Untersuchungen zu einem hochauflösenden Flächenlichtmodulator mit einstellbarem Profil einer Flüssigkeitsoberfläche zur optischen Musterwiedergabe

Vom Fachbereich Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

von

Dipl. - Ing. Alexander Wolter

aus

Berlin

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Günter Zimmer Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2001

Dieser Text ist über die Universität Duisburg im Internet veröffentlicht und als PDF-Datei verfügbar: http://www.ub.uni-duisburg.de/ETD-db/ theses/available/duett-09102001-110607/

Zusammenfassung

Flächenlichtmodulatoren werden seit den Vierzigerjahren in unterschiedlichen Technologien für verschiedene Anwendungsfelder wie Projektionsdisplays, Direkt-Schreiber für photolithographische Prozesse und zur optischen Signalverarbeitung entwickelt. In dieser Arbeit werden Untersuchungen zu einem mikromechanischen Flächenlichtmodulator (FLM) mit einem deformierbaren Ölfilm als Aktor auf einer verspiegelten Ansteuerschaltung in CMOS-Technologie beschrieben. Der Ölfilm wird durch die elektrostatische Kraft deformiert, die auf die Oberfläche des Dielektrikums im elektrischen Feld wirkt. Einfallendes Licht wird dann an der Verspiegelung reflektiert und erfährt während der Transmission durch den deformierten Ölfilm eine ortsabhängige Phasenmodulation, die sich mittels einer Schlierenoptik in ein Intensitätsmuster wandeln lässt.

Im Rahmen dieser Arbeit ist zum ersten Mal die Ansteuerung eines Ölfilms durch eine CMOS-Schaltung gelungen. Genannt wurde diese neue Flächenlichtmodulator-Technologie *moving liquid mirror* (MLM).

Die Arbeit beginnt mit einem Überblick über die Anwendungsgebiete und Technologien für Flächenlichtmodulatoren. Es wird ein theoretisches Modell aufgestellt, das die mikromechanischen und die beugungsoptischen Eigenschaften von Bauelementen in MLM-Technologie beschreibt. Die umfangreichen Anforderungsprofile der Flüssigkeit und der Elektrodenstruktur werden diskutiert.

Durch zweidimensionale Simulationsrechnungen wurde die Auslegung der Elektrodenstruktur und des Ölfilms sowohl bezüglich der Deformationen als auch bezüglich der Intensitätsverteilung im Beugungsbild untersucht. Dabei ergab sich für die benutzte Elektrodenstruktur mit einer Gitterelektrode über einem Array von Spiegelelektroden eine optimale Pixelgröße um $20\mu m$. Die erreichbaren Kontraste sind durch das Deformationsprofil des Ölfilms und durch die in der Praxis nicht vollständig unterdrückbare Beugung an der Gitterelektrode begrenzt.

Das vorgestellte MLM-Bauelement lässt sich mit einem nur leicht modifizierten CMOS-Prozess fertigen. Zur Herstellung der Elektroden auf der Ansteuerschaltung wurde ein Prozess entwickelt, der weitestgehend der Herstellung der Aluminium-Leitbahnebenen in der verwendeten Hochvolt-CMOS-Technologie entspricht. Der Ölfilm lässt sich schließlich als Tropfen definierten Volumens aufbringen, der sich selbstständig über die Chipfläche ausbreitet.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden passive Bauelemente hergestellt, bei denen die Elektroden direkt über die Gehäuseanschlüsse mit Spannung beaufschlagt werden. Die durchgeführten interferenzoptischen Profilmessungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen. Intensitätsmessungen im Beugungsbild ergaben Kontraste bis 43:1 in der nullten Ordnung. Graustufen lassen sich mit analogen Spannungswerten erzeugen. Dynamische Messungen zeigten, dass Aktoren in MLM-Technologie mit Bildwiederholfrequenzen bis 200Hz betrieben werden können.

An aktiven MLM-Bauelementen wurde schließlich demonstriert, dass beliebige eingeschriebene Bildmuster in der Oberfläche des Ölfilms abgebildet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	\mathbf{Ein}	leitung						
	1.1	Motivation der Arbeit						
	1.2	Gliederung						
	1.3	Flächenlichtmodulatoren						
	1.4	Anwendungsgebiete						
	1.5	Modulatorprinzipien						
	1.6	Methoden der Ansteuerung						
	1.7	Einordnung des neuartigen Flächenlichtmodulators						
2	Das	Prinzips des neuartigen Flächenlichtmodulators 17						
	2.1	Grundlagen						
		2.1.1 Phasenmodulation im Flüssigkeitsfilm						
		2.1.2 Oberflächenspannung						
		2.1.3 Maxwellsche Spannung						
		2.1.4 Benetzung						
	2.2	Modelle						
		2.2.1 Beugung an einem Phasenprofil						
		2.2.2 Das Deformationsprofil						
	2.3	Benetzung der Substratoberfläche						
	2.4	Die Flüssigkeit						
	2.5	Die Elektroden						
		2.5.1 Optische Anforderungen						
		2.5.2 Technologische Anforderungen						
		2.5.3 Elektrische Anforderungen						
		2.5.4 Auswahl einer den Anforderungen entsprechenden						
		Elektrodengeometrie						
3	The	eoretische Beschreibung des Flächenlichtmodulators 45						
	3.1	Die Maxwellsche Spannung						
	3.2	Die Deformation						
	3.3	Einflussparameter der Deformation						
		3.3.1 Einfluss der Filmdicke auf die Deformation						
		3.3.2 Einfluss der vertikalen Elektrodenabmessungen 51						
		3.3.3 Einfluss der lateralen Elektrodenabmessungen 54						
		3.3.4 Einfluss der Pixelspannung						
	3.4	Das Beugungsbild der Elektrodenanordnung						
	3.5	Das Beugungsbild des deformierten Flüssigkeitsfilms 61						

	3.6 Intensitätsverteilung im Beugungsbild	3							
	3.6.1 Einfluss der Stufenhöhe	4							
	3.6.2 Einfluss der Dicke des Flüssigkeitsfilms 6	8							
	3.6.3 Einfluss der Pixelweite	8							
	3.7 Hell-Feld-Abbildung	0							
4	Herstellung des neuen Bauelementes 75								
	4.1 Die Ansteuerschaltung	5							
	4.1.1 Anforderungen an die aktive Matrix 7	5							
	4.1.2 Die verwendete aktive CMOS-Matrix 7	6							
	4.2 Fertigung der Elektroden	8							
	4.3 Aufbau- und Verbindungstechnik	1							
	4.4 Flüssigkeitsauftrag	1							
	4.5 Passive Bauelemente	4							
5	Charakterisierung des neuen Mikrosystems 8	5							
	5.1 Messungen des Oberflächenprofils	5							
	5.2 Die Filmdicke	5							
	5.3 Optische Messungen im Beugungsbild 9	6							
	5.4 Homogenität $\dots \dots \dots$	9							
	5.5 Dynamische Messungen	0							
	5.6 Demonstratoren $\ldots \ldots 10$	1							
0		_							
6	Zusammenfassung und Ausblick 10	7							
	$6.1 \text{Zusammentassung} \dots \dots$	7							
	$6.2 \text{Ausblick} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	9							
Δ	Symbolyerzeichnis 11	1							
Π	Symbolverzelemms 11	Ŧ							
В	Abkürzungsverzeichnis 11								
\mathbf{C}	Beugungsbild des MLM-Bauelementes 115								
D	O Zweifache Integration der Maxwellschen Spannung119								
Б									
E	Detailaufnahmen aus Weißlichtprojektionen 121								
\mathbf{F}	Aufnahmen von aktiven MLM-Bauelementen125								
Qı	Quellenverzeichnis 128								

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Flächenlichtmodulatoren werden seit den Vierzigerjahren für verschiedene Anwendungsfelder entwickelt. In den letzten zwei Jahrzehnten hat vor allem der zunehmende Bedarf an Flach- und Projektionsdisplays die Entwicklung weit vorangetrieben. Der vor zehn Jahren einsetzende Trend zur Miniaturisierung hat Bauelemente hervorgebracht, mit denen neuartige Produkte sowohl im Displaysektor als auch für andere optische Anwendungen entwickelt werden konnten.

Das Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (FhG-IMS) befasst sich seit Ende der Achtzigerjahre mit der Entwicklung von monolithisch integrierbaren Flächenlichtmodulatoren auf der Basis deformierbarer Mikrospiegelanordnungen mit unterliegenden aktiven CMOS-Schaltungen. Diese Arbeiten wurden in den letzten Jahren mit dem Ziel des Aufbaus eines Kernkompetenzbereichs "Bildgebende Mikrosysteme" intensiviert.

Ausgangspunkt der Aktivitäten war die Entwicklung einer aktiven CMOS-Ansteuermatrix für Flächenlichtmodulatoren, die als Bildgeber in einem vom Heinrich-Hertz-Institut in Berlin entwickelten System zur Videogroßbildprojektion zum Einsatz kamen [1]. Nachfolgend wurde im Rahmen der Entwicklung eines maskenlosen Waferbelichtungssystems am FhG-IMS Dresden weiter an Flächenlichtmodulatoren mit viskoelastischer Steuerschicht (VCL) gearbeitet [2]. Ergänzend dazu begann man 1993 zusätzlich mit der Entwicklung von mikromechanischen Spiegeln (CBM) als lichtmodulierende Aktorelemente [3].

Beide Aktorprinzipien basieren auf einer Deformation der Spiegeloberfläche durch elektrische Felder. Da in beiden Fällen eine Aluminiumschicht deformiert werden muss, sind die benötigten Ansteuerspannungen relativ hoch. Außerdem ist das Vermeiden von Alterungserscheinungen durch sich einprägende Bildmuster und von anderen Inhomogenitäten eine anspruchsvolle technologische Aufgabe. Alternativ dazu wird in dieser Arbeit ein völlig anderer Ansatz verfolgt, bei dem ein Flüssigkeitsfilm als mikromechanische Aktorschicht auf einer verspiegelten mikroelektronischen Ansteuerschaltung eingesetzt wird. Die Oberfläche des Flüssigkeitsfilms lässt sich durch elektrische Felder deformieren. Dazu wird die elektrostatische Kraft genutzt, die an der Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika wirkt. Einfallendes Licht wird dann an der Verspiegelung reflektiert und während der Transmission durch den deformierten Flüssigkeitsfilm phasenmoduliert.

Ein Vorteil des flüssigen Aktors ist seine leichte Beweglichkeit. Darüber hinaus hat eine Flüssigkeit kein Gedächtnis für ihre Form. Die Verwendung einer Flüssigkeit als Aktor für Flächenlichtmodulatoren war in der Vergangenheit schon erfolgreich realisiert worden [4, 5]. Diese Flächenlichtmodulatoren wurden allerdings mittels eines Elektronenstrahls angesteuert, der ein Ladungsmuster auf dem Flüssigkeitsfilm platziert.

1996 wurde am FhG-IMS Dresden mit der Arbeit an einem Flächenlichtmodulator mit einer sich bewegenden Flüssigkeit als Aktor auf einem starren Spiegel begonnen. Die Ansteuerung durch eine verspiegelte mikroelektronische Schaltung mit Elektrodenstruktur macht diese Technologie, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, außerordentlich interessant. Sie hat dadurch das Potenzial, dass Flächenlichtmodulator-Bauelemente in einem reinen CMOS-Prozess mit einer Erweiterung für Spiegel und Elektroden gefertigt werden können. Ein Flüssigkeitsfilm lässt sich schließlich mit vergleichsweise einfachen Methoden aufbringen. Benannt ist diese Technologie ihrem Prinzip nach als *moving liquid mirror* (MLM).

1.2 Gliederung

Das erste Kapitel gibt einen allgemeinen Überblick über Flächenlichtmodulatoren, ihre Einsatzgebiete und über die verschiedenen Konzepte ihrer Realisierung. Es folgt eine Diskussion der möglichen Anwendungsfelder für Flächenlichtmodulatoren in MLM-Technologie.

In Kapitel zwei werden alle Gesichtspunkte beschrieben, die für die Entwicklung des MLM-Bauelementes maßgeblich sind. Zunächst wird auf die physikalischen Grundlagen eingegangen. Dazu wird ein theoretisches Modell für die Deformation der Flüssigkeitsoberfläche abgeleitet und die daraus resultierenden Beugungserscheinungen werden berechnet. Im Anschluss werden die technischen und technologischen Gesichtspunkte diskutiert, nach denen ein solches Mikrosystem ausgelegt werden muss.

In Kapitel drei wird anhand von numerischen Simulationsrechnungen der Einfluss der wichtigsten Parameter auf das Verhalten des MLM- Bauelementes analysiert. Dabei wird zunächst die Deformation des Flüssigkeitsfilms untersucht. Anschließend wird die Intensitätsverteilung im Beugungsbild und der Einfluss verschiedener Parameter berechnet, um die optischen Eigenschaften zu bestimmen. Simulationsrechnungen zur Bildübertragung in einem Projektionssystem schließen das Kapitel ab.

Kapitel vier beschreibt die Herstellung der Bauelemente. Die Bedeutung der Ansteuermatrix wird erläutert und die am FhG-IMS verwendeten Schaltungen werden vorgestellt. Die Prozessschritte zur Herstellung der Modulatorschicht für die MLM-Bauelemente wurden eng an Standard-CMOS-Prozesse angelehnt. Der Beschreibung der monolithischen Herstellungsprozesse schließt sich eine Aufzählung der Besonderheiten der Aufbau- und Verbindungstechnik an. Schließlich wird das Aufbringen der Flüssigkeit auf die Elektrodenstruktur behandelt, welches im letzten Herstellungsschritt erfolgt.

Kapitel fünft dokumentiert die Ergebnisse der Messungen, die an Bauelementen mit aktiver und passiver Ansteuerung vorgenommen wurden. Da angesichts der geringen lateralen Pixelabmessungen, wegen der Phasensprünge an hohen Kanten und durch die Mehrfachreflexionen am Flüssigkeitsfilm direkte Profilmessungen auch mit einem modernen weißlichtinterferometrischen Oberflächenmessgerät nur eingeschränkt möglich sind, wurden zusätzlich Untersuchungen am Beugungsbild durchgeführt. Auf diesem Wege wurde auch das dynamische Verhalten charakterisiert. Mit einem einfachen optischen Projektionsaufbau wurde schließlich die prinzipielle Eignung des MLM-Bauelementes für bildgebende Anwendungen mit vergrößernder Optik nachgewiesen. Außerdem werden Aufnahmen von aktiven Matrizen mit eingeschriebenen Bildern präsentiert, um die Realisierbarkeit von Flächenlichtmodulatoren in MLM-Technologie zu demonstrieren.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

1.3 Flächenlichtmodulatoren

In der Fachliteratur werden bei der Beschreibung von Flächenlichtmodulatoren recht unterschiedliche Terminologien verwendet, die dem jeweiligen Anwendungsgebiet angepasst sind. Häufig fließt in die Definitionen auch der technische Aufbau mit ein, der jedoch mit fortschreitender Entwicklung Veränderungen unterworfen ist.

Eine allgemeine, gut abgrenzende und zugleich verständliche Definition liefert M. C. Crandall [6]:

"Ein Flächenlichtmodulator (FLM) ist ein in Echtzeit programmierbares Bauteil, das die Amplitude, die Phase oder den Polarisationszustand einer einfallenden Wellenfront in Abhängigkeit des Ortes mittels elektrischer oder

optischer Steuersignale verändern kann."

Die einfallende Wellenfront stammt von einer separaten Lichtquelle. Dies unterscheidet Flächenlichtmodulatoren von modulierten Lichtquellen, wie z.B. Fernsehbildröhren (CRT), Plasmabildschirmen oder Displays aus Leuchtdioden (LED), bei denen Lichterzeugung und Modulation unmittelbar verkoppelt sind und die sich vorrangig für die Bilderzeugung eignen.

Der verwandte Begriff "Lichtventilmatrix" (LVM) ist etwas enger gefasst. Er bezieht sich auf eine Matrix aus Bildelementen, die einzeln ansprechbar das einfallende Licht in seiner Intensität steuern. Pixelierte, amplitudenmodulierende Flächenlichtmodulatoren können als Lichtventilmatrizen eingesetzt werden. Phasen- und polarisationsmodulierende Flächenlichtmodulatoren werden erst in Verbindung mit einer geeigneten Schlieren-Optik bzw. mit Polarisationsfiltern als Lichtventilmatrizen bezeichnet.

In den letzten Jahren hat außerdem der anwendungsorientierte Begriff Mikrodisplay große Verbreitung gefunden, mit dem die Industrie flache Bildgeber mit Diagonalen unter 1,5 Zoll definiert [7].

Der technische Aufbau eines Flächenlichtmodulators lässt sich typischerweise in drei funktionelle Ebenen unterteilen, die meist auch einen dreischichtigen Aufbau zur Folge haben:

1. Modulatorschicht:

Dies ist eine Schicht, welche die einfallende Lichtfront mittels eines physikalischen Effektes moduliert, indem sie ihre optischen Eigenschaften lokal verändert. Da im Rahmen dieser Arbeit ein mikromechanischer Flächenlichtmodulator entwickelt wurde, wird diese Schicht im Folgenden auch mit einem Begriff aus der Mikromechanik als "Aktorschicht" bezeichnet. Auf die Vielzahl von Technologien zur Lichtmodulation wird im Abschnitt 1.5 weiter eingegangen.

2. Adressierung:

Die Programmierung in Echtzeit legt fest, an welchen Stellen und in welchem Maße die einfallende Lichtfront moduliert werden soll. Zur Ansteuerung einzelner Bildelemente werden in der Literatur elektrische und optische Methoden vorgeschlagen, die sich in ihrer Komplexität stark unterscheiden. Sie werden im Abschnitt 1.6 behandelt.

3. Signalübertragung und -wandlung:

Der lichtmodulierende Effekt wird meist elektrisch ausgelöst (siehe Abschnitte 1.5 und 1.6). Das lokale Programmiersignal muss je nach Art gegebenenfalls photoelektrisch gewandelt, verstärkt und an Elektroden übertragen werden, die den Effekt in der Modulatorschicht schließlich auslösen. Bei einigen Flächenlichtmodulatoren findet die Wandlung unmittelbar in der Aktorschicht statt, andere enthalten eine komplexe Schicht mit zum Teil mehrstufiger Wandlung des Ansteuersignals.

Von besonderer Bedeutung ist, dass alle Bereiche der Lichtfront parallel moduliert werden. Scannende Systeme zur Erzeugung von Intensitätsmustern haben demgegenüber einen Geschwindigkeitsnachteil. Bei Anwendungen, die auf Beugungserscheinungen basieren, gibt es keine Alternative zu Flächenlichtmodulatoren, welche die gesamte beugende Struktur gleichzeitig zur Verfügung stellen.

1.4 Anwendungsgebiete

Flächenlichtmodulatoren werden in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsgebiete eingesetzt. Die folgende Aufstellung gibt eine Übersicht über bekannte Flächenlichtmodulator-Anwendungen:

- 1. direkt zu betrachtende, flache Displays
 - Flachbildschirme
 - Instrumentenanzeigen
 - Displays für Mobiltelefone [10]
 - Displays an Videokameras und digitalen Fotoapparaten [10]
 - portable Fernseh- und Videobetrachter [10]
- 2. Projektion eines reellen Bildes für Fernseh-, Video- und Computerbilder
 - Rückseitenprojektion von *Mikrodisplays* in Großbildschirmen [11] und in Hochleistungs-Instrumentenanzeigen [12]
 - Leinwandprojektion für Präsentationen, "home theatre" u.ä. [13]
 - head-up displays mit Mikrodisplays, die Informationen in das Sichtfeld eines Piloten einblenden [12]
 - Großleinwandprojektion für Kinos und Videowände [4, 14, 15, 16]
- 3. *virtual displays*, bei denen das virtuelle Bild eines *Mikrodisplays* mit einer Lupe vergrößert betrachtet wird.
 - helmet-mounted displays, head-mounted displays und eye-glass displays, die den Kopfbewegungen des Betrachters folgen, weil sie am Helm, am Kopf bzw. an der Brille befestigt werden [17]
 - hochauflösende Displays für Mobiltelefone mit einem eye-piece, welches direkt vor das Auge gehalten wird [10]

- Sucher von Videocameras und digitalen Fotoapparaten [10]
- 4. Direktbelichter für verschiedene photolithographische Verfahren
 - maskenlose Waferbelichtung [18]
 - Maskenbelichtung [19]
 - Leiterplattenbelichtung
 - Herstellung von Siebdruckmasken
 - Belichtung von Fotopapier und Dias
- 5. Belichtung für Tonerwalzen in Computer-Druckern [20]
- 6. Beschreiben und Auslesen holographischer Speicher [21]
- 7. optische Schalter für die Kommunikationstechnik [22]
- 8. Steuerung photoinduzierter Reaktionen für die biochemische Wirkstoffanalyse und -synthese in sogenannten *micro fluidic systems* [23]
- 9. Photonik: optische Computer für die parallele Datenverarbeitung, wie z.B. Bildverarbeitung [8] oder 2D-Fouriertransformation [9]
- 10. Bilderkennung, z.B. für die Identifikation von Fingerabdrücken [24] oder für die militärische Aufklärung [20]
- 11. programmierbare Fourierfilter [25]
- 12. Bildverstärker [16] und Bildwandler, wie z.B. Nachtsichtgeräte [26]
- 13. Inkohärent-zu-Kohärent-Wandler [25]
- 14. Phasenkorrektur mittels adaptiver Optik [27]

Das mit weitem Abstand größte Marktvolumen liegt bei Display-Anwendungen (Anwendungen 1, 2, 3). Dabei ist die Flüssigkristall-Technologie (LCD) vorherrschend. Sie hat die Entwicklung in starkem Maße vorangetrieben [6, 10]. Flächenlichtmodulatoren für Display-Anwendungen werden oft auch in anderen Bereichen eingesetzt, weil Baugruppen mit hohem technischem Niveau verfügbar sind. Der besondere Vorteil von Projektionsdisplays mit Flächenlichtmodulatoren gegenüber *direct-view*-Displays liegt in der Trennung vier funktionaler Baugruppen, die weitgehend unabhängig voneinander optimiert werden können. Die Beleuchtungsquelle bestimmt die Helligkeit, der Flächenlichtmodulator gibt die räumliche und zeitliche Auflösung und den Kontrast vor, mit der Optik wird die Bildgröße dimensioniert, und die Mattscheibe oder Leinwand entscheidet über den Betrachtungswinkel und den Einfluss des Umgebungslichts. Auch Spezialdisplays lassen sich aus Standardkomponenten zusammenstellen.

In den Achzigerjahren wurde der parallelen, optischen Bild- bzw. Datenverarbeitung größere Bedeutung zugemessen (Anwendungen 9, 10, 11). Die mittlerweile sehr hohe Rechenleistung digitalelektronischer Computer hat das Interesse zurückgehen lassen. Ein wachsender Markt liegt dagegen bei Direktschreibern (Anwendungen 4, 5, 6). Die gleichzeitige Belichtung ganzer Bildfelder begründet einen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber scannenden Systemen. Darüber hinaus ist die Strukturauflösung ähnlich wie in der Mikrolithographie nur durch die Wellenlänge begrenzt und nicht wie bei scannenden Systemen durch die Strahlqualität.

Verschiedene optische Verfahren werden durch den Einsatz von Flächenlichtmodulatoren überhaupt erst möglich (Anwendungen 12, 13, 14). Schließlich gibt es Bestrebungen bei der optischen Signalverarbeitung (Anwendung 8) und in der chemischen Analytik (Anwendung 7), durch Flächenlichtmodulatoren Entwicklungssprünge einzuleiten.

1.5 Modulatorprinzipien

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal, nach dem Flächenlichtmodulatoren in der Literatur unterschieden werden, ist das Modulatorprinzip. Folgende Ansätze wurden realisiert:

- Deformation der Oberfläche eines Flüssigkeitsfilms [4, 5]
- Polarisationsänderung in einer magneto-optischen Kristallschicht [28]
- Absorption oder Polarisationsänderung in einer photochromatischen Schicht [9]
- Streuung oder Absorption in einem flüssigkristallinen Film [29]
- Polarisationsänderung in einem flüssigkristallinen Film [30]
- Deformation einer verspiegelten Membran [31, 32, 33]
- Deformation von mikromechanischen Spiegelelementen [3, 34]

Für die Anwendung ist darüber hinaus von Bedeutung, ob die einfallende Welle transmittiert oder reflektiert wird. Der Betrieb mit reflektierendem Modulator bietet besondere Freiheiten für die Ansteuerung, da diese sich dann nicht im Lichtweg befindet. Andererseits fällt die modulierte Lichtfront nach der Reflexion in den Beleuchtungsstrahlengang, so dass meist ein Strahlteiler erforderlich ist. In der Vergangenheit wurden Flächenlichtmodulatoren auch danach eingeteilt, ob sie eine Pixelstruktur aufweisen oder nicht. Wenn sowohl die Aktorschicht als auch die Ansteuerung kontinuierlich ist, spricht man von einem nicht-pixelierten Flächenlichtmodulator. Moderne elektronische Ansteuerschaltungen arbeiten jedoch ausschließlich pixeliert (siehe Abschnitt 1.6).

Flächenlichtmodulatoren mit deformierbarem Flüssigkeitsfilm wurden schon früh für die Projektion von Fernsehbildern eingesetzt [4, 5]. Die Deformationen werden elektrostatisch erzeugt und prägen in die einfallende Welle ein Phasenprofil ein. Auf diese Weise wird im sich anschließenden Interferenzfeld Licht aus dem Hauptstrahlengang herausgebeugt. Die Umwandlung in ein Intensitätsmuster ist erst mit Hilfe eines schlierenoptischen Projektionssystems möglich. Flächenlichtmodulatoren mit Flüssigkeitsfilm sind in Bezug auf die möglichen Lichtströme unübertroffen. Sie wurden sowohl für Reflexion als auch für Transmission ausgelegt.

Flüssigkristall-Anzeigen (LCD) haben seit Ende der Sechzigerjahre weite Verbreitung gefunden [35, 36]. Sie können im Durchlicht sowie in Reflexion betrieben werden und eignen sich für die Projektion wie auch für die Draufsicht. Da ihre Funktion zumeist auf der Drehung der Polarisationsebene beruht, müssen sie zusammen mit Polarisationsfiltern oder mit polarisierenden Strahlteilern betrieben werden. Flüssigkristall-Anzeigen, die das einfallende Licht streuen, sind dagegen im erreichbaren Kontrast begrenzt. Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es in den letzten Jahren gelungen, kontrastreiche Anzeigen mit akzeptabler Lichtausbeute zu realisieren, und den Betriebstemperaturbereich zu erweitern. Bei den Schaltzeiten besteht trotz großer Fortschritte weiterhin Verbesserungsbedarf, und das modulierbare Lichtspektrum ist eng auf den sichtbaren Bereich beschränkt. Für hohe Lichtströme wurde bisher nur über einen einzigen Flächenlichtmodulator in LCD-Technologie berichtet [37], da flüssigkristalline Schichten wie auch Polarisationsfilter durch die Strahlung insbesondere im UV-Bereich degradieren. Besondere Erwähnung verdienen Flächenlichtmodulatoren mit ferroelektrischen Flüssigkristallen (FLC). Die Firma Displaytech bietet auf dieser Basis Mikrodisplays mit Silicon backplane¹ an, die eine hohe Auflösung haben und Schaltgeschwindigkeiten aufweisen, die eine Grauwertdarstellung durch Zeitmultiplexing erlauben [38].

Flächenlichtmodulatoren mit verspiegelter Membran zeichnen sich durch eine hohe Lichtausbeute aus, da ihr Füllfaktor bei bis zu 100% liegt.

¹siehe Abschnitt 1.6

Eine durchgehende Spiegelfläche ruht entweder auf einer viskoelastischen Schicht [32] oder auf einem Stützgitter [39]. Im letzteren Fall ist die Aktorschicht pixeliert. Die gegenseitige Beeinflussung zwischen benachbarten Pixeln lässt sich nicht vollständig unterbinden. Die Deformationen werden durch elektrostatische Anziehung ausgelöst und erzeugen ein beugendes Phasenprofil. Der Einsatz erfolgt also immer mit einer Schlierenoptik und immer in Reflexion.

Mikrospiegelarrays besitzen einige Gemeinsamkeiten mit Membran-Flächenlichtmodulatoren. Sie arbeiten in Reflexion und erzeugen ein beugendes Phasenprofil. Der nutzbare Wellenlängenbereich geht vom UV über den gesamten sichtbaren Bereich, und die Schaltzeiten sind außerordentlich kurz. Die jeweilige Architektur der Spiegelelemente und damit das Deformationsprofil kann darüber hinaus für die spezifische Anwendung optimiert werden. Über verschiedene Kipp-, Senk- und Torsionselemente wurde berichtet [40, 41, 42]. Die Spiegelfläche ist nicht geschlossen, sondern enthält Stufen und Schlitze. Der Füllfaktor liegt damit immer unter 100%, und eine Pixelstruktur ist vorgegeben. Die Beeinflussung zwischen benachbarten Pixeln ist unterbunden. Die meisten Mikrospiegel lassen sich elektrostatisch deformieren. Es wurde jedoch auch über einen Ansatz mit piezoelektrischen Aktoren berichtet [43].

1.6 Methoden der Ansteuerung

Um sämtliche Bildelemente der Modulatorschicht einzeln anzusprechen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden zur Ansteuerung entwickelt. Ein grundsätzliches Merkmal ist die Unterscheidung nach optischer und elektrischer Ansteuerung. Bei Flächenlichtmodulatoren mit optischer Ansteuerung wird ein reelles Bild auf die Rückseite des Bauelementes projiziert. Entsprechend der lokalen Intensität verändert sich mittelbar oder unmittelbar die Aktorschicht und moduliert die einfallende Lichtfront. Sogenannte photochromatische Schichten reagieren direkt auf das optische Programmiersignal und verändern ihre Absorption [9] oder ihre doppelbrechenden Eigenschaften [8]. Die Schaltzeiten sind jedoch lang und das Ausleselicht muss eine bestimmte, vom Schreibstrahl verschiedene Wellenlänge besitzen, weshalb die technische Bedeutung eher gering ist. Fast alle optisch ansprechbaren Flächenlichtmodulatoren arbeiten deshalb nach einem anderen Prinzip. Sie besitzen eine photoelektrische Schicht, die unter dem Schreibstrahl entweder ein Widerstandsmuster hervorruft, das die Potenzialbelegung der Elektroden einstellt [32, 45, 37], oder ein Ladungsmuster wird erzeugt, das mittels einer Mikrokanalplatte verstärkt und an Elektroden weitergegeben wird [44]. Die optische Ansteuerung ist nicht-pixeliert. Wenn auch die Aktorschicht nichtpixeliert ist, wird die Auflösung in *Linien/mm* angegeben. Ihre Bedeutung hatte die optische Ansteuerung vor allem für die optische Signalverarbeitung, für Bildverstärker und für Bildwandler (Anwendungen 9–13 in Abschnitt 1.4). Zur Bildgeneration kann die optische Ansteuerung nicht verwendet werden, weil ein projiziertes Bild bereits vorhanden sein muss.

Um die Bildmuster auf einem Flächenlichtmodulator aus einem binären Datenstrom zu generieren, gibt es verschiedene elektrische Ansteuermethoden, die mit fortschreitender Entwicklung realisiert werden konnten:

- Elektronenstrahl-Ansteuerung
- Passiv-Matrix-Ansteuerung
- Aktiv-Matrix-Ansteuerung auf Glas- oder Saphirsubstraten
- Ansteuerung mit einer monolithisch integrierten aktiven Matrix

Bereits vor sechzig Jahren stand die Ansteuerung mittels Elektronenstrahl zur Verfügung. Ein Elektronenstrahl läuft zeilenweise über die Modulatorfläche und bringt ein Ladungsmuster auf. Das Bild hat damit keine Pixel-, wohl aber eine Zeilenstruktur, welche allerdings durch die Führung des Elektronenstrahls verändert werden kann. Da sich die Fokussierung des Elektronenstrahls nicht erhöhen lässt, ohne den Elektronenstrom zu senken, kann die Auflösung nicht bis auf HDTV-Qualität gesteigert werden. Darüber hinaus muss der Modulator sich im Vakuum einer Kathodenstrahlröhre befinden, was die Geräte kostspielig, groß und schwer macht. Auch muss mit Hochspannungen angesteuert werden, und die Leistungsaufnahme ist hoch. Zu den wenigen Anwendungen, die noch heutzutage mit Elektronenstrahlansteuerung arbeiten, gehört der Eidophor-Projektor für Großleinwände, mit dem die Entwicklung von Flächenlichtmodulatoren ihren Anfang nahm [4].

