhöht, wohingegen die Intensitätsstreuungen im unkalibrierten Bereich offensichtlich sind. Als Ursache kann eindeutig die Streubreite der Spiegelauslenkungen identifiziert werden. Die helleren und dunkleren Steifen im oberen unkalibrierten Bildbereich sind auf einen Bauelementeffekt in Form von entgegengesetzt ausgelenkten Spiegelreihen zurückzuführen. Graubilder mittlerer Intensität eigenen sich besonders gut, um die

Wirkungsweise MMA-Kalibrierung aufzuzeigen, der da die sinc-Quadrat-Übertragungsfunktion von Spiegelauslenkungen zu Bildintensitäten (Abbildung 2.23) bei mittleren Intensitäten ihren sensitivsten Bereich hat. Auch bei reinen Schwarz- oder Weißmustern existiert im unkalibrierten MMA eine erhöhte Spiegelauslenkungsstreuung, die Auswirkungen sind dagegen durch die optische Übertragungsfunktion weniger direkt ersichtlich.

Einen mehr quantitativen Eindruck der Bildhomogenität zeigen die beiden Schnittbilder auf der rechten Seite. Während die Intensitätsstreuung im unkalibrierten Zustand noch 3,8 % der Maximalintensität beträgt (Standardabweichung σ_I), kann sie durch die Kalibrierung auf Werte um 0,9 % gesenkt werden. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die durch das MMA verursachte Intensitätsstreuung immer zusätzlich von einem Kamerarauschen überlagert wird.



Abbildung 6.24: Ausschnitt der optischen Abbildung eines Graubildes mit teilweise kalibrierten und unkalibrierten Bereichen (Aufnahme mit λ = 405 nm)

Nachdem die Homogenitätsverbesserungen und die Rauschminimierung durch die individuelle Spiegelansteuerung an einzelnen Intensitätslevels nachgewiesen wurden, ist nun die Betrachtung der gleichzeitigen Abbildung von verschiedenen Graulevels von besonderem Interesse. Ziel der Kalibrierung war die intensitätstreue Abbildung von Graustufen mit 6 Bit Auflösung, entsprechend 64 Intensitätsstufen. Abbildung 6.25 zeigt die Messergebnisse eines Testbildes mit exakt 64 unterschiedlichen Graustufen, die sich linear zwischen minimaler (schwarz) und maximaler Intensität (weiß) verteilen. Neben dem Originalbitmap sind Aufnahmen mit einer kurzen (blau) und der längsten Wellenlänge (IR) im Charakterisierungsaufbau gezeigt, um sicherzustellen, dass die Kalibrierziele gleichfalls bei sehr unterschiedlichen Abbildungsbedingungen erfüllbar sind.



Abbildung 6.25: Abbildung eines Testmusters mit 64 Graustufen bei unterschiedlichen Quellwellenlängen

Mit bloßem Auge sind direkt die unterschiedlich intensiven Reihen erkennbar, zumindest bei den mittleren Graustufen unterscheiden sich auch die einzelnen quadratischen Graulevelbereiche innerhalb der Reihen. An dieser Stelle hilft der Machsche Streifeneffekt, ein Effekt des menschlichen Auges, der Übergänge zwischen einzelnen Graustufen überhöht (kontrastreicher) darstellt, obwohl die Flächen gleichmäßig homogene Intensitäten aufweisen [136]. Insgesamt liegt die Anzahl der Graustufen ähnlich dem Bereich, den das menschliche Auge in einem Bild gleichzeitig wahrnehmen kann. Demzufolge fällt vor allem die Erkennung der Helligkeitsunterschiede zweier benachbarter Stufen besonders schwer, speziell in dem ganz hellen und dunklen Streifen. Erst durch Unterstützung eines Schnittbildes lassen sich die Intensitätsunterschiede sichtbarmachen (Abbildung 6.26). Das Schnittbild zeigt deutlich die Abstufungen der einzelnen Graulevels in dem Bereich, der für das menschliche Auge nur schwer erfassbar ist.



Abbildung 6.26: Graustufentestmuster mit Schnittbild durch die acht dunkelsten Graufelder (Aufnahme mit λ = 680 nm)

Anhand des gezeigten Testbildes ist folglich der Nachweis erbracht, dass mindestens 64 unterschiedliche Graulevel durch die Kalibrierung mit einem MMA im Charakterisierungsaufbau abgebildet werden können. Selbst Intensitätsunterschiede, die mit dem bloßen Auge nicht/kaum wahrnehmbar sind, konnten messtechnisch nachgewiesen werden.

Sämtliche bisher gezeigten Kameraaufnahmen von kalibrierten MMA-Mustern waren gezielt so ausgewählt, dass sie einen im Folgenden vorgestellten Effekt überdecken. Abbildung 6.27 zeigt ein Graumuster einer mittlerer Intensität (55 % der Maximalintensität), welches die Auswirkung besonders deutlich herausstellt. Zu beobachten ist eine Unterteilung der gesamten MMA-Fläche in vier gleichbreite Streifen. Bei anderen Aufnahmen konnte zusätzlich eine Überlagerung von vier Spalten beobachtet werden, sodass sich insgesamt 16 gleichgroße quadratische Felder abzeichnen. Die Beobachtungen wurden als Mappingeffekt bezeichnet.



Abbildung 6.27: Abbildung Graubild (55 % Maximalintensität) mit sichtbarem Kalibriereffekt (Aufnahme mit λ = 405 nm)

Quantifiziert entsprechen die Übergänge zwischen den Feldern bzw. Streifen im Maximum Intensitätssprüngen von ca. 2,5 % der Maximalintensität. Mit diesem Wert wäre das Kalibrierziel zur zuverlässigen Abbildung von 64 Graustufen nicht mehr erreichbar. Zurückzuführen sind die Intensitätssprünge auf systematische Änderungen der Spiegelauslenkungen an den Kanten der Felder.

Als Ursache für den beobachteten Effekt konnte relativ bald das Weißlichtkalibrierverfahren aus folgenden Gründen identifiziert werden:

- die WLI-Kalibrierung benötigt ebenso 16 Messfelder in der gleichen Anordnung
- die individuellen Kalibrierkoeffizienten zeigen eine systematische Verteilung im gleichen Muster

Eine Variation der WLI-Messfeldgröße und des Abrasterschemas während der Kalibrierung bestätigten die These und zogen stets synchrone Veränderungen des Musters auf den Kalibrierkoeffizienten und auf dem optischen Bild nach sich. Detaillierte Untersuchungen der WLI-Kalibrierprozedur führten letztendlich zu der Erkenntnis, dass scheinbar systematische Messfehler des Weißlichtinterferometers vorliegen. Beobachtet werden konnte ein Messfehler in Form einer systematischen Auslenkungsänderung von bis zu 5 nm. Eine Quantifizierung der tatsächlichen Größe wird erschwert durch die Variation der Größe des Fehlers abhängig von der Spiegelauslenkung. Zusätzlich konnten bei Referenzmessungen mit standardisierten Stufennormalen die Fehler nicht reproduziert werden. Vielmehr scheint die Kombination aus spezieller Objektstruktur (MMA-Gitteroberfläche) und WLI-Messung zu dem beobachteten Effekt zu führen. Eine wirksame Korrektur des Fehlers schlug daher fehl, weil eine exakte Quantifizierung bisher nicht möglich war.