Bei der Ansteuerung mit einer passiven Matrix wird ein Array durch Zeilen- und Spaltenleitungen vorgegeben. Die Daten einer Zeile werden an die Spaltenleitungen gelegt, und die entsprechende Zeilenleitung wird aktiviert, damit sich die Modulatorelemente dieser Zeile einstellen. Die Zeilen werden nacheinander beschrieben. Deshalb muss die Modulatorschicht eine Speichereigenschaft besitzen, welche die Information nach einer kurzen Schreibphase bis zum erneuten Beschreiben der Zeile aufrechterhält. Wenn nicht gerade bistabile Aktorelemente geschaltet werden, sondern die Abklingzeitkonstante des optischen Effektes zum Speichern genutzt wird, gelten die Beschränkungen des Multiplexings [46], die die maximal mögliche Zeilenzahl begrenzen und ein Übersprechen des gesamten Bildinhaltes auf jede Zeile unvermeidbar machen. Auch steht das gesamte Bild meist nicht gleichzeitig zur Verfügung, was den Einsatz für Beugungsanwendungen oder für das Auslesen mit gepulstem Licht sehr stark einschränkt. Passive Matrizen sind pixeliert. Ihre Auflösung wird mit *Zeilenzahl×Spaltenzahl* angegeben. Die gemultiplexte Passiv-Matrix-Ansteuerung ist vor allem für Displays mit niedriger oder mittlerer Auflösung von Bedeutung, weil sie mit einfachen Mitteln realisierbar ist. Bei einer sehr kleinen Anzahl von Bildelementen gibt es darüber hinaus noch die Möglichkeit der festen Verdrahtung jeder Elektrode mit dem Verzicht auf Multiplexing.

Aktive Ansteuermatrizen unterscheiden sich von passiven Matrizen dadurch, dass sich an jedem Kreuzungspunkt der Zeilen- und Spaltenleitungen ein aktives Schaltelement befindet, welches das Modulatorelement von der Spaltenleitung trennt, solange es nicht angesteuert wird. Typischerweise handelt es sich bei diesem Schaltelement um einen Transistor mit Stützkapazität . Auf diese Weise ist es möglich, das elektrische Übersprechen weitgehend zu vermeiden und ein flimmerfreies Modulationsmuster zu gewährleisten. Um auf die bei passiven Matrizen üblichen Glas- und Saphirsubstrate elektronische Bauelemente aufzubringen, wird eine dünne, polykristalline oder amorphe Halbleiterschicht abgeschieden, in welche Schalttransistoren mit relativ großer Strukturgröße integriert werden. Zeilen- und Spaltentreiber müssen von einer externen Ansteuerelektronik bereitgestellt werden, da sich Transistoren mit höherer Stromergiebigkeit nicht herstellen lassen. Aktive Matrizen haben große Bedeutung für Flüssigkristall-Displays. Seit Einführung der TFT-Technologie (thin-film transistor) hat sich die Darstellungsqualität erheblich verbessert, weil jeweils immer nur eine Pixelzeile an die Spaltenleitungen geschaltet wird, was ein Übersprechen auf andere Zeilen verhindert. Bedingt durch die große Substratfläche, die für flache *direct-view*-Displays erforderlich ist, ist die Ausbeute bei der Fertigung jedoch gering [47].

Bei aktiven Ansteuermatrizen in monokristallinen Silizium-Chips (*Silicon* backplane) erlauben die hochentwickelten Herstellungsverfahren der CMOS-Technologie die kostengünstige Produktion sehr komplexer Schaltungen mit hoher Integrationsdichte und hoher Zuverlässigkeit. Wegen der größeren Vielfalt von integrierbaren Bauelementen kann unter jedem Pixel eine dynamische oder statische Speicherzelle (DRAM oder SRAM) integriert werden, die zwischen den Schreibzyklen eine konstante Ansteuerspannung zur Verfügung stellt. Weiterhin befinden sich Zeilen- und Spaltentreiber auf dem gleichen Siliziumsubstrat, sowie eine Logik zur Generation von Steuersignalen und eine Datenschnittstelle. Die Implementierung darüberhinausgehender Funktionen ist denkbar. Da Chipflächen typischerweise nur wenige Quadratzentimeter betragen, müssen die Aktorelemente kleiner sein, als es auf Glassubstraten üblich ist. Typische Pixelgrößen betragen $10\mu m$ bis $40\mu m$, seltener bis $100\mu m$. Daher besteht die Herausforderung, einen mikromechanischen Mo-

dulator zur Verfügung zu haben, der insbesondere für kleinste Pixelgrößen geeignet ist und kostengünstig mit hoher Ausbeute gefertigt werden kann.

Die Bedeutung von Flächenlichtmodulatoren mit *Silicon backplane* wächst zur Zeit sehr schnell. Andere Methoden der Ansteuerung sind eigentlich nur noch in der Display-Technik von Bedeutung.

1.7 Einordnung des neuartigen Flächenlichtmodulators

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen zu einem neuartigen Flächenlichtmodulator durchgeführt, bei dem durch Deformation eines Flüssigkeitsfilms auf einem Spiegel optische Phasenmuster erzeugt werden, die dann mittels eines geeigneten Optikaufbaus in ein intensitätsmoduliertes Bild umgewandelt werden können. Der Spiegel hat eine Pixelstruktur und besteht aus einer Gegenelektrode und spiegelnden Pixelelektroden, die durch eine unterliegende CMOS-Schaltung mit Spannungspegeln beaufschlagt werden können. Das sich ergebende inhomogene elektrische Feld ruft dann die Deformationen des dielektrischen Flüssigkeitsfilms hervor. Die ansteuernde CMOS-Schaltung inklusive der spiegelnden Elektrodenstruktur werden in einem Standard-Hochvolt-CMOS-Prozess hergestellt. Aufgrund dieser Eigenschaften können hier bereits die Einsatzgebiete umrissen werden, für die sich das MLM-Bauelement eignet.

Bei diesem Modulationsprinzip erfolgt die Deformation der einfallenden Wellenfront pixelweise, wodurch das entsprechende Licht aus dem Hauptstrahlengang herausgebeugt wird. Durch Fourierfilterung des Beugungsbildes in einem nachfolgenden schlierenoptischen System werden daraus Intensitätsmuster erzeugt. Eine großflächige Phasenverschiebung, wie sie z.B. für adaptive Optiken benötigt wird, ist nicht möglich. Der Vorteil der Phasenmodulation besteht darin, dass das Licht dunkler Pixel nicht im oder nahe am Flächenlichtmodulator absorbiert wird, sondern im Fourierfilter. Nur Reflexionsverluste führen zu Absorptionswärme, die vom Bauelement abgeführt werden muss. Der Lichtstrom kann entsprechend groß dimensioniert werden.

Die Ansteuerung mit einer *Silicon backplane* und die Herstellung mit den Methoden der Halbleitertechnologie erlauben die preisgünstige Fertigung in hohen Stückzahlen. Weiterhin ergeben sich aus dieser Ansteuermethode kleine Abmessungen der Modulatorfläche und ein Betrieb ausschließlich in Reflexion. Die kleinen Abmessungen ermöglichen die Konstruktion kompakter Geräte. Da in jedem Fall eine Fourieroptik verwendet werden muss, kann die Größe des projizierten Bildes durch deren Vergrößerung/Verkleinerung eingestellt werden. Selbst Standardobjektive mit geeigneter numerischer Apertur sind als Fourieroptiken zur Darstellung von Phasenbildern geeignet [48]. Der reflektive Betrieb erfordert einen leicht erhöhten Aufwand bei der Optik. Jedoch stehen verschiedene Lösungen zur Verfügung, und die Baulängen werden kurz gehalten. Schließlich werden die Deformationsprofile durch die Ansteuerung mit einer aktiven Speichermatrix flimmerfrei dargestellt. Dies ist bei kontinuierlicher Beleuchtung nützlich, wie sie bei Projektionsdisplays, programmierbaren Fourierfiltern und der Steuerung photoinduzierter Reaktionen zur Anwendung kommt. Beim Auslesen mit Lichtimpulsen ist diese Eigenschaft sogar unerlässlich. Der Einsatz in schnellen Direktschreibern und in der parallelen optischen Signalverarbeitung hängt hiervon ab. Im Gegensatz zu den früheren Ölfilmprojektoren deren Gesamtsystem präzise auf die Zeitkonstanten der jeweiligen Fernsehnorm ausgelegt war, stellt die MLM-Technologie eine statische Deformation ein, die bei kontinuierlicher Ansteuerung dauerhaft aufrechterhalten wird.

Das MLM-Bauelement arbeitet mit Licht aus einem weiten Spektralbereich, der vor allem bis ins Ultraviolette reicht, was den Einsatz in hochauflösenden Direkt-Belichtungssystemen erlaubt. Der Flüssigkeitsfilm ist ein analogfähiger Aktor, das heißt, die Deformationsamplitude lässt sich durch analoge Spannungssignale kontinuierlich einstellen. Wie in dieser Arbeit durch Messungen und Simulationsrechnungen gezeigt wird, ist deshalb auch die Grauwertdarstellung ohne Zeitmultiplexing möglich. Auch kann die Abstimmung auf eine bestimmte Wellenlänge durch Vorgabe der Ansteuerspannung erfolgen, da so die Deformationsamplitude angepasst wird.

Für den Einsatz als Mikrodisplay ist die prinzipielle Farbtauglichkeit des Bauelementes selbst interessant. Ein Farbfilter-Mosaik kann unter der Flüssigkeit auf den Spiegel aufgebracht werden, so dass mehrere Einzelpixel einen Farbpixel ergeben. Bei Flüssigkristall-Displays wird das Farbfilter-Mosaik-Verfahren häufig verwendet. Farbbildtaugliche Videoprojektoren auf Basis mikromechanischer Flächenlichtmodulatoren arbeiten dagegen entweder sequenziell mit Primärfarben, die mit Farbfilterrädern erzeugt werden, oder die Primärfarben werden mit Hilfe von drei separaten Flächenlichtmodulatoren überlagert [49].

Der Einsatz als Mikrodisplay verlangt eine aufwendige Produktentwicklung, da nur preisgünstige Bauelemente mit sehr hoher Zuverlässigkeit dem Konkurrenzdruck auf diesem Markt standhalten können. Spezialanwendungen machen dagegen oft besondere Eigenschaften erforderlich, wie zum Beispiel UV-Tauglichkeit oder eine hohe Planarität der Modulatoroberfläche, so dass hier höhere Stückpreise akzeptiert werden.

Kapitel 2

Das Prinzips des neuartigen Flächenlichtmodulators

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiger Flächenlichtmodulator mit einem Flüssigkeitsfilm auf einer verspiegelten CMOS-Schaltung erstmalig untersucht. Zielstellung war dabei ein einfacher Herstellungsprozess und eine unproblematische Handhabung bei der Anwendung. Das grundsätzliche Funktionsprinzip ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Über einem Spiegel befinden sich Elektrodenstege, die in ihrer Umgebung ein starkes elektrisches Feld aufbauen. Spiegel und Stege sind von einem Flüssigkeitsfilm bedeckt, der zunächst eine plane Oberfläche bildet. Im elektrischen Feld wirkt eine Kraft, welche die dielektrische Flüssigkeit in Richtung auf die Bereiche größerer Feldstärke treibt und dabei die Oberfläche deformiert (Abbildung 2.1a). Einfallendes Licht legt vor und nach der Reflexion am Spiegel einen von der örtlichen Filmdicke abhängigen optischen Weg zurück und wird so in seiner Phase moduliert (Abbildung 2.1b).

In diesem Kapitel werden zunächst die physikalischen Grundlagen erläutert, die für das Verständnis des MLM-Bauelementes wichtig sind. Sie werden so aufbereitet, dass sich ein geschlossenes Modell ergibt, welches im nächsten Kapitel numerisch untersucht werden kann. Weiterhin wird in diesem Kapitel auf die vielfältigen Anforderungen an eine Aktorflüssigkeit eingegangen, aus denen sich die Wahl der geeigneten Flüssigkeit ergibt. Schließlich wird noch die Struktur der auf der Ansteuerschaltung zu platzierenden Elektroden diskutiert und festgelegt.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Phasenmodulation im Flüssigkeitsfilm

Die Phasenmodulation der einfallenden Lichtwellenfront wird durch lokale Variation der Dicke des Flüssigkeitsfilms erreicht. Wenn Licht einen Flüssigkeitsfilm mit lokal variierender Dicke durchläuft, so erfährt es eine entspre-



Abbildung 2.1: Grundsätzliches Prinzip der MLM-Technologie zur Lichtmodulation mit einem deformierbaren Flüssigkeitsfilm. a) Entstehung der Deformation durch ein elektrisches Feld b) Phasenmodulation am deformierten Flüssigkeitsfilm

chende Phasenmodulation. Für die weitere Betrachtung sei eine in z-Richtung laufende Welle angenommen, die senkrecht auf den in der xy-Ebene ausgerichteten Flächenlichtmodulator trifft. Wird nun die Schichtdicke der Flüssigkeit lokal um $\Delta z(x, y)$ erhöht, wird an dieser Stelle der optische Weg von $n_0 \cdot \Delta z$ auf $n_{\ell} \cdot \Delta z$ verlängert, weil der Brechungsindex n_{ℓ} der Flüssigkeit größer ist als der Brechungsindex n_0 im Vakuum bzw. in Luft. Durch die Reflexion am Spiegel durchläuft das Licht diesen Bereich ein zweites Mal, und für Licht der Wellenlänge λ ergibt sich eine Phasenverschiebung $\Delta \varphi_{\ell}$.

$$\Delta \varphi_{\ell} = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \left(n_{\ell} - n_0 \right) \Delta z \tag{2.1}$$

Ist die unterliegende Spiegelfläche nicht eben, sondern weist eine erhabene Elektrodenstruktur $\Delta t(x, y)$ auf, so wird der optische Weg stellenweise verkürzt und die lokale Phasenlage wird gegenüber Reflexionen am ebenen Spiegel um $\Delta \varphi_{sp}$ verschoben.

$$\Delta \varphi_{sp} = -\frac{2\pi}{\lambda} \ 2 \ n_\ell \ \Delta t$$

Insgesamt ergibt sich also das Phasenprofil $\Delta \varphi$ in der reflektierten Lichtwellenfront.

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{\ell} + \Delta \varphi_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \left[(n_{\ell} - n_0) \Delta z - n_{\ell} \Delta t \right]$$
(2.2)

Die gleiche Phasenänderung, die durch das Anheben der Flüssigkeitsoberfläche hervorgerufen wird, kann auch ohne Flüssigkeitsfilm durch bloßes Absenken eines Spiegels erzeugt werden. Das Spiegelprofil Δz_{eq} , mit dem das gleiche Phasenprofil $\Delta \varphi$ erzeugt wird wie mit dem deformierten Flüssigkeitsfilm, erhält man mit Gleichung (2.3):

$$\Delta z_{eq}(\Delta z) = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{-\Delta\varphi}{2} = n_{\ell} \,\Delta t - (n_{\ell} - n_0) \cdot \Delta z \tag{2.3}$$

 Δz_{eq} sei deshalb als *äquivalente Spiegelabsenkung* eingeführt. Die Ergebnisse von Untersuchungen an deformierbaren Spiegeloberflächen können bei gleichem Δz_{eq} auf das MLM-Bauelement übertragen werden.

Das Modell der äquivalenten Spiegelabsenkung berücksichtigt allerdings nicht die Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche. Für eine Flüssigkeit mit dem Brechungsindex n = 1, 4 liegt die Reflektivität ihrer Oberfläche bei senkrechtem Lichteinfall nach [50] beispielsweise bei 2,8%. Für viele Betrachtungen kann sie tatsächlich vernachlässigt werden. Die Oberfläche einer stark brechenden Flüssigkeit mit n = 1, 7 reflektiert aber bereits 6,7% der einfallenden Intensität. Abbildung 2.2 zeigt den Einfluss, den ein dünner Ölfilm durch Mehrfachreflexion auf die Reflektivität eines Aluminiumspiegels hat. In Abhängigkeit von der Filmdicke wird die Reflektivität geschwächt oder geringfügig erhöht. Nutzen lässt sich diese Charakteristik für das Bauelement nicht, da eine derart genaue Kontrolle der Filmdicke auf wenige 10nm nicht über längere Zeiträume zu gewährleisten ist.

2.1.2 Oberflächenspannung

Bei Abwesenheit äußerer Kräfte bilden sich Flüssigkeitsoberflächen so aus, dass die Grenzflächenenergie des Gesamtsystems minimiert wird. Benetzt ein Flüssigkeitsfilm eine planare Oberfläche vollständig, bildet er zur Gasphase hin eine ebene Oberfläche aus, sofern die Flüssigkeitsmenge ausreichend ist. Jeder Deformation wirkt die flächenbezogene Kraft p_{σ} entgegen, welche versucht, die Oberfläche zu minimieren. Diese Kraft ist proportional zur Krümmung der Oberfläche [55]:

$$p_{\sigma} = \sigma_{\ell} \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y}\right) \tag{2.4}$$



Abbildung 2.2: Reflektivität eines 500nm dicken Aluminiumspiegels ohne Flüssigkeit, mit einem Film aus Silikonöl ($n \approx 1,4$, siehe Abbildung 2.8) und mit Immersionsöl (n = 1,7,) in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei der Wellenlänge $\lambda = 543nm$ (Berechnung mit [51])

Die Proportionalitätskonstante σ_{ℓ} ist eine Materialeigenschaft und heißt Kapillaritätskonstante. Sie hat die Dimension einer Oberflächenenergie. r_x und r_y sind die Hauptkrümmungsradien der Oberfläche am betrachteten Punkt.

2.1.3 Maxwellsche Spannung

Im elektrischen Feld erfährt die Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika verschiedener Permittivität eine flächenbezogene Kraft, die sogenannten Maxwellsche Spannung p_{el} (vgl. z.B. [56]).

$$p_{el} = \frac{1}{2} E_t^2 \left(\varepsilon_\ell - \varepsilon_0\right) + \frac{1}{2} D_n^2 \frac{\varepsilon_\ell - \varepsilon_0}{\varepsilon_\ell \cdot \varepsilon_0}$$
(2.5)

 ε_{ℓ} und ε_{0} sind die Dielektrizitätskonstanten der Flüssigkeit und der umgebenden Atmosphäre. E_{t} ist die tangentiale elektrische Feldstärke an der Grenzfläche, und D_{n} ist die Normalkomponente des dielektrischen Flusses. Die Verwendung dieser beiden Größen wurde gewählt, weil sie an der Grenzfläche stetig sind und damit der Bezug auf das Medium entfallen kann. Abbildung 2.3 stellt die Größen zur Veranschaulichung noch einmal dar.

Da es sich bei der Maxwellschen Spannung um einen Effekt zweiter Ordnung handelt, ist die Kraftrichtung unabhängig von der Feldrichtung. Sie wirkt immer orthogonal zur Grenzfläche in Richtung zum weniger polarisierbaren Medium. Dielektrika mit großem ε_{ℓ} werden in die Bereiche hoher



Abbildung 2.3: Die Maxwellsche Spannung p_{el} an der Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika im elektrischen Feld (a). An der Grenzfläche ist die Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke stetig (b), sowie die Normalkomponente der dielektrischen Flussdichte (c).

Felddichte gezogen und senken dort das elektrische Feld und damit die elektrische Feldenergie. Im Falle des MLM-Bauelementes wird also der Film bestrebt sein, seine Dicke dort zu vergrößern, wo hohe Feldstärken herrschen.

2.1.4 Benetzung

Die Benetzung einer festen Oberfläche durch eine Flüssigkeit charakterisiert man mit dem sogenannten Rand- oder Kontaktwinkel, unter dem die Flüssigkeitsoberfläche auf die Oberfläche des festen Stoffes trifft (Abbildung 2.4). Dieser Winkel wird durch die Grenzflächenenergien zwischen den Medien eingestellt [58, Abschnitt 5.1].

$$\sigma_{sv} - \sigma_{sl} = \sigma_{lv} \cdot \cos\vartheta \tag{2.6}$$

Darin tritt der Randwinkel ϑ auf und die Grenzflächenenergien σ_{sv} zwischen dem festen und dem gasförmigen Medium, σ_{sl} zwischen dem festen und dem flüssigen Medium und σ_{lv} zwischen dem flüssigen und dem gasförmigen Medium.



Abbildung 2.4: Linse eines Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche

Man unterscheidet drei Fälle der Benetzbarkeit:

- 1. $\vartheta \ge 90^\circ$: Die Oberfläche ist mit der Flüssigkeit **nicht benetzbar**. Ein Tropfen liegt mit einer kleinen Kontaktfläche auf der festen Oberfläche.
- 2. $0^{\circ} < \vartheta < 90^{\circ}$: Die Oberfläche ist mit der Flüssigkeit **benetzbar**. Es bildet sich eine Linse.
- 3. $\vartheta = 0^{\circ}$: Die Oberfläche wird mit der Flüssigkeit vollständig benetzt. Ein Film breitet sich aus, bis er entweder eine minimale Filmdicke erreicht (im Idealfall eine Monolage) oder bis das feste Material ganzflächig bedeckt ist.

Allgemein kann gesagt werden, dass ein Festkörper um so besser durch Flüssigkeiten benetzbar ist, je größer seine Oberflächenenergie ist. Metalle haben eine sehr hohe Oberflächenenergie. Eine Flüssigkeit wiederum benetzt einen Festkörper um so besser, je kleiner ihre Oberflächenenergie ist.

2.2 Modelle

2.2.1 Beugung an einem Phasenprofil

Phasenmodulierende Flächenlichtmodulatoren werden zur Erzeugung von Intensitätsmustern verwendet, indem das Phasenbild schlierenoptisch abgebildet und dabei in ein intensitätsmoduliertes Bild umgewandelt wird. Um den Flächenlichtmodulator unabhängig von dieser Optik zu charakterisieren, bietet es sich an, das Beugungsbild zu untersuchen, welches entsteht, wenn eine monochromatische Lichtwellenfront an seinem Oberflächenprofil reflektiert wird. Nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip [52] lässt sich das Beugungsbild als Interferenz aller Kugelwellen berechnen, die beim Einfall einer Wellenfront vom Oberflächenprofil ausgehen.

Da in [52] ein sehr allgemeiner Fall beschrieben ist, soll hier von einer Anordnung ausgegangen werden, wie sie in [53] beschrieben ist. Dort wird das Beugungsbild eines Kristallgitters berechnet, indem man eine ebene Welle annimmt, die an den Gitteratomen gestreut wird. Jedes diskrete Atom sendet nach auftreffen der einfallenden ebenen Welle eine Kugelwelle aus. Für einen in großem Abstand am Betrachtungsort P aufgestellten Schirm kann dann die Intensität bestimmt werden, indem man die Beiträge aller Streuzentren phasenrichtig aufsummiert. Durch die periodische Anordnung im Kristall ergeben sich nur diskrete Winkel, unter denen die Interferenz der Kugelwellen nicht destruktiv ist. Die mathematische Beschreibung dieser Anordnung lässt sich sehr leicht auf eine kontinuierliche Oberfläche übertragen. Sie wird im Anhang C auch für die Streuung an einer Oberfläche mit transparentem Flüssigkeitsfilm aufgestellt.

Eine ebene, harmonische Welle, die sich in Richtung des Wellenvektors \vec{k}_{in} mit $|\vec{k}_{in}| = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$ fortpflanzt, hat einen Feldvektor mit dem Betrag $E_{in}(\vec{r}, t)$. Die zeitliche Abhängigkeit lässt sich verkürzt in der komplexen Darstellung schreiben, die hier durch einen Unterstrich gekennzeichnet wird.

$$\underline{E}_{in} = \underline{E}_0 \ e^{i\vec{k}_{in}\cdot\vec{r}}$$

Die Intensität der Welle ergibt sich zu $I = \frac{\varepsilon}{2} \cdot |\underline{E}_0|^2$. Die kontinuierliche Oberfläche werde durch die Vektorfunktion \vec{r}_{of} beschrieben und habe den örtlichen Reflexionsfaktor $\underline{R}(\vec{r}_{of})$, dessen Quadrat die Reflektivität ergibt. Trifft die Welle auf die Spiegeloberfläche F_{of} , geht von jedem differentiellen Oberflächenelement dF eine Kugelwelle aus, die am entfernten Aufpunkt P mit dem Ortsvektor \vec{r} als ebene Welle mit dem Wellenvektor \vec{k}_{out} wahrgenommen wird. \vec{k}_{out} hat den gleichen Betrag wie \vec{k}_{in} und zeigt vom Flächenelement dF zum Aufpunkt P. Wie Abbildung 2.5 verdeutlicht, ist die resul-



Abbildung 2.5: Integration über alle an der Oberfläche gestreuten Feldbeiträge

tierende Feldstärke gegeben durch das folgende Integral über die am Auf-

punkt P interferierenden Beiträge aller Flächenelemente der Spiegelfläche¹.

$$\underline{E}_{out} = \frac{1}{F_{of}} \iint_{F_{of}} \underline{E}_{in}(\vec{r}_{of}) \ \underline{R}(\vec{r}_{of}) \ e^{i\vec{k}_{out} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{of})} \ dF$$
(2.7)

Ist die Entfernung zum Punkt P groß gegenüber der Ausdehnung des Flächenlichtmodulators (Fraunhofer-Beugung), so ist $\vec{k}_{out} \parallel (\vec{r} - \vec{r}_{of})$ für alle \vec{r}_{of} gleich gerichtet. Im Fernfeld lässt sich das Integral (2.7) also umformen zu

$$\underline{\underline{E}}_{out} = \frac{\underline{\underline{E}}_0}{\overline{F}_{of}} e^{i\vec{k}_{out}\cdot\vec{r}} \iint_{F_{of}} \underline{R}(\vec{r}_{of}) e^{i(\vec{k}_{in}-\vec{k}_{out})\cdot\vec{r}_{of}} dF .$$
(2.8)

Die normierte Intensität, die in Richtung \vec{k}_{out} läuft, ergibt sich schließlich zu

$$\frac{I_{out}}{I_0} = \frac{1}{F_{of}^2} \cdot \left| \iint_{F_{of}} \underline{R}(\vec{r}_{of}) e^{i(\vec{k}_{in} - \vec{k}_{out}) \cdot \vec{r}_{of}} dF \right|^2 .$$
(2.9)

Das Integral (2.9) lässt sich numerisch für beliebige Oberflächen auswerten. In [54] werden Beugungsbilder für ausgewählte eindimensionale Oberflächenprofile analytisch berechnet. Dabei wird ein stetiger, funktionaler Zusammenhang zwischen der Deformationsamplitude des Profils und der auf die einzelne Beugungsordnung entfallenden Intensität hergeleitet. Bei sinusförmiger Deformation haben die Intensitätsverläufe bei steigender Deformationsamplitude die Form quadratischer Besselfunktionen, aus Rechteckprofilen ergeben sich quadratische Sinus, und für Sägezahn-Profile erscheinen die Beugungsordnungen nacheinander jeweils nur für einen kleinen Amplitudenbereich. Insbesondere erlauben alle drei Profile die vollständige Unterdrückung der nullten Beugungsordnung, wenn die Amplitude auf die Wellenlänge abgestimmt wird.

Mit der oben hergeleiteten Methode kann auch das Beugungsbild eines MLM-Bauelementes berechnet werden, wenn als Spiegelprofil die *äquivalente Spiegelabsenkung* eingesetzt wird, die im letzten Abschnitt für senkrechten Einfall auf einen Spiegel mit deformiertem Flüssigkeitsfilm eingeführt wurde. Eine genauere Berechnung des Beugungsbildes eines MLM-Bauelementes

¹Es wird natürlich entlang einer Phasenfront der einfallenden Welle integriert. Dabei hat das Flächenelement $d\vec{F}$ eine Wirkfläche von $\frac{d\vec{F}\cdot\vec{k}_{in}}{|\vec{k}_{in}|} = dF\cos\theta_{Einfall}$, also die Projektion von dF in Wellenrichtung. Da die Oberflächendeformationen bei mikromechanischen Flächenlichtmodulatoren im Verhältnis zu ihren lateralen Abmessungen klein sind, gilt für alle Flächenelemente dF und für die Spiegelfläche F_{of} derselbe Verkürzungsfaktor $\cos\theta_{Einfall}$ und lässt sich aus dem Bruch kürzen.

wird im Anhang C angegeben. Sie berücksichtigt die Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche und die längeren optischen Wege in der Flüssigkeit bei nicht-senkrechten Einfall. Die weiteren Betrachtungen lassen sich jedoch am einfachen Modell leichter ableiten.

Das Integral (2.8) ist eine zweidimensionale Fouriertransformation der Oberflächenfunktion vom Ortsraum in den Ortsfrequenzraum, also den Raum der Streuvektoren $\vec{K} = \vec{k}_{in} - \vec{k}_{out}$. Mit der Modulatorfläche in der xy-Ebene hat die Deformation die Form z(x, y). Der Reflexionsfaktor wird außerhalb der Modulatorfläche zu $\underline{R}(x, y) = 0$ gesetzt, um die Integrationsgrenzen ins Unendliche verschieben zu können, ohne dass sich der Wert des Integrals ändert. Schreibt man die Vektoren \vec{k}_{in} , \vec{k}_{out} und \vec{r}_{of} in kartesischen Koordinaten nieder, lässt sich das Skalarprodukt im Exponenten nach Summanden auflösen. Man erhält die Form eines zweidimensionalen Fourierintegrals in exponentieller Schreibweise:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{\underline{R}(\vec{r_{of}}) \ e^{i(k_{in,z} - k_{out,z}) \ z(x,y)}}_{\text{Oberflächenfunktion}} \cdot e^{i(k_{in,y} - k_{out,y}) \ y} \ dy \right] e^{i(k_{in,x} - k_{out,x}) \ x} \ dx$$

Für den nächsten Schritt sei ein unendlich ausgedehntes Array gleich deformierter Pixel als Modulator angenommen. Die Oberflächenfunktion ist dann in x und y mit der Pixelgröße d periodisch. Es ist bekannt, dass die Fouriertransformierte einer periodischen Funktion nur an diskreten Stellen von Null verschieden ist. Für diese Stellen genügt die Integration über eine Periode, um die Fourierkoeffizienten zu bestimmen. Ihre Quadrate stellen die Intensitäten der diskreten Beugungsordnungen dar. Auf diese Weise soll im nächsten Kapitel der Einfluss der Pixeldeformation auf die Beugungsordnungen untersucht werden. Zunächst müssen aber noch die Richtungen \vec{k}_{out} bestimmt werden, unter denen sich Beugungsordnungen ausbilden. Die Orthogonalitätseigenschaft von e^{ix} sagt aus, dass das Fourierintegral verschwindet, wenn die Periode der komplexen Exponentialfunktion kein ganzzahliges Vielfaches der Periode d der zu transformierenden Funktion ist. Das bedeutet, dass die Beugungsordnungen (m_x, m_y) dort auftreten, wo \vec{k}_{out} die folgenden beiden Bedingungen erfüllt:

$$(k_{in,x} - k_{out,x}) d = 2\pi m_x \quad \text{und} \quad (2.10)$$

$$(k_{in,y} - k_{out,y}) d = 2\pi m_y \quad \text{für} \quad m_x, m_y = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Da sich bei der Reflexion nur die Richtung des Wellenvektors ändert, nicht aber der Betrag, ergibt sich die z-Komponente $k_{out,z}$ so, dass $|\vec{k}_{out}| = |\vec{k}_{in}|$ ist:

$$k_{out,z} = \sqrt{|\vec{k}_{in}|^2 - k_{out,x}^2 - k_{out,y}^2}$$

Für höhere (m_x, m_y) wird $k_{out,z}$ imaginär. Es existiert also nur eine endliche Anzahl von Beugungsordnungen.

In Kapitel 3 wird die Intensität der Beugungsordnungen nach Bedingung 2.10 mit dem Integral (2.9) numerisch berechnet. Dabei werden zweidimensionale Deformationsprofile zugrundegelegt, wie sie sich mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Modell aus Simulationsrechnungen ergeben.

2.2.2 Das Deformationsprofil

Nach den Gesetzen der Mechanik muss sich das Deformationsprofil des Flüssigkeitsfilms im statischen Fall so einstellen, dass sich die Kräfte an der Flüssigkeitsoberfläche gerade aufheben. Für ein Flüssigkeitsprofil mit konvexen und konkaven Abschnitten, also mit Bergen und Tälern, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, weist die Oberflächenspannung p_{σ} gemäß Gleichung (2.4) teilweise in den Film hinein und teilweise aus ihm heraus. Die



Abbildung 2.6: Die Oberflächenspannung p_{σ} am deformierten Ölfilm

Maxwellsche Spannung p_{el} nach Gleichung (2.5) weist immer aus dem Film heraus und wirkt der Oberflächenspannung nur bei konvexen Deformationen entgegen. In der Flüssigkeit entsteht somit ein Unterdruck p_0 , der eine Volumensvergrößerung des Films im Feld verhindert, denn Flüssigkeiten sind nur wenig kompressibel. Dort, wo der Unterdruck die lokale Maxwellsche Spannung überwiegt, wird sich die Filmoberfläche konkav wölben. Das Kräftegleichgewicht an der Oberfläche ist also gegeben durch

$$-p_{\sigma} = p_{el} - p_0 . (2.11)$$

Die Krümmung $\frac{1}{r}$ einer Funktion z(x) lässt sich mit folgenden Differentialen angeben, wenn der Krümmungsradius an konvexen Stellen negativ ist (vgl. z.B. [57, Tabelle 4.1]).

$$\frac{1}{r} = \frac{z''(x)}{\sqrt{1 + z'(x)^2}^3} \tag{2.12}$$

Für das Oberflächenprofil z(x, y) ergibt sich damit

$$\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}^3} + \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}^3}$$
(2.13)

Aus (2.11), (2.4), (2.5) und (2.13) ergibt sich die Differentialgleichung für die Flüssigkeitsoberfläche:

$$\frac{\sigma_{\ell} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}^3} + \frac{\sigma_{\ell} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}^3} = \frac{1}{2} E_t^2 \left(\varepsilon_{\ell} - \varepsilon_0\right) + \frac{1}{2} D_n^2 \frac{\varepsilon_{\ell} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{\ell} \cdot \varepsilon_0} - p_0 \quad (2.14)$$

Da das elektrische Feld, E_t und D_n , von der Form des Films abhängig ist, lässt sich diese Gleichung nicht geschlossen für z(x, y) lösen, und auch die numerische Lösung bereitet erhebliche Probleme. Mit einigen Näherungen lässt sich jedoch ein sehr einfaches Modell ableiten, welches das Verhalten des MLM-Bauelementes gut beschreibt.

Zuallererst beschränken wir uns auf den eindimensionalen Fall, $\frac{\partial}{\partial y} = 0$. Weiterhin nehmen wir an, dass im Profil keine großen Steigungen auftreten, $z'(x) \approx 0$. Die Krümmung entspricht dann etwa der zweiten Ableitung, $\frac{1}{r} \approx z''(x)$. Diese Näherung muss für kleine Pixel immer überprüft werden. Um eine grobe Abschätzung zu geben, wird eine Deformationsamplitude in der Größenordnung einer Lichtwellenlänge im sichtbaren Bereich als optisch ausreichend angenommen, also $|\Delta z| < 1000 nm$. Da über jedem $20 \mu m$ -Pixel gerade ein Tal entsteht, lässt sich abschätzen, dass die höchste Steigung nicht größer sein wird als der maximale Höhenunterschied pro viertel Pixelweite. Wie Abbildung 2.7 erkennen lässt, können größere Steigungen nur auftreten, wenn die Oberfläche stellenweise erheblich stärker gekrümmt wird. Die Oberflächenspannung wird die Krümmung jedoch immer über größere Abschnitte verteilen. Wir können also von einer Steigung unter $z' < \frac{1000 nm}{20 \mu m/4} = 0, 2$ ausgehen. In Tabelle 2.1 sind die Werte des in der Näherung zu eins gesetzten Faktors $\frac{1/r}{z''}$ für einige Steigungen angegeben.

Schließlich nehmen wir noch an, die Feldstärke an der Oberfläche bliebe trotz der Deformation der dielektrischen Flüssigkeit unverändert. Diese Annahme ist gerechtfertigt, solange die Deformation klein ist gegenüber dem



Abbildung 2.7: Die Oberflächenspannung p_{σ} am deformierten Ölfilm

z'	0,05	$_{0,1}$	0,15	0,2	0,25
$\frac{1}{\sqrt{1+z'(x)^2}}^3$	0,996	0,985	0,967	0,943	0,913

Tabelle 2.1: Zur Abhängigkeit der Näherung von der Steigung z'

Abstand der Flüssigkeitsoberfläche zu den Elektroden. Mit diesen drei Näherungen wird die Differentialgleichung (2.14) zu

$$-\sigma_{\ell} z''(x) = p_{el}(x) - p_0 \quad . \tag{2.15}$$

Das Deformationsprofil z(x) kann jetzt durch zweifache Integration bestimmt werden. Nach kurzer Rechnung (siehe Anhang D) ergibt sich für eine unendlich ausgedehnte Matrix mit gleich angesteuerten Pixeln der Weite d das Deformationsprofil eines Pixels zu

$$z(x) = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} \int_{0}^{\zeta} p_{el}(\xi) d\xi d\zeta + \frac{p_{0}}{2\sigma_{\ell}} x^{2} - z(0)$$
(2.16)
mit $p_{0} = \frac{1}{d} \int_{0}^{d} p_{el}(x) dx$ und $z(0)$ gemäß (Anhang D.6).

2.3 Benetzung der Substratoberfläche

Das MLM-Bauelement benötigt einen homogenen Flüssigkeitsfilm mit planer Oberfläche. Die Flüssigkeit muss die Spiegelfläche dazu vollständig oder nahezu vollständig benetzen², also nach Abschnitt 2.1.4 maximal einen sehr spitzten Randwinkel auf der Spiegelfläche ausbilden. Wenn die Modulatoroberfläche nicht völlig planar entworfen wird, sondern eine erhabene Elektrodenstruktur trägt, muss sichergestellt sein, dass die Flüssigkeit sich nicht etwa in Vertiefungen sammelt und diese füllt, der zunächst zusammenhängende Film dabei aufreißt und erhabene Elektrodenstrukturen nicht benetzt sind.

Angesichts der kleinen Strukturgrößen mit Pixeln um $20\mu m$ Kantenlänge und der geringen Stufenhöhen der Planartechnologie von bis zu wenigen Mikrometern werden derlei Risiken in jedem Falle durch die Kapillarkräfte vermieden. Benetzt die Flüssigkeit die Oberfläche, wird sie die geringe Stufenhöhe mühelos überwinden und über die Elektrodenstrukturen hinwegkriechen, weil sich an den Strukturkanten ein Meniskus ausbildet, der die Stufenhöhe schon bei einem Randwinkel von knapp unter 90° übersteigt. Eine nicht benetzende Flüssigkeit würde dagegen eine Linse über mehrere Pixel ausbilden, da eine Flüssigkeitsverteilung mit vielen kleinen Linsen in der Größe je eines Pixels eine sehr viel höhere Oberflächenenergie hätte und damit instabil wäre. Zwischen diesen beiden Fällen liegt der Randwinkel um 90°. Die Flüssigkeit kann dann fast ohne Meniskus zwischen den Elektroden wie in einem kleinen Topf gehalten werden. Wegen der geringen Strukturabmessungen ist dieser Winkelbereich jedoch so klein, dass die Grenzflächenenergien σ_{sv} und σ_{sl} erheblich genauer übereinstimmen müssten, als dies technisch denkbar ist.

2.4 Die Flüssigkeit

Die Flüssigkeit muss einem ganzen Katalog von Anforderungen genügen. Sie soll zunächst einen homogenen Film bilden, im Feld soll sich ihre Oberfläche deformieren, und das Deformationsprofil soll in der einfallenden Wellenfront ausreichend große Phasenverschiebungen hervorrufen. Die Deformationen müssen mit einer hinreichend kurzen Zeitkonstanten einstellbar sein, für die Dauer eines Ansteuerzyklus stabil bleiben und ohne Ansteuerung schnell abklingen. Darüber hinaus muss sichergestellt sein, dass der Flächenlichtmodulator über einen längeren Zeitraum mit konstanten Kenndaten arbeitet.

Zur besseren Übersicht lassen sich die Anforderungen an die Flüssigkeit in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe beinhaltet jene Eigenschaften, die es zu optimieren gilt, um das MLM-Bauelement mit möglichst geringer Ansteuerspannung betreiben zu können:

 $^{^2\}rm{Ein}$ anderes Konzept für einen Flächenlichtmodulator wird in [59] beschrieben. Dort wird mit einer Flüssigkeit gearbeitet, die eine Elektrodenstruktur gerade nicht benetzt.

- Der Brechungsindex n soll möglichst groß sein, um schon mit geringen Deformationen die notwendigen Phasenhübe zu erreichen. Brechungsindizes bekannter Flüssigkeiten liegen im Bereich bis n = 1, 7. Gele werden im Bereich bis n = 2, 3 angeboten [61].
- Die **relative Dielektrizitätskonstante** ε_r soll möglichst groß sein, damit schon geringe elektrische Feldstärken eine große Maxwellsche Spannung an der Oberfläche erzeugen. Relative Dielektrizitätskonstanten von Flüssigkeiten können bei polaren Stoffen Werte von $\varepsilon_r = 90$ und mehr erreichen.
- Die Kapillaritätskonstante σ_{ℓ} soll möglichst klein sein, damit die **Oberflächenspannung** nicht schon bei geringen Deformationen die Maxwellsche Spannung ausgleicht. Kapillaritätskonstanten von Flüssigkeiten liegen typischerweise im Bereich $\sigma_{\ell} = 18 \dots 70 m N/m$ [55].

In der zweiten Gruppe sind notwendige Eigenschaften zusammengefasst, die den Einsatz der Flüssigkeit technisch überhaupt erst möglich machen. Eine Flüssigkeit ist nur geeignet, wenn mit ihr ein im Betrieb langzeitstabiler Film aufgebracht werden kann. Dazu sind die folgenden Eigenschaften erforderlich:

- Eine vollständige Benetzung der *Silicon backplane*, d.h. von Aluminium und Siliziumdioxid, ist erforderlich, damit sich ein Film gleichmäßiger Dicke ausbildet. Die Oberflächenspannung muss dafür gering sein. Gegebenenfalls kann ein Haftvermittler eingesetzt werden.
- Ein sehr hoher **spezifischer Widerstand** vermeidet, dass sich die Speicherzellen angesichts der hohen Feldstärken über die Flüssigkeit zur Gegenelektrode hin entladen. Ist die Flüssigkeit zu einem Anteil dissoziiert, tritt Ionenleitung ein, und es kommt zur Elektrolyse, die die Flüssigkeit zersetzt. Aus dem gleichen Grund darf die Flüssigkeit auch **nicht hygroskopisch** sein. Nachträglich aufgenommenes Wasser würde den Leitwert drastisch erhöhen, und die Anionen würden die Elektroden chemisch angreifen.
- Eine sehr hohe **Durchschlagfestigkeit** von größer 100kV/mm ermöglicht die Isolierung von 50V Ansteuerspannung durch 500nm Flüssigkeit.
- Chemische Neutralität gegenüber der Oberfläche der *Silicon backplane* (AlSiCu, SiO₂, Si₃N₄, siehe Abschnitt 4.2) ist für die dauerhafte Funktionsfähigkeit unabdingbar.

• Ausreichende Lichtbeständigkeit muss für die jeweilige Anwendung gegeben sein. Die Leinwandprojektion im abgedunkelten Heimbereich erfordert beispielsweise eine Lichtleistungen von mindestens $10^4 W/m^2$.

Schließlich müssen auch weitere Eigenschaften berücksichtigt werden, welche die Herstellung und den Einsatz der Bauelemente erheblich vereinfachen. Zugunsten anderer Eigenschaften sind hier durchaus Kompromisse möglich. Dann ist allerdings in Kauf zu nehmen, dass entweder die Betriebsbedingungen sehr scharf zu fassen sind oder dass zum Ausgleich zusätzlicher technischer Aufwand getrieben werden muss.

- Stabile Parameter sollen mindestens im **Temperaturbereich** von 10°C...40°C vorliegen.
- **Festpunkt** und **Siedepunkt** müssen sicher außerhalb dieses Temperaturbereiches liegen.
- Ein geringer Dampfdruck bedeutet eine geringe Flüchtigkeit. Jedoch ist auch eine Verbesserung des Abdampfverhaltens durch Kapselung des Bauelements denkbar.
- Eine geringe Viskosität erlaubt kurze Schaltzeiten, da die Umverteilung der Flüssigkeit dann weniger gedämpft wird.
- Lagertemperaturen von unter $-40^{\circ}C$ bis über $70^{\circ}C$ ohne nachhaltige Schädigung des Flüssigkeitsfilms beschichteter Bauelemente erlauben erheblich einfachere Transportbedingungen. Eine kurzzeitig höhere Temperaturbelastung sollte auch für die Aufbau- und Verbindungstechnik zulässig sein.
- Die Einsetzbarkeit in einem möglichst weiten Spektralbereich erweitert den Anwendungsbereich. Gerade der kurzwellige Bereich ist anwendungstechnisch äußerst interessant. Eine Flüssigkeit, die bis weit in den UV-Bereich hinein transparent und photostabil ist, hat wesentliche Vorteile gegenüber Flüssigkristallen.
- Geringe oder keine Toxizität verringert den Aufwand bei Entwicklung und Fertigung.

Die Suche nach einer chemisch inerten Flüssigkeit mit guten Benetzungseigenschaften führt schnell auf Öle. Ihr Einsatz als Schmiermittel beruht gerade auf diesen beiden Eigenschaften. Bei Verwendung als Aktorflüssigkeit für die MLM-Technologie kann erwartet werden, dass sich auf der verspiegelten Chipoberfläche ein stabiler Film ausbildet. Besonders hochwertig sind synthetische Öle auf Silikonbasis. Die wichtigsten Eigenschaften des schließlich gewählten Silikonöls werden in Tabelle 2.3 angegeben.

Aufgrund ihrer sehr hohen Durchschlagfestigkeit finden Silikonöle sogar Einsatz als umweltverträgliche Isolierflüssigkeiten für Transformatoren. Der Dampfdruck fast aller Silikonöle ist außerdem so niedrig, dass mit einem nennenswerten Flüssigkeitsverlust durch Verdunstung in Zeiträumen von mindestens einigen Wochen kaum zu rechnen ist. Die notwendigen Randbedingungen für die Verwendung als Aktorflüssigkeit sind damit erfüllt.

Silikonöle werden in einem weiten Viskositätsbereich angeboten, wobei die niederviskosen Öle sich durch eine sehr geringe Oberflächenspannung auszeichnen. Mit Beschaffungsproblemen ist auf absehbare Zeit nicht zu rechnen, da Silikonöle aufgrund der Nachfrage aus diversen Einsatzgebieten auch in Zukunft mit kontrollierten Parametern lieferbar sein werden.

Für sämtliche Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde das Silikonöl AK10 der Firma Wacker mit einer Viskosität von $\eta = 10mm^2/s$ verwendet. Es hat eine relative Dielektrizitätskonstante von $\varepsilon_r = 2,61$ und einen Brechungsindex von n = 1, 4 (bei $\lambda = 550 nm$, Abbildung 2.8). Gerade für Experimente eignet sich AK10 sehr gut. Es ist nicht toxisch und kann über längere Zeit ohne Kapselung an der Luft betrieben werden, weil es bei Raumtemperatur praktisch nicht flüchtig ist, weil es bei Temperaturen bis über $100^{\circ}C$ nicht oxidiert und weil es nicht hygroskopisch ist. Als Lagertemperatur wird der Bereich $T = -80^{\circ}C \dots 150^{\circ}C$ angegeben. Außerdem kann AK10 mit verschiedenen organischen Lösungsmitteln wieder von der Silicon backplane abgelöst werden, so dass ein leichtes Rework der Bauelemente möglich ist. Unter den optischen Eigenschaften ist die sehr geringe Absorption im Bereich von $\lambda = 250nm \dots 1150nm$ äußerst interessant. Ein 2mm dicker Film transmittiert in diesem Bereich $90\% \dots 95\%$. Abbildung 2.8 zeigt den Verlauf des Brechungsindexes über der Wellenlänge im sichtbaren Bereich. Interessant ist dieser ansteigende Verlauf für die Modulation von sichtbarem Licht mit kontinuierlichem Spektrum. Während die aufgetragene Vakuumwellenlänge zwischen $\lambda_1 = 450 nm$ und $\lambda_2 = 750 nm$ um den Faktor 1,67 steigt, verringert sich die Phasenverschiebung nach Gleichung (2.1) bei konstanter Deformation nur um den Faktor $\frac{n(\lambda_2)}{\lambda_2} \cdot \frac{\lambda_1}{n(\lambda_1)} = 1,31$. Ein Deformationsprofil dessen Amplitude auf maximale Beugungseffizienz bei mittlerer Wellenlänge eingestellt ist, hat demnach durch den Anstieg von $n(\lambda)$ eine verbesserte Beugungseffizienz in Bezug auf das gesamte sichtbare Spektrum.

Zur Temperaturabhängigkeit lassen sich aus dem Datenblatt der Silikonöle AK [63] die Werte in Tabelle 2.2 entnehmen. Insbesondere die Viskosität nimmt bei steigender Temperatur stark ab.

In Tabelle 2.3 sind die relevanten Eigenschaften von AK10 noch einmal


Abbildung 2.8: Spektraler Verlauf des Brechungsindexes von AK10, bestimmt aus einer Ellipsometermessung am FhG-IMS [62]

Temperatur	$10^{\circ}\mathrm{C}$	$25^{\circ}\mathrm{C}$	$40^{\circ}\mathrm{C}$
ε_r	2,66	2,61	2,56
η	$17mm^{2}/s$	$10mm^{2}/s$	$7,4mm^{2}/s$

Tabelle 2.2: Temperaturabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante und der Viskosität von AK10 nach [63]

zusammengestellt und mit Materialgrößen verglichen, wie sie von bekannten Flüssigkeiten erreicht werden.

	typ. Bereich		
Material-	bekannter	AK10	Bewertung
eigenschaft	Flüssigkeiten		
Brechungsindex n	$1,\!3.\dots 1,\!7$	1,399	befriedigend
relative			
Dielektrizitätskonstante ε_r	2, 390	$2,\!61$	schlecht
Oberflächenspannung σ_{ℓ}	$18 \dots 70 m N/m$	20mN/m	sehr gut
Dampfdruck	$1 \dots 10^5 Pa$	< 1Pa	sehr gut
Siedepunkt T_s	$(> 40^{\circ}C)$	$> 300^{\circ}C$	gut
Festpunkt T_f	$(< 10^{\circ}C)$	$-80^{\circ}C$	sehr gut
Viskosität η	$\geq 0,5mm^2/s$	$10mm^{2}/s$	sehr gut
Durchschlagfestigkeit E_{max}	bis $100kV/mm$	$> \frac{30kV}{2,5mm}$	gut

Tabelle 2.3: Herstellerangaben [63] zu Materialeigenschaften von AK10 bei 25°C mit Anhaltspunkten zum physikalischen Bereich bekannter Flüssigkeiten

Andere Flüssigkeiten mit höherem Brechungsindex haben typischerweise eine höhere Viskosität und lassen keine Langzeitstabilität erwarten. Angesichts der geringen Filmdicke und der damit verbundenen geringen Flüssigkeitsmenge ist schon der Verlust oder die Veränderung von wenig Substanz kritisch. Flüssigkeiten mit höherer Dielektrizitätskonstante haben tendenziell Benetzungsprobleme, eine höhere Leitfähigkeit und eine kleinere Durchschlagfestigkeit. Das Silikonöl AK10 wurde gewählt, weil seine Eigenschaften hohe Stabilität und einfache Handhabung mit einem guten Kompromiss der Optimierungsgrößen n, ε_r und σ_e verbinden.

2.5 Die Elektroden

Um elektrostatische Deformationen hinreichender Amplitude mit möglichst geringen Ansteuerspannungen zu erzeugen, muss eine geeignete Elektrodenkonfiguration gefunden werden. Die Elektroden sollen mit Verfahren der Mikroelektronik herzustellen sein und der optische Einfluss ihrer Struktur auf das Phasenprofil der reflektierten Welle ist zu berücksichtigen. Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, ist ein Gitter aus schmalen Elektrodenstegen vorteilhaft, das über einer spiegelnden Elektrodenfläche angeordnet ist.

2.5.1 Optische Anforderungen

Die verspiegelte Chipoberfläche des Flächenlichtmodulators sollte im Idealfall einen Zustand haben, in dem die einfallende Wellenfront verlustfrei und ohne Störung des Phasenprofils reflektiert wird. Intensitätsverluste entstehen durch Absorption im Spiegelmaterial und durch Transmission durch die Spiegelschicht. Unebenheiten im Spiegel führen dazu, dass Licht gebeugt bzw. diffus gestreut wird. Gelangt dieses Licht nicht mehr durch die Aperturblende der verwendeten Schlierenoptik, geht es für die Abbildung verloren. Der Absorptionsverlust im Spiegel führt außer zum Intensitätsverlust auch zur Erwärmung der Schaltkreisoberfläche. Die optisch generierte Wärmemenge sollte die Verlustleistung der Schaltung nicht wesentlich erhöhen. Weiterhin generiert Licht, das in die Ansteuerschaltung gelangt, im Halbleitermaterial freie Ladungsträgerpaare und erhöht so den Sperrstrom der Schalttransistoren, was zur Entladung der Zellen führt.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Spiegeln. Metallische Spiegel reflektieren aufgrund ihrer sehr beweglichen Leitungsbandelektronen über einen weiten Spektralbereich. Verluste entstehen durch Absorption aufgrund des spezifischen Widerstands. Die Eindringtiefe der Welle in den Spiegel ist sehr kurz. Die Transmission einer nur 50*nm* dicken Aluminiumschicht liegt beispielsweise im gesamten Bereich vom nahen UV bis ins Infrarote unter 0, 15%. Dielektrische Spiegel bestehen aus einem Stapel abwechselnd stark und schwach brechender dielektrischer Schichten, deren Dicken präzise auf die Lichtwellenlänge abgestimmt sind. Mit einer größeren Anzahl von Schichten können auch relativ breitbandige Spiegel realisiert werden. Stimmen die Interferenzbedingungen jedoch nicht genau – sei es durch unpräzise Schichtdicken, sei es durch falsche Wellenlängen – wird ein Teil des einfallenden Lichtes transmittiert. Da der Lichteinfall auf die CMOS-Ansteuerschaltung minimiert werden muss und weil außerdem eine CMOS-kompatible Technologie zur Herstellung und Strukturierung dielektrischer Spiegel auf einer CMOS-Schaltung erst zu entwickeln wäre, wurde vom Einsatz dielektrischer Spiegel abgesehen.

Die besten metallischen Spiegelmaterialien sind Silber, Gold, Kupfer und Aluminium [65]. Die Abhängigkeit der Reflektivität von der Wellenlänge ist in Abbildung 2.9 dargestellt [51]. Die Reflektivität liegt im Infraroten na-



Abbildung 2.9: Abhängigkeit der Reflektivität ausgewählter Metalle von der Vakuumwellenlänge bei Lichteinfall aus dem Vakuum und aus Silikonöl. (Letztere ist jeweils etwas geringer als die Vakuumreflektivität.) $\lambda = 400nm \dots 800nm$

he 100%. Im sichtbaren Bereich bei Wellenlängen unter $\lambda = 600nm$ zeigen Kupfer und Gold jedoch einen starken Abfall. Silber reflektiert noch sehr gut bis $\lambda = 350nm$. Einzig Aluminium zeichnet sich durch eine Reflektivität von über 90% auch im tiefen UV-Bereich bis unter $\lambda = 200nm$ aus. Aluminium-oberflächen können im Gegensatz zu Silberoberflächen ohne Degradation der

Luft ausgesetzt werden.

In Abbildung 2.9 wurde auch der Fall berechnet, dass sich die Metalloberflächen nicht im Vakuum befinden, sondern unter Silikonöl. Da das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Welle unmittelbar an der Metalloberfläche bestimmt wird, sind die tatsächlich auftretenden Mehrfachinterferenzen am Ölfilm sowie die Absorption im Öl hier ohne Einfluss. Der Berechnung wurde der spektrale Verlauf des Brechungsindexes von AK10 zu Grunde gelegt, der aus einer Ellipsometermessung im Bereich $\lambda = 400nm \dots 800nm$ vorlag (Abbildung 2.8). Wie sich zeigt, ist die Reflektivität unter Silikonöl jeweils etwas geringer als die Reflektivität im Vakuum, weil mehr Strahlung in das Metall eindringt.

Es ist ein glücklicher Umstand, dass Aluminium neben seinen ausgezeichneten Spiegeleigenschaften gleichzeitig das bedeutendste Metall der Halbleitertechnologie ist. Verfahren für die Abscheidung und Strukturierung von Aluminium stehen deshalb auf hohem technischem Niveau zur Verfügung.

Ein besonderer Vorteil metallischer Spiegel besteht darin, dass sich aus ihnen auch die Elektroden formen lassen. Schlitze in der Spiegelschicht trennen dann die einzelnen Elektroden voneinander. Die Strukturierung der Spiegelfläche hat jedoch auch Konsequenzen. Einerseits führt die reduzierte Spiegelfläche zu Verlusten bei der Reflexion. Statt dessen kann das durch die Schlitze in die unterliegende Schaltung fallende Licht durch Ladungsträgergeneration zur Zellentladung führen. Andererseits wirkt die regelmäßige Anordnung der Schlitze als Beugungsgitter, das Licht aus der nullten Beugungsordnung in höhere Ordnungen beugt. Daher ist ein möglichst großer Füllfaktor anzustreben und die Schlitze sollten in einer anderen Ebene lichtdicht abgedeckt werden (Abbildung 2.10).



Abbildung 2.10: Durch Schlitze in der Spiegelschicht werden Elektroden geformt. Die Spiegelfläche nimmt dabei ab, und der Lichteinfall in die CMOS-Schaltung muss verhindert werden.

Eine interessante Option ergibt sich, wenn die Schlitze durch spiegelnde Elektrodenstege abgedeckt werden. Der Füllfaktor liegt in diesem Falle bei 100%. Allerdings enthält diese Anordnung Stufen, die Phasensprünge verursachen. Bei Anwendungen mit monochromatischer Beleuchtung könnte die Stufenhöhe so gewählt werden, dass die Phasensprünge gerade ein ganzzahliges Vielfaches von 2π betragen. Dadurch wirkt die Oberfläche bei dieser Wellenlänge wie ein ebener Spiegel, der bei nicht deformiertem Flüssigkeitsfilm alles Licht in die nullte Ordnung reflektiert (Abbildung 2.11a).



Abbildung 2.11: Reflexion an Stufenprofilen. a) bei konstruktiver Interferenz b) beim Spiegelflächenverhältnis 1:1 und destruktiver Interferenz

Umgekehrt ist in Abbildung 2.11b) die Stufenhöhe auf destruktive Interferenz eingestellt, so dass bei gleichen Flächenanteilen auf beiden Spiegelniveaus kein Licht in die nullte Beugungsordnung gelangt. Erst Deformationen des Flüssigkeitsfilmes beugen Licht zurück in die nullte Ordnung. Die Berechnung der tolerierbaren Stufenhöhenschwankungen in Abschnitt 3.4 ergibt Toleranzen von 10nm bis 30nm, die technologisch außerordentlich schwer einzuhalten sind. Deshalb wurde es vorgezogen, die Fläche der Schlitzabdeckungen möglichst klein zu halten und deren Oberfläche zu entspiegeln. Ein entspiegeltes Gitter führt zwar auch zu Beugung, der Einfluss der Stufenhöhe wird aber reduziert. Vor allem ist aber die Realisierung leicht möglich, da CMOS-Technologien standardmäßig mit Antireflexionsschichten arbeiten. Erläuterungen hierzu folgen bei den technologischen Anforderungen im nächsten Absatz.

Als letzter Punkt soll hier noch kurz auf den Einfluss einer Isolationsschicht auf dem Spiegel eingegangen werden, die auch bei leitender Flüssigkeit einen Stromfluss zwischen Elektroden mit unterschiedlichen Potenzialen verhindern kann, wie in Abbildung 2.12 erläutert ist. Für zwei beispielhafte Wellenlängen wurde die Reflektivität eines Aluminiumspiegels in Silikonöl berechnet, wenn sich eine Schicht aus Siliziumdioxid oder Siliziumnitrid auf ihrer Oberfläche befindet. Abbildung 2.13 zeigt den bekannten, periodischen Verlauf der Reflektivität bei kleinen Schichtdicken, der durch die Mehrfachreflexionen an der Siliziumdioxidschicht entsteht. Die Dicke des Silikonölfilms wurde wieder als unendlich angenommen, damit keine weiteren Reflexionen in



Abbildung 2.12: a) Isolation nur als Träger unter der Stegelektrode. b) Isolation bedeckt die Spiegelelektrode vollständig.



Abbildung 2.13: Einfluss einer Isolationsschicht auf die Reflektivität einer mit dem Silikonöl AK10 bedeckten Aluminiumoberfläche in Abhängigkeit von der Schichtdicke [51] bei Wellenlängen von $\lambda = 543$ nm und $\lambda = 248$ nm

die Rechnung eingehen. Die Materialparameter stammen aus der Datenbank von [51]. Für das Silikonöl wurde $n_{\ell} = 1, 4$ angenommen. Mit einer Siliziumdioxidschicht ist die Reflektivität eines Aluminiumspiegels nur um bis zu 1% kleiner als ohne, da die Brechungsindizes von Siliziumdioxid ($n_{ox} = 1, 45$) und vom Silikonöl AK10 in etwa übereinstimmen. Aus optischer Sicht ist eine Siliziumdioxidschicht auf dem Spiegel also problemlos akzeptierbar. Wird statt AK10 eine stärker brechende Flüssigkeit verwendet, reduziert sich die Reflektivität des blanken Aluminiumspiegels noch stärker, als dies laut Abbildung 2.9 mit AK10 der Fall ist. Eine Oxidschicht vergütet einen Aluminiumspiegel sogar noch, wenn er sich in einer Flüssigkeit mit $n_{\ell} > n_{ox}$ befindet.

Siliziumnitridschichten wirken sich wegen ihres höheren Brechungsindexes in jedem Falle negativ aus. Die Reflektivität wird schon durch sehr dünne Schichten von 15 - 50nm auf 80% gesenkt. Auch führen bereits geringe Schichtdickenschwankungen um wenige zehn Nanometer zu erheblichen Schwankungen der Reflektivität. Bei Beleuchtung mit weißem Licht können sich starke Farbveränderungen ergeben. Für kurze Wellenlängen ist Siliziumnitrid außerdem wenig transparent, so dass kurzwelliges Licht stärker absorbiert wird. Siliziumnitridschichten oder -reste sind auf den Spiegeln deshalb unbedingt zu vermeiden.

2.5.2 Technologische Anforderungen

Für die Herstellung des MLM-Bauelementes wurde darauf geachtet, im Wesentlichen nur Standard-Prozessschritte der Mikroelektronik zu verwenden. Auf diese Weise wird der Aufwand vermieden, neue Prozessschritte zu entwickeln, und die MLM-Bauelemente haben das Potenzial in einer Standard-CMOS-Fertigungslinie hergestellt zu werden. Bei der Wahl der Elektrodengeometrie müssen auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Insbesondere die Chipfläche sowie die Anzahl der Masken und Prozessschritte sind im Hinblick auf die Fertigungskosten und Ausbeute gering zu halten. Für die realisierbaren Formen der Elektroden ergeben sich damit allerdings bestimmte Einschränkungen.

Als Elektrodenmaterial wurde im letzten Abschnitt bereits Aluminium favorisiert, weil es unter optischen und technologischen Gesichtspunkten hervorragende Eigenschaften besitzt. Die Verdrahtungsebenen in der am FhG-IMS verfügbaren CMOS-Prozesstechnologie bestehen ohnehin aus Aluminium, mit Zusätzen von Silizium und Kupfer. Ausgereifte Prozesse zum Abscheiden und zum Strukturieren mit geringen Strukturgrößen stehen zur Verfügung.

Beim Entwurf der Elektrodengeometrie müssen Design-Regeln beachtet werden, die aus technologischen und elektrischen Randbedingungen abgeleitet sind. Die für die MLM-Bauelemente verwendete CMOS-Hochvolt-Technologie C5090 des FhG-IMS [66] erlaubt Pixelspannungen bis 40V (siehe Abschnitt 4.1.2). Anhand der in Tabelle 2.4 aufgelisteten Design-Regeln wird im folgenden Absatz gezeigt, dass es nicht sinnvoll ist, Pixelelektroden über einer durchgehenden Spiegelfläche zu platzieren, und sie durch die Spiegelfläche hindurch mit den Speicherzellen zu verbinden. Stattdessen soll die Spiegelfläche so strukturiert werden, dass jeder Teilspiegel als Pixelelektrode mit der darunterliegenden Speicherzelle verbunden wird, während über den Spiegeln eine gemeinsame Gegenelektrode realisiert wird, welche die Spiegel nur so wenig als möglich verdeckt.