Nach derzeitiger Erkenntnislage deuten alle Hinweise darauf hin, dass das am WLI verwendete Objektiv bzw. dessen Justierung für den Messeffekt verantwortlich ist. Sowohl ein Objektivwechsel, als auch eine Neujustierung zogen Veränderungen im Erscheinungsbild des Messeffekts nach sich. Eine vollständige Vermeidung durch bessere Justage ist bisher nicht gelungen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die hochpräzise MMA-Kalibrierung die derzeitige Grenze des Messgerätes erreicht hat.

Das der Effekt nicht bei den Kontrollmessungen der Kalibrierung am WLI auffiel (siehe Abschnitt 5.4) ist darauf zurückzuführen, dass die Kontrolle mit derselben Messfeldgröße und in demselben Abrasterschema durchgeführt wurde. Die Messabweichung wird insofern vom WLI teilweise selbst kompensiert und tritt nicht zutage.

Eine wirksame Lösung zur Vermeidung des Effekts bzw. zur Verringerung der Auswirkungen konnte in der Veränderung des Rasterschemas gefunden werden, indem die einzelnen Kalibriermessfelder durch Halbierung oder Vierteilung verkleinert wurden. Dadurch wird der Messfehler nicht vermieden, jedoch in seiner Auswirkung verringert. Wenngleich dafür die doppelte oder vierfache Kalibrierzeit in Kauf genommen werden muss, so ist am optischen Messplatz eine deutliche Verringerung der Intensitätssprünge an den Messfeldrändern zu beobachten.

6.6.3 Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen

Bis hierhin basiert die vorliegende Arbeit auf zwei voneinander nahezu unabhängigen optischen Messplätzen zur Mikrospiegelarray-Charakterisierung, –Kalibrierung und deren Validierung. Die jeweils separat erzielten Messergebnisse am Weißlichtinterferometersetup finden sich vor allem im Kapitel 5, die vom laseroptischen Charakterisierungssystem in Kapitel 6 bis hierhin. Die Verknüpfungspunkte beider Ergebnisse wurden bisher nur andiskutiert und sollen daher in diesem Kapitel im Fokus stehen.

Während die Weißlichtcharakterisierung vor allem mechanische Spiegelparameter erfasst, charakterisiert man am Lasermessplatz die optischen Bauelementeigenschaften. Alle bisher vorgestellten Messergebnisse zeigen sich über beide Messplätze hinweg konsistent. Nachdem durch die WLI-Kalibrierung nachweislich die Streuung der Spiegelauslenkungen deutlich geringer ausfällt, waren in der optischen MMA-Abbildung erhöhte Kontrastwerte und deutlich homogenere uniforme Flächen zu beobachten.

Zur Einordnung der Ergebnisse sei ergänzend erwähnt, dass die Abbildungsleistung auf die Kamera nicht nur vom MMA selbst, sondern zusätzlich von allen optischen Komponenten im System mitbestimmt wird. Obwohl während des Systemdesigns eine Zielvorgabe für deren Einflussminimierung auf die Messergebnisse im Fokus stand, um vorrangig unverfälschte MMA-Eigenschaften zu charakterisieren, ist eine geringfügige Beeinflussung nicht auszuschließen. Dies zeigt sich vor allem bei den Kontrastbegrenzungen Wellenlängen, hervorgerufen bei langen durch die Laserguelleigenschaften.

Zusätzlich zu den bisher vorgestellten Ergebnissen wurden während der Untersuchungen weitere Erkenntnisse gewonnen, die so zu Beginn der Arbeit nicht zu erwarten waren. Ein wesentlicher Grund dafür ist die zweigleisige Strategie zur MMA-Charakterisierung, die eine umfassendere Untersuchung und Bewertung der Bauelemente erlaubt und deren interdisziplinärem, mechatronischem Charakter gerecht wird. Vor allem dieser doppelten Betrachtungsweise ist die Aufdeckung von Limitationen beider Messplätze zu verdanken. Eine Begrenzung des WLI-Aufbaus äußert sich in dem Mappingeffekt, eine Grenze des Laseraufbaus zeigt sich in den Kontrastwerten kalibrierter MMAs bei großen Wellenlängen. Diese Feststellungen sind nicht ausschließlich negativ zu betrachten, sondern sprechen vielmehr für die Leistungsfähigkeit der Kalibrierprozedur. Erst die MMA-Kalibrierung mit ihrer hervorragenden Genauigkeit und die Nutzung beider Messplätze in Kombination machten es überhaupt möglich diese Grenzen aufzudecken. Mit anderen Worten ausgedrückt liefert der Lasermessplatz solch detaillierte Ergebnisse, dass WLI-Messfehler aufgedeckt wurden, die WLI-Kalibrierung hingegen verbessert das MMA-Leistungsvermögen so stark, dass es mit dem Lasermessplatz nicht mehr vollständig erfasst werden kann.

Als Nächstes soll ein Punkt aus der Einleitung aufgegriffen werden. Es wurde formuliert, dass zunächst nur die Kontrastwerte als Ziel im Fokus der Kalibrieruntersuchungen standen. Erst im Laufe der Arbeit kristallisierte sich das zweite Kalibrierziel hinsichtlich der Grauwertwiedergabe heraus, um eine qualitativ hochwertige homogene Abbildung von gleichförmigen MMA-Mustern zu gewährleisten. Zurückzuführen ist dieser Erkenntnisgewinn vor allem auf den beobachteten Mappingeffekt. Bis zu dessen erstmaliger Beobachtung galten vor allem die digitale Auflösung der MMA-Steuerelektronik sowie die verbleibende Spiegelauslenkungsstreuung als entscheidende Kriterien für die Anzahl und Homogenität erzeugbarer Graustufen. Kann der Effekt vollständig verhindert oder korrigiert werden, wäre diese Annahme nach wie vor aktuell. Erst durch die Beobachtung des Kalibriermappings auf Abbildungen mittlerer Intensitätswerte rückte das Thema Grauwertwiedergabe mehr in den Vordergrund.

Es bleibt indes festzuhalten, dass der Mappingeffekt keinen Einfluss auf die Kontrastwerte nimmt. Zum Ersten sind dafür die jeweils nur lokal untersuchten MMA-Bereiche für die Kontrastermittlung verantwortlich, der Mappingeffekt zeigt sich nur bei einer Betrachtung des gesamten MMAs, zum Zweiten sind die Auswirkungen des Kalibriereffekts – wie dargestellt – bei reinen Schwarz- und Weißbildern deutlich verringert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der als Kalibrierung bezeichnete neuartige Technologieschritt optischer MEMS wurde erfolgreich in der Praxis umgesetzt und validiert. Als Lösungsweg diente ein mechatronischer Ansatz zur profilometrischen Vermessung und Korrektur der elektromechanischen Aktuatoren. Dank der implementierten Kalibrierprozedur ist erstmalig ein MMA-Einsatz in einer multispektralen Arbeitsumgebung, wie sie beispielsweise bei Mikroskopsystemen vorliegt, gewährleistet. Darüber hinaus konnte das optische Leistungsvermögen der Bauelemente deutlich verbessert werden, sodass bisher nur theoretisch bekannte optische Parameter zum ersten Mal in der Praxis erschlossen wurden, beispielsweise Kontrastwerte. Gemäß den geometrischen Anforderungen von optischen Komponenten im (Sub-) Nanometerbereich in den zukunftsweisenden Märkten der Ultrapräzisions- und diffraktiven Optik kann der neu entwickelte Kalibrierschritt in der MEMS-Fertigung als Türöffner für einen Einsatz in den neuen Anwendungsfeldern verstanden werden.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen erfolgten stellvertretend für die Gruppe der optischen MEMS an Mikrospiegelarrays bestehend aus ca. 65000 individuell adressierbaren, analog betriebenen Torsionsspiegeln. Der Bauelementausgangszustand war prozessbedingt gekennzeichnet durch statistische und systematische Streuungen der elektromechanischen Auslenkcharakteristika aller Einzelspiegel, die sich aufgrund des diffraktiven Arbeitsprinzips auf das Abbildungsvermögen direkt leistungsmindernd auswirken.