Weil Metallkontakte immer nur bis auf die nächst tiefere Verdrahtungsebene reichen, werden Kontakte vom Metall-3 zum Metall-1 durch zwei sepa-

Stegbreite	$1.2\mu m$
Schlitzbreite	$1.0 \mu m$
Überlapp der Schlitzabdeckung	$0.3 \mu m$
Kontaktlochbreite	$2.0 \mu m$
Überlapp Metall um Kontaktlöcher	$1.2\mu m$
Abstand zwischen Kontaktlöchern	$2.0 \mu m$

Tabelle 2.4: Für das Layout der Elektroden relevante Design-Regeln für die zweite und dritte Metalllage [66]

rate Kontakte im Abstand von $2\mu m$ realisiert, die im Metall-2 zusammengeschaltet sind. Abbildung 2.14 zeigt, dass die laterale Ausdehnung solcher Verbindungen über drei Metalllagen so groß ist, dass bei einem $20\mu m$ -Pixel ein erheblicher Anteil der Spiegelfläche von der Pixel-Elektrode verdeckt würde. Werden die Elektroden also in zwei Metalllagen angeordnet, müssen die Pixel-Elektroden in der unteren Ebene liegen, damit sie an die Speicherzellen der Matrix angeschlossen werden können.



Abbildung 2.14: Pixel-Elektroden decken einen zu großen Teil des Spiegels ab, wenn sie durch den Spiegel hindurch kontaktiert werden müssen.

Damit die Spiegelfläche auf der CMOS-Schaltung von guter Qualität ist, muss die Oberfläche besonders eben sein und eine geringe Rauhigkeit besitzen. Eine hohe Ebenheit lässt sich durch verschiedene Planarisierungsverfahren erzielen, wie chemisch-mechanisches Polieren (CMP) oder Boroxidplanarisierung mit Rückätzen. Wie in Abschnitt 4.2 näher dargestellt wird, steht im FhG-IMS ein CMP-Prozess zur Verfügung, mit dem die Feldoxide unter den Metalllagen planarisiert werden. Strukturen aus tieferen Lagen zeichnen sich dann praktisch nicht mehr in der Topographie der Oberfläche ab.

Die Mikrorauhigkeit der Oberfläche wird zuerst durch den Abscheideprozess bestimmt, wobei aufgedampfte Aluminiumschichten eine höhere Reflektivität haben als gesputterte Spiegel, die aufgrund der gröberen Körnung einen größeren Anteil des einfallenden Lichtes diffus streuen. Sputtern wurde trotzdem aufgrund der besseren Bedeckung der Kontaktlochwände vorgezogen. Im weiteren Prozess ist darauf zu achten, dass die Qualität der Spiegeloberfläche nicht verschlechtert wird. Diese Gefahr besteht bei allen Ätz- und CMP-Schritten.

Bei den optischen Anforderungen im letzten Abschnitt wurde darauf eingegangen, dass es günstig wäre, die unvermeidlichen Stufen im Spiegel auf eine Höhe einzustellen, die ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt. Die Abweichung darf je nach Wellenlänge jedoch nur maximal $\pm 10nm$ bis $\pm 25nm$ betragen (siehe Abschnitt 3.4), was nur mit großem Aufwand zu erreichen ist: Die Siliziumdioxidschicht zwischen zwei Metalllagen muss mindestens 300nm dick sein, um auch bei Spannungen über 40V Durchschläge zu vermeiden. Größere Dicken bis etwa 1000nm sind unter elektrischen Gesichtspunkten günstiger und in der Mikroelektronik üblich. Für die Metallschicht sind noch einmal 500nm erforderlich, um eine sichere Kontaktierung zu gewährleisten und eine schädliche Transmission auch im roten Wellenlängenbereich zu vermeiden. Zwischen Spiegel und Gegenelektrode können also Stufenhöhen von etwa 1000 - 2000nm auftreten. Die mit noch vertretbarer Ausbeute erzielbare Schichtdickengenauigkeit von $\pm 5\%$ reicht allerdings nicht aus, um die Stufenhöhe optimal einzustellen.

Damit Stufenhöhenschwankungen sich optisch weniger auswirken, wurde im vorherigen Abschnitt eine Antireflexionsschicht für die Gitterelektrode vorgeschlagen. Da Titannitrid für die Photolithographie ohnehin standardmäßig auf Aluminiumoberflächen abgeschieden wird, steht es als Antireflexionsschicht in jeder gegenwärtigen CMOS-Technologie, wie auch in der C5090, zur Verfügung. Den Messergebnissen in Abbildung 2.15 ist zu entnehmen, dass eine 60nm - 100nm dicke Schicht eine gute Absorption bis hin zu größeren Wellenlängen bietet. Im kurzwelligen Bereich sind dünnere Schichten vorzuziehen. Die entspiegelnde Wirkung ist zwar begrenzt, dafür steht dieser Prozessschritt standardmäßig zur Verfügung. Bei der Spiegelschicht muss auf die Antireflexionsschicht aus Titannitrid selbstverständlich verzichtet werden.

2.5.3 Elektrische Anforderungen

An der Oberfläche des Flüssigkeitsfilms soll mit einem elektrischen Feld eine Maxwellsche Spannung erzeugt werden, welche die Oberfläche deformiert. Da die Maxwellsche Spannung dem Betragsquadrat der elektrischen Feldstärke proportional ist, sollte letztere eine möglichst inhomogene Feldverteilung entlang der Oberfläche aufweisen, um hohe Deformationsamplituden zu erzeu-



Abbildung 2.15: Messung [67] der Reflektivität von Aluminiumoberflächen mit Antireflexionsschichten aus Titannitrid verschiedener Dicken

gen. Starke, inhomogene Felder erhält man, wenn man Elektroden sehr nahe der Flüssigkeitsoberfläche anordnet. Es stellt sich dabei die Frage, ob Elektrode und Gegenelektrode in der gleichen Ebene nebeneinander liegen sollen oder ob sie aus zwei Metalllagen gebildet werden.

Liegen die Elektroden in einer Ebene, wie in Abbildung 2.16a) dargestellt, muss ihr Abstand so groß sein, dass ein genügend starkes Streufeld die Flüssigkeitsoberfläche erreicht. Die stärkste Oberflächendeformation tritt nun gerade im Bereich höchster Feldstärke auf, also gerade über dem Elektrodenspalt, wo das modulierte Licht nicht reflektiert wird. Ein metallischer Spiegel in diesem Bereich würde das elektrische Feld negativ beeinflussen. Aus diesem Grunde ist es günstiger, eine kleine Elektrode über einer großflächigen Spiegelelektrode anzuordnen. Das stärkste elektrische Streufeld baut sich um die obere, kleinere Elektrode vor allem an den Kanten auf. Es befindet sich somit über der Spiegelelektrode, und der Flüssigkeitshub kann voll genutzt werden.

Eine weitere Uberlegung betrifft die Isolationsschicht zwischen den Elektrodenebenen. Diese Schicht kann die Spiegelelektroden ganzflächig bedecken oder genauso strukturiert werden wie die Gitterelektrode. Im ersteren Fall wären Spiegel- und Gitterelektrode unabhängig von der Flüssigkeit gegeneinander isoliert, und die Realisierung wäre technologisch einfacher. Reflektivitätseinbußen sind nicht zu befürchten, wenn der Brechungsindex der Isolationsschicht kleiner oder gleich dem Brechungsindex der Flüssigkeit ist. Die Brechungsindizes von Silikonöl und Siliziumdioxid stimmen beispielsweise in



Abbildung 2.16: Optische Nutzbarkeit der Flüssigkeitsdeformation je nach Elektrodenanordnung. Das Licht mit dem stärkstem Phasenhub fällt zwischen die Spiegelelektroden (a) bzw. wird reflektiert (b).

etwa überein. Andererseits besteht jedoch das Risiko, dass Ladungsträger im Oxid gefangen werden und das Feld abschirmen. Auch wenn dieser Effekt am MLM-Bauelement nicht nachgewiesen werden konnte, wurde es sicherheitshalber vorgezogen, die Isolation von den Spiegelelektroden zu entfernen.

2.5.4 Auswahl einer den Anforderungen entsprechenden Elektrodengeometrie

Aus den in den letzten drei Abschnitten angestellten Überlegungen wurde eine Elektrodenanordnung abgeleitet, die verspricht, ohne überhöhte Ansteuerspannungen ausreichende Deformationen zu erzeugen, welche optisch effektiv genutzt werden können. Ihre einfache Herstellbarkeit mit Standardverfahren ist gesichert.

Die Abbildungen 2.17 und 2.18 zeigen den Aufbau schematisch. Die Spie-



Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der Elektrodengeometrie des MLM-Bauelementes



Abbildung 2.18: Vertikalaufbau der Elektrodengeometrie des MLM-Bauelementes

gelschicht auf der Chip-Oberfläche ist durch $1\mu m$ breite Schlitze in einzelne Spiegelelektroden unterteilt, welche mit der jeweils darunterliegenden Speicherzelle kontaktiert sind. Isoliert durch eine Oxidschicht, deckt ein Kreuzgitter aus Aluminiumstegen die Schlitze ab und fungiert als gemeinsame Gegenelektrode. Die Stege sind $2\mu m$ breit, um einen Lichteinfall durch die Schlitze zu unterbinden und trotzdem viel Spiegelfläche frei zu lassen. Der Füllfaktor beträgt 81%. Dieser Wert kann noch auf nahezu 85% erhöht werden, wenn die Stegbreite auf den minimalen Wert von 1, $6\mu m$ gesenkt wird, der noch eine sichere Abdeckung der Schlitze erwarten lässt. Der optische Einfluss der Stufe wird durch eine Antireflexionsschicht (ARC) auf den Stegen minimiert. Da die Möglichkeit besteht, die Anschlussleitung des gemeinsamen Gegenelektrodengitters bis an das entsprechende Bondpad zu führen und erst dort zu kontaktieren, wo genügend Fläche für spezielle Kontakte vorhanden ist, kann die Gitterelektrode als Aluminiumschicht mit einer Dicke von nur $300nm \dots 500nm$ auf einer 900nm dicken Isolationsschicht realisiert werden.

Kapitel 3

Theoretische Beschreibung des Flächenlichtmodulators

Im vorigen Kapitel wurden alle Voraussetzungen zusammengetragen, um die grundlegenden Verhaltensweisen des MLM-Bauelementes numerisch berechnen zu können. Dabei wurden zunächst die optischen Grundlagen dargestellt, die das beugende Verhalten eines deformierten Flüssigkeitsfilms quantitativ beschreiben. Aus den mechanischen Spannungen an der Flüssigkeitsoberfläche im elektrischen Feld wurde die statische Differentialgleichung für das elektromechanische Verhalten des Systems abgeleitet und für vereinfachte Bedingungen gelöst. Es wurde eine Flüssigkeit gewählt, die den physikalischen und technischen Anforderungen gerecht wird. Schließlich wurde eine Elektrodenanordnung vorgestellt, die sich optisch und elektrisch als günstig erweist und technisch realisierbar ist.

In diesem Kapitel soll nun im zweidimensionalen Modell der Einfluss der Abmessungen numerisch untersucht werden. Dazu werden zunächst die elektrischen Felder an der Oberfläche bestimmt [71]. Aus ihnen ergeben sich die Maxwellschen Spannungen, deren zweifache Integration auf die Oberflächendeformationen führt. Aus den Deformationsprofilen lässt sich schließlich das Beugungsbild des MLM-Bauelementes berechnen. Ferner wird mit dem Programm LITHSIM [69, 70] die optische Bildübertragung simuliert.

3.1 Die Maxwellsche Spannung

Die Maxwellsche Spannung ergibt sich mit Gleichung (2.5) aus dem elektrischen Feld an der Flüssigkeitsoberfläche. Das Feld ist aus der Elektrodenanordnung und den angelegten Elektrodenspannungen zu bestimmen. Es handelt sich dabei um ein elektrostatisches Randwertproblem erster Art, das hier als ebenes Problem behandelt wird. Die Geometrie und die Randwerte sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Dabei handelt es sich um den Schnitt durch ein Pixel der Weite *d*. Die Elektrodenanordnung weicht in zwei weiter unten beschriebenen Details von der in Abschnitt 2.5.4 entwickelten Geometrie ab.



Abbildung 3.1: Elektrodengeometrie für die Feldberechnung mit ANSYS [71] (teilweise abweichend von der endgültigen Struktur)

Des Weiteren wird das Kreuzgitter im ebenen Fall zu einem Kammgitter.

Zuunterst liegt die Spiegelelektrode mit der Pixelspannung U_{sp} . Auf dem Spiegel befindet sich eine Isolationsschicht aus Siliziumdioxid mit der Dicke t_{ox} und der Dielektrizitätskonstanten ε_{ox} . Am linken und rechten Pixelrand ruhen auf dem Oxid die Stege der Gitterelektrode. Sie haben die Breite *b* und die Schichtdicke t_{ge} und liegen an Masse ($U_{ge} = 0V$). Bedeckt ist diese Anordnung vom nicht deformierten Flüssigkeitsfilm, dessen Dielektrizitätskonstante bei $\varepsilon_{\ell} = 2,61 \varepsilon_0$ liegt und der über den Stegen die Dicke h_0 hat. Im Halbraum darüber befindet sich Luft (ε_0).

Bei der ANSYS-Simulation der elektrischen Feldverteilung wurde ursprünglich von einem gegenüber der endgültigen Elektrodengeometrie leicht veränderten Aufbau ausgegangen, bei dem die Oxidschicht die Spiegelelektroden vollständig bedeckt. Aus den in Abschnitt 2.5.3 angegebenen Gründen wird das Oxid bei der Fertigung wieder vom Spiegel entfernt. Nur unter den Stegen der Gitterelektrode bleibt Oxid zur Isolation stehen. In der Simulation wurde die Dielektrizitätskonstante der Oxidschicht deshalb mit $\varepsilon_{ox} = \varepsilon_{\ell}$ als Flüssigkeit angenommen. Der zu erwartende Einfluss des damit gleichzeitig vernachlässigten Oxidsteges ist in erster Näherung vernachlässigbar. Weiterhin erhebt sich in der Pixelmitte eine Fingerelektrode aus dem Spiegel, die nur einen unbedeutenden Einfluss auf die Felder hat und deshalb wieder verworfen wurde. Ihr Einfluss ist jedoch in den berechneten Feldverläufen erkennbar. Die gesamte Struktur wird als periodisch fortgesetzt angenommen, so dass an den seitlichen Rändern die partiellen Ableitungen $\frac{\partial}{\partial x}$ aller Größen verschwinden.

Das elektrische Potenzial erhält man nun durch separates Lösen der Laplace-Gleichung für das Potenzial in den Gebieten Oxid, Flüssigkeit und Luft unter Beachtung der Stetigkeitsbedingungen an den Grenzflächen. Die Feldberechnungen wurden hier nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Simulationstool ANSYS [68] durchgeführt. Ein Makro, das die Feldberechnung vorbereitet und durchführt, wenn die Parameter aus Abbildung 3.1 sowie weitere, die Netzstruktur beeinflussende Parameter vorgegeben werden, stand im FhG-IMS zur Verfügung [71]. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft eine Lösung bei Elektrodenabmessungen, wie sie in Kapitel 4 beschrieben sind. Die auf der rechten Seite aufgeführten Parameter gelten



Abbildung 3.2: Verlauf der Äquipotenzialflächen an einem typischen MLM-Pixel. Die Elektrodenquerschnitte und die Flüssigkeitsoberfläche sind weiß dargestellt.

auch für alle weiteren Simulationsrechnungen, soweit keine anderen Angaben gemacht werden. In der Potenzialverteilung sind die Äquipotenziallinien als Grenzen zwischen den Graustufen zu erkennen. Ihre Dichte gibt die Feldstärke an, deren Vektoren senkrecht auf den Äquipotenziallinien stehen. Die Feldstärke nimmt um die Stege der Gitterelektrode ihre höchsten Werte an. An der Oberfläche weisen die Äquipotenziallinien einen Knick auf, so dass die Feldstärkevektoren außerhalb der Flüssigkeit steil auf die Oberfläche zulaufen und in der Flüssigkeit einen spitzen Winkel zur Oberfläche bilden. Die Feldlinien, die in jedem Punkt den Feldstärkevektor zur Tangente haben, laufen dadurch besonders lange in der Flüssigkeit und greifen außerhalb der Flüssigkeit weit in den Raum. Die Feldenergie konzentriert sich also in der Flüssigkeit und ist zwischen Gitter- und Spiegelelektrode am stärksten, während die Flüssigkeitsoberfläche, die sich deformieren soll, nur von einem schwachen Streufeld erreicht wird.

Zu berechnen ist nur das Feld an der Oberfläche mit den Komponenten E_t und D_n , die an Grenzflächen zwischen verschiedenen dielektrischen Medien stetig sind. Aus ihnen wird die auf die Flüssigkeitsoberfläche wirkende Maxwellsche Spannung bestimmt. Die Verläufe, die in den Abbildungen 3.3 und 3.4 dargestellt sind, zeigen die Feldüberhöhung an den Kanten der Gitterelektrode. Dabei liegt das Maximum der tangentialen elektrischen Feldstärke neben den Gitterstegen und fällt zur Pixelmitte hin auf Null ab, während die



Abbildung 3.3: Tangentiale elektrische Feldstärke E_t an der Flüssigkeitsoberfläche



Abbildung 3.4: Normaler dielektrischer Fluss D_n an der Flüssigkeitsoberfläche

Normalkomponente über den Stegen am stärksten ist und über der Spiegelelektrode einen kleinen, etwa konstanten Wert annimmt. Die leichten Stufen in der Pixelmitte sind auf die Fingerelektrode zurückzuführen und können vernachlässigt werden.

Da E_t und D_n unterschiedliche Dimensionen haben, lassen sie sich quantitativ nur über ihre Wirkungen vergleichen. Dies sind ihre Beiträge p_t und p_n zur Maxwellschen Spannung, welche durch die Summanden in Gleichung (2.5) repräsentiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, das aus dem Oberflächenfeld die Maxwellsche Spannung und daraus die Oberflächendeformation errechnet. Es sei hier noch einmal daran erinnert, dass die Kraftwirkung unabhängig von der Feldrichtung senkrecht zur Oberfläche wirkt, so dass p_t und p_n skalar addiert werden. Aus Abbildung 3.5 ist zu ersehen, dass das tangentiale Feld die größere Kraftwirkung erzielt. Dies



Abbildung 3.5: Beiträge der tangentialen bzw. normalen Komponente des Oberflächenfeldes zur Maxwellschen Spannung $p_{el} = p_t + p_n$

lässt sich im Feldlinienbild veranschaulichen, da die elektrische Feldstärke auf kurzen Feldlinien höher ist, als auf längeren — vorausgesetzt, die betrachteten Feldlinien verbinden dieselben Elektroden. Als Folge ist die Kraftwirkung auf die Flüssigkeitsoberfläche gerade neben den Stegen am größten, also über dem Spiegel, wo die Deformation optisch wirksam ist. Durch die quadratische Abhängigkeit der Maxwellschen Spannung von der Feldstärke werden die Feldstärke-Peaks noch einmal besonders betont. Außerhalb der Gebiete maximaler Kraftwirkung, also über dem Spiegel, in größerer Entfernung von den Stegen und auch über den Stegen, ist die Maxwellsche Spannung dadurch nahezu vernachlässigbar.

3.2 Die Deformation

In Abschnitt 2.2.2 wurde das zweifache Integral (2.16) hergeleitet, mit dem aus dem Verlauf der Maxwellschen Spannung das Profil der Flüssigkeitsoberfläche berechnet werden kann. Für das bisher behandelte Beispiel ergibt sich bei einer Pixelspannung von $U_{sp} = 30V$ an der Spiegelelektrode der Oberflächenverlauf in Abbildung 3.6 mit einer Amplitude von $\hat{z} = 358nm$. Über



Abbildung 3.6: Berechnetes Deformationsprofil z(x) der Flüssigkeitsoberfläche bei einer Pixelspannung von $U_{sp} = 30V$. Man beachte die unterschiedlichen Skalen für x und z!

den Stegen wird ein schmales Plateau angehoben, indem Flüssigkeit aus der Pixelmitte in die Gebiete hoher Feldstärke abfließt. Im Bereich größter Kraftwirkung, neben den Stegen, wird die Oberfläche stark konvex gekrümmt. Sie wölbt sich dann über dem Spiegel mit gleichmäßiger Krümmung nach unten. Dabei entsteht über jedem Pixel eine volle Periode des Deformationsprofils.

Während die konstante Krümmung über dem Spiegel eigentlich zu einer kreisbogenförmigen Deformation führt, muss sich in diesem Modell im Bereich des konstanten Druckes eine Parabel ergeben, denn die Krümmung wurde durch die zweite Ableitung angenähert. Jedoch ist der Krümmungsradius erheblich größer als die Pixelabmessungen, deshalb weicht der parabolische Abschnitt in diesem Beispiel um weniger als 0, 2nm von einem Kreisbogen ab. Zu beachten ist, dass die Ordinate in Abbildung 3.6 gedehnt dargestellt ist, dadurch wird der Kreisbogen zu einer Ellipse verzerrt und erweckt den Eindruck einer Parabel.

Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Deformationsamplitude von verschiedenen Parametern untersucht. Als Deformationsamplitude \hat{z} wird dabei der Höhenunterschied zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt des Deformationsprofils bezeichnet.

3.3 Einflussparameter der Deformation

3.3.1 Einfluss der Filmdicke auf die Deformation

Die Dicke des Flüssigkeitsfilmes hat erwartungsgemäß einen sehr starken Einfluss auf die elektrische Feldstärke an der Oberfläche, da die Filmdicke h_0 den Abstand von den Quellen darstellt. Der Vergleich der Maxwellschen Spannung für drei verschiedene Filmdicken in Abbildung 3.7 zeigt, dass der Peak bei höherem Flüssigkeitsstand deutlich flacher ausfällt, dafür aber über eine breitere Strecke nahe dem Spitzenwert bleibt. Dies wird im Feldlinienbild an-



Abbildung 3.7: Maxwellschen Spannung p_{el} für drei Filmdicken

schaulich, da die dichten Feldlinien, die von den Elektrodenkanten ausgehen, sich mit zunehmendem Abstand verteilen. Für die Deformationsamplitude \hat{z} ergibt sich ein exponentielles Abklingen von einer Dekade pro 1770nm zusätzlicher Flüssigkeit, wie Abbildung 3.8 zeigt.

3.3.2 Einfluss der vertikalen Elektrodenabmessungen

In Abschnitt 2.5 wurde die Elektrodenanordnung unter Berücksichtigung verschiedener Gesichtspunkte entwickelt. Dabei wurden auch Regeln für die Gestaltung der Elektrodenabmessungen angegeben, die hohe Feldstärken an der Flüssigkeitsoberfläche erwarten lassen. Hier wird die Abhängigkeit der Deformationsamplitude von den einzelnen Abmessungen nun anhand von Simulationsrechnungen quantitativ untersucht. Die technologischen Anforderungen aus Abschnitt 2.5.1 geben dabei weiterhin die Grenzen an. Zuerst sollen hier



Abbildung 3.8: Exponentielles Abklingen der Deformationsamplitude \hat{z} mit zunehmender Filmdicke h_0

die Schichtdicken betrachtet werden. Abbildung 3.9 gibt die Abhängigkeit der Deformationsamplitude von der Metalldicke t_{ge} der Gitterelektrode wieder. Dabei ist immer ein Flüssigkeitsfilm angenommen, der 300nm über den



Abbildung 3.9: Deformationsamplitude \hat{z} in Abhängigkeit von der Kammhöhe t_{ge} für zwei Oxiddicken

Elektroden steht. Es zeigt sich ein Abfall der Deformationsamplitude, der nur wenig schwächer als exponentiell ist. Die Elektrodenhöhe soll demnach so gering gehalten werden, wie die Technologie dies zulässt. Die Kennlinie in Abbildung 3.9 für eine Oxiddicke von $t_{ox} = 500nm$ zeigt, dass auch das Oxid dünn zu halten ist. Wie beim Vergleich von Abbildung 3.9 mit Abbildung 3.10

zu erkennen ist, reagiert die Deformationsamplitude auf Veränderungen der Oxiddicke t_{ox} jedoch weit weniger empfindlich als auf Veränderungen der Elektrodendicke t_{ge} . Mit zunehmender Dicke des Flüssigkeitsfilms wird diese



Abbildung 3.10: Deformationsamplitude \hat{z} in Abhängigkeit von der Oxiddicke t_{ox} bei unterschiedlichen Flüssigkeitsständen

Abhängigkeit schwächer. In Abbildung 3.11 ist noch einmal die Oxiddicke variiert, nur wird hier bei dickerem Oxid das Elektrodenmetall entsprechend dünner ausgelegt, so dass die Höhe der Stufe von den Stegen der Gitterelektrode hinab auf die Spiegeloberfläche konstant bleibt. Es zeigt sich eine



Abbildung 3.11: Deformationsamplitude \hat{z} in Abhängigkeit von der Oxiddicke t_{ox} bei konstanter Stufenhöhe $t_{ox}+t_{ge}$

leichte Verbesserung, wenn die Gitterelektrode dünner wird und eine dickere

Isolationsschicht Verwendung findet. Eine erhebliche Verbesserung lässt sich dagegen durch Herabsetzen der Stufenhöhe erzielen.

3.3.3 Einfluss der lateralen Elektrodenabmessungen

Während sich die Wahl der Schichtdicken im Wesentlichen an den theoretisch gewonnenen Zusammenhängen orientiert, sofern dies technologisch möglich ist, wird die Pixelgröße durch die *Silicon backplane* vorgegeben, die mit quadratischen Pixeln mit Kantenlängen von $16\mu m$, $20\mu m$ und $24\mu m$ realisiert wurden. Bauelemente mit größeren Pixeln als $24\mu m$ haben eine entsprechend größere Chipfläche, was bei der Fertigung zu einer geringeren Ausbeute führt, oder man begnügt sich mit einer geringeren Pixelanzahl. Kleinere Pixel als $16\mu m$ lassen sich nur realisieren, wenn die Ansteuerspannung verringert wird, da sich die Speicherzellen in der gegenwärtigen Hochvolt-Technologie nicht weiter verkleinern lassen. Trotzdem soll die Deformationsamplitude hier auch in Abhängigkeit der Pixelweite *d* betrachtet werden, um das Potenzial der Modulatortechnologie aufzuzeigen.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in Abbildung 3.12 zeigen eine lineare Abhängigkeit der Deformationsamplitude von der Pixelbreite. Dies



Abbildung 3.12: Deformationsamplitude \hat{z} in Abhängigkeit von der Pixelweite d bei unterschiedlichen Flüssigkeitsständen

ist einsichtig, wenn man bedenkt, dass die Felder zweier Gitterstege sich bei genügendem Abstand gegenseitig kaum beeinflussen. Die Peaks der Maxwellschen Spannung behalten bei zunehmender Pixelweite ihre Form und Größe bei, rücken aber weiter auseinander. Der Bereich geringer Feldstärke ist dann etwas kleiner als d-b. Das Mittel von p_{el} über einen Pixel nimmt deshalb etwa mit $\frac{1}{d-b}$ ab. Genauso nimmt auch der Unterdruck in der Flüssigkeit p_0 ab

und damit wiederum die Krümmung k über dem Spiegel. Das Oberflächenprofil über dem Spiegel wurde in Abschnitt 3.2 als parabolisch gefunden und genügt somit der Form $z = kx^2$ mit dem Minimum z(0) = 0 im Scheitelpunkt und dem Maximum z(d-b) am Pixelrand. Die Deformationsamplitude \hat{z} ist also proportional zu $\frac{1}{d-b}(\frac{d-b}{2})^2 \sim d-b$. Bei sehr kleinen Pixeln gibt es keinen Bereich vernachlässigbarer Feldstärke mehr, und die Deformation geht gegen Null. Extrapoliert man die Geraden in Abbildung 3.12, schneiden sie die Abszisse etwas oberhalb von $d = 6\mu m$.

In der Simulation wirkt sich zusätzlich die Fingerelektrode aus. Sie liegt auf Spiegelpotenzial. Verringert sich der Abstand zwischen der Fingerelektrode und den Stegen der Gitterelektrode, erreichen immer weniger Feldlinien, die von der Spiegelelektrode ausgehen, noch die Flüssigkeitsoberfläche, und das Feld konzentriert sich auf den Bereich zwischen den Stegen und der Fingerelektrode. Unterhalb einer Pixelgröße von $10\mu m$ wird der Einfluss der Fingerelektrode also so groß, dass die Ergebnisse der Simulationsrechnungen nicht mehr auf Pixel ohne Fingerelektrode übertragen werden können.

Für höhere Deformationsamplituden, die über dem Flüssigkeitsfüllstand h_0 liegen, wird die Maxwellsche Spannung über den Stegen überbewertet, weil die Vergrößerung des Abstandes der deformiertenFlüssigkeitsoberfläche von der Gitterelektrode in den Rechnungen nicht berücksichtigt wird. Es ist also real ein Abflachen der linearen Verläufe bei größeren Pixelweiten zu erwarten.

Die zweite laterale Abmessung, die Stegbreite b, wurde in Abschnitt 2.5 zugunsten des Füllfaktors als möglichst schmal festgelegt, wobei mindestens $1,6\mu m$ bis $2\mu m$ erforderlich sind, um die Schlitze zwischen den Pixelelektroden abzudecken. Die Simulationsrechnungen, deren Ergebnisse in Abbildung 3.13 dargestellt sind, zeigen einen Abfall der Deformationsamplitude mit zunehmender Stegbreite b. Dies ist in Übereinstimmung mit der Abnahme der Deformation bei sinkender Pixelweite d, da das Gebiet vernachlässigbarer Maxwellscher Spannung mit steigender Stegbreite schmaler wird. Interessant ist, dass die Deformationsamplitude auch durch sehr schmale Gitterstege wieder reduziert wird, was sich mit der abnehmenden Wirkfläche für die Maxwellsche Spannung erklären lässt. Bei genügender Stegbreite existiert über beiden Gitterkanten ein Oberflächenbereich mit großer Kraftwirkung. Über schmalen Stegen überlappen diese Bereiche und bilden ein verkleinertes Gesamtgebiet. Es ergibt sich eine optimale Stegbreite, die bei $h_0 = 300nm$ Flüssigkeitsstand um $b = 0, 8\mu m$ liegt und mit steigender Dicke des Flüssigkeitsfilmes linear ansteigt, so dass bei $h_0 = 1000nm$ Gitterstege mit $b \approx 1,9\mu m$ optimal sind. Die minimal zulässige Stegbreite von $b = 1, 6\mu m$ ist weiteren Simulationsrechnungen zufolge gerade für einen zu dicken Flüssigkeitsfilm mit $h_0 \approx 820 nm$ optimal. Deshalb wird die Forderung



Abbildung 3.13: Deformationsamplitude \hat{z} in Abhängigkeit von der Stegbreite b der Gitterelektrode bei unterschiedlichen Flüssigkeitsständen

nach möglichst schmalen Stegen durch die Ergebnisse der Simulationsrechnungen bekräftigt.

Die Darstellung dreier Oberflächenprofile in Abbildung 3.14 zeigt, dass der Abfall der Deformationsamplitude bei größer werdender Stegbreite zu einem wesentlichen Anteil aus der Profiländerung über den Stegen herrührt. Das bedeutet, dass breite Gitterstege auch dann zu vermeiden sind, wenn ihre Oberfläche nicht entspiegelt wird, da die Modulation über ihnen nur sehr schwach ist.



Abbildung 3.14: Deformationsprofile bei verschiedenen Stegbreiten b

3.3.4 Einfluss der Pixelspannung

Die Abhängigkeit der Deformation von der Spannung kann aus dem aufgestellten Modell analytisch abgeleitet werden. Bei der Berechnung der elektrischen Felder an der nicht deformierten Flüssigkeitsoberfläche mit ANSYS [68] liegen die Stege der Gitterelektrode an Masse und die Spiegelelektrode führt die Pixelspannung U_{sp} . Verändert man die Pixelspannung, ändert sich der Betrag der Feldstärke überall im gleichen Verhältnis, weil lineare Medien angenommen werden $(\frac{\partial \varepsilon}{\partial E}) = 0$. Die Richtung der Feldstärke verändert sich an keinem Ort. Die Maxwellsche Spannung hängt quadratisch von beiden Komponenten des Oberflächenfeldes E_t und D_n ab, wie aus Gleichung (2.5) abzulesen ist. Bei der Berechnung des Deformationsprofils Δz mit dem Integral (2.16) bleibt die quadratische Spannungsabhängigkeit schließlich erhalten, da sich von x unabhängige Faktoren vor das Integral ziehen lassen.