Das zur Reduzierung der Streuung eingesetzte Kalibrierverfahren basiert auf mittels Weißlichtinterferometrie zur individuellen Profilometrie zeitaufgelösten Charakterisierung des elektromechanischen Verhaltens aller Mikroaktuatoren im Bauelement. Das kommerzielle Messsystem wurde durch Hardund Softwarekomponenten so ergänzt, dass in einem autonomen Vorgang das Bauelement vollständig vermessen wird. Die Speicherung der Ergebnisse in Form von individuellen Spiegelkoeffizienten einer analytischen Funktion in einer Kalibrierdatei gewährleistet den universellen Einsatz der Bauelemente mit stets korrigiertem Einzelspiegelverhalten.

Eine detailliertere Betrachtung der Kalibrierergebnisse zeigt eine Reduzierung der Spiegelauslenkungsstreuung um mindestens den Faktor 5. Die nach der Kalibrierung verbliebenen Auslenkungsstreuungen betrugen je nach Zielwert um $\sigma_d = 1$ nm, maximal $\sigma_d = 2$ nm bei einer Zielauslenkung von 200 nm, was einer bisher unerreichten Auslenkgenauigkeit von $\lambda/400$ (Beleuchtungswellenlänge $\lambda = 800$ nm) entspricht.

Der Nachweis des erhöhten optischen MMA-Leistungsvermögens wurde an einem parallel entwickelten weiteren Messsystem erbracht. Den optischen Aufbau kennzeichnen fünf verschiedene Laserquellen in einem breiten Spektralbereich (UV bis NIR) zur Beleuchtung des MMAs, sowie ein Kamerasystem zur Aufzeichnung der projizierten Muster. Die vollreflektive Ausführung stellt ein wesentliches Merkmal des Charakterisierungssystems dar, sodass MMA-Abbildungsmuster ohne chromatische Aberrationen in höchster Qualität aufgezeichnet und weiterverarbeitet werden.

Anhand von zwei optischen Parametern fanden Untersuchungen zur Wirkungsweise der MEMS-Kalibrierung statt: Kontrastwerte der projizierten Beleuchtungsmuster sowie deren Intensitätstreue bei der Wiedergabe von Grauwerten. Den Kontrast betreffend wurde mindestens eine Verdoppelung der Messwerte durch die Kalibrierung nachgewiesen, Werte von teilweise über 2000 übertreffen klar die Zielspezifikation. Simulationen legen ein noch höheres vorhandenes Kontrastpotential nahe, was durch Einschränkungen im Messsystem derzeitig noch nicht erfassbar ist. Das Ziel der Wiedergabe von mindestens 64 verschiedenen Intensitätslevels konnte ebenfalls erreicht werden, sodass in Echtzeit intensitätsmodulierte Graustufenprojektionsmuster erzeugbar sind.

Neben den verbessert nutzbaren Bauelementeigenschaften weist die vorliegende diffraktiver MMAs in einem multispektralen Analyse erstmalig die Nutzung Arbeitsumfeld nach. Während die Bauelemente in der Vergangenheit vor allem in monochromatischen Spezialanwendungen im tiefen UV-Spektralbereich in der Mikrolithografie ihr Einsatzfeld hatten, ist jetzt erstmalig dank der profilometrischen Kalibrierprozedur der Weg für einen universelleren Bauelementeinsatz geebnet. Die vollständige Charakterisierung aller Einzelspiegelauslenkverhalten erlaubt den MMA-Einsatz bei beliebigen Wellenlängen in einem breiten Spektralbereich, was den Anforderungen in Mikroskopieapplikationen sowie weiteren Anwendungsfeldern entspricht. Folglich ist die Kalibrierung von MOEM-Systemen als Grundvoraussetzung für die weitere Öffnung des Marktes der diffraktiven Optik anzusehen, sodass zudem Anwendungsfelder Holografie, andere wie diffraktive Messtechnik oder Displayanwendungen von hochpräzisen, programmierbaren, optischen Modulatoren profitieren können.

Die aufgezeigten Grenzen der profilometrischen Kalibrierung, verursacht vor allem durch Messgerätetoleranzen, wirkten sich zwar nicht negativ auf die Ziele dieser Arbeit aus, verdeutlichen hingegen das Potential für zukünftige Untersuchungen. Vor allem eine sogenannte optische Kalibrierung in Form von hochpräziser Spiegelansteuerung bei gleichzeitiger Analyse der Projektionsmuster lässt eine weitere Erhöhung des MMA-Leistungsvermögens erwarten.

Zusammengefasst unterstreicht diese Arbeit zudem, dass das komplexe mechatronische System Mikrospiegelarray handhabbar, kontrollierbar sowie für einen breiten Markt einsetzbar ist. Das eingehende Verständnis der interdisziplinären MOEMS-Zusammenhänge sowie deren Kontrolle ermöglichen erweiterte Einsatzchancen für die Bauelemente. Der Endanwender profitiert zudem von der Kalibrierung durch einfachere Systemhandhabung und erhöhte Sicherheit im Betrieb, die mechatronischen und ansteuerungstechnischen Teilbereiche werden komplett durch die Kalibrierdatei als Bestandteil jeder MMA-Lieferung abgedeckt.

Abkürzungsverzeichnis

1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
AD	Adresselektrode
ANSI	American National Standards Institute
AP	Arbeitspunkt
ASCII	american standard code for information interchange
ASIC	application specific integrated circuit
CCD	charge-coupled device
CE	Rückstellelektrode
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
CRT	cathode ray tube
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLP	digital light precessing
DMD	digital micromirror device
DRAM	dynamic random access memory
DUV	deep ultraviolet
et al.	et alii / et aliae / et alia (Bedeutung: und andere)
EU	Europäische Union
FPGA	field programmable gate array
GLV	Grating Light Valve
HDTV	high definition television
IPMS	Institut für Photonische Mikrosysteme
IR	Infrarot
LCD	liquid crystal display
LCoS	liquid crystal on silicon
LIGA	Lithografie, Galvanik, Abformung
Max.	Maximalwert
ME	Spiegelelektrode
MEMI	Micromirror Enhanced Micro-Imaging
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches System
Mio.	Million
MLM	moving liquid mirror
MMA	micro mirror array
MOEMS	Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches System
MFT	Modulationstransferfunktion
NA	Numerische Apertur
NIR	nahes Infrarot
OLED	organic light emitting diode
PC	Personalcomputer
PDP	plasma display panel
REM	Rasterelektronenmikroskop

SLM	spatial light modulator
Sp1, Sp2	Spiegel 1, Spiegel 2
Std.	Standardabweichung
USB	universal serial bus
UV	Ultraviolett
VIS	visible spectrum
WLI	Weißlichtinterferometer

Formelverzeichnis / Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a_1, a_2, U_0, U_{pull_in},$		Koeffizienten
$d_0, d_{pull_{in}},$		
A, †, H,	_	
A	m²	Elektrodenfläche
C, C _{max}		Kontrast, Maximalkontrast
d, ∆d	nm	Spiegelauslenkung, Abweichung der Spiegelauslenkung
d_{max} , d_{min} , d_{Ziel}	nm	maximale und minimale Auslenkung, Zielauslenkung
f	mm	Brennweite
f	Hz	Frequenz
F	Ν	Kraft
i		Index, Laufvariable
$I, I_{max}, I_{min}, \Delta I$		Intensität, Maximal-, Minimalintensität, Intensitätsabweichung
I_{n_korr}, I_n, I_{DS}		korrigierte Intensität, Intensität aktuelle Messung, Dunkelstromintensität
k		ganzzahlige Vielfache (Beugungsordnung)
L _v	cd/m²	Leuchtdichte
m, m _{max}		Anstieg, maximaler Anstieg
n		Zielanzahl, Index
p, P	mm	Pitch, Gittergröße, Gitterkonstante
p _i		Polynomkoeffizienten
Ref ₀ , Ref _n , Ref _{DS}		Referenzintensität 1. Messung, Referenzintensität aktuelle Messung, Dunkelstromreferenzintensität
S		Kohärenzparameter
U, U ₁ , U ₂ , ΔU	V	Spannung, Spannung1, Spannung 2, Spannungsschritt
U_{CF}, U_{MF}, U_{AD}	V	Rückstell-, Spiegel-, Adresselektrodenspannung
U_A, U_B	V	Spannungsdifferenz an Adress- und Rückstellelektrode
Z	μm	Abstand Elektrode-Spiegel
Z , Z ₀	mm	Scanhöhe, maximale Scanhöhe
α	0	Spiegelauslenkung
Δx	um	Auflösunasarenze
3	F/m	Dielektrizitätskonstante
λ	nm	Wellenlänge
π		Kreiszahl
		Standardabweichung, gemessene Standardabweichung
$\sigma_{Ziel}, \sigma_d, \sigma_l$		Zielstandardabweichung, Standardabweichung der Auslenkungen, Standardabweichung der Kameraintensität

Literaturverzeichnis

- [1] Mahalik, N. P.: MEMS. New Dehli : Tata McGraw-Hill, 2008
- [2] Glück, M.: *MEMS in der Mikrosystemtechnik*. 1. Aufl. Wiesbaden : Teubner Verlag, 2005
- [3] Salomon, P.: *European roadmaps for MOEMS applications*. In: Proceedings of SPIE Bd. 4983, 2003
- [4] Ljungblad, U.; Askebjer, P.; Karlin, T.; Sandström, T.; Sjöberg, H.: A High-End Mask Writer using a Spatial Light Modulator. In: Proceedings of SPIE Bd. 5721, 2005
- [5] MEMI (Micromirror Enhanced Micro imaging), URL: www.memi-fp7.org, Abruf: 23.08.2012
- [6] Motamedi, M. E.: MOEMS. Bellingham : SPIE Press, 2005
- [7] Salomon, P.: *NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005-2009*, NEXUS, 2005
- [8] Motamedi, M. E.: *Merging microoptics with micromechanics: micro-opto-electromechanical (MOEM) devices.* In: Proceedings of SPIE Bd. CR49, 1993
- [9] Schenk, H.; Wolter, A.; Dauderstädt, U.; Gehner, A.; Grüger, H.; Drabe, C.; Lakner, H.: *Photonic Microsystems: An enabling technology for light deflection and modulation*. In: Proceedings of SPIE Bd. 5348, 2004
- [10] Mounier, E. ; de Charentenay, Y. ; Eloy, J.-C.: *New applications for MOEMS*. In: Proceedings of SPIE Bd. 6114, 2006
- [11] Petersen, K. E.: *Silicon Torsional Scanning Mirror*. In: IBM Journal of Research and Development Bd. 24, Nr. 5, 1980
- [12] Petersen, K. E.: *Silicon as a mechanical material*. In: Proceedings of the IEEE Bd. 70, Nr. 5, 1982
- [13] Thomas, R. N.; Guldberg, J.; Nathanson, H. C.; Malmberg, P. R.: *The Mirror-Matrix Tube: A Novel Light Valve for Projection Displays*. In: IEEE Transactions on Electron Devices Bd. 22, Nr. 9, 1975
- [14] Toshiyoshi, H.: Lateral Spread of MEMS WDM Technologies. In: Proceedings of SPIE Bd. 7930, 2011
- [15] Petersen, K. E.: *Micromechanical Light Modulator Array Fabricated on Silicon*. In: Applied Physics Letters Bd. 31, Nr. 8, 1977
- [16] Trisnadi, J. I.; Carlisle, C. B.; Monteverde, R.: Overview and applications of Grating-Light-Valve-based optical write engines for high-speed digital imaging. In: Proceedings of SPIE Bd. 5348, 2004
- [17] *Silicon Light Machines Homepage*, URL: www.siliconlight.com, Abruf: 23.08.2012
- [18] Wolter, A. ; Kirstein, K.-U. ; Doleschal, W. ; Kück, H. ; Lakner, H. ; Zimmer, G.: *A spatial light modulator using moving liquid mirrors (MLM) on a CMOS activematrix.* In: Proceedings of 7th International Conference on New Actuators, 2000
- [19] Sandner, T.; Kenda, A.; Drabe, C.; Schenk, H.; Scherf, W.: *Miniaturized FTIR-spectrometer based on optical MEMS translatory actuator*. In: Proceedings of SPIE Bd. 6466, 2007
- [20] Wolter, A. ; Hsu, S.-T. ; Schenk, H. ; Lakner, H.: *Applications and requirements for MEMS scanner mirrors*. In: Proceedings of SPIE Bd. 5719, 2005