In der Realität wird die Deformationsamplitude jedoch nur bei kleinen Auslenkungen quadratisch mit der Spannung zunehmen, weil alle durchgeführten Vereinfachungen die deformationsmindernden Einflüsse vernachlässigen, die bei großen Deformationen auftreten. Die Kennlinie wird also bei größeren Spannungen vom quadratischen Verlauf abweichen und einen schwächeren als quadratischen Anstieg zeigen.

3.4 Das Beugungsbild der Elektrodenanordnung

Wie schon in Abschnitt 2.2.1 erläutert, lässt sich das Verhalten des MLM-Bauelementes sehr allgemein mit den Veränderungen in seinem Beugungsbild charakterisieren, die sich bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle ergeben. Die Ergebnisse lassen sich zum Vergleich auch messtechnisch erfassen, wenn eine passive oder aktive Matrix mit einem Laser beleuchtet wird.

Die numerische Berechnung erfolgt mittels des Integrals (2.9) mit einem Integrationsbereich über ein Pixel. Ausgewertet wird das Integral nur für die Beugungsordnungen nach Gleichung (2.10), also für ganzzahlige m_x, m_y . Auf diese Weise wird ein unendlich ausgedehntes Array betrachtet, dessen Pixel alle gleich angesteuert werden.

Das MLM-Bauelement verhält sich auch ohne Ansteuerung nicht wie ein Planspiegel, weil bereits die Elektrodenstruktur ein Stufenprofil darstellt, welches Licht aus der nullten, dem Reflexionsgesetz folgenden Beugungsordnung herausbeugt. In diesem Abschnitt werden deshalb zunächst die beugenden Eigenschaften des MLM-Bauelementes ohne Deformation des Flüssigkeitsfilms betrachtet. Mit dem Photolithographie-Simulationsprogramm LITHSIM [69, 70] wurde das Beugungsbild in der Umgebung der nullten Ordnung berechnet, wie es auf einem ebenen Schirm aufgefangen werden kann. Dabei wurde eine dreidimensionale Elektrodenanordnung nach Abbildung 2.17 angenommen, mit den Abmessungen, wie in Bild 3.2 angegeben. Abbildung 3.15 zeigt das Ergebnis mit den Beugungsordnungen (i, j) auf einem Raster, das aus Hyperbeln gebildet wird. Es wurde eine Vakuumwel-



Abbildung 3.15: Mit LITHSIM berechnetes Beugungsbild des MLM-Bauelementes ohne Flüssigkeitsdeformation

lenlänge von $\lambda = 543nm$ gewählt, da ein entsprechender Laser für die Messungen verwendet wurde. Der Winkel zwischen der nullten Ordnung (0,0) und der Ordnung (1,0) beträgt dann $\arcsin \frac{\lambda}{d} = 1,56^{\circ}$ bei $20\mu m$ großen Pixeln.

Der Einfluss der Stufenhöhe $t_{ox}+t_{ge}$ auf die Intensitäten der ersten Beugungsordnungen (i, 0) ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Weil der Verlauf sich periodisch fortsetzt, wurden nur kleine Stufenhöhen betrachtet. Die Gitterelektrode ist in diesem Beispiel nicht entspiegelt, deshalb ergibt sich bei Stufenhöhen, die ein Vielfaches der halben Wellenlänge in der Flüssigkeit $\frac{\lambda}{2n_{\ell}}$ betragen, das Verhalten eines Planspiegels mit reflektiertem Licht nur in der nullten Ordnung. Aus dieser Rechnung lässt sich auch die Toleranz bestimmen, mit der die Stufenhöhe gefertigt werden muss. Soll nicht mehr als ein Zwanzigstel der Lichtintensität bei $\lambda = 543nm$ in höhere Ordnungen gebeugt werden, muss die Stufenhöhe auf $\pm 22, 6nm$ genau stimmen. Tabelle 3.1 gibt



Abbildung 3.16: Intensität der nullten bis vierten Beugungsordnung bei wachsender Stufenhöhe $t_{ox}+t_{qe}$ der spiegelnden Gitterelektrode

beispielhaft weitere Toleranzen für eine andere Wellenlänge und Kontrastforderung an. Eine Fehlanpassung der Stufenhöhe in dieser Größenordnung

aus der 0. Ordnung	Toleranz bei	Toleranz bei
gebeugte Intensität	$\lambda = 543nm$	$\lambda = 248nm$
1/20	$\pm 22,6nm$	$\pm 10, 3nm$
1/100	$\pm 10, 1nm$	$\pm 4,2nm$

Tabelle 3.1: Toleranzen der Stufenhöhe, wenn nicht mehr als ein vorgegebener Anteil der Lichtintensität durch die Gitterelektrode aus der nullten Ordnung herausgebeugt werden darf.

schwächt die Intensität der Reflexion des nicht angesteuerten Bauelements also schon in bedeutendem Maße. Insbesondere hängt deren Homogenität über die Modulatorfläche empfindlich von der Homogenität der Stufenhöhe ab.

Die Wirkung der Antireflexionsschicht der Gitterelektrode ist in Abbildung 3.17 für die nullte und erste Beugungsordnung dargestellt. Wie man sieht, geht der Einfluss der Stufenhöhe mit abnehmender Reflektivität zurück. Die Reflexion wird dann homogener, ohne dazu die Stufenhöhenschwankungen reduzieren zu müssen. Andererseits wird immer Licht in höhere Ordnungen gebeugt, was deren erreichbaren Kontrast auch bei optimaler Stufenhöhe begrenzt.

Mit der Stegbreite *b* nimmt der Einfluss des Kreuzgitters zu, bis die Fläche



Abbildung 3.17: Intensitäten bei wachsender Stufenhöhe $t_{ox}+t_{ge}$ bei spiegelnder und teilweise entspiegelter Gitterelektrode

der Gitterelektrode der Spiegelfläche entspricht. Bei spiegelnder Gitterelektrode und genau angepasster Stufenhöhe kann dann alles Licht aus der nullten Ordnung herausgebeugt werden. Erst durch Deformation des Flüssigkeitsfilms wird bei Ansteuerung wieder Licht zurück in die nullte Ordnung gebeugt. Die bei Fehlanpassung auftretende Restintensität in der nullten Ordnung führt auf die Stufenhöhentoleranzen in Tabelle 3.2.

Restintensität	Toleranz bei	Toleranz bei
in der 0. Ordnung	$\lambda = 543nm$	$\lambda = 248nm$
1/20	$\pm 27,8nm$	$\pm 12,7nm$
1/100	$\pm 12,4nm$	$\pm 5,6nm$

Tabelle 3.2: Toleranzen der Stufenhöhe einer Gitterelektrode mit 50% Anteil an der Spiegelfläche, wenn nicht mehr als ein vorgegebener Anteil der Lichtintensität in der nullten Ordnung bleiben darf.

Wie schon in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, sind die zur Verfügung stehenden Prozesse für eine solche Genauigkeit nicht ausgelegt. Die Gitterelektrode sollte also mit einer Anti-Reflexionsschicht versehen werden, um bei homogener Ausleuchtung der Modulatorfläche auch eine homogene Reflexion zu erhalten und um die Schwankungen von Bauelement zu Bauelement zu minimieren.

3.5 Das Beugungsbild des deformierten Flüssigkeitsfilms

Nachdem der vorangegangene Abschnitt das Beugungsbild der Silicon backplane ohne Flüssigkeitsdeformation betrachtet hat, soll hier zunächst das beugende Verhalten der Flüssigkeitsdeformation auf einem Planspiegel betrachtet werden. In Gleichung (2.9) wird die äquivalente Spiegelabsenkung Δz_{eq} nach Gleichung (2.3) bei ebenem Spiegel ($\Delta t = 0$) eingesetzt. Als Deformationsprofile werden die Ergebnisse der ersten Abschnitte dieses Kapitels eingesetzt, die zum Beispiel in den Abbildungen 3.6 und 3.14 dargestellt sind. Es wird also wiederum eine zweidimensionale Rechnung durchgeführt, weil keine dreidimensionalen Flüssigkeitsprofile zur Verfügung stehen. Die Beugungsordnungen liegen dementsprechend auf einer Geraden mit der nullten Ordnung in der Mitte und den höheren Ordnungen jeweils links und rechts davon. Bei senkrechtem Einfall und symmetrischem Deformationsprofil ist auch das Beugungsbild symmetrisch, weshalb es im Folgenden genügt, immer nur eine Seite zu betrachten.

Das Oberflächenprofil nach Abbildung 3.6, das für die Standard-Parameter nach Abbildung 3.2 berechnet wurde, führt bei der Wellenlänge $\lambda = 543nm$ auf die Intensitätsverläufe der niederen Beugungsordnungen in Abbildung 3.18. Dazu wurde die Deformationsamplitude, die bei $U_{sp} = 30V$ gerade $\hat{z} = 358nm$ beträgt, mit dem Faktor 0...4 skaliert. Ohne Deformation



Abbildung 3.18: Intensitätsverläufe der niederen Beugungsordnungen eines Flüssigkeitsfilms auf einem Planspiegel bei wachsender Deformationsamplitude \hat{z}

 $(\hat{z} = 0)$ existiert nur die nullte Beugungsordnung. Bei wachsender Deformation verliert sie Intensität an höhere Ordnungen und erreicht bei $\hat{z} = 500nm$ ein Minimum von 2, 2%. Bezogen auf Wellenlänge und Brechungsindex beträgt diese Deformationsamplitude $\hat{z} = 0, 37 (n_{\ell} - 1) \lambda$. Die nullte Ordnung erreicht demnach einen Kontrast¹ von maximal 45:1. Die erste Ordnung beginnt theoretisch bei der Intensität Null und erreicht ihr Maximum von 33% bei $\hat{z} = 386nm$ bzw. $\hat{z} = 0, 27 (n_{\ell} - 1) \lambda$. Die weiteren Beugungsordnungen sind erheblich schwächer und sollen hier deshalb nicht weiter betrachtet werden. Da sie bis zum Maximum der ersten Ordnung ansteigen, können sie bei einer Dunkelfeldprojektion dazu benutzt werden, die Lichtausbeute zu verbessern. Größere Deformationen als 500nm sind bei monochromatischer Beleuchtung mit $\lambda = 543nm$ und einer Flüssigkeit mit n = 1, 4 uninteressant, weil die Beugungseffizienz darüber wieder abnimmt und weil derartige Deformationsamplituden schwer zu erreichen sind.

Der Vergleich mit der Beugung an einem sinusförmig deformierten Spiegel zeigt eine hohe Übereinstimmung mit der Beugung an der Flüssigkeitsdeformation. In [54] wird auf analytischem Wege gezeigt, dass die Intensitätsverläufe der Beugungsordnungen die Form von quadratischen Besselfunktionen haben. Das Minimum der nullten Ordnung liegt bei $\hat{z} = 0, 38\lambda$ (Spitze-Spitze). Die erste Ordnung erreicht ihre maximale Intensität von 33% bei $\hat{z} = 0, 29\lambda$. Im Gegensatz zum berechneten Flüssigkeitsprofil kann mit einem Sinusprofil alles Licht aus der nullten Ordnung herausgebeugt werden. Für eine Hell-Feld-Abbildung mit der ersten Ordnung lässt sich damit sagen, dass der Kontrast sich verbessert, wenn das Deformationsprofil der Flüssigkeitsoberfläche einer Sinusfunktion ähnlicher wird.

Für das fertige Bauelement ist weniger die Abhängigkeit der Beugungsintensitäten von der Deformationsamplitude interessant, als viel mehr die Übertragungskennlinie mit der Pixelspannung als Eingangsgröße. In Abbildung 3.19 wurde die Abszisse deshalb mit der als streng quadratisch angenommenen Spannungsabhängigkeit der Deformation auf die Pixelspannung umskaliert. Das Maximum der ersten Ordnung liegt demnach bei $U_{sp} = 32V$, das Minimum der nullten Ordnung bei $U_{sp} = 36V$. Im Bereich kleiner Spannungen bleibt das Beugungsbild zunächst nahezu unverändert. Es ist also möglich, die Gitterelektrode mit einem festen Potenzial von $-5V \dots - 10V$ negativ vorzuspannen, ohne den Kontrast stark zu begrenzen. Abbildung 3.19 zeigt auch die prinzipielle Analogfähigkeit der MLM-Technologie. Die Inten-

¹Unter Kontrast wird in dieser Arbeit das Verhältnis zwischen der maximalen und der minimalen Helligkeit verstanden, die durch Ansteuerung erreichbar sind. Die Angabe erfolgt als $\frac{I_{max}}{I_{min}}$: 1, weil dies in der Display-Technik üblich ist. Anwendbar wäre in diesem Fall auch die in der Optik gebräuchliche Definition $K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$, die Werte zwischen 0% und 100% liefert.



Abbildung 3.19: Intensitätsverläufe der niederen Beugungsordnungen eines deformierten Flüssigkeitsfilms auf einem Planspiegel in Abhängigkeit von der Pixelspannung U_{sp}

sität der nullten Ordnung sinkt bei steigender Spannung stetig bis zum Minimum. Bei mittleren Intensitäten ist der Verlauf sogar in etwa linear. Für die erste Ordnung gilt das Analoge: Mit zunehmender Pixelspannung nimmt ihre Helligkeit bis zum ersten Maximum kontinuierlich zu.

Beim Aufstellen des theoretischen Modells wurden einige Vernachlässigungen gemacht, die nur bei kleinen Deformationsamplituden gültig sind. Ab etwa $\hat{z} = 300nm$, also oberhalb von knapp 30V, wird deshalb die Deformationsamplitude in der Realität nicht mehr quadratisch mit der Pixelspannung ansteigen. Für die Beugungsverläufe in Abbildung 3.19 bedeutet dies, dass sie am realen Bauelement ab 30V etwas gestreckt werden. Das zweite Minimum der nullten Ordnung wird dann beispielsweise nicht schon bei $U_{sp} = 54V$ erreicht.

3.6 Intensitätsverteilung im Beugungsbild

Nachdem in den letzten beiden Abschnitten der Einfluss der Beugung an der Elektrodenstruktur und am deformierten Flüssigkeitsfilm getrennt betrachtet worden sind, soll nun das Gesamtsystem beschrieben werden. Dabei werden grundsätzlich wieder die Standardparameter nach Abbildung 3.2 angesetzt. In den folgenden Untersuchungen wird jeweils ein Parameter variiert, um seinen Einfluss auf charakteristische Punkte in den Beugungsverläufen zu bestimmen.

3.6.1 Einfluss der Stufenhöhe

Der Einfluss der Stufenhöhe der Elektrodenstege $t_{ox}+t_{ge}$ bei nicht deformierter Flüssigkeitsoberfläche zeigt nach Abschnitt 3.4 ein periodisches Verhalten. Deshalb wurde hier nur ein kleiner Bereich um die Standardhöhe von 1400nm betrachtet. Die Reflektivität der Elektrodenstege wird mit 25% angenommen, weil dieser Wert in der Realität mittels einer Antireflexionsschicht aus Titannitrid leicht erreicht werden kann. Der Einfluss der Gitterelektrode wird dadurch gering gehalten, jedoch ist immer ein wirksames Beugungsgitter vorhanden. Die Pixelelektroden werden weiterhin als ideale Spiegel mit 100% Reflektivität angenommen. Um den Einfluss der Elektrodenhöhe auf die Interferenzerscheinungen isoliert betrachten zu können, wurde die Feldberechnung einheitlich für $t_{ox}+t_{ge} = 900nm + 500nm = 1400nm$ durchgeführt und die Stufenhöhe nur bei der Berechnung der Beugungsintensitäten variiert. Diese Vorgehensweise ist gerechtfertigt, da sich die Felder auch nur wenig verändern würden, wenn die Oxiddicke t_{ox} variiert würde (siehe Abbildung 3.10).

Die Intensitätsverläufe der nullten und der ersten Ordnung sind in Abbildung 3.20 für vier ausgewählte Stufenhöhen im Abstand von $\frac{\lambda}{8n_{\ell}}$ dargestellt. Die maximalen und minimalen Intensitäten beider betrachteter Beugungsnormierte Intensität



Abbildung 3.20: Intensitätsverläufe der nullten und ersten Beugungsordnung bei ausgewählten Stufenhöhen $t_{ox}+t_{qe}$

ordnungen verändern sich mit der Stufenhöhe. Auch die Spannungen, bei denen das Minimum der nullten und das Maximum der ersten Ordnung auftreten, verschieben sich etwas. Die nullte Ordnung erreicht bei der Stufenhöhe $14 \frac{\lambda}{4n_c}$ die größte Intensität, weil dann die Reflexionen von den Stegen und von

den Spiegelelektroden konstruktiv interferieren, wie schon in Abschnitt 3.4 erläutert. Entsprechend herrscht bei 13 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}}$ destruktive Interferenz. Interessant sind die unterschiedlichen Verläufe bei 13,5 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}}$ und 14,5 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}}$. Während die Intensität der nullten Ordnung im ersten Fall schon bei kleinen Flüssigkeitsdeformationen schnell abfällt, aber kein sehr ausgeprägtes Minimum hat, steigt sie bei der Stufenhöhe 14, 5 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}}$ zuerst noch etwas an, um dann steiler als die anderen Verläufe abzufallen und ein besonders tiefes Minimum zu durchlaufen. Dieses Verhalten ist einleuchtend, wenn man bedenkt, dass erhöhte Stege den optischen Weg in der Flüssigkeit etwas verkürzen. Kleine Flüssigkeitsdeformationen verlängern den optischen Weg über den Stegen wieder und gleichen die Störung der konstruktiven Interferenz durch die Stege etwas aus. Bei großen Deformationen wird der optische Weg am stärksten über den Stegen verlängert, die gegenüber $14 \frac{\lambda}{4n_e}$ etwas erhöhten Stege verkürzen ihn wieder und korrigieren das Phasenprofil hin zu einem sinus-ähnlichen Profil. Die Beugungseffizienz steigt und das Intensitätsminimum wird besonders tief. Der Kontrast ist folglich besonders hoch.

Die Diagramme in Abbildung 3.21 zeigen die Veränderungen der charakteristischen Punkte der Intensitätsverläufe in Abhängigkeit von der Stufenhöhe zwischen Gitterelektrode und Spiegel. Aus Abbildung 3.21b) ist abzulesen, dass die erste Ordnung bei konstruktiver Interferenz die kleinsten Intensitäten erreichen kann. Beugung findet dann nur aufgrund der reduzierten Reflektivitäten der Gitterstege statt, nicht aber durch die Stufe. Ist die Stufe dagegen etwas höher, kann besonders viel Licht in die erste Ordnung abgelenkt werden, weil die Beugungseffizienz dadurch verbessert wird. Der erreichbare Kontrast der ersten Ordnung ist am größten, wenn die Stufenhöhe auf konstruktive Interferenz ausgelegt ist $(14 \frac{\lambda}{4n_s} = 1358nm)$, wie Abbildung 3.21c) zeigt. Bei großen Kontrastwerten muss zwar mit einer hohen Ungenauigkeit gerechnet werden, denn im Nenner steht eine kleine Intensität, die sich im Integral (2.9) als kleine Differenz großer Zahlen ergibt und deshalb mit einem großen numerischen Fehler behaftet ist. Der Verlauf mit dem ausgeprägten Maximum entspricht aber den Erwartungen. Aufgrund der Ungenauigkeit werden die berechneten Kontraste der ersten Ordnung bei den folgenden Simulationsrechnungen nicht mit angegeben. Der Kontrast der nullten Ordnung erreicht den Wert 36:1 bei einer Stufenhöhe von 14,3 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}} = 1387nm$, also bei gegenüber konstruktiver Interferenz leicht erhöhter Stufenhöhe. Im ungünstigsten Fall sinkt er unter 10:1.

Abbildung 3.21a) zeigt die Ansteuerspannungen, bei denen die maximale und die minimale Intensität der nullten und ersten Ordnung erreicht werden. Das Minimum der nullten Ordnung lässt sich mit Spannungen zwischen 36V



Abbildung 3.21: Abhängigkeiten von der Stufenhöhe $t_{ox} + t_{ge}$: a) Pixelspannung U_{sp} im Maximum bzw. Minimum, b) Intensitätsmaximum und minimum der 0. und 1. Ordnung, c) Kontrast

bei 13,8 $\frac{\lambda}{4n_\ell} = 1338nm$ und 39V bei 13,1 $\frac{\lambda}{4n_\ell} = 1270nm$ erreichen. Bei maximalem Kontrast (14,3 $\frac{\lambda}{4n_\ell} = 1387nm$) beträgt sie 37V. Das Maximum der nullten Ordnung ist in diesem Fall gerade von 0V auf 8V verschoben. Die Gitterelektrode kann also mit -8V vorgespannt werden, und die Pixelelektroden brauchen nur noch zwischen 0V und 29V geschaltet zu werden, um den vollen Kontrast zu erreichen.

Tabelle 3.3 fasst noch einmal zusammen, in welchen Grenzen sich die charakteristischen Punkte der Beugungsverläufe bewegen und nennt die Stufenhöhen, bei denen die Grenzwerte erreicht werden. Diese Stufenhöhen werden in den folgenden Simulationsrechnungen verwendet, um die Bereiche zu bestimmen, in denen sich die Ergebnisse bei Stufenhöhenschwankungen bewegen können. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das MLM-

		erreichbar		schlech-	erreichbar	
Charakteristischer Punkt	bester	bei $t_{ox} + t_{qe}$		tester	bei $t_{ox} + t_{qe}$	
im Beugungsverlauf	Wert	[nm]	$\left[\frac{\tilde{\lambda}}{4n_{\ell}}\right]$	Wert	[nm]	$\left[\frac{\tilde{\lambda}}{4n_{\ell}}\right]$
Maximum 0. Ordnung	90.5%	1358	14.0	73.0%	1260	13.0
Minimum 0. Ordnung	6.3%	1299	13.4	2.4%	1396	14.4
Maximum 1. Ordnung	28.4%	1367	14.1	73.0%	1270	13.1
Minimum 1. Ordnung	2.1%	1260	13.0	0.2%	1358	14.0
U_{sp} Minimum 0. Ordnung	36.0V	1338	13.8	38.9V	1270	13.1
U_{sp} Maximum 1. Ordnung	30.5V	1309	13.5	34.0V	1435	14.8
Kontrast der 0. Ordnung	36.3:1	1387	14.3	12.6:1	1290	13.3
Kontrast der 1. Ordnung	(123:1)	1358	14.0	12.6:1	1290	9.7

Tabelle 3.3: Maximal und minimal erreichbare Werte für charakteristischePunkte in den Beugungsverläufen durch Variation der Stufenhöhe

Bauelement bei Abbildung mit der nullten Ordnung den höchsten Kontrast verspricht, wenn die Stufenhöhe des Elektrodengitters 0,3 $\frac{\lambda}{4n_{\ell}}$ über einem geradzahligen Vielfachen einer viertel Wellenlänge in der Flüssigkeit liegt. Die Gitterelektrode sollte dann negativ vorgespannt werden, um die notwendige Pixelspannung zu verringern. Die beiden ersten Ordnungen links und rechts der nullten sind mit je bis zu 28% etwas schwächer, erreichen aber erheblich höhere Kontraste. Die optimale Stufenhöhe liegt nur wenig über der für konstruktive Interferenz. Stufenhöhenschwankungen von $\pm 30nm$ bedeuten in beiden Fällen hohe Kontrasteinbußen.

3.6.2 Einfluss der Dicke des Flüssigkeitsfilms

Die Dicke h_0 des Flüssigkeitsfilms über der Gitterelektrode hat einen sehr starken Einfluss auf die Deformationsamplitude \hat{z} . Die Simulationsrechnungen in Abschnitt 3.3.1 haben einen exponentiellen Zusammenhang ergeben. Angesichts der quadratischen Spannungskennlinie der Deformationsamplitude $\hat{z}(U_{sp})$ kann die Deformationseinbuße, die ein nur wenig dickerer Film verursacht, jedoch durch eine moderate Spannungserhöhung ausgeglichen werden. Abbildung 3.22a) zeigt den Anstieg der Pixelspannungen, die bei Beleuchtung mit $\lambda = 543nm$ nötig sind, um vollen Kontrast zu erhalten. Je 100nm zusätzlicher Flüssigkeit steigen die notwendigen Spannungen fast linear um etwa 3, 2V an. Transmissionsverluste wurden deshalb in den Simulationsrechnungen auch nicht berücksichtigt, da der dünne Flüssigkeitsfilm praktisch kein Licht absorbiert. Die Intensität im Maximum der nullten Ordnung wird somit durch die Filmdicke nicht verändert. Die Intensität im Maximum der ersten Ordnung steigt aber leicht an, wie Abbildung 3.22b) zeigt, und die minimale Intensität der nullten Ordnung wird mit steigendem Flüssigkeitsstand weiter geschwächt. Wenn die Gitterelektrode auf konstruktive Interferenz ausgelegt ist und das Phasenprofil durch die Elektrodenstege nur wenig gestört wird, steigt der Kontrast deutlich mit zunehmender Filmdicke (Abbildung 3.22c). Bei $h_0 = 900nm$ Flüssigkeit über den Elektroden erreicht er 1:50. Allerdings ist dazu eine Ansteuerspannung von $U_{sp} = 50V$ erforderlich. Der Grund für die steigende Beugungseffizienz wurde schon in Abschnitt 3.3.1 beobachtet. Mit zunehmendem Abstand der Flüssigkeitsoberfläche von der Gitterelektrode verteilt sich die Feldstärkeüberhöhung an den Kanten über einen immer größeren Oberflächenabschnitt. Das Deformationsmaximum über den Stegen wird breiter, und das Oberflächenprofil wird einer Sinusfunktion ähnlicher.

3.6.3 Einfluss der Pixelweite

Der Pixelweite *d* kommt bei hochauflösenden Flächenlichtmodulatoren mit Silicon backplane eine hohe Bedeutung zu, da große Pixelarrays einen erheblichen Anteil der Chipfläche einnehmen. Bei größerer Chipfläche nimmt die Ausbeute jedoch ab, während die Fertigungskosten pro Bauelement steigen. Prinzipiell wird die Miniaturisierung nur solange sinnvoll, wie sich die einzelnen Pixel mit der verwendeten Wellenlänge optisch auflösen lassen. Pixelgrößen, die wesentlich unterhalb einer Wellenlänge liegen, sind deshalb nicht nutzbar. Für das MLM-Bauelement ist jedoch die Ausdehnung der Pixelektronik entscheidend. Ohne die Ansteuerspannung zu senken, lassen sich die Pixel in der gegenwärtigen Hochvolt-CMOS-Technologie kaum unter


Abbildung 3.22: Abhängigkeiten von der Flüssigkeitshöhe h_0 : a) Pixelspannung U_{sp} im Maximum bzw. Minimum, b) Intensitätsmaximum und - minimum der 0. und 1. Ordnung, c) Kontrast

 $d = 16 \mu m$ verkleinern [72]. Der Einfluss der Pixelweite auf die Beugungsverläufe wurde deshalb in weiteren Simulationsreihen untersucht.

Abbildung 3.24 gibt die Intensitätsverläufe der nullten und ersten Beugungsordnung für drei verschiedene Pixelweiten d wieder. Laut Abschnitt 3.3.3 steigt die Deformationsamplitude mit größer werdender Pixelweite linear an. Entsprechend sinken die Spannungen U_{sp} zum Erreichen des Maximums der ersten und des Minimums der nullten Ordnung (Abbildung 3.23a). Bei Pixelweiten unter $d = 20 \mu m$ werden die nötigen Spannungen sehr groß. Eine Hell-Feld-Abbildung (siehe Abschnitt 3.7) bei $U_{sp} \leq 40V$ kann erst ab Pixelweiten von $d = 18 \mu m$ vollen Kontrast erreichen. Abbildung 3.23b) zeigt, wie der optische Einfluss der $2\mu m$ breiten Stege mit zunehmender Pixelweite sinkt, weil deren Flächenanteil abnimmt. Die maximal reflektierte Intensität nimmt zu und wird von der Stufenhöhe der Elektroden unabhängiger. Von besonderer Bedeutung ist die abnehmende Beugungseffizienz. Die nullte Ordnung lässt sich bei größeren Pixeln ab $36\mu m$ auch im günstigsten Fall nicht mehr auf unter 5% verdunkeln. Der Kontrast bleibt unter 20:1 (Abbildung 3.23b). Ein Kontrast über 30:1 wird bei optimaler Stufenhöhe nur bei Pixeln mit $d < 25 \mu m$ erreicht. Der Grund liegt wiederum darin, dass das Oberflächenprofil des Flüssigkeitsfilms bei kleinen Pixelweiten einer Sinusfunktion ähnlicher ist als bei großen. Für die Hell-Feld-Projektion bieten sich also Pixelweiten um $d = 20 \mu m$ an, weil gute Kontraste mit vertretbaren Ansteuerspannungen erzielt werden können.

3.7 Hell-Feld-Abbildung

Ein Phasenprofil absorbiert kein Licht, sondern beugt es in höhere Beugungsordnungen. Um ein Intensitätsmuster zu erzeugen, wird eine Schlierenoptik eingesetzt, die einen Teil der Ordnungen mit einem Fourierfilter unterdrückt. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise sind in Abbildung 3.25 dargestellt. Das am Phasenprofil des Flächenlichtmodulators in die verschiedenen Ordnungen gebeugte Licht wird mit einer Sammellinse auf einen Schirm abgebildet. In der Fourierebene, die bei senkrechtem Einfall ebener Beleuchtungswellenfronten auf den Flächenlichtmodulator durch den Brennpunkt der Linse geht, wird das Beugungsbild scharf abgebildet, wie es sich ohne Linse erst im Fernfeld ergäbe. Durch eine Blendenanordnung in der Fourierebene können die Beugungsordnungen selektiv blockiert oder durchgelassen werden. Je nachdem, ob mit der nullten Ordnung abgebildet wird oder mit den höheren Ordnungen, spricht man von einer Hellfeldprojektion oder von einer Dunkelfeldprojektion. Bei der Hellfeldprojektion (wie in Abbildung 3.25) wird die nullte Ordnung übertragen, während die höheren Ordnungen unter-



Abbildung 3.23: Abhängigkeiten von der Pixelweite d: a) Pixelspannung U_{sp} im Maximum bzw. Minimum, b) Intensitätsmaximum und -minimum der 0. und 1. Ordnung, c) Kontrast



Abbildung 3.24: Intensitätsverläufe der nullten und ersten Beugungsordnung bei drei verschiedenen Pixelweiten d

drückt werden. Für die Dunkelfeldprojektion wird eine Punktblende als Fourierfilter eingesetzt, welche die nullte Ordnung unterdrückt und die höheren Ordnungen überträgt, soweit die Apertur dies zulässt.



Abbildung 3.25: Prinzipieller Abbildungsstrahlengang einer Hell-Feld-Projektion

Mit dem Programm LITHSIM wurde eine Hell-Feld-Abbildung simuliert. Die Helligkeitsverteilung ist in Abbildung 3.26 dargestellt. Es handelt sich dabei um die Abbildung einer 8×8 großen Matrix, in der nur die Pixel angesteuert sind, die im Muster links im Bild dunkel gezeichnet sind. Die Deformationsamplitude dieser Pixel beträgt $\hat{z} = 500nm$. Die numerische Apertur



Abbildung 3.26: Hell-Feld-Abbildung einer 8×8 -MLM-Matrix im Maßstab 1:1 mit NA = 0,027. Nur die im Muster schwarz gezeichneten Pixel sind angesteuert und haben eine Deformationsamplitude von $\hat{z} = 500$ nm.

wurde mit NA = 0,027 so gewählt, dass die beugungsbegrenzte Auflösung bei $\frac{\lambda}{NA} = 20 \mu m$ liegt. Jeder Pixel wird dann mit der Helligkeit abgebildet, die er in die nullte Ordnung beugt. Die Form des Pixels wird jedoch nicht mehr aufgelöst.

Das Deformationsprofil eines Pixels in MLM-Technologie ist also geeignet, als einzelner, in der Intensität unabhängig von seinen Nachbarpixeln einstellbarer Bildpunkt abgebildet zu werden.

Kapitel 4

Herstellung des neuen Bauelementes

Die Herstellung der Flächenlichtmodulator-Bauelemente erfolgt in der Prozesslinie des FhG-IMS in Dresden bzw. Duisburg. Die MLM-Technologie greift dabei weitestgehend auf Standard-CMOS-Prozessschritte zurück. Die ansteuernde CMOS-Schaltung in ihrer derzeitigen Form wurde im Rahmen einer anderen Forschungsarbeit des FhG-IMS entwickelt [72].

4.1 Die Ansteuerschaltung

Die Ansteuerung des Flächenlichtmodulators erfolgt bei allen drei Modulatortechnologien des FhG-IMS (MLM, CBM und VCL) mit einer monolithisch integrierten aktiven Matrix in CMOS-Technologie [73, 3, 2]. Die Vorteile dieser Form der Ansteuerung wurden bereits im Abschnitt 1.6 diskutiert. Ziel bei der Entwicklung der MLM-Technologie war es, Kompatibilität zu den beiden anderen Aktortechnologien des FhG-IMS zu gewährleisten, so dass die gleiche Schaltung als *Silicon backplane* für alle drei Technologien verwendet werden kann. Sie dient der Ansteuerung und als Träger für die mikromechanischen Aktorelemente.

4.1.1 Anforderungen an die aktive Matrix

Ein elektrisch ansteuerbarer Flächenlichtmodulator mit Aktiv-Matrix-Ansteuerung lässt sich als Speicherbauelement auffassen, das elektrisch sequenziell programmiert und optisch parallel ausgelesen wird. Aus dieser Sichtweise lassen sich einige Eigenschaften der Schaltung ableiten: Die Zellenarchitektur mit einer Kapazität und einem Transistor pro Zelle und die Matrixanordnung der Zellen können von Dynamic Random Access Memory (DRAM) übernommen werden. Die Spaltenleitungen geben als Datenleitungen die Potenziale vor, die von den Transistoren einer Zeile auf die Speicherzelle durchgeschaltet werden, sobald die entsprechende Zeilenleitung aktiviert wird. Die DRAM-Matrix hat eine Randelektronik mit Zeilen- und Spaltentreibern und mit Logik zum Auswählen der adressierten Zeile bzw. zum Zuordnen der Daten an die richtigen Spaltenleitungen. Diese Architektur mit Speicherkapazitäten, bei der gleichzeitig immer nur eine Pixelzeile aktiv ist, ist im Hinblick auf eine geringe Verlustleistung am besten in CMOS-Technologie zu realisieren.

Die Besonderheiten von Flächenlichtmodulatoren erfordern jedoch erhebliche Veränderungen der Ansteuerschaltung gegenüber typischen DRAM-Schaltungen: Zunächst wird der Speicher optisch ausgelesen, jedoch nicht elektrisch. Es entfällt also die gesamte Auslese-Elektronik. Die *Silicon backplane* stellt gewissermaßen einen Nur-Schreibe-Speicher (WOM) dar. Darüber hinaus wird immer die gesamte Matrix mit einem Frame (Bild) zusammenhängend beschrieben. Die Zeilen werden in fester aufeinanderfolgender Reihenfolge aktiviert. Es entfallen Adressbus und Adressdekoder. Außerdem kann auch die Elektronik für die Zuordnung der Daten an die Spaltenleitungen auf ein festes Format des Datenstromes optimiert werden. Schließlich wird nach dem optischen parallelen Auslesen ein neuer Frame in die Matrix geschrieben. Damit sind interne Refresh-Zyklen überflüssig.

Besonders hohe Anforderungen stellen die mikrooptischen Aktoren an die Schaltung. Jede Speicherzelle steuert direkt ein Pixel an. Dazu sind auch intern Pegel bis zu 40V erforderlich. Dies liegt deutlich über den Standardpegeln von 5V, 3,3V und 2,5V. Fast die gesamte Matrix muss also in einer speziellen Hochvolt-CMOS-Technologie realisiert werden. Gerade bei Hochvolt-Schaltungen wirkt sich die geringe Verlustleistung von CMOS-Schaltungen positiv aus. Bereits die ersten Hochvolt-ICs wurden in CMOS-Technologie realisiert [74]. Mit gewisser Ähnlichkeit zu dieser Anwendung handelte es sich dabei um Display-Treiber.

Alle drei Aktortechnologien des FhG-IMS sind analogfähig. Das heißt, die Modulationstiefe nimmt mit steigender Ansteuerspannung kontinuierlich zu. Um diese Eigenschaft nicht zu verlieren, soll die aktive Matrix analoge Spannungswerte speichern können. Auch mit dieser Forderung steigen die Ansprüche an die *Silicon backplane* erheblich über die Anforderungen an ein digitales DRAM-Bauelement hinaus.

4.1.2 Die verwendete aktive CMOS-Matrix

Neben einigen Prototypen für Testzwecke mit VCL- und mit CBM-Aktoren wurden am FhG-IMS bisher zwei Ansteuermatrizen für Flächenlichtmodulatoren entwickelt. Für die Farbprojektion von Videobildern, die Anfang 1993 vom Heinrich-Hertz-Institut Berlin vorgestellt wurde, lieferte das FhG-IMS die drei Flächenlichtmodulatoren mit viskoelastischer Steuerschicht [31]. Dabei handelte es sich um 196×328 Pixel große Matrizen mit analogen Dateneingängen. Im Rahmen der Entwicklung des Wafer-Direktbelichtungssystems [18] wurden 512×464 und 2048×1024 Pixel große, rein digitale Matrizen mit viskoelastischer Steuerschicht gebaut.

Zur Zeit wird am FhG-IMS eine analoge Ansteuermatrix entwickelt, die für alle drei Aktortechnologien (VCL, CBM und MLM) als *Silicon backplane* geeignet ist. Sie hat digitale Dateneingänge, die pro Pixel vier Bit annehmen. Die sechzehn Analogpegel werden von außen zugeführt und sind frei wählbar. Die Matrix ist in Blöcken von 256×256 Pixeln bis zur Matrixgröße von 2048×1024 Pixeln skalierbar. Die bereits realisierten Matrix- und Chipgrößen sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Pixelgröße	$16 \mu m$	$20\mu\mathbf{m}$	$24\mu\mathbf{m}$
Matrixgröße	256×256	256×256	256×160
Matrixfläche	$4,1$ mm $\times 4,1$ mm	$5,1$ mm $\times 5,1$ mm	$6,1$ mm $\times 6,1$ mm
Chipfläche	8 mm \times 7,5mm	$9,9$ mm $\times 8,8$ mm	$10,06$ mm $\times 7,5$ mm

Tabelle 4.1: Größen der realisierten FLM-Chips

Beim Herstellungsprozess handelt es sich um eine Hochvolt-CMOS-Technologie mit zwei Metalllagen. Die Spannungsfestigkeit dieser Technologie wird durch die Einführung von Doppelwannen und Pinch-Zonen erreicht [66, 75]. Die Transistoren haben eine Kanallänge von 5μ m und 90nmdickes Gateoxid. Wichtige elektrische Kennwerte sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. Während die Randelektronik auf vollständige CMOS-Schaltungen mit n- und p-Kanal-Transistoren zurückgreift, enthalten die Speicherzellen im Modulatorgebiet jeweils einen n-Kanal-Transistor und eine Speicherkapazität von 10–20fF¹. Spannungen von 0V bis 40V können damit in die Kapazität eingeschrieben werden.

	NMOS	PMOS
Schwellenspannung	1.0V	-2.6V
Durchbruchspannung	40V	-40V
$ON-Widerstand^2$	600Ω	$2.5k\Omega$

Tabelle 4.2: Elektrische Kennwerte der Hochvolt-Transistoren der CMOS-Technologie C5090

¹abhängig von der Pixelgröße

 $^{^2\}mathrm{Der}$ ON-Widerstand setzt sich aus dem Kanalwiderstand bei geöffnetem Transistor und den Kontaktwiderständen zusammen.

4.2 Fertigung der Elektroden

Wie in Abschnitt 2.5 ausgeführt, wurde die Elektrodenanordnung dergestalt ausgelegt, dass sie mit Prozessschritten einer Standard-CMOS-Technologie hergestellt werden kann. Dabei werden nur an wenigen Stellen einzelne Parameter verändert. Da die Hochvolt-CMOS-Technologie des FhG-IMS zwei Metalllagen beinhaltet und die Elektronik im Matrixgebiet jedoch nur eine Metalllage benötigt, werden die Spiegelelektroden im Metall-2 realisiert, so dass nur eine zusätzliche Metalllage für die Gitterelektrode erforderlich wird. Uber der Randelektronik bleibt das Metall-2 für die Verdrahtung der Schaltung reserviert. Es bildet somit die Schnittstelle von der CMOS-Schaltung zur Aktorschicht. Erste Vorbereitungen werden jedoch bereits früher im Prozess getroffen. Die Oberfläche der Schaltung, auf der die Spiegelelektroden abgeschieden werden, muss sehr eben sein. Deshalb werden im Polysilizium und im Metall-1 Füllstrukturen eingeführt, welche die Flächenbelegung des gesamten Chips mit Strukturelementen möglichst homogen gestalten. Das Isolationsoxid zwischen Metall-1 und Metall-2 wird dann durch chemischmechanisches Polieren (ILD-CMP) mit Hilfe von Stoppschichten aus Siliziumnitrid planarisiert. Dieser Prozessabschnitt ist ausführlich in [90] beschrieben.

Als Metall-2 werden standardmäßig 1000nm Aluminium als Legierung mit geringen Mengen von Silizium und Kupfer durch Sputtern aufgetragen. Die Reflektivität dieser Legierung liegt im Wellenlängenbereich von $\lambda = 200nm$ bis $\lambda = 850nm$, in dem Messdaten vorliegen [51], allerdings nahezu 2% unter der Reflektivität von reinem Aluminium (vgl. Abbildung 2.9). Gewöhnlich erhalten Metalllagen eine Antireflexionsschicht aus 40nm Titannitrid, damit in der Photolithographie kein an der Topographie gestreutes Licht zu Fehlbelichtungen führt. Da beim MLM-Bauelement aus dem Metall-2 auch die Spiegelelektroden gebildet werden, muss auf die Antireflexionsschicht verzichtet werden. Wegen der Planarisierung sind derartige Fehlbelichtungen bei der Photolithographie hier ohnehin stark unterdrückt.

Nach der Strukturierung des Spiegelmetalls wird die Chipoberfläche erneut mittels eines komplexen CMP-Schrittes planarisiert. Im Anschluss sind die Schlitze zwischen den Spiegelelektroden mit undotiertem Silikatglas (USG) gefüllt und die Oberfläche ist mit 100*nm* Siliziumnitrid bedeckt. Diese Isolation wird durch Abscheiden von 800*nm* USG verstärkt. Sie wirkt dann nicht nur als Träger und Isolation für die Gitterelektrode, sie dient auch zur Passivierung der Randelektronik. Im standardmäßig letzten Schritt einer CMOS-Technologie wird die Passivierung an den Bondpads geöffnet. Bei der Präparation von MLM-Bauelementen folgt jedoch noch die Abscheidung einer dritten Aluminiumschicht, aus der die Gitterelektrode gebildet wird. Das Metall-3 ist 500nm dick und wird ausschließlich an den Bondpads mit dem Metall-2 kontaktiert. Um mit 500nm Aluminium sichere Kontakte durch 900nm Passivierung zu erhalten, werden in einem zweistufigen Ätzprozess nur an den Bondpads großflächige Kontaktfenster geöffnet. Im ersten Schritt wird nasschemisch bis in 400nm Tiefe isotrop geätzt. Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, bildet sich dabei eine Schüsselform aus, weil unter der Lackkante auch lateral geätzt wird. Im zweiten Schritt wird mit derselben Lackmaske im Plasma bis zum Metall-2 anisotrop weitergeätzt. Die dabei entstehende Oxidkante ist nur 500nm hoch, so dass eine ausreichende Bedeckung mit Aluminium gewährleistet ist, wie in Abbildung 4.2 veranschaulicht wird.



Abbildung 4.1: Zweistufiger Ätzprozess zum Vermeiden hoher Kanten bei Kontaktfenstern an den Bondpads: Nasschemisches Ätzen erzeugt Schüsseln ohne steile Kanten (a). Durch anisotropes Ätzen im Plasma werden Kontaktfenster mit den Maßen der Lackmaske nach das Metall-2 geöffnet (b).

Das Metall-3 wird, dem Standard entsprechend, mit der 40nm dicken Titannitrid-Schicht gesputtert. Sie reduziert im Betrieb des Flächenlichtmodulators die Reflexionen an der Gitterelektrode. Nach der Strukturierung des Metall-3 bleibt die Lackmaske stehen, damit sie das Titannitrid im nächsten Ätzschritt schützt. Mit einer weiteren Lackmaske werden alle Bereiche mit Ausnahme des Matrixgebietes abgedeckt, und die Passivierung



Abbildung 4.2: Bedeckung der Oxidkanten beim Sputtern von Aluminium An hohen, steilen Oxidkanten kann die Aluminiumschicht abreißen (a). Durch den zweistufigen Ätzprozess werden die Oxidkanten angeschrägt, um eine gute Kantenbedeckung zu gewährleisten (b).

wird durch Plasmaätzen von den Spiegelelektroden entfernt. Dabei wird die Ätzzeit knapp kalkuliert, um die Oberfläche der Spiegelelektroden möglichst wenig anzugreifen. Erst nach diesem Schritt wird die Doppellackmaske im



Abbildung 4.3: Aluminiumstrukturierung und Freiätzen der Spiegel im Pixelgebiet mit der gleichen Lackmaske.

Sauerstoffplasma entfernt. Abbildung 4.3 verdeutlich die zweimalige Verwendung der Lackmaske für die Metall-3-Strukturierung im Pixelgebiet.

In einem letzten Atzschritt wird das Titannitrid über eine weitere Lackmaske von den Bondpads entfernt, weil es aufgrund seiner Härte keine zuverlässige Drahtbondverbindung zulässt. Es folgt eine Wasserstoff-Temperung bei 440°C. Nach der Parametermessung und der elektrischen Zwischenprüfung erfolgt noch eine Reinigung und ein Schutzlack wird aufgebracht. Dann sind die Scheiben fertig für die Vereinzelung.

4.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für Lichtmodulator-Chips bedarf besonderer Vorkehrungen, damit die Spiegelflächen für den Betrieb partikelfrei bleiben und nicht zerkratzt werden. Die für MLM-Bauelemente getroffenen Maßnahmen werden im folgenden kurz beschrieben.

Die Vereinzelung erfolgt mit dem Standardprozess. Da die Modulatorflächen mit einem Schutzlack versehen sind, können die Scheiben problemlos gesägt werden.

Aufgebaut werden die Flächenlichtmodulatorbauelemente in Keramik-PGA-Gehäusen mit 68 Anschlüssen. Die Gehäuse werden nicht verschlossen. Direkt vor dem Einkleben der Chips in die Gehäuse wird der Schutzlack abgelöst und die Chips werden gereinigt. Ab diesem Moment besteht das Risiko, dass sich Partikel auf der Spiegelfläche festsetzen bzw. das Kratzer entstehen. Eine umsichtige Handhabung ist unabdingbar. Partikelquellen, wie z.B. Hände ohne Schutzhandschuhe, dürfen nicht über die offenen Chips gelangen. Die Chips dürfen nur am Rand oder auf der Rückseite gehalten werden. Der Einsatz einer Vakuumpinzette, die auf der Chipoberfläche aufsetzt, ist nicht möglich.

Das Ultraschall-Drahtbonden stellt die größte Partikelquelle dar, weil sich viele mechanische Teile über dem Bauelement bewegen. Eine neue AVT-Linie mit Anlagen, die es erlauben, Flächenlichtmodulatorbauelemente mit wesentlich geringerer Partikelkontamination unter Reinraumbedingungen der Staubklasse 10 zu häusen, ist am FhG-IMS zur Zeit im Aufbau. In diesem Zusammenhang wird sich das Handling nach dem Auftragen des Schutzlackes noch einmal stark verändern. Schließlich wird auch darauf geachtet, für Transport und Lagerung partikelarme Verpackungen einzusetzen.

Abbildung 4.4 zeigt ein MLM-Bauelement ohne eingeschriebenes Bild. Die Pixelmatrix befindet sich rechts unten. Das Array umfasst 256×256 Pixel mit einer Kantenlänge von $16\mu m$. Über der Pixelmatrix sind der Datenbus, die Digital-Analog-Wandler und die Spaltentreiber zu sehen. Links neben der Pixelmatrix sind die Zeilentreiber zu erkennen. Der Schaltungsblock im Feld links oben stellt alle Steuersignale und Spannungspegel zur Verfügung.

4.4 Flüssigkeitsauftrag

Die Aktorflüssigkeit wird im letzten Herstellungsschritt auf die gehäusten Bauelemente aufgetragen. Anfangs wurde versucht, das *Spin coating*, mit dem Flüssigkeitsfilme mit kontrollierter Dicke auf Wafer aufgetragen werden, auf Einzelchips zu übertragen. Es zeigte sich jedoch, dass sich zu viel Silikonöl



Abbildung 4.4: Aktives MLM-Bauelement mit 256×256 Pixeln der Kantenlänge $16\mu m$ in der Cavity eines PGA68-Keramik-Gehäuses

in einem Wulst an der Chipkante hielt und nach dem Schleudern zurück auf die Modulatorfläche floss.

Erfolgreich wird jetzt eine wohldosierte Menge Öl aufgetragen, die sich durch Kapillarkräfte selbstständig über die gesamte Chipfläche ausbreitet und einen homogenen Film ausbildet. Die abzumessende Menge Öl ist außerordentlich gering. Der $1\mu m$ dicke Film auf einem passiven MLM-Bauelement mit 5, $6mm \times 5$, 6mm Chipfläche hat beispielsweise ein Volumen von nur $0, 03\mu\ell$. Es zeigte sich, dass mit einem automatisierten Reinraumdispenser [91] die winzige Ölmenge reproduzierbar dosiert werden kann. Dazu wurde eine Kanüle mit einem Innendurchmesser von 0, 11mm verwendet. Das große Benetzungsvermögen des Öls führt dazu, dass sich der dosierte Tropfen sofort an der Spitze der Kanüle verteilt (siehe Abbildung 4.5a). Bringt man die Kanüle vorsichtig mit der Chipoberfläche in Kontakt, wird der größte Teil



Abbildung 4.5: a) Öltropfen an der Dispenser-Nadel. b) Der Öltropfen wird beim Absetzen von der Dispenser-Nadel abgestreift. c) Nach dem Absetzen bleibt eine definierte Restmenge Öl an der Dispenser-Nadel

des Tropfens abgestreift (Abbildung 4.5b). Bereits nach wenigen Dosierungen stellt sich eine konstante Restmenge an der Nadel ein, und jeweils die neu dosierte Menge wird übertragen. (Abbildung 4.5c).

Der Dispenser besitzt einen Höhensensor, der nach dem Triangulationsverfahren arbeitet. Mit diesem wird die Höhe der Chipoberfläche vermessen, bevor die Nadel aufgesetzt wird. Der Abstand der Nadel zur Elektrodenstruktur wird auf Null eingestellt, so erfolgt die Berührung mit minimaler Andruckkraft. Kratzspuren am Aufsetzort wurden nicht gefunden.

4.5 Passive Bauelemente

Für Experimente und für spezielle Messungen wurden auch neben aktiven auch passive MLM-Bauelemente hergestellt. Diese unterscheiden sich von den aktiven Matrizen darin, dass sie nicht durch eine darunterliegende CMOS-Schaltung angesteuert werden. Statt dessen sind die Pixelelektroden zu Gruppe zusammengefasst und fest mit den Gehäuseanschlüssen verdrahtet. Auf diese Weise werden feste Bildmuster vorgegeben. Ohne CMOS-Schaltung vereinfacht sich die Herstellung drastisch. Sie beginnt auf einer Siliziumscheibe mit einer thermischen Oxidschicht zur Isolation und der Verdrahtungsebene Metall-1 und verläuft dann, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben. Da die Bindung an das Layout der CMOS-Schaltung entfällt, konnten die Elektroden sehr frei entworfen werden. Zum einen wurden Pixel mit Kantenlängen von $6\mu m$ bis $30\mu m$ mit verschiedenen Stegbreiten realisiert. Zum anderen wurden eindimensionale Strukturen mit parallelen Stegen über einem geschlossenen Spiegel produziert, die den simulierten Strukturen in Kapitel 3 entsprechen. Eine weitere Messstruktur ist im Zusammenhang mit den Messungen im nächsten Kapitel beschrieben. Ferner wurden bei den passiven Matrizen auch die Schichtdicken variiert.

Kapitel 5

Charakterisierung des neuen Mikrosystems

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, wurden im Rahmen dieser Arbeit passive und aktive MLM-Bauelemente hergestellt. Dieses Kapitel beschreibt nun die Messungen, die an den passiven Bauelementen durchgeführt wurden. Dabei zeigte sich, dass vor allem das Oberflächenprofil und die Filmdicke schwer zu erfassen sind. Die Messung der Intensitäten im Beugungsbild ist dagegen weniger aufwendig. Sie eignet sich auch für dynamische Untersuchungen. Da bei den einzelnen Messungen jeweils hohe Unsicherheiten angenommen werden müssen, führt erst die Übereinstimmung der verschiedenen Messungen und der Simulationsrechnungen insgesamt zu einem gutem Verständnis des Verhaltens.

5.1 Messungen des Oberflächenprofils

Die Messung von Deformationsprofilen an MLM-Bauelementen ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei Deformationsamplituden von 100nm bis über 1000nm muss die Höhenauflösung besser als 20nm sein, um Profilverläufe zu bestimmen. Die laterale Auflösung muss bei Pixelgrößen ab $16\mu m$ besser als $2\mu m$ sein, da über jedem Pixel eine volle Deformationsperiode zu vermessen ist. Die Messung muss berührungslos erfolgen, da die Flüssigkeitsoberfläche andernfalls durch die Berührung verformt würde. Tastschnittgeräte und Atomic-Force-Mikroskope (AFM) sind also nicht geeignet. Die Deformationen treten nur während der Ansteuerung mit starken elektrischen Feldern auf. Es muss also an einem intakten Chip gemessen werden, der mit Spannung versorgt wird. Die Messung darf nicht durch die inhomogenen elektrischen Felder verfälscht werden, wie dies bei einer AFM-Messung auch im berührungslosen Messmodus zu erwarten wäre. Und schließlich ist gerade während der Entwicklungsphase eine zeitliche Veränderung der Deformationsprofile über etliche Sekunden hinweg auch bei konstanter Ansteuerung nicht auszuschließen. Die Messzeit darf dementsprechend nur wenige Sekunden lang sein.

Da das MLM-Bauelement für die Lichtmodulation entwickelt wurde, bieten sich optische Messverfahren an. Sie erlauben höchste Genauigkeiten bei simultaner Aufnahme ganzer Bildfelder, ohne einen Einfluss auf die Probe zu nehmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Messungen der Deformationsprofile des Flüssigkeitsfilms ein Oberflächenmesssystem der Firma WYKO vom Typ NT-2000 [92] eingesetzt. Es handelt sich bei diesem Gerät um ein Zweistrahl-Mikroskopinterferometer, das nach zwei Methoden Oberflächenprofile vermessen kann: scannende Weißlichtinterferometrie (VSI) [93] und Phase-Shift-Interferometrie (PSI) [94]. Beide Verfahren erlauben die berührungs- und zerstörungsfreie Messung von reflektierenden Oberflächentopographien mit hoher Auflösung bei kurzen Messzeiten von wenigen Sekunden. Bei fünfzigfacher Vergrößerung erreicht das Messgerät eine laterale Ortsauflösung von circa 0, $7\mu m$, die durch die optische Auflösung des Mikroskops gegeben ist. Die vertikale Auflösung liegt im Weißlichtbetrieb unter 5nm, beim Phase-Shift-Verfahren unter 1nm.

Da das System bei der Auswertung der Interferenzbilder keinen dünnen, transparenten Film auf der Probenoberfläche berücksichtigt, entsprechen die ermittelten Oberflächenprofile nicht dem Profil der Flüssigkeitsoberfläche, sondern können je nach Einstellung der Parameter für die Messung verschiedene Bedeutungen haben. Die gemessenen Profile und die Interferenzbilder können jedoch mit Kenntnis des Messverfahrens interpretiert werden. Deshalb sei zunächst das Messprinzip näher erläutert, um anschließend die Vorgehensweise verständlich machen zu können.

Das Prinzip des Zweistrahlinterferometers

Das Messprinzip beruht auf dem optischen Vergleich der zu messenden Oberfläche mit einer hochplanaren Referenzfläche durch Überlagerung der reflektierten Wellenfronten beider Flächen. Es ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Probe liegt im Fokus des Mikroskops, aus dessen Beleuchtungsstrahlengang ein Teil des Auflichts ausgekoppelt wird und auf die Referenzfläche fällt, die den gleichen Abstand zum Strahlteiler hat wie die Fokusebene des Mikroskops. Die reflektierten Wellenfronten von der Probe und von der Referenz werden vom Strahlteiler wieder vereinigt, so dass sie in der Bildebene, in der eine Schwarz/Weiß-CCD-Kamera platziert ist, ein Interferenzmuster erzeugen. Diejenigen Stellen der Probe, deren Abstand zum Strahlteiler exakt mit dem Abstand des Strahlteilers zur Referenzfläche übereinstimmen, erzeugen konstruktive Interferenz und werden auf der Kamera mit maximaler Intensität abgebildet. Steigt die Oberfläche von diesem Punkt aus an oder fällt sie ab, nimmt die Intensität in der Abbildung ab und erreicht ein Minimum, wo die beiden beschriebenen Abstände sich gerade um eine viertel Wellenlänge unterscheiden und destruktive Interferenz vorherrscht. Diese Intensitätsmodulation durch die Oberflächentopographie setzt sich mit der Periode einer halben Wellenlänge nach oben und unten fort. Linien konstanter Helligkeit stellen dabei Höhenlinien dar. Eine ebene Probe zeigt unter dem Interferometer demnach eine konstante Helligkeit auf der gesamten Fläche. Wird sie dagegen leicht verkippt, entstehen äquidistante, parallele Streifen.



Abbildung 5.1: Entstehung der Interferenzstreifen am Michelson-Interferometer (Phase-Shift-Verfahren, PSI)

Phase-Shift-Verfahren

Beim Phase-Shift-Verfahren (Abbildung 5.1) wird das Interferenzstreifenbild nun durch eine Integration ausgewertet, die auf eine Linienverfolgung hinausläuft. Da die Probe monochromatisch beleuchtet wird, ist der vertikale Abstand zwischen zwei Interferenzstreifen genau bekannt. Er beträgt eine halbe Wellenlänge. Die Richtung der Oberflächendeformation ist aus einem einzelnen Bild jedoch nicht bestimmbar. Deshalb werden beim WYKO NT-2000 sechs Interferenzmuster aufgenommen, während die Probe schrittweise über eine viertel Wellenlänge in z-Richtung bewegt wird. Durch die Redundanz in diesen Bildern können auch Reflektivitätsunterschiede der Probenoberfläche berücksichtigt werden, und die hohe Messgenauigkeit wird dadurch möglich. Stetige Oberflächenprofile lassen sich eindeutig bestimmen, solange sie nicht über die Kohärenzlänge hinausragen. An Stufen gibt es dagegen Mehrdeutigkeiten, die Offsets von einem Vielfachen der halben Wellenlänge produzieren, wenn die Stufenhöhe den Bereich $\pm \lambda/4$ übersteigt. Die eingebauten Interferenzfilter des WYKO NT-2000 stellen Messwellenlängen von $\lambda = 605nm$ und $\lambda = 628nm$ zur Verfügung.

Scannende Weißlichtinterferometrie

Im Gegensatz zum Phase-Shift-Verfahren erfolgt die Beleuchtung der Probe bei der scannenden Weißlichtinterferometrie (VSI) mit dem kontinuierlichen Spektrum einer Halogenlampe. Nur noch wenn die beiden Abstände der Probenoberfläche und der Referenzfläche zum Strahlteiler exakt übereinstimmen, ergibt sich konstruktive Interferenz für alle Wellenlängen. Die nächsten destruktiven Interferenzen im Abstand von $\lambda/4$ fallen für die verschiedenen Wellenlängen räumlich jedoch bereits ein wenig auseinander. Mit zunehmender Entfernung der Probenoberfläche von der Fokusebene verschmieren die Interferenzstreifen, und nur in einem schmalen Höhenbereich von circa $\pm 2\mu m$ um den Fokus tritt noch Intensitätsmodulation auf (Abbildung 5.2). Der vertikale Abstand der Interferenzstreifen ist nur grob bestimmt, da die Spektralverteilung der Beleuchtung nicht exakt kontrolliert wird.

Die Probe wird nun in z-Richtung gescannt, so dass alle Bereiche der Probenoberfläche einmal durch die Fokusebene treten. Während des Scans werden die Interferenzmuster aufgezeichnet, und die z-Position wird mit einem Sensor verfolgt. Jeder Bildpunkt der Kamera registriert dabei einen Intensitätsverlauf, wie er links in Abbildung 5.2 dargestellt ist. Die stärkste Intensitätsmodulation an einer bestimmten Stelle im Interferenzbild tritt nun genau in dem Moment auf, in dem der abgebildete Fleck der Probenoberfläche die Fokusebene passiert. Aus diesen Informationen wird das Oberflächenprofil zusammengesetzt, ohne dass die Bildpunkte in Korrelation zueinander gesetzt werden. Auch Profile mit hohen Stufen werden dabei richtig erkannt. Durch Beugungseffekte enthalten VSI-Profile jedoch unvermeidbare Überschwinger an allen Kanten. Bei sehr kleinen Oberflächenelementen, wie zum Beispiel bei schmalen Stegen um etwa $1\mu m$, ist eine Höhenbestimmung des Oberflächenniveaus deshalb problematisch.



Abbildung 5.2: Entstehung der Interferenzstreifen bei der scannenden Weißlichtinterferometrie (VSI)

Profilmessungen mit dem Zweistrahlinterferometer

Während die Algorithmen des WYKO NT-2000 von einer einzelnen reflektierenden Oberfläche ausgehen, ist die spiegelnde Elektrodenstruktur des MLM-Bauelementes von einem transparenten Flüssigkeitsfilm bedeckt, an dessen deformierbarer Oberfläche weitere, wenn auch schwache Reflexionen auftreten. Diese zusätzliche Interferenz an einem dünnen Film, die in den Auswertealgorithmen nicht berücksichtigt wird, führt zu Messfehlern. Weitere Probleme ergeben sich aus der großen Stufenhöhe zwischen den Stegen der Gitterelektrode und den Spiegelelektroden. Der Phase-Shift-Modus erzeugt hier willkürlich kleinere Stufen, so dass weder das Profil über den Stegen ausgewertet werden darf, noch ein Pixel-zu-Pixel-Vergleich möglich ist. Um trotzdem Aussagen über die Form des Deformationsprofils zu gewinnen, wurden spezielle Elektrodenstrukturen entworfen, an denen die Interferenzbilder des WYKO NT-2000 direkt ausgewertet werden konnten, denn die äquivalente Spiegelabsenkung Δz_{eq} (Gleichung 2.3) lässt sich im Interferenzbild gut sichtbar machen. Über einer durchgehenden Spiegelfläche wurde ein Kammgitter anstelle des Kreuzgitters realisiert. Die entstandene Struktur entspricht der Geometrie, die bei den zweidimensionalen Simulationsrechnungen in Kapitel 3 untersucht wurde. Unter dem Interferenz-Mikroskop wird die Struktur nun so verkippt, dass die Interferenzstreifen senkrecht zu den Stegen stehen und das Deformationsprofil die Interferenzstreifen in Richtung entlang der Stege verformt. Da sich das Profil in dieser Richtung nicht ändert, zeichnen die Interferenzstreifen die Deformationen unverzerrt nach. Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Interferenzstreifenbild, das bei monochromatischer Beleuchtung mit $\lambda = 605nm$ an $2\mu m$ breiten Kämmen im $20\mu m$ -Raster aufgenommen wurde. In der Flüssigkeit mit $n_\ell = 1, 4$ beträgt der vertikale Interferenzstreifensabstand 216nm. Das Deformationsprofil, das sich bei



Abbildung 5.3: Interferenzstreifenbild an einer passiven Matrix mit 20µm-Kammstruktur. Die äquivalente Spiegelabsenkung eines Deformationsprofils aus den Simulationsrechnungen ist maßstabsgerecht eingezeichnet.

der Ansteuerspannung von $U_{sp} = 30V$ einstellt, wurde für diese Elektrodengeometrie simuliert und auf die *äquivalente Spiegelabsenkung* umgerechnet. Das Ergebnis ist maßstabsgerecht im Interferenzstreifenbild eingezeichnet. Die Form des simulierten Profils stimmt mit der Form der Interferenzstreifen gut überein und bestätigt damit das Modell zur Berechnung des Deformationsprofils qualitativ wie quantitativ.