- [21] Schenk, H.; Dürr, P.; Kunze, D.; Kück, H.: A new driving principle for micromechanical torsional actuators. In: Micro Electro Mechanical Systems 1999 Bd. 1, 1999
- [22] Torashima, K. ; Teshima, T. ; Mizoguchi, Y. ; Kato, T. ; Shimada, Y. ; Yagi, T.: A micro scanner with low power consumption using double coil layers on a permalloy film. In: Proceedings IEEE-LEOS Optical MEMS, 2004
- [23] Sprague, R. B. ; Montague, T. ; Brown, D.: *Bi-axial magnetic drive for scanned beam display mirrors*. In: Proceedings of SPIE Bd. 5721, 2005
- [24] Bakke, T. ; Johansen, I.-R.: *A robust, non-resonant piezoelectric micromirror*. In: 16th International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2011
- [25] Jain, A.; Kopa, A.; Pan, Y.; Fedder, G. K.; Xie, H.: A Two-Axis Electrothermal Micromirror for Endoscopic Optical Coherence Tomography. In: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics Bd. 10, Nr. 3, 2004
- [26] Sandner, T. ; Grasshoff, T. ; Schenk, H.: *Translatory MEMS actuator with extraordinary large stroke for optical path length modulation*. In: 2010 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2010
- [27] Schutzrecht US 4.566.935, Hornbeck, L. J.: *Spatial light modulator and method*, 1986
- [28] Schutzrecht US 5.083.857, Hornbeck, L. J.: *Multi-level deformable mirror device*, 1992
- [29] Schutzrecht US 6.522.454 B2, Meier, R. E. ; Huffmann, J. D.: Hidden Hinge Digital Micromirror Device With Improved Manufacturing Yield And Improved Contrast Ratio, 2003
- [30] Digital Light Processing, URL: www.dlp.com, Abruf: 23.08.2012
- [31] Bert, T. ; Marescaux, T.: *White Paper 4K resolution: more than meets the eye*. Kortrijk : Barco, 2011
- [32] *Product Sheet DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD*, Texas Instruments, 2011
- [33] Product Sheet DLP Discovery 4100, Texas Instruments, 2009
- [34] Application Report DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology, Texas Instruments, 2008
- [35] Hornbeck, L. J.: *Digital Light Processing for High-Brightness, High-Resolution Applications*. In: Proceedings of SPIE Bd. 3013, 1997
- [36] Gong, Y.; Zhang, S.: High-resolution, high-speed three-dimensional shape measurement using projector defocusing. In: Optical Engineering Bd. 50, Nr. 2, 2011
- [37] Bitte, F.; Dussler, G.; Pfeiffer, T.: *3D micro-inspection goes DMD*. In: Optics and Lasers in Engineering Bd. 36, Nr. 2, 2001
- [38] Frankowski, G. ; Hainich, R.: DLP/DSP-based optical 3D sensors for the mass market in industrial metrology and life sciences. In: Proceedings of SPIE Bd. 7932, 2011
- [39] Reimer, K. ; Engelke, R. ; Witt, M. ; Wagner, B.: 16-k Infrared Micromirror Arrays with Large Beam Deflection and Tenth Millimeter Pixel Size. In: Proceedings of SPIE Bd. 3878, 1999
- [40] Fraunhofer ISIT Digitale Mikrospiegel Arrays, URL: http://www.isit.fraunhofer.de/de/Arbeitsgebiete/Mikrosystemtechnik/anwendunge n/digitale_mikrospiegel_arrays.html, Abruf: 23.08.2012
- [41] Pardo, F. ; Simon, M. E. ; Aksyuk, V. ; Ryf, R. ; Lai, W. Y.-C. ; Pai, C. S. ; Klemens, F. P. ; Miner, J. F. ; Cirelli, R. A. ; Ferry, E. J. ; Bower, J. E. ; Mansfield, W. M. ; et al.: *Characterization of Piston-Tip-Tilt mirror pixels for*

scalable SLM arrays. In: IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference, 2006

- [42] Gehner, A.; Wildenhain, M.; Neumann, H.; Knobbe, J.; Komenda, O.: MEMS analog light processing - an enabling technology for adaptive optical phase control. In: Proceedings of SPIE Bd. 6113, 2006
- [43] Fern ndez, B. . Kubby, .: High-aspect-ratio microelectromechanical systems deformable mirrors for adaptive optics. In: Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS Bd. 9, Nr. 4, 2010
- [44] Helmbrecht, M. A.; Juneau, T.; Hart, M.; Doble, N.: Performance of a highstroke, segmented MEMS deformable-mirror technology. In: Proceedings of SPIE Bd. 6113, 2006
- [45] Bifano, T.; Cornelissen, S.; Bierden, P.: *Recent advances in high-resolution MEMS DM fabrication and integration*. In: Proceedings of AMOS, 2010
- [46] López, D.; Aksyuk, V.; Watson, G. P.; Simon, M. E.; Mansfield, W. M.; Klemens, F. P.; Cirelli, R. A.; Ferry, E. J.; Papazian, A.; Pardo, F.; Bolle, C.; Basavanhally, N.; et al.: *Two dimensional MEMS piston array for DUV optical pattern generation*. In: IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference, 2006
- [47] Dauderstädt, U.; Askebjer, P.; Björnangen, P.; Dürr, P.; Friedrichs, M.; List, M.; Rudloff, D.; Schmidt, J.-U.; Müller, M.; Wagner, M.: Advances in SLM Development for Microlithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 7208, 2009
- [48] Schmidt, J.-U.; Friedrichs, M.; Bakke, T.; Voelker, B.; Rudloff, D.; Lakner, H.: Technology development for micromirror arrays with high optical fill factor and stable analogue deflection integrated on CMOS substrates. In: Proceedings of SPIE Bd. 6993, 2008
- [49] Sinning, S.; Wullinger, I.; Schmidt, J.-U.; Friedrichs, M.; Dauderstädt, U.; Wolschke, S.; Hughes, T.; Pahner, D.; Wagner, M.: One dimensional Light Modulator. In: Proceedings of SPIE Bd. 8252, 2012
- [50] Dauderstädt, U.; Dürr, P.; Krellmann, M.; Karlin, T.; Berzinsh, U.; Leonardsson, L.; Wendrock, H.: Operation of spatial light modulators in DUV light. In: Proceedings of SPIE Bd. 4983, 2003
- [51] Hornbeck, L. J.: From cathode rays to digital micromirrors : A history of electronic projection display. In: TI Technical Journal, 1998
- [52] Ling, F. Z.; De Coster, J.; Beernaert, R.; Witvrouw, A.; Celis, J.-P.; De Wolf, I.: An investigation of stiction in poly-SiGe micromirror. In: 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011
- [53] Lauria, J.; Albright, R.; Vladimirsky, O.; Hoeks, M.; Vanneer, R.; van Drieenhuizen, B.; Chen, L.; Haspeslagh, L.; Witvrouw, A.: *SLM device for 193nm lithographic applications*. In: Microelectronic Engineering Bd. 86, Nr. 4-6, Elsevier B.V., 2008
- [54] Haspeslagh, L.; De Coster, J.; Pedreira, O. V.; De Wolf, I.; Du Bois, B.; Verbist, A.; Van Hoof, R.; Willegems, M.; Locorotondo, S.; Bryce, G.; Vaes, J.; van Drieenhuizen, B.; et al.: *Highly reliable CMOS-integrated 11MPixel SiGebased micro-mirror arrays for high-end industrial applications*. In: 2008 IEEE International Electron Devices Meeting, 2008
- [55] Witvrouw, A.; Van Hoof, R.; Bryce, G.; Du Bois, B.; Verbist, A.; Severi, S.; Haspeslagh, L.; Osman, H.; De Coster, J.; Wen, L.; Puers, R.; Beernaert, R.; et al.: SiGe MEMS Technology: a Platform Technology Enabling Different Demonstrators. In: ECS TRANSACTIONS Bd. 33, Nr. 6, ECS, 2010
- [56] Kielhorn, M.; Cox, S.; Ipp, E.; Heintzmann, R.: *Spatio-angular Microscopy*. In: Proceedings of SSI, 2011

- [57] Berndt, D.; Heber, J.; Sinning, S.; Rudloff, D.; Wolschke, S.; Eckert, M.; Schmidt, J.-U.; Bring, M.; Wagner, M.; Lakner, H.: Calibration of diffractive micromirror arrays for microscopy applications. In: Proceedings of SPIE Bd. 8191, 2011
- [58] Schmidt, J.-U.; Bring, M.; Heber, J.; Friedrichs, M.; Rudloff, D.; Rößler, J.; Berndt, D.; Neumann, H.; Kluge, W.; Eckert, M.; List, M.; Müller, M.; et al.: Technology development of diffractive micromirror arrays for the deep ultraviolet to the near infrared spectral range. In: Proceedings of SPIE Bd. 7716, 2010
- [59] Lakner, H.; Dürr, P.; Dauderstädt, U.; Doleschal, W.; Amelung, J.: Design and Fabrication of Micromirror Arrays for UV-Lithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 4561, 2001
- [60] Küpfmüller, K. ; Mathis, W. ; Reibiger, A.: *Theoretische Elektrotechnik*. 17. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [61] Jang, Y.-H.; Lee, K.-N.; Kim, Y.-K.: *Characterization of a single-crystal silicon micromirror array for maskless UV lithography in biochip applications*. In: Journal of Micromechanics and Microengineering Bd. 16, Nr. 11, 2006
- [62] Degani, O.; Socher, E.; Lipson, A.; Leitner, T.; Setter, D. J.; Kaldor, S.; Nemirovsky, Y.: *Pull-in Study of an Electrostatic Torsion Microactuator*. In: Journal of Microelectromechanical Systems Bd. 7, Nr. 4, 1998
- [63] Bergmann, L. ; Schaefer, C. ; Niedrig, H.: *Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3: Optik.* 10. Aufl. Berlin : de Gruyter, 2004
- [64] Reynolds, G.; DeVelis, J. B.; Parrent, G. B.; Thompson, B. J.: *The New Physical Optics Notebook: Tutorials in Fourier Optics*. Bellingham : SPIE Optical Engineering Press, 1989
- [65] Heber, J.; Kunze, D.; Dürr, P.; Rudloff, D.; Wagner, M.; Björnangen, P.; Luberek, J.; Berzinsh, U.; Sandström, T.; Karlin, T.: Contrast properties of spatial light modulators for microlithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 6730, 2007
- [66] Gaskill, J. D.: *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*. 1. Aufl., Wiley, 1978
- [67] Keller, P. A.: Electronic Display Measurement, Wiley & Sons, 1997
- [68] Chen, J. ; Cranton, W. ; Fihn, M.: *Handbook of Visual Display Technology*. Berlin : Springer, 2012
- [69] Stupp, E. H. ; Brennesholtz, M. S.: Projection Displays, Wiley & Sons, 2008
- [70] Soneira, R. M.: Display Myths Shattered: How Monitor & HDTV Companies Cook Their Specs, 2010, URL: http://www.maximumpc.com/article/features/display_myths_shattered, Abruf: 23.08.2012
- [71] Becker, M. E.: Specsmanship: the artistry of sugarcoating performance specifications. In: LCD TV Matters Bd. 1, Nr. 3, 2008
- [72] Kelley, E. F.: What Do the Specifications Mean? In: SID 04 ADEAC, 2004
- [73] Soneira, R. M.: *Display Technology Shoot-Out*, 2006, URL: http://www.displaymate.com/ShootOut_Comparison.htm, Abruf: 23.08.2012
- [74] DeBoer, C.: So Which Display Technology Is Best?, 2004, URL: http://www.audioholics.com/education/display-formats-technology/displaytechnologies-guide-lcd-plasma-dlp-lcos-d-ila-crt/display-technologies-guide-lcdplasma-dlp-lcos-d-ila-crt-page-11, Abruf: 23.08.2012
- [75] Gurski, J. ; Quach, L. M.: *White Paper Display Technology Overview*, Lytica, 2005

- [76] Luberek, J.; Carroll, A.; Sandström, T.; Karawajczyk, A.: Controlling CD variations in a massively parallel pattern generator. In: Proceedings of SPIE Bd. 4691, 2002
- [77] *Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) 1924*, Cambridge University Press, 1926
- [78] *Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), 1951*. Paris : Bureau Central de la CIE, 1951
- [79] Gonzalez, R. C. ; Wintz, P.: *Digital Image Processing*. 2. Aufl., Addison-Wesley Publishing Company, 1987
- [80] Lin, J.; Gao, Z.; Xu, B.; Cao, Y.; Yingjian, Z.: The affection of grey levels on mutual information based medical image registration. In: Proceedings of 26th Annual International Conference of the IEEE, IEMBS'04 Bd. 1, 2004
- [81] O'Mahony, C. ; Hill, M. ; Brunet, M. ; Duane, R. ; Mathewson, A.: Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry. In: Measurement Science and Technology Bd. 14, Nr. 10, 2003
- [82] Novak, E.; Pasop, F.; Browne, T.: Production metrology for MEMS characterization. In: Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, 2003
- [83] De Wolf, I.; De Coster, J.; Pedreira, O. V.; Haspeslagh, L.; Witvrouw, A.: Wafer Level Characterization and Failure Analysis of Microsensors and Actuators. In: 2008 IEEE Sensors, 2008
- [84] Hering, M.: Angewandte statistische Optik in der Weißlicht-Interferometrie: Räumliches Phasenschieben und Einfluss optisch rauer Oberflächen. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Dissertation, 2007
- [85] Norm DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik, 1995
- [86] Hopkinson, G. R. ; Goodman, T. M. ; Prince, S. R.: *A Guide to the Use and Calibration of Detector Array Equipment*. Bell : SPIE Press, 2004
- [87] Otón, J.; Ambs, P.; Millán, M. S.; Pérez-Cabré, E.: Multipoint phase calibration for improved compensation of inherent wavefront distortion in parallel aligned liquid crystal on silicon displays. In: Applied optics Bd. 46, Nr. 23, 2007
- [88] Xun, X.; Cohn, R. W.: Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators. In: Applied optics Bd. 43, Nr. 35, 2004
- [89] Harriman, J. ; Linnenberger, A. ; Serati, S.: *Improving spatial light modulator performance through phase compensation*. In: Proceedings of SPIE Bd. 5553, 2004
- [90] Otón, J.; Millán, M. S.; Ambs, P.; Pérez-Cabré, E.: Advances in LCoS SLM characterization for improved optical performance in image processing. In: Proceedings of SPIE Bd. 7000, 2008
- [91] Gu, D.-F.; Winker, B.; Wen, B.; Taber, D.; Brackley, A.; Wirth, A.; Albanese, M.; Landers, F.: Calibration of a spatial light modulator containing dual frequency liquid crystal. In: Proceedings of SPIE Bd. 5894, 2005
- [92] Bergeron, A.; Gauvin, J.; Gagnon, F.; Gingras, D.; Arsenault, H. H.; Doucet, M.: Phase calibration and applications of a liquid-crystal spatial light modulator. In: Applied optics Bd. 34, Nr. 23, 1995
- [93] Martínez-León, L. I. ar oszewicz, Z. Kołodziejczyk, A. Dur n, V. Tajahuerce, E. ; Lancis, J.: *Phase calibration of spatial light modulators by means of Fresnel images*. In: Journal of Optics A: Pure and Applied Optics Bd. 11, Nr. 12, 2009
- [94] Corrigan, R. W.; Amm, D. T.; Alioshin, P. A.; Staker, B.; LeHoty, D. A.; Gross, K. P.; Lang, B. R.: Calibration of a Scanned Linear Grating Light Valve Projection System. In: SID Symposium Digest of Technical Papers Bd. 30, Nr. 1, 1999