Im Gegensatz zum Phase-Shift-Modus werden beim Weißlicht-Modus die Höhenbeziehungen zwischen allen gültigen Bildpunkten korrekt wiedergegeben. Ein Vergleich von Pixel zu Pixel ist möglich. Allerdings gibt es nur über der Mitte der Pixelelektroden einen Bereich, in dem das Phasenprofil des MLM-Modulators präzise gemessen wird. Das Messergebnis gibt auch im VSI-Modus die äquivalente Spiegelabsenkung Δz_{eq} an, die am angesteuerten Pixel in der Pixelmitte ein Maximum hat. Das Minimum von Δz_{eq} liegt am Pixelrand, über den Gitterstegen, wo jedoch die Überschwinger wegen der Kanten dominieren. Die Profilhöhe lässt sich hier reproduzierbar abschätzen, bleibt aber mit einer großen Unsicherheit behaftet. Die Deformationsamplitude eines einzelnen Pixels kann also nur grob bestimmt werden und Vergleiche zwischen verschiedenen Messungen haben nur begrenzte Aussagekraft. Der Pixel-zu-Pixel-Vergleich innerhalb eines Profils lässt sich dagegen auswerten, wenn die verglichenen Pixel entweder unterschiedliche Abmessungen haben oder wenn sie unterschiedlich angesteuert werden. Die Maxima der äquivalenten Spiegelabsenkung liegen dann auf unterschiedlichen Niveaus, und die Differenz lässt sich reproduzierbar und genau vermessen.



Abbildung 5.4: Bei $U_{sp} = 20V$ gemessenes Oberflächenprofil an einer speziellen Struktur mit wachsender Pixelgröße. Die Auswertung erfolgt in Abschnitt 5.1

In Abbildung 5.4 ist das Ergebnis einer Profilmessung im Weißlicht-Betrieb wiedergegeben. Die Messung wurde an einer speziellen Messstruktur mit einem Kreuzgitter durchgeführt, bei welcher der Abstand der $b = 2\mu m$ breiten Stege in x- und y-Richtung von $d = 5\mu m$ bis 500 μm kontinuierlich zunimmt. Die Gitterelektrode besteht aus $t_{ge} = 300nm$ Aluminium auf einer $t_{ox} = 800nm$ dicken Oxid-Isolation. In dieser Struktur existiert eine diagonale Reihe quadratischer Pixel mit wachsender Kantenlänge. Bei verschiedenen Spannungen zwischen 5V und 30V wurden Profile aufgenommen und entlang einer diagonalen Linie durch die Pixelmitten ausgewertet. Die Profilschnitte befinden sich im Diagramm 5.5, in dem die Stege durch senkrechte Gitterlinien gekennzeichnet sind. Da nicht das Oberflächenprofil Δz des Flüssigkeits-



Abbildung 5.5: Ausgerichtete diagonale Profilschnitte durch die quadratischen Pixel der eingetragenen Kantenlängen

films gemessen wird, sondern die äquivalente Spiegelabsenkung Δz_{eq} , ergibt sich in der Pixelmitte, wo der Flüssigkeitsfilm am dünnsten wird, ein Maximum. Das Deformationsprofil ergibt sich durch Division durch die Differenz der Brechungsindizes der Flüssigkeit ($n_{\ell} = 1, 4$) und von Luft. Eine gemessene Amplitude von $\hat{z}_{eq} = 200nm$ tritt also bei einer Deformationsamplitude von $\hat{z} = (1 - n_{\ell})\hat{z}_{eq} = 500nm$ auf. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird jedoch der Einfachheit halber von der Deformationsamplitude \hat{z}_{eq} gesprochen, wenn von den Messergebnissen die Rede ist.

Zur Auswertung der Profilschnitte wurde jeweils an den $b=2\mu m$ breiten Stegen über einen etwa $4\mu m$ breiten Abschnitt gemittelt und der Wert als lokales Minimum angenommen. Dabei ist davon auszugehen, dass der tatsächliche Wert um einige 10nm tiefer liegt und dass sich diese Differenz systematisch mit der Spannung und mit der Pixelweite ändert. In der Pixelmitte wurde das Maximum auf gleiche Weise durch Mitteln über ein Dreißigstel der Pixelweite bestimmt. Dabei treten nur kleine Messfehler auf, sobald die Pixel größer als $d = 50\mu m$ sind. Kleinere Pixel haben kleinere Deformationen \hat{z}_{eq} , so dass die Unsicherheit im Minimum von einigen 10nm einen größeren relativen Fehler zur Folge hat. Die Profile wurden im Diagramm 5.5 so ausgerichtet, dass ihre Minima bei großen Pixelweiten über $d = 80\mu m$ auf der Nulllinie liegen. Zu kleineren Pixelgrößen hin senkt sich die Linie durch die ermittelten Minima um bis zu 200nm, was bedeutet, dass der Flüssigkeitsfilm dort bis zu 500nm dicker wird. Dies ist einzusehen, da die mittlere Kraft auf die Oberfläche bei dichter stehenden Elektrodenstegen größer ist, und weil auf diesen Bauelementen für spezielle Untersuchungen neben dem Rand der Elektrodenstruktur Flüssigkeit zur Verfügung steht, die leicht in das elektrische Feld über den Pixeln fließen kann.

Die Deformationsamplitude \hat{z}_{eq} der äquivalenten Spiegelabsenkung ergibt sich aus der Differenz der Profilhöhe im Maximum und dem Mittel der benachbarten Minima. Wie erläutert, wurde der Wert allerdings einige 10nm zu klein bestimmt. \hat{z}_{eq} ist in Abbildung 5.6a) über der Pixelweite aufgetragen. Es zeigen sich etwa lineare Verläufe, die erst bei sehr großen Deformationsamplituden abflachen, wenn das Flüssigkeitsvolumen nicht mehr ausreicht, um die Oberfläche über den Stegen weiter anzuheben und der Film über den Pixelmitten sehr dünn wird. Die Filmdicke bei nicht deformierter Flüssigkeitsoberfläche wurde mit der im folgenden Abschnitt 5.2 beschriebenen Methode zu etwa 1, 8µm bestimmt. Über der Gitterelektrode befinden sich demnach noch $h_0 = 500nm$ Flüssigkeit.

Mit den Simulationsrechnungen in Abschnitt 3.3.3 war der Einfluss der Pixelweite d auf die Deformationsamplitude \hat{z} anhand des theoretischen Modells untersucht worden. Ab $d = 10 \mu m$ hatte sich ein linearer Zusammenhang ergeben, der sich auch oberhalb der größten simulierten Pixelweiten von $d = 60 \mu m$ fortsetzt. Die simulierten Kennlinien wurden auf die äquivalente Spiegelabsenkung Δz_{eq} umgerechnet und sind in den Abbildungen 5.6b) und c) mit den Messergebnissen verglichen. Extrapoliert man die Ergebnisse der Simulationsrechnungen, so verlaufen die Geraden bei großen Pixelweiten nur wenig unterhalb der Messergebnisse, was auf einen etwas dünneren Flüssigkeitsfilm mit $h_0 \approx 450 nm$ schließen lässt. Da sich über den kleinen Pixeln unter $60 \mu m$ bei Ansteuerung zusätzliche Flüssigkeit sammelt, ist der Flüssigkeitsfilm bis zu 500 nm dicker. Die Deformationsamplitude liegt deshalb deutlich unter den Werten, welche die Simulationsrechnungen für $h_0 = 500 nm$ liefern.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Messergebnisse die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zur Abhängigkeit der Deformationsamplitude von der Pixelweite bestätigen.



Abbildung 5.6: Amplitude der äquivalenten Spiegelabsenkung in Abhängigkeit von der Pixelweite a) Messergebnisse bei verschiedenen Spannungen b) Vergleich der Messung mit der Simulation bei hohen und c) niedrigen Spannungen

5.2 Die Filmdicke

Die Filmdicke hat einen sehr starken Einfluss auf die Deformationsamplitude und einen starken Einfluss auf die Ansteuerspannung. Ohne ihre Kenntnis lassen sich Messergebnisse, die an verschiedenen Bauelementen gewonnen wurden, kaum vergleichen. Im Rahmen dieser Arbeit stand jedoch kein Schichtdickenmessgerät zur Verfügung, mit dem die Filmdicke über dem Pixelgebiet hätte präzise bestimmt werden können. Aus anderen Messungen kann jedoch auf die Schichtdicke geschlossen werden.

Eine erste Abschätzung liefert die dosierte Flüssigkeitsmenge im Verhältnis zur Chipfläche. Bei der Beschichtung von Hand mit einer Mikroliterspritze zeigten passive Bauelemente mit $(5, 6mm)^2$ Chipfläche guten Kontrast bei Ansteuerspannungen unter 40V, wenn etwa $0, 03\mu\ell$ Silikonöl aufgetragen wurden. Unter der Annahme, dass sich die Flüssigkeit gleichmäßig verteilt, ergibt sich eine Filmdicke von 960nm über den Spiegelelektroden. Die Bauelemente, an denen diese Untersuchungen durchgeführt wurden, hatten 500nm bis 800nm hohe Gitterelektroden, so dass sich ein typischer Füllstand h_0 von wenigen 100nm über der Gitterelektrode angeben ließ. Die Beschichtung von Hand ist allerdings schlecht reproduzierbar, weil die Kanüle jedes Mal anders aufgesetzt wird. Ein Fehler von -50% / +100% ist bei der abgeschätzten Filmdicke deshalb nicht auszuschließen.

Bestätigt wurde die Größenordnung mit einem Schichtdickenmessgerät vom Typ Nanospec AFT200. Der minimale Messfleck, in dem die transparenten Schichten homogen sein müssen, ist mit einem Durchmesser von mindestens $100\mu m$ deutlich größer als die Spiegelelektrode eines Pixels. Außerdem ließ sich die Dicke einer transparenten Schicht nicht auf spiegelnden Oberflächen bestimmen. Messungen an unstrukturierten Siliziumscheiben mit Oxidoberfläche lieferten Werte um 800nm. Sind Elektrodenstrukturen vorhanden, ergeben sich jedoch andere Verhältnisse. Selbst 1429nm hohe Elektroden werden von der Flüssigkeit vollständig bedeckt, was sich dadurch zeigt, dass die Flüssigkeitsoberfläche durch die Elektroden nicht deformiert wird.

Gute Abschätzungen der Filmdicke lassen sich mit dem WYKO NT-2000 im VSI-Modus machen. Ist die plane Oberfläche einer Probe leicht verkippt, wandert das schmale Interferenzstreifenband während des Scans über die Oberfläche. Am nicht angesteuerten MLM-Bauelement laufen zuerst schwache Interferenzstreifen über die Flüssigkeitsoberfläche, dann laufen intensive Streifen über die Spiegelelektroden. Sofern der Film über 1, $2\mu m$ dick ist, lassen sich die beiden Gruppen gut unterscheiden. Das WYKO NT-2000 bietet nun eine Option, mit welcher der Scan abgebrochen werden kann, sobald ein bestimmter Prozentsatz der Bildpunkte erkannt wurde. Die Interferenzstreifen bleiben dann reproduzierbar an einer bestimmten Stelle im Bild stehen. Zusätzlich kann ein Post-Scan eingestellt werden, um den der Scan über die Abbruchbedingung weiterläuft. Wird hier die Filmdicke eingestellt, bleiben die intensiven Interferenzstreifen genau an der Stelle stehen, an der ohne Post-Scan die blassen Interferenzstreifen stoppen. Unterschiede von $0, 1\mu m$ in der Post-Scan-Länge sind deutlich unterscheidbar, und die Messung ist mit dieser Genauigkeit auch reproduzierbar. Für Bauelemente mit guten Kennwerten für Kontrast und Ansteuerspannung liefert diese Messmethode typische Flüssigkeitsstände von $h_0 = 300 nm \dots 500 nm$ über der Gitterelektrode. Bauelemente mit zu dickem Film benötigen hohe Ansteuerspannungen, sie haben inhomogene Filmdicken und zeigen eine starke Flüssigkeitsumverteilung von nicht angesteuerten Pixeln in angesteuerte Bereiche. Zu dünne Filme werden bereits von der Gitterelektrode deformiert und reagieren bei Ansteuerung erheblich langsamer. Die Helligkeitsverteilung im Beugungsbild verändert sich dann nur noch geringfügig mit einer Zeitkonstante bis zu einer halben Sekunde.

5.3 Optische Messungen im Beugungsbild

In den Abschnitten 3.4 bis 3.6 wurde das Beugungsbild des MLM-Bauelementes simuliert. Dabei wurde der senkrechte Einfall einer ebenen Welle auf ein unendlich ausgedehntes Array gleichförmig angesteuerter Pixel angenommen. Da die Berechnung zweidimensional für ein ebenes Problem erfolgte, entsprachen die Elektroden einem Spiegel mit darüberliegender Kammelektrode, wie sie bei der Messung in Abbildung 5.3 verwendet wurde. Da sich Intensitätsverteilungen in Beugungsbildern messtechnisch relativ leicht aufnehmen lassen, bieten sie eine gute Möglichkeit, die wichtigsten Kenndaten eines Bauelementes zu bestimmen. Die interessierenden Größen sind dabei der Kontrast der nullten und der ersten Ordnung, sowie der jeweilige Bereich der Ansteuerspannung, in dem alle erreichbaren Grauwerte eingestellt werden können. Mit Hilfe von Beugungsmessungen wurden außerdem Bauelemente kontrolliert, die über längere Zeit mit aufgetragenem Flüssigkeitsfilm und ohne Deckel unter normalen atmosphärischen Bedingungen gelagert worden waren. Es zeigt sich eine Funktionsfähigkeit über 2–3 Monate, bis die Flüssigkeitsfilme zu dünn wurden.

Bei den durchgeführten Messungen an passiven MLM-Bauelementen wurde ein Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 543nm$ und einer Leistung von 5mW als Beleuchtungsquelle verwendet. Der Spot ist klein genug, um die Lichtintensität auf Pixelarrays bis herab zu $1mm \times 1mm$ zu konzentrieren, was sich in scharfen Beugungsbildern äußert. Der Laserstrahl fiel nahezu senkrecht auf die Modulatorflächen, so dass die nullte Ordnung und einige der höheren Ordnungen dicht neben dem Laser mit einem Schirm zur Betrachtung aufgefangen werden konnten. Abbildung 5.7 zeigt Fotografien von Beugungsbildern, die an einem Kamm- und einem Kreuzgitter entstanden. Zur Aufnahme der Beugungsverläufe wurde ein Photo-



Abbildung 5.7: Beugungsbilder von nicht angesteuerten MLM-Bauelement a) mit Kammgitterelektrode und b) mit Kreuzgitterelektrode. Bei gleichförmiger Ansteuerung aller Pixel wird die Intensität nur unter den Beugungsordnungen umverteilt.

sensor so platziert, dass die Lichtintensität immer genau in einer Beugungsordnung bestimmt wurde. Das Messsignal wurde verstärkt und an den v-Kanal eines xy-Schreibers geleitet. Es ist direkt proportional zur Intensität und wird auf die Ausgangsintensität des Lasers normiert. An den x-Kanal des Schreibers wurde eine Spannungsrampe von $0 \dots 57V$ mit einem Anstieg von 25V/s gelegt, welche gleichzeitig alle Modulatorpixel mit der Ansteuerspannung versorgte. Abbildung 5.8 zeigt die gemessenen Beugungsverläufe eines MLM-Bauelementes mit $3, 2\mu m$ breiten und 1100nm hohen Kammgitterstegen im $8\mu m$ -Raster, wobei jeder zweite Steg auf Spiegelpotential liegt, so dass sich ein $16\mu m$ -Raster von Gegenelektroden ergibt. Optisch wirkt weiterhin das $8\mu m$ -Raster, das Licht nur in die geraden Ordnungen, nicht aber in die ungeraden Ordnungen beugt. Diese erhalten nur Intensität, wenn sich der Flüssigkeitsfilm über dem elektrischen $16 \mu m$ -Raster deformiert. Der Vergleich mit den simulierten Beugungsverläufen in Abbildung 3.19 zeigt grundsätzlich die gleiche Charakteristik. Wie erwartet, ist die Spannungsabhängigkeit bei hohen Ansteuerspannungen geringer als von den Simulationsrechnungen vorhergesagt, weil die Deformations-Spannungs-Kennlinie in diesem Bereich nicht mehr quadratisch ansteigt. Die Lichtausbeute der ersten



Abbildung 5.8: Beugungsverläufe eines passiven MLM-Bauelementes mit 8µm-Kammgitter. Jeder zweite Steg liegt auf Spiegelpotenzial.

Ordnung liegt bei nur 31,3%, weil die Reflektivität der gesputterten Aluminiumoberfläche nicht ideal ist, weil die Stege einen großen Anteil der Pixelfläche einnehmen und weil die Stufenhöhe in etwa auf destruktive Interferenz ausgelegt ist $(13, 3\frac{\lambda}{4n_{\ell}})$. Diese Stufenhöhe kann auch für den starken Abfall der Intensität der nullten Ordnung bereits ab $U_{sp} = 7V$ verantwortlich gemacht werden. Die minimale Intensität wird bei $U_{sp} = 38V$ erreicht und offenbart einen guten Kontrast von 43.5:1, der deutlich über den Erwartungen liegt. Bei einer negativen Gittervorspannung $U_{ge} = -7V$ lässt sich dieser Kontrast also mit Pixelspannungen im Bereich $U_{sp} = 0V \dots 31V$ nutzen.

Die erste Beugungsordnung erreicht ihr Maximum bei $U_{sp} = 36V$. Auch bei ihr kann eine Gittervorspannung $U_{ge} = -7V$ gewählt werden. Da die ungeraden Ordnungen aufgrund der Gitterstruktur mit der halben Rasterweite völlig dunkel sind, wenn der Flüssigkeitsfilm nicht deformiert ist, wird der Kontrast nur durch Streulicht begrenzt. Es wurde 80:1 gemessen. Für kontrastreiche Dunkel-Feld-Abbildungen, bei denen eine geringe Lichtausbeute akzeptiert werden kann, bietet es sich also an, eine Gitterelektrode mit der halben Pixelperiode zu verwenden, wobei jeder zweite Gittersteg auf Spiegelpotenzial liegt, damit die Flüssigkeitsdeformationen weiterhin mit der Pixelperiode auftreten. Auf diese Weise sind die Beugungsordnungen der Flüssigkeitsdeformationen und des Elektrodengitters teilweise räumlich getrennt.

Da die MLM-Bauelemente bei sämtlichen Beugungsmessungen senkrecht betrieben wurden, lässt sich feststellen, dass dünne Flüssigkeitsfilme von der Gravitation praktisch nicht beeinflusst werden. Aufgrund von Kapillarkräften und Kohäsion bleibt der Film auf der Chip-Oberfläche.

5.4 Homogenität

Bei sehr dicken Flüssigkeitsfilmen wurde an MLM-Bauelementen eine starke Inhomogenität der Filmdicke festgestellt. Sie äußert sich im Beugungsbild durch Verschmieren der normalerweise scharfen Beugungsordnungen. Das Intensitätsverhältnis des Streulichts um die nullte Ordnung und der nullten Ordnung selbst kann als Maß für die Inhomogenität herangezogen werden. Abbildung 5.9 zeigt das Ergebnis einer Messung, bei der die Intensität der nullten Ordnung sowie ein mit dem Faktor 30 verstärkter Ausschnitt aus dem Streulicht bei zunehmender Ansteuerspannung aufgezeichnet wurden. Der Verlauf der nullten Ordnung, die bei Ansteuerung nur wenig schwächer wird, weist auf einen erheblich zu dicken Flüssigkeitsfilm hin. Das Streulicht zeigt schon bei mittleren Spannungen einen stärkeren Abfall als die nullte Ordnung. Ein gleichmäßiges elektrisches Feld über dem Pixelgebiet erhöht also die Homogenität des Flüssigkeitsfilms. Wird während des Betriebes Flüssigkeit auf der Modulatorfläche umverteilt, so ist es denkbar, Refresh-Zyklen einzurichten oder einen homogenisierenden Stand-by-Modus. Entsprechend lässt sich der Benetzungsprozess durch Anlegen einer Ansteuerspannung beschleunigen.



Abbildung 5.9: Beugungsverlauf der nullten Ordnung und gestreute Intensität in deren Umgebung

5.5 Dynamische Messungen

Das zeitliche Verhalten der in die verschiedenen Ordnungen gebeugten Intensität wird durch die hydrodynamischen Vorgänge beim Umverteilen der Aktorflüssigkeit bestimmt. Dabei bewirkt die Viskosität der Flüssigkeit eine Dämpfung. Unter anderem aus diesem Grunde war eines der niederviskosesten Silikonöle als Aktorflüssigkeit gewählt worden. Die Querschnittsfläche, durch welche die umzuverteilende Flüssigkeit fließen muss, darf nicht zu klein werden. Bauelemente mit zu dünnem Flüssigkeitsfilm arbeiten deshalb erheblich langsamer als korrekt beschichtete. Schließlich ist auch die Entfernung, über die Flüssigkeit umverteilt wird, von Bedeutung. Zum Aufbau der Pixeldeformation braucht die Flüssigkeit nur von der Pixelmitte an den Rand zu fließen. Dies geschieht innerhalb von Millisekunden. Tritt dagegen Übersprechen durch Flüssigkeitstransport über mehrere Pixel auf, werden die Fließwege sehr lang. Hier wurden Zeitkonstanten bis zu über 1/3s beobachtet.

Im Beugungsbild lassen sich neben der quasistatischen Aufnahme von Beugungsverläufen auch dynamische Messungen mit schnell veränderlichen Ansteuersignalen durchführen. Abbildung 5.10 zeigt die Antwort der nullten Beugungsordnung, wenn eine passive Matrix mit einem Rechtecksignal angesteuert wird. Ihre Intensität wird dabei alle 8ms zwischen dem Maximum bei 0V und dem Minimum bei 44V geschaltet. Der Aufbau der Deformati-



Abbildung 5.10: Zeitlicher Intensitätsverlauf der nullten Ordnung bei Ansteuerung mit einer Rechteckfunktion

on benötigt demnach 5ms vom Anlegen der Pixelspannung (t = 8ms), bis die nullte Ordnung auf 10% ihrer maximalen Intensität gefallen ist. Wird die Spannung abgeschaltet (t = 0ms), geht die Deformation innerhalb von 2,6ms soweit zurück, dass bereits wieder 90% in die nullte Ordnung gelangen. Die maximale Bildwiederholfreqenz kann demnach mit 200Hz angegeben werden. Diese Schaltgeschwindigkeiten wurden von sämtlichen passiven Bauelementen eingehalten, die einen Kontrast von mindestens 1:10 in der nullten Ordnung erreichen. Bauelemente, die aufgrund zu geringer Filmdicke langsamer reagierten, erzielten auch nur noch geringe Beugungseffizienzen.



Abbildung 5.11: Zeitlicher Intensitätsverlauf der nullten Ordnung bei Ansteuerung mit einer Dreiecksfunktion

Während die Spannung bei der Aufnahme der Beugungsverläufe in Abschnitt 5.3 nur mit 20V/s erhöht wurde, zeigt Abbildung 5.11 anhand der nullten Ordnung, dass die Intensität im Analogbetrieb auch einem Anstieg von 1400V/s folgen kann.

5.6 Demonstratoren

Wie in Kapitel 4 berichtet, wurden sowohl passive als auch aktive MLM-Bauelemente hergestellt. Beide Sorten wurden verwendet, um die Funktion des MLM-Prinzips nachzuweisen.

Zum Nachweis der Eignung des MLM-Bauelementes für vergrößernde Bildprojektionen wurden passive Matrizen mit einem fest verdrahteten Bildmuster hergestellt. Sie wurden in einen einfachen Projektionsaufbau eingesetzt, der mit Schräglicht-Beleuchtung arbeitet und jeweils eine Linse im Beleuchtungs- und im Abbildungsstrahlengang hat. Der Aufbau ist in Abbildung 5.12 skizziert. Eine Halogenlampe mit Kondensorlinse beleuchtet die Modulatorfläche unter einem Winkel, der möglichst senkrechten Lichteinfall ermöglicht, ohne dass dabei der Beleuchtungs- und der Abbildungsstrahlengang gegenseitig durch Abschattung stören. Die Abbildungslinse ist so platziert, dass die Modulatoroberfläche mit dem Licht aus der nullten Ordnung auf dem Schirm abgebildet wird. In deren Fokusebene liegt bildseitig eine Irisblende mit dem Brennpunkt im Zentrum, um die höheren Beugungsordnungen zu blockieren. In Abbildung 5.13 ist der Abbildungsstrahlengang



Abbildung 5.12: Einfacher Projektionsaufbau mit Schräglicht-Beleuchtung



Abbildung 5.13: Fourier-Filterung mit einer Lochblende bei Schräglicht-Beleuchtung

für die nullte, erste und zweite Beugungsordnung bei Schräglicht-Beleuchtung dargestellt. In der Fokusebene treffen die jeweils gleichen Beugungsordnungen von der gesamten Modulatoroberfläche aufeinander, so dass sich dort das Beugungsbild ergibt, in dem der Fourierfilter platziert wird. Die Filterkanten sollen dabei mittig zwischen der nullten und den ersten Ordnungen liegen.



Abbildung 5.14: Hell-Feld-Projektion mit Weißlicht mit einem passiven MLM-Bauelement

Abbildung 5.14 gibt eine Projektion wieder, die mit einem Array aus 256×256 Pixeln erzeugt wurde. Die Pixel haben eine Kantenlänge von $20\mu m$ und $2\mu m$ breite Stege mit einer Antireflexionsschicht aus Titannitrid. Die Schichtdicken des Metalls und der Isolation für die Gitterelektrode betragen jeweils 300nm. Objekt- und Bildweite waren so gewählt, dass sich ein Vergrößerungsfaktor von $40 \times$ ergab. Die optische Achse der schrägen Beleuchtung bildete mit dem Lot der Modulatorfläche einen Winkel von 12° . Die Halogenlampe strahlt ein kontinuierliches, weißes Spektrum ab. Um bei Weißlicht-Beleuchtung dunkle Bildpunkte zu erhalten, war eine Pixelspannung von $U_{sp} = 44V$ erforderlich. Details aus weiteren Weißlichtprojektionen sind im Anhang E abgebildet.

Wie in Kapitel 4 beschrieben wurden auch aktive Bauelemente hergestellt, in die beliebige Bildmuster eingeschrieben werden können. An diesen Bauelementen wurden keine Messungen durchgeführt, jedoch konnten eingeschriebene Bilder unter einem Stereomikroskop betrachtet werden, das einen großen Objektabstand und damit eine sehr geringer numerischer Apertur hat.

Abbildung 5.15 zeigt das Chipfoto eines aktiven MLM-Bauelementes mit 256×256 Pixeln der Kantenlänge $20 \mu m$ im Betrieb. Bei dem eingeschriebenen Bild handelt es sich um den Bestückungsplan für eine Leiterplatte. In der linken Bildhälfte befinden sich die Zeilentreiber, oben rechts ist ein Teil der Spaltenansteuerung zu sehen, auf der sich während der Aufnahme ein Partikel befand. Oben rechts befindet sich der Logik-Block, der Takt- und Steuersignale generiert.



Abbildung 5.15: Chipfoto eines aktiven MLM-Bauelementes mit eingeschriebenem Bild

Abbildung 5.16 zeigt einen Ausschnitt aus dem Pixelgebiet eines Bauelementes mit $16\mu m$ großen Pixeln. Durch einen defekten Spaltentreiber ist eine Spalte nahe dem rechten Rand ständig angesprochen. Weitere Fotos von aktiven MLM-Bauelementen finden sich im Anhang F


Abbildung 5.16: Ausschnitt aus dem Pixelgebiet eines aktiven MLM-Bauelementes mit Spaltenfehler

Die Funktionsfähigkeit des MLM-Bauelements wurde damit nachgewiesen. Ein deformierbarer Flüssigkeitsfilm, der durch Elektroden auf der Oberfläche eines mikroelektronischen Bauelements angesteuert wird, kann als Flächenlichtmodulator zur Mustergeneration verwendet werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zu einem mikromechanischen Flächenlichtmodulator (FLM) mit einem deformierbaren Flüssigkeitsfilm als Aktor auf einer verspiegelten Ansteuerschaltung in CMOS-Technologie beschrieben. Diese neue Flächenlichtmodulator-Technologie wurde *moving liquid mirror* (MLM) genannt. Zur Ansteuerung stand eine CMOS-Schaltung zur Verfügung, die für andere Aktorprinzipien (VCL und CBM) entworfen worden war und die im gleichen Zeitraum, in dem diese Arbeit entstand, weiterentwickelt wurde. Für die neue Modulatortechnologie wurde eine zur Schaltung kompatible, mit Standard-CMOS-Prozessen herstellbare Elektrodenanordnung entwickelt, die den Film ansteuert und außerdem als Spiegel wirkt. Als Aktorflüssigkeit wurde ein niederviskoses Silikonöl gewählt, für das auch die Technologie zum Auftrag entwickelt wurde. Schließlich wurden Bauelemente gefertigt und mit verschiedenen Messverfahren untersucht.

Soweit bekannt, ist im Rahmen dieser Arbeit zum ersten Mal die definierte Deformation eines Ölfilms mit Ansteuerung durch eine CMOS-Schaltung gelungen, welche die elektrischen Potenziale bereitstellt.

Unter Berücksichtigung der Oberflächenspannung und der Maxwellschen Spannung wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein theoretisches Modell zur Berechnung der Beugung an dem durch den Ölfilm und die Elektrodenstrukturen sich ausbildenden Phasenprofil aufgestellt. In diesem wird aus dem elektrischen Feld an der Oberfläche die statische Deformation durch zweifache Integration über den Ort bestimmt. Aus der Flüssigkeitsdeformation lässt sich dann das Beugungsbild des MLM-Bauelementes bei Einfall einer ebenen Welle berechnen. Die Veränderungen im Beugungsbild erlauben es, die Eigenschaften eines phasenmodulierenden Flächenlichtmodulators unabhängig von der projizierenden Optik zu beschreiben.

Als Aktorflüssigkeit wurde nach Diskussion der vielfältigen Anforderungen ein niederviskoses Silikonöl gewählt, weil es die notwendigen Randbedingungen erfüllt, um einen dauerhaft stabilen Flüssigkeitsfilm auszubilden. Die Elektrodenstruktur eines entspiegelten Kreuzgitters erlaubt Füllfaktoren von 81% und mehr. Sie erzeugt günstige Feldstärkeverteilungen an der Flüssigkeitsoberfläche, die große Deformationen zur Folge haben, und sie lässt sich fast ausschließlich durch Standardprozesse einer CMOS-Technologie des FhG-IMS herstellen.

Durch zweidimensionale Simulationsrechnungen wurde das theoretische Modell für die gewählte Elektrodenanordnung numerisch ausgewertet. Das Flüssigkeitsprofil besteht demzufolge aus konkaven Kreisbögen oberhalb der Spiegelflächen, die über den Stegen durch stark gekrümmte Bereiche verbunden sind. Die Untersuchungen zeigen einen exponentiellen Einfluss der Flüssigkeitsfilmdicke auf die Deformation. Dünne Filme sind deshalb anzustreben. Auch die Gitterelektrode muss nach den Ergebnissen der Simulation flach gehalten werden, wobei vor allem das entspiegelte Elektrodenmetall möglichst dünn sein soll, während eine dickere Isolationsschicht auf die Deformation keinen wesentlichen Einfluss hat.

Bei Untersuchungen am Beugungsbild zeigte sich zum einen, dass die Struktur der Gitterelektrode auch ohne Ansteuerung des Bauelementes immer Licht in höhere Ordnungen beugt. Zum anderen zeigte sich, dass das Flüssigkeitsprofil des MLM-Bauelementes die nullte Ordnung auch theoretisch nicht vollständig unterdrücken kann. Der Kontrast lässt sich nicht wesentlich über 50:1 steigern. Die Stufenhöhe der Gitterelektrode sollte ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge in der Flüssigkeit $\frac{\lambda}{2n}$ betragen. Etwas größere Werte wirken sich günstig auf den Kontrast der nullten Ordnung aus, geringfügig kleinere Werte ergeben optimale Kontraste bis über 100:1 in der ersten Ordnung. Die maximale Ansteuerspannung für vollen Kontrast liegt bei einer zu modulierenden Lichtwellenlänge von $\lambda = 543 nm$ zwischen 30V und 40V, wobei die Gitterelektrode ohne Einbuße mit -5Vbis -10V negativ vorgespannt werden kann, um die Pegel an den Pixelelektroden entsprechend senken zu können. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass die Ansteuerspannungen für große Pixel ab $50\mu m$ unter 20V sinken, gleichzeitig aber keine Kontraste über 18:1 mehr erreicht werden können.

Zur Herstellung von MLM-Bauelementen wurde die Hochvolt-Technologie des FhG-IMS auf drei Metalllagen erweitert, so dass auch die Elektrodenstruktur mit Standard-Prozessschritten der CMOS-Technologie gefertigt wird. Abweichungen vom Standard bestehen nur insofern, dass bei den Pixelelektroden auf eine Titannitrid-Schicht verzichtet wird, um die Reflektivität nicht zu senken und dass eine plane Modulatoroberfläche erzeugt wird, indem zwei Isolationsoxide durch chemisch-mechanisches Polieren (ILD-CMP) planarisiert werden. Die Bauelemente werden in deckellosen Gehäusen aufgebaut und anschießend mit Flüssigkeit beschichtet, indem eine definierte Menge dosiert wird, die sich selbstständig über die Chipfläche ausbreitet.

Für die Messungen wurden passive MLM-Bauelemente hergestellt, bei denen die Elektroden direkt über die Gehäuseanschlüsse mit Spannung beaufschlagt werden. Interferenzoptische Profilmessungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen den Simulationsrechnungen. Messungen der Beugungsintensitäten ergaben Kontraste bis 43:1 in der nullten bzw. 80:1 in der ersten Ordnung. Die Ansteuerspannungen hierfür lagen bei 31V bzw. 29V, wenn die Gitterelektrode mit -7V vorgespannt wurde. Die Ansteuerung mit anderen Spannungen erzeugt Grauwerte. Analogbetrieb ist somit möglich. Die Zeitkonstante, mit der sich die Deformation soweit aufbaut, dass 90% der Intensität aus der nullten Ordnung herausgebeugt wird, beträgt etwa $t_{10\%} = 5ms$. Der Abbau der Deformation, bis die nullte Ordnung wieder 90% ihres Maximalwertes erreicht, dauert etwa halb so lange. Der Betrieb mit Bildwiederholfrequenzen bis 200Hz ist damit gesichert.

Schließlich wurden aktive MLM-Bauelemente hergestellt, in die beliebige Bildmuster eingeschrieben werden können. Durch ein Mikroskop wurden Aufnahmen der eingeschriebenen Bilder gemacht. Anwendungsgebiete für den MLM-Flächenlichtmodulator ergeben sich vor allem bei schnellen Direkt-Schreibern für photolithographische Verfahren und bei Projektionsdisplays verschiedenen Typs.

6.2 Ausblick

Die weiteren Arbeiten an der MLM-Technologie müssen sich damit befassen, die Flüssigkeitsverschiebung von nicht angesteuerten Pixeln zu angesteuerten Pixeln zu unterbinden. Prinzipiell muss dazu erreicht werden, dass die mittlere Maxwellsche Spannung über allen Pixeln unabhängig von ihrer Ansteuerung gleich ist. Deformationen werden dann durch eine inhomogene Verteilung der Maxwellschen Spannung hervorgerufen, während eine homogene Kräfteverteilung eine glatte Flüssigkeitsoberfläche zur Folge hat.

Während die Modulation von langwelligem Licht durch die erreichbare Deformationsamplitude begrenzt wird, muss beim Betrieb im UV-Bereich mit Transmissionsverlusten und abnehmender Photostabilität im Flüssigkeitsfilm gerechnet werden. Das verwendete Silikonöl verspricht die Anwendbarkeit bis mindestens 248*nm*. Der Nachweis ist noch zu erbringen.

Weitere Technologieentwicklungen können die optischen Eigenschaften deutlich verbessern. Stehen Abscheideprozesse mit Zieldickengenauigkeiten und Homogenitäten von besser 5nm zur Verfügung, kann die Stufenhöhe der Gitterelektrode mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen auf optimalen Kontrast ausgelegt werden. Die Lichtausbeute wird erhöht, wenn sich die Reflektivität der Pixelelektroden verbessert. Das Aufdampfen der Aluminiumstege ist vielversprechend, wenn andererseits die Kontaktlöcher sicher gefüllt werden. Hier kann eine Damascene-Technologie mit Wolfram-Plugs vor der Spiegelabscheidung Abhilfe schaffen.

Die Ansteuerspannung ließe sich etwas senken, wenn ein Öl mit höherem Brechungsindex von n = 1,7 verwendet wird. Jedoch muss in jedem Fall die Stabilität des Flüssigkeitsfilms gesichert sein. Ein erheblich stärkerer Effekt ließe sich durch die Wahl einer hochpermittiven Flüssigkeit erzielen. Jedoch scheint eine entsprechende Flüssigkeit nicht in der Lage zu sein, gleichzeitig nichtleitend, chemisch stabil und gut benetzend zu sein.

Eine für Displayanwendungen interessante und für mikromechanische Flächenlichtmodulatoren untypische Option ergibt sich durch die Verwendung eines beweglichen Flüssigkeitsfilms auf einem feststehenden Spiegel. Es ist denkbar, auf den Spiegelelektroden ein RGB-Farbfilter-Mosaik abzuscheiden. Dadurch entsteht ein farbtaugliches Mikrodisplay ohne die Verwendung dreier Modulatorbauelemente und ohne Farbfilterrad.

Anhang A

Symbolverzeichnis

ε	Dielektrizitätskonstante	S. 20
arphi	Phasenlage einer Welle	S. 18
λ	Wellenlänge	S. 18
σ_ℓ	Oberflächenspannung von Öl gegenüber Vakuum	S. 21
$\Delta \varphi(x,y)$	örtliche Phasendifferenz bezogen auf eine ebene Wellenfront	S. 18
b	Breite der Stege der Gitterelektrode	S. 46
d	Pixelweite	S. 46
Ε	elektrisches Feld	S. 20
h_0	mittlere Ölfilmdicke über der Gitterelektrode	S. 46
t_{ge}	Schichtdicke der Gitterelektrode	S. 46
n,n_0,n_ℓ	Brechungsindex (allgemein, im Vakuum, in Öl)	S. 18
p	flächenbezogene Kraft, Druck	S. 19
p_{el}	Maxwellsche Spannung	S. 20
p_{σ}	Oberflächenspannung	S. 19
r_{1}, r_{2}	Hauptkrümmungsradien der deformierten Oberfläche	S. 19
t_{ox}	Oxiddicke zwischen den Elektrodenebenen	S. 46
U_{ge}	Vorspannung der Gitterelektrode	S. 46

U_{sp}	Pixelspannung	S. 46
$\Delta z(x,y)$	örtliche Abweichung der deformierten Flüssigkeitsoberfläche ebenen, nicht ausgelenkten Lage	von der S. 18
z(x,y)	Deformationsprofil der Flüssigkeitsoberfläche	S. 25
Δz_{eq}	äquivalente Spiegelabsenkung	S. 19

Anhang B

Abkürzungsverzeichnis

AFM	atomic-force microscope	S. 85
ASIC	application specific integrated circuit	
AK10	Produktname eines niederviskosen Silikonöls der Firma Wacker	S. 32
ARC	anti-reflective coating	S. 44
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik	S. 81
CBM	cantilever beam mirror	S. 3
CCD	charge-coupled device	S. 86
CMOS	$complementary\ metal-oxide-semiconductor\ (Schaltungsgattung)$	S. 77
CMP	chemical mechanical polishing	S. 78
CRT	cathode ray tube	S. 6
DRAM	dynamic random-access memory (Schreib-Lese-Speicher)	S. 13
FEM	Finite-Elemente-Methode	S. 47
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft	S. 3
FLC	ferroelectric liquid crystal	S. 10
FLM	Flächenlichtmodulator	S. 3
HDTV	high definition television	S. 12
IC	integrated circuit	S. 76

ILD	inter layer dielectric	S. 78
IMS	Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme	S. 3
LCD	liquid crystal display	S. 8
LED	light emitting diode	S. 6
LVM	Lichtventilmatrix	S. 6
MLM	moving liquid mirror	S. 3
PGA	pin grid array	S. 81
PSI	phase-shift interferometry	S. 86
RGB	Rot-Grün-Blau	S. 110
SLM	spatial light modulator	
SRAM	static random-access memory (Schreib-Lese-Speicher)	S. 13
TFT	thin-film transistor	S. 13
USG	undotiertes Silikatglas	S. 78
UV	ultraviolettes Licht	S. 15
VCL	viscoelastic control layer	S. 3
VIS	visible light (sichtbarer Spektralbereich des Lichts)	
VSI	vertical scanning interferometry	S. 86
WOM	write-only-memory	S. 76

Anhang C

Beugungsbild des MLM-Bauelementes

In Abschnitt 2.2.1 wurde das Phasenprofil der Reflexion an einer deformierten Spiegeloberfläche bestimmt, indem nach dem Huygensschen Prinzip die Überlagerung der von der Oberfläche ausgehenden Elementarwellen berechnet wurde. Für senkrechten Einfall wurde diese Methode mit Hilfe der äquivalenten Spiegelabsenkung auf das MLM-Bauelement übertragen. Hier sollen nun auch größere Einfallswinkel korrekt behandelt werden. Außerdem werden Reflexion und Brechung an der Flüssigkeitsoberfläche berücksichtigt. Um bei der Vielzahl der Symbole in dieser Rechnung doppelte Indizes zu vermeiden, werden die Größen in der Flüssigkeit hier –anders als im Hauptteil der Arbeit– mit einem Apostroph gekennzeichnet. So ist n' beispielsweise der Brechungsindex der Flüssigkeit, während n den Brechungsindex der Atmosphäre darstellt.

Wiederum sei eine einfallende ebene Welle mit dem Wellenvektor k_{in} betrachtet, die auf die Modulatoroberfläche zuläuft. Der Einfallswinkel ist θ_{in} .

$$\underline{E}_{in} = \underline{E}_0 \ e^{i\vec{k}_{in}\cdot\vec{r}} , \qquad \text{mit} \quad \vec{k}_{in} = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \left(\begin{array}{c} -\sin\theta_{in} \\ -\cos\theta_{in} \end{array} \right)$$

Nach der Streuung an der Oberfläche \vec{r}_{of1} sind jetzt zwei Strahlenwege von Interesse. Der eine Strahl wird reflektiert und läuft dann sofort unter dem Ausfallswinkel θ_{out} in die Betrachtungsrichtung \vec{k}_{out} . Der andere dringt in den Flüssigkeitsfilm ein, wird gebrochen, bei \vec{r}_{sp} am Spiegel reflektiert und beim Austritt aus dem Flüssigkeitsfilm an der Stelle \vec{r}_{of2} ein zweites Mal gebrochen, bevor auch er in die Betrachtungsrichtung \vec{k}_{out} läuft und im unendlich entfernten Punkt mit dem ersteren Strahl interferiert. Nach der Streuung müssen immer solche Strahlen gleichzeitig betrachtet werden, welche die Stetigkeitsbedingungen der Felder an der Flüssigkeitsoberfläche erfüllen. Zu den beiden

Strahlen außerhalb der Flüssigkeit mit dem Ausfallswinkel θ_{out} gehören innerhalb der Flüssigkeit die Strahlen unter dem Brechungswinkel θ'_{out} , der nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz bestimmt wird.

$$n\,\sin\theta_{out} = n'\,\sin\theta_{out}'$$

In Abbildung C.1 sind die beschriebenen Lichtwege und Ortsvektoren zur Verdeutlichung noch einmal dargestellt.



Abbildung C.1: Streuung am MLM in der betrachteten Richtung

Das Integral über alle Beiträge, die am entfernten Ort \vec{r} interferieren ist dann

$$\underline{E}_{out}(\vec{r}) = \frac{1}{F_{of}} \iint_{F_{of}} \left[\underline{E}_{out}(\vec{r}_{of1}) e^{i\vec{k}_{out}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_{of1})} + \underline{E}_{out}(\vec{r}_{of2}) e^{i\vec{k}_{out}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_{of2})} \right] dF$$

$$\underline{E}_{out}(\vec{r}) = \frac{1}{F_{of}} \iint_{F_{of}} \underline{E}_{0} e^{i\vec{k}_{in}\cdot\vec{r}_{of1}} \cdot \left[\underline{R}_{of1} e^{i\vec{k}_{out}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_{of1})} + \underline{T}_{of1} e^{i\vec{k}'_{in}\cdot(\vec{r}_{sp}-\vec{r}_{of1})} \right] dF$$

$$\cdot \underline{R}_{sp} e^{i\vec{k}'_{out}\cdot(\vec{r}_{of2}-\vec{r}_{sp})} \cdot \underline{T}_{of2} e^{i\vec{k}_{out}\cdot(\vec{r}-\vec{r}_{of2})} \right] dF$$

$$\underline{E}_{out}(\vec{r}) = \frac{\underline{E}_{0}}{F_{of}} e^{i\vec{k}_{out}\cdot\vec{r}} \iint_{F_{of}} e^{i(\vec{k}_{in}-\vec{k}_{out})\cdot\vec{r}_{of1}} \cdot \left[\underline{R}_{of1} + \underline{T}_{of1}\cdot\underline{R}_{sp}\cdot\underline{T}_{of2} - e^{i(\vec{k}'_{out}-\vec{k}'_{out})\cdot\vec{r}_{of2}} \right] dF$$

$$\cdot e^{i(\vec{k}_{out}-\vec{k}'_{in})\cdot\vec{r}_{of1}} \cdot e^{i(\vec{k}'_{in}-\vec{k}'_{out})\cdot\vec{r}_{sp}} \cdot e^{i(\vec{k}'_{out}-\vec{k}_{out})\cdot\vec{r}_{of2}} \right] dF$$

Dabei sind \underline{R}_{of1} , \underline{T}_{of1} , \underline{R}_{sp} und \underline{T}_{of2} die Reflexions- und Transmissionsfaktoren an den durch den Index bezeichneten Stellen. Sie werden nach [95] bestimmt und hängen sowohl von der Polarisationsrichtung als auch vom untersuchten Ausfallswinkel θ_{out} ab. Nach der letzten Umformung entspricht die Form der Gleichung (2.8), welche die resultierende Feldstärke bei der Reflexion an einer Oberfläche ohne Flüssigkeitsfilm bestimmt. Die eckige Klammer entspricht dann dem lokalen Reflexionsfaktor $\underline{R}(\vec{r}_{of})$ des Spiegels einschließlich Flüssigkeitsfilm. Die normierte Intensität bestimmt sich entsprechend nach Gleichung (2.9).

Aus Abbildung C.1 lassen sich schließlich noch die auftretenden Größen ablesen.

$$\vec{k}_{in} = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \begin{pmatrix} -\sin\theta_{in} \\ -\cos\theta_{in} \end{pmatrix}, \quad \vec{k}_{out} = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \begin{pmatrix} -\sin\theta_{out} \\ \cos\theta_{out} \end{pmatrix}$$
$$\vec{k}'_{in} = \frac{2\pi n'}{\lambda} \cdot \begin{pmatrix} -\sin\theta'_{out} \\ -\cos\theta'_{out} \end{pmatrix}, \quad \vec{k}'_{out} = \frac{2\pi n'}{\lambda} \cdot \begin{pmatrix} -\sin\theta'_{out} \\ \cos\theta'_{out} \end{pmatrix}$$

und

$$\vec{r}_{sp} = \vec{r}_{of1} + [h_0 + \Delta z(\vec{r}_{of1})] \cdot \begin{pmatrix} -\tan\theta'_{out} \\ -1 \end{pmatrix}$$
$$\vec{r}_{of2} = \vec{r}_{sp} + [h_0 + \Delta z(\vec{r}_{of2})] \cdot \begin{pmatrix} -\tan\theta'_{out} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Dabei ist h_0 die mittlere Filmdicke, und $\Delta z(\vec{r}_{of1})$ und $\Delta z(\vec{r}_{of2})$ sind die Deformationen bei \vec{r}_{of1} bzw. \vec{r}_{of1} .

Anhang D

Zweifache Integration der Maxwellschen Spannung

In Abschnitt 2.2.2 wurde eine vereinfachte, eindimensionale Form (2.15) für die Differenzialgleichung (2.14) der Flüssigkeitsoberfläche hergeleitet:

$$-\sigma_{\ell} z''(x) = p_{el}(x) - p_0 \tag{D.1}$$

Die erste Integration von (D.1) liefert das folgende Ergebnis, wenn gleichzeitig durch $(-\sigma_{\ell})$ geteilt wird:

$$\int_{0}^{x} z''(\xi) d\xi = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} [p_{el}(\xi) - p_{0}] d\xi$$
$$z'(x) - z'(0) = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} p_{el}(\xi) d\xi + \frac{p_{0}}{\sigma_{\ell}} x$$
(D.2)

Nach der zweiten Integration erhält man:

$$\int_{0}^{x} [z'(\zeta) - z'(0)] d\zeta = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} \left[\int_{0}^{\zeta} p_{el}(\xi) d\xi - p_{0} \zeta \right] d\zeta$$
$$z(x) - z(0) - z'(0) x = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} \int_{0}^{\zeta} p_{el}(\xi) d\xi d\zeta + \frac{p_{0}}{2\sigma_{\ell}} x^{2} \qquad (D.3)$$

$$z(x) = -\frac{1}{\sigma_{\ell}} \int_{0}^{x} \int_{0}^{\zeta} p_{el}(\xi) d\xi d\zeta + \frac{p_0}{2\sigma_{\ell}} x^2 - z(0) - z'(0) x$$
(D.4)

In (D.4) sind sowohl der Unterdruck p_0 im Film als auch die Integrationskonstanten z'(0) und z(0) unbestimmt. Diese ergeben sich aus der konkreten Aufgabenstellung. Betrachtet man eine unendlich ausgedehnte, periodische Anordnung, so muss sich ein periodisches Deformationsprofil z(x) ergeben. Die Oberfläche muss stetig sein und kann keinen Knick enthalten, deshalb gilt bei der Periodenlänge d

$$z(d) = z(0)$$
 und $z'(d) = z'(0)$.

Mit der Stetigkeit der ersten Ableitung ergibt sich der Unterdruck p_0 aus Gleichung (D.2), weil die linke Seite bei x = d zu Null wird.

$$p_0 = \frac{1}{d} \int_0^d p_{el}(x) \, dx \tag{D.5}$$

Da Flüssigkeiten nahezu inkompressibel sind, bleibt das Volumen praktisch konstant. Es gilt also in guter Näherung

$$\frac{1}{d}\int\limits_0^d z(x)\;dx=0\;\;.$$

Setzt man (D.4) ein, ergibt sich z(0).

$$z(0) = -\frac{1}{\sigma_{\ell} d} \int_{0}^{d} \int_{0}^{x} \int_{0}^{\zeta} p_{el}(\xi) d\xi d\zeta d\xi d\zeta dx + \frac{p_0 d^2}{6\sigma_{\ell}} - \frac{z'(0) d}{2}$$
(D.6)

Im Hinblick auf die technische Realisierung ist es keine Einschränkung, nur symmetrische Pixel zu betrachten. Wird x = 0 gerade auf eine Symmetrieachse gesetzt, gewährleistet nur

$$z'(0) = 0$$
 (D.7)

eine stetige erste Ableitung.

Aus dem elektrischen Feld an der Oberfläche E_t und D_n kann nun mit (D.4), (D.5), (D.6) und (D.7) das Deformationsprofil berechnet werden.

Anhang E

Detailaufnahmen aus Weißlichtprojektionen

Dieser Abschnitt enthält weitere Aufnahmen von projizierten Bildern, die mit passiven MLM-Matrizen erzeugt wurden. Zur Projektion diente ein einfacher optischer Aufbau, der in Abschnitt 5.6 beschrieben wird.



Abbildung E.1: Bildmuster mit Linien und Flächen. Die große Schrift besteht aus zwei Pixel breiten Linien, die kleine Schrift aus einzelnen Pixeln.



Abbildung E.2: Dunkel-Feld-Projektion: Am unteren Matrixrand befindet sich ein Streifen mit nicht angesteuerten Pixeln (unterhalb der Bildmitte). Im oberen Teil werden alle Pixel angesteuert.



Abbildung E.3: Dunkel-Feld-Projektion: Jeweils 8 von 12 Pixelspalten werden angesteuert.



Abbildung E.4: Dunkel-Feld-Projektion: 2 von 12 Pixelspalten werden angesteuert.



Abbildung E.5: Dunkel-Feld-Projektion: 1 von 12 Pixelspalten werden angesteuert.



Abbildung E.6: Hell-Feld-Projektion: Flächen erreichen bei gleicher Ansteuerspannung ein satteres Schwarz als Linien.



Abbildung E.7: Hell-Feld-Projektion bei Ansteuerung anderer Elektrodengruppen. Der Grauton um das Auto entsteht durch Einschreiben eines Schachbrettmusters

Anhang F

Aufnahmen von aktiven MLM-Bauelementen

Dieser Anhang enthält weitere Aufnahmen aus dem Modulatorgebiet eines aktiven MLM-Bauelementes mit eingeschriebenen Bildmustern entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 5.6. Es handelt sich um ein Bauelement mit Pixeln der Kantenlänge $16\mu m$. Abbildung F.1 zeigt eine Detailaufnahmen aus einem Schriftzug. Abbildung F.2 zeigt ein Bild mit Linien, Flächen und



 $Abbildung \ F.1: \ Detail aufnahme \ von \ einem \ aktiven \ MLM-Bauelement \ im \ Betrieb$

rechten Winkeln, und in Abbildung F.3 wurde das gleiche Bild eingeschrieben wie in das Bauelement mit 20 μm -Pixeln in Abbildung 5.15.





Abbildung F.3: Chipfoto eines aktiven MLM-Bauelementes im Betrieb mit stark ungleichmäßiger Ausleuchtung der Modulatorfläche

Literaturverzeichnis

- R. Gerhard-Multhaupt et al., Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, Deutschland: Lichtventilprojektion mit Festkörpersteuerschichten

 Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben TK 0448/8, 1992
- [2] H. Kück, et al., Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden: New system for fast submicron laser direct writing
 - Proc. SPIE, vol. 2440 Optical/Laser Microlithography VIII, 1995
- [3] H. Kück et al., Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden: Deformable micromirror devices as phase modulating high resolution light valves — Proc. of Transducers '95 and Eurosensors IX, Stockholm, 1995, Sensors and Actuators A 54, 1996, pp. 536-541
- [4] E. Baumann, Institut für technische Physik, E.T.H., Schweiz: The Fischer large screen projection system
 — Journal of the SMPTE, 60 (1953), pp. 344–355
- [5] W.E. Glenn, General Electric Co., USA: Principles of simultaneouscolor projection television using fluid deformation
 — Journal of the SMPTE, vol. 79, Sept. 1970, pp. 788–794
- [6] C. M. Crandall, Displaytech: Spatial light modulator technology overview: Current concepts and commercially available devices
 Advanced Imaging Technologies and Commercial Applications, SPIE proceedings series, vol. 2566, San Diego, Calif., 1995, pp. 4–10
- [7] C. Chinnok: If microdisplays are the answer, what is the question?
 Information Display, 7/1999, pp. 10–14
- [8] T. Takeda et al., Muroran Institute of Technology, Japan: A spatial light modulator by using a methyl-red doped polyvinyl alcohol film
 — Nonlinear Optics, vol. 7, 1994, pp. 295–301

- [9] C.J.G. Kirkby, Plessey Research Ltd., UK:
 Organic photochromics for spatial light modulation
 IEE Proceedings, vol. 133 J, no. 1, February 1986, pp. 98–104
- [10] C. Chinnok: Microdisplays: The next big market?
 Solid State Technology, 4/1999, pp. 38–42
- [11] H. Whright et al., Displaytech, USA: Providing the missing link
 Information Display, no. 7, 1999, pp. 16–20
- [12] D. Wilkins, Boeing, USA: Projection displays in military aircraft
 Information Display, no. 8, 1999, pp. 16–18
- [13] L.J. Hornbeck, Texas Instruments: From cathode rays to digital micromirrors: A history of electronic projection display technology
 — Texas Intruments Technical Journal, vol. 15, no. 3, 1998, pp. 7–46
- [14] D.M. Robinson, Scophony Lab., London, England: The supersonic light control and its application to television with special reference to the Scophony television receiver — Proceedings of the I.R.E., vol. 27, 1939, pp. 483–486
- [15] J. Sieger, Scophony Lab., London, England: The design and development of television receivers using the Scophony optical scanning system
 Proceedings of the I.R.E., vol. 27, 1939, pp. 487–492
- [16] W.P. Bleha, Hughes JVC: Large screen projection displays
 Proc., 12th Internaltional Display Research Conference (Japan Disply '92), Hiroshima, Japan, 1992, pp. 105–108
- [17] T. Holzel, MicroOptical Corp., USA: Are head-mounted displays going anywhere? — Information Display, no. 10, 1999, pp. 16–18
- [18] J. Paufler et al., Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden, Deutschland: High throughput optical direct write lithography
 — Solid state technology 40, 1997, pp. 175–182
- [19] H. Buhre, Micronic Laser Systems, Täby, Sweden: Micronic and Fraunhofer in expanded co-operation over micro patternin development
 — Press Release, Dec 3, 1999
- [20] L.J. Hornbeck, Texas Instruments: Deformable mirror spatial light modulators

— Spatial light modulators and applications, SPIE vol. 1150, 1989, San Diego, Calif., pp. 86–102

- [21] K. Buse: Photorefractive crystals for holographic storage: what are the performance limits?
 Nonlinear Optics Conference, New York, Aug. 1998, pp. 254–256
- M. Pai et al.Cornell University, USA: Polysilicon actuated micromirror for large matrix optical cross-connects
 — MOEMS, Proc., Sep. 1999, pp. 30–34
- [23] Y. Baba: DNA analysis and diagnostics with integrated micro sensors
 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors an Actuator, Transducers, Jun. 1999, pp. 40–43
- [24] Yoshiji Suzuki et al., Hamamatsu Photonics K.K., Japan: Spatial light modulators and applications
 — International Conference on Optoelectronic Science and Engineering, Beiijing, 1994, pp. 665–668
- [25] Kurt Hess et al., Université de Neuchâtel, Schweiz: Deformable surface spatial light modulator — Optical Engineering, May 1987, Vol. 26 no. 5, May 1987, pp. 418–422
- M. Ploke et al., Zeiss Ikon AG, Stuttgart, Deutschland: Image reproducing device for visible and invisible radiation images
 US-Patent 3,001,447, Sep. 1061
- [27] Adaptive optics systems and technology
 SPIE proceedings 3762, Denver, USA, Jul. 1999
- [28] J.P. Karins et al., Litton Data Systems, Agoura Hills CA, USA: Yield and performance of a production process for reflected magnetooptic spatial light modulators
 — Optical Pattern Recognition, no. 5, SPIE vol. 2237, 1994, pp. 74–79
- [29] G.H. Heilmeier et al.: Dynamic scattering:
 A new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals
 Proceedings of the IEEE, vol. 56, Jul. 1968, pp.1162–1171
- [30] A. Mosley67, GEC-Marconi Ltd., Wembley, UK: Liquid crystal displays—An overview
 — Displays, vol. 14, no. 2, 1993, pp. 67–73

- [31] R. Gerhard-Multhaupt, HHI Berlin, Germany:
 Solid-state light-valve technology for HDTV projection displays
 European Conf. on the Technologies for HDTV, Grenoble, Nov. 1989
- [32] N.K. Sheridon, Xerox Corp., Rochester NY, USA: The Ruticon Family of erasable image recording devices
 — IEEE Transactions on Electron devices, vol. ED-19, no. 9, Sep. 1972
- [33] T.N. Horsky, Optron Systems Inc., Bedford MA, USA: Electron-beamaddressed membrane mirror light modulator for projektion display
 — Applied Optics, vol. 31, no. 20, Jul. 1992, pp. 3980–3990
- [34] L.J. Hornbeck, Texas Instruments: Digital Light Processing and MEMS: Timley convergence for a bright future
 — SPIE Micromachining and microfabrication, Oct. 1995, pp. 3–21
- [35] W.E. Howard, IBM Corp., New York, USA: Thin-film-transistor/liquid crystal display technology—An introduction
 — IBM Journal Res. Develop., vol. 36, no. 1, Jan. 1992, pp. 3–10
- [36] D.J. McKnight et al., University of Colorado: 256×256 liquid-cristall-on-silicon spatial light modulator — Applied Optics, vol. 33, no. 14, May 1994, pp. 2775–2784
- [37] W.P. Bleha, Hughes Aircraft Co, Carlsbad, California: Projection displays
 — Information Display, vol. 5, no. 12, 1998, pp. 18–34
- [38] M. Wand et al., Displaytech Inc., Boulder, USA: Chronocolor FLC devices for high resolution projection display — Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. (USA), vol. 3296, Jan. 1998, pp. 13–18
- [39] J.A. van Raalte, RCA Lab., New Jersey, USA:
 A new Schlieren light valve for television projection
 Applied Optics, vol. 9, no. 10, Oct. 1970, pp. 2225–2230
- [40] R.M. Boysel et al. Texas Instruments: Deformable mirror device light modulator for image processing
 — Optical Information Processing Systems and Architectures, SPIE vol. 1151, 1989, pp. 183–194
- [41] J.-M- Moret et al., University Neuchatel, Schweiz: Mechanical an optical properties of surface micromachined torsional mirrors in silicon, polysilicon and aluminium

 — Sensors and Actuators A, 43, 1994, 269–275

- [42] M. Fischer et al., Universität Stuttgart: Integration of surface micromachined polysilicon mirrors and a standard CMOS process
 — Transducers '95, Eurosensors IX, 8th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden, Jun. 1995, pp. 305-308
- [43] S.G. Kim et al.: Micromachined thin-film mirror array for reflective light modulation — Annals of the CIRP, vol. 46/1, Manufacturing Technology, 1997, pp. 455–458
- [44] J.N. Duffey et al., U.S. Army Missle Command, USA:
 Optical evaluation of the microchannel spatial light modulator
 SPIE vol. 1558, 1991, pp. 422–431
- [45] D. Armitage et al., Lockheed Palo Alto Research Laboritoriy, California, USA: High-speed spatial light modulator — IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-21, no. 8, August 1985, pp. 1241
- [46] T.J. Scheffler, In Focus Systems, Inc., Wilsonville, USA: The "iron law" 25 years later
 — Information Display, no. 10/1998, pp. 12–16
- [47] N. Funk, NEC Deutschland: TFT-Flachbildschirme werden erschwinglich
 — Markt&Technik, Sonderheft Displays, März 1999, S. 45–47
- [48] K. Knop, M. T. Gale: ZOD micro-images: Colour and black-and-white image reproduction from surface relief grating structures
 — Journal of Photographic Science, Vol. 26, 1978, pp. 120
- [49] H. Whright et al., Displaytech, USA: Die-sized displays enable new applications
 Semiconductor International, Sep. 1998, pp. 87–94 (see section Color productionön page 94)
- [50] E. Hecht: Optik Addison-Wesley, Bonn, S. 108
- [51] E. Toussar et al., SOPRA S.A., Frankreich: WinElli Program
 Simulationssoftware mit Datenbank zur Lösung der Fresnelschen Gleichungen mit Datenbank für Materialparameter, 1994
- [52] M. Born und E. Wolf: Principles of Optics, 6th Edition
 Pergamon Press, Oxford, 1980, section 8.2
- [53] M. Henzler et al.: Oberflächenphysik des Festkörpers
 B. G. Teubner, Stuttgart, 1996, S. 124-131

- [54] A. Gehner: Entwicklung hochauflösender Flächenlichtmodulatoren mit deformierbaren Spiegelanordnungen für die maskenlose Mikrolithographie — Shaker Verlag, Aachen, 1997, S. 20–33
- [55] Bergmann/Schäfer:
 Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. I: Mechanik Akustik Wärme
 deGruyter, Berlin, 1990, S. 443–446
- [56] E. Philippow [Hrsg.]: Taschenbuch der Elektrotechnik,
 Bd. 1: Allgemeine Grundlagen VEB Verlag Technik, Berlin, 1986
- [57] I.N. Bronstein, K.A. Semandjajew: Taschenbuch der Mathematik
 Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1987
- [58] M.J. Schwuger: Lehrbuch der Grenzflächenchemie — Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1996
- [59] B. Kazan, Xerox Corporation, Stamford, USA: Optical display device — US-Patent no. 4,660,938, Apr. 28, 1987
- [60] W. Greiner: Theoretische Physik, Bd. 2A: Hydrodynamik
 Verlag Harri DeutschFrankfurt am Main, 1991
- [61] R.L. Sacher