- [95] Schutzrecht EP 1542060, Sagan, S.: Spatial light modulator calibration, 2005
- [96] Schutzrecht US 6898377, LeHoty, D. A. ; Staker, B.: *Method and applications for calibration of light-modulating array*, 2005
- [97] Schutzrecht US 2006/0268387, Lianza, T. A.: Apparatus and method for calibration of DLP/DMD projection image systems, 2006
- [98] Bastani, B. ; Funt, B. ; Ghaffari, R.: *End-User DLP Projector Colour Calibration*. In: AIC 2005 Proc. 10th Congress of the International Colour Association, 2005
- [99] Schutzrecht US 6965119 B2, Sandström, T. ; Luberek, J.: Method and apparatus of calibrating mulit-position SLM elements, 2005
- [100] Wang, J.-S. ; Solgaard, O. ; Neureuther, A. R.: High-sensitivity interferometric schemes for ML2 micromirror calibrations. In: Proceedings of SPIE Bd. 6151, 2006
- [101] Stone, E. M.; Hintersteiner, J. D.; Cebuhar, W. a.; Albright, R.; Eib, N. K.; Latypov, A. M.; Baba-Ali, N.; Poultney, S. K.; Croffie, E. H.: Achieving maskbased imaging with optical maskless lithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 6151, 2006
- [102] Schutzrecht US 6847461 B1, Latypov, A. M. ; Poultney, S. K.: System and method for calibration a spatial light modulator array using shearing interferometry, 2005
- [103] Schutzrecht US 6965436 B2, Latypov, A. M. ; Poultney, S. K.: System and method for calibration a spatial light modulator array using shearing interferometry, 2005
- [104] Schutzrecht US 7158238 B2, Latypov, A. M. ; Poultney, S. K.: System and method for calibration a spatial light modulator array using shearing interferometry, 2007
- [105] Schutzrecht US 2005/0168790 A1, Latypov, A. M. ; Poultney, S. K.: System and method for calibration a spatial light modulator, 2005
- [106] Pedreira, O. V.; Lauwagie, T.; De Coster, J.; Haspeslagh, L.; Witvrouw, A.; De Wolf, I.: High throughput measurement techniques for wafer level yield inspection of MEMS devices. In: Proceedings of SPIE Bd. 7155, 2008
- [107] Witvrouw, A.; Tilmans, H. A. C.; Bogaerts, L.; De Moor, P.; Bearda, T.; Halder, S.; Haspeslagh, L.; Schlatmann, B.; van Bommel, M.; de Nooijer, C.; Lauria, J.; Vanneer, R.; et al.: *Packaging of 11 MPixel CMOS-Integrated SiGe Micro-Mirror Arrays.* In: 2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2009
- [108] Berndt, D.: Software für die zeitoptimierte Kalibrierung von Mikrokippspiegeln. TU Dresden, Diplomarbeit, 2007
- [109] Schug, H.: *Flächenkalibrierung von Mikrospiegelarrays*. TU Dresden, Diplomarbeit, 2007
- [110] *Zygo*, URL: www.zygo.com, Abruf: 23.08.2012
- [111] Novak, E.; Krell, M. B.; Browne, T.: *Template-based software for accurate MEMS characterization*. In: Proceedings of SPIE Bd. 4980, 2003
- [112] Tanneberger, T.: *Statische und dynamische Untersuchungen an Mikrospiegelarrays*. Hochschule für Technik und Wirtschaft Mitweida, Diplomarbeit, 1998
- [113] Matlab Online Hilfe Choosing a Solver, URL: http://www.mathworks.de/help/toolbox/optim/ug/brhkghv-18.html, Abruf: 23.08.2012
- [114] *Matlab Online Hilfe nlinfit*, URL: http://www.mathworks.de/help/toolbox/stats/nlinfit.html, Abruf: 23.08.2012

- [115] Seber, G. A. F. ; Wild, C. J.: Nonlinear Regression. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2003
- [116] Ma, Y.: Optimal MEMS plate design and control for large channel count optical switches. University of Maryland, Dissertation, 2004
- [117] Berndt, D.; Heber, J.; Sinning, S.; Kunze, D.; Knobbe, J.; Schmidt, J.-U.; Bring, M.; Rudloff, D.; Friedrichs, M.; Rößler, J.; Eckert, M.; Kluge, W.; et al.: *Multispectral characterization of diffractive micromirror arrays*. In: Proceedings of SPIE Bd. 7718, 2010
- [118] Dickey, F. M.; Holswade, S. C.: Laser Beam Shaping: Theory and Techniques. New York : Marcel Dekker, 2000
- [119] Schreiber, P. ; Kudaev, S. ; Dannberg, P. ; Zeitner, U. D.: *Homogeneous LEDillumination using microlens arrays.* In: Proceedings of SPIE Bd. 5942, 2005
- [120] Lin, Y.; Lawrence, G. N.; Buck, J.: Characterization of excimer lasers for application to lenslet array homogenizers. In: Applied optics Bd. 40, Nr. 12, 2001
- [121] Erdmann, L.; Burkhardt, M.; Brunner, R.: Coherence management for microlens laser beam homogenizers. In: Proceedings of SPIE Bd. 4775, 2002
- [122] Zimmermann, M. ; Lindlein, N. ; Völkel, R. ; Weible, K. J.: Microlens laser beam homogenizer: from theory to application. In: Proceedings of SPIE Bd. 6663, 2007
- [123] Pesch, A.; Uhlendorf, K.; Deparnay, A.; Erdmann, L.; Kuschnerus, P.; Engel, T.; Brunner, R.: *Microscope illumination systems for 157 nm*. In: Proceedings of SPIE Bd. 5038, 2003
- [124] Mizushima, T.; Furuya, H.; Mizuuchi, K.; Yokoyama, T.; Morikawa, A.; Kasazumi, K.; Itoh, T.; Kurozuka, A.; Yamamoto, K.; Kadowaki, S.; Marukawa, S.: Laser Projection Display with Low Electric Consumption and Wide Color Gamut by Using Efficient Green SHG Laser and New Illumination Optics. In: SID Symposium Digest of Technical Papers Bd. 37, Nr. 1, 2006
- [125] Völkel, R. ; Weible, K. J.: *Laser Beam Homogenizing: Limitations and Constraints*. In: Proceedings of SPIE Bd. 7102, 2008
- [126] Hoffnagle, J. A. ; Jefferson, C. M.: Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam. In: Applied optics Bd. 39, Nr. 30, 2000
- [127] Dingel, B. ; Kawata, S. ; Minami, S.: *Speckle reduction with virtual incoherent laser illumination using a modified fiber array*. In: Optik Bd. 94, Nr. 3, 1993
- [128] Dainesi, P. ; Ihlemann, J. ; Simon, P.: Optimization of a beam delivery system for a short-pulse KrF laser used for material ablation. In: Applied optics Bd. 36, Nr. 27, 1997
- [129] Haferkorn, H.: Optik: Physikalisch-Technische Grundlagen und Anwendungen.4. Aufl. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2003
- [130] Sandström, T.; Martinson, H.: RET for optical maskless lithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 5377, 2004
- [131] Dürr, P.; Dauderstädt, U.; Kunze, D.; Auvert, M.; Bakke, T.; Schenk, H.; Lakner, H.: Characterization of Spatial Light Modulators for Micro Lithography. In: Proceedings of SPIE Bd. 4985, 2003
- [132] Lee, Y. H.: Alignment of an off-axis parabolic mirror with two parallel He-Ne laser beams. In: Optical Engineering Bd. 31, Nr. 11, 1992
- [133] Chen, D.-C.: Portable alignment Device for an Off-Axis Parabolic Mirror Optical Axis Adjustment. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Bd. 13, Nr. 1, 2012
- [134] *Technical Note on UV Conversion Coatings : LUMOGEN*, e2v technologies, 2003

- [135] Heber, J. ; Kunze, D.: Influence of spectral source properties on the contrast of diffractive micro- mirror arrays. Dresden : Fraunhofer IPMS, 2008
- [136] Mach, E.: Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. Wien : K. k. Hof- und Staatsdruckerei, 1865

Anhang A Auflösungsvermögen Charakterisierungsaufbau

Die nachfolgende Tabelle demonstriert anhand verschiedener Musteraufnahmen den Zusammenhang zwischen dem Öffnungsdurchmesser der Fourierblende und der Bildgualität der projizierten Muster. Alle Aufnahmen erfolgten mit dem Laserdiodenmodul bei λ = 680 nm, während stets das gleiche Testmuster in das MMA-Bauelement geladen wurde. Durch die Variation der Fourierblende ändern sich von Reihe zu Reihe die herausgefilterten Ortsfrequenzen des Testmusters. Eine fast geschlossene Fourierblende filtert nahezu alle Frequenzanteile aus, es entsteht eine sehr unscharfe Abbildung. Je weiter die Blende geöffnet wird, desto mehr niederfrequente Anteile passieren den optischen Tiefpassfilter. Resultat ist die immer schärfere und kontrastreichere Abbildung sehr feiner Strukturen, beispielsweise der im Testmuster unten links angeordneten Linienpaare (siehe rechte Spalte). Genau ab dem Zeitpunkt, wenn die ± 1. Beugungsordnung zumindest teilweise ebenfalls durch die Blende propagiert, sinkt der erreichbare Bildkontrast erheblich. Eine weitere Öffnung der Blende, praktisch durch geometrische Randbedingungen allerdings nicht realisierbar, würde dem Entfernen des Fourierfilters gleichkommen und die phasenmodulierten MMA-Muster nicht mehr in Intensitätsmuster transformieren. In diesem Fall ist schließlich mit einem homogenen weißen Bild zu rechnen, unabhängig des in das MMA geladenen Musters.

Tabelle A.1: Einfluss Flächenfilterposition auf Projektionsmusterauflösung (Aufnahmen mit λ = 680 nm)



15 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)



25 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)





40 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)







50 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)



60 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)





80 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)







100 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)



120 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)





140 % Fourierblendenöffnung (Blendenradius / Abstand 0. zu 1. Beugungsordnung)



Die nachfolgende Abbildung A.1 quantifiziert die Messergebnisse in Form der Modulationstransferfunktion (MTF). In das MMA sind wechselnde schwarze und weiße Linien verschiedener Breite zur Variation der Musterfrequenz eingeschrieben. Die MTF ist nach Gleichung (A.1) aus dem Quotienten von Bild- zu Objektmodulation errechnet, wobei jeweils die maximal und minimal gemessenen Intensitäten miteinander verrechnet werden [69]. Die Objektmodulation nimmt für jede Frequenz den Wert 1 an, wenn $I_{max} = 1$ und $I_{min} = 0$ beträgt. Aus den Werten der Musterfrequenz aufgetragen auf der Abszisse kann direkt die Periode der eingeschriebenen Muster errechnet werden. Die Periode wird bestimmt durch Linienbreiten der Testmuster in Einzelspiegeln und hat daher einen direkteren Bezug zum untersuchten MMA.

$$MTF(f) = \frac{Bildmodulation(f)}{Objektmodulation(f)} = \frac{I_{max_Messung}(f) - I_{min_Messung}(f)}{I_{max_Messung}(f) + I_{min_Messung}(f)}$$
(A.1)

Die variable relative Blendenöffnung bezieht sich analog zur vorangegangenen Tabelle auf den Abstand zwischen der 0. und 1. Beugungsordnung im Fourierbild. Eine alternative Darstellung zur Beschreibung der Beleuchtungsbedingung ist der Kohärenzparameter S, der sich nach [129] aus dem Quotienten von Eintrittspupille zu Austrittspupille berechnet:





Die maximale Modulationsübertragung wird je nach Blendenposition bei unterschiedlichen Musterfrequenzen erreicht. Bei nur 15 % geöffneter Fourierblende (nahezu inkohärente Beleuchtung des MMAs, S = 1) sind Linienbreiten von mehr als fünf Einzelspiegeln bis zur vollständigen Modulation notwendig. Bei maximaler Blendenöffnung von 80 %, sodass die 1. Beugungsordnung gerade noch nicht den Filter passieren kann (partiell kohärente MMA-Beleuchtung, S = 0,19), werden immerhin Linienstrukturen von einem Einzelspiegel mit mehr als halber Modulation übertragen. Alle übrigen Blendenpositionen zwischen den beiden Extremfällen verlaufen analog zum Beleuchtungsfall mit S = 0,19, die Unterschiede liegen nur in der Modulation bei einer Musterfrequenz von 0,5 Perioden/Mikrospiegel.

Am unteren Diagrammrand sind zusätzlich zu den Messwerten berechnete Größen der kleinstmöglich abbildbaren Strukturen dargestellt. Die Auflösungsgrenze Δx berechnet sich nach [129] wie folgt:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{NA^*(1+S)}, \qquad (A.3)$$

wobei NA der numerischen Apertur der Blende entspricht. Die Umrechnung der Werte für Δx in Musterfrequenzen erfolgt unter Berücksichtigung der Einzelspiegelgröße von p = 16 µm mit

$$f = \frac{p}{\Delta x} \,. \tag{A.4}$$

Der in Abbildung A.1 gestrichelt dargestellte theoretische Kurvenverlauf mit Schnittpunkten der Abszisse bei einer Modulation von 0 % passt sich gut an die übrigen gemessenen Werte an. Musterfrequenzen zwischen 0,25 (Linienbreite 2 Spiegel) und 0.5 Perioden/Mikrospiegel (Linienbreite 1 Spiegel) sind praktisch nicht realisierbar, sodass in diesem Wertebereich die berechneten Werte nur von theoretischer Natur sind. Bei partiell kohärenter Beleuchtung mit S = 0,19 (max. zulässige Blendenöffnung) wäre die theoretische Auflösungsgrenze bei $\Delta x = 16.8 \,\mu m$ beziehungsweise einer Modulationsfrequenz von 0,95 Perioden/Mikrospiegel erreicht. Dank der hervorragenden Passgenauigkeit von praktischen und theoretischen Ergebnissen ist das gesamte Modulationsübertragungsverhalten des Charakterisierungsaufbaus vollständig beschrieben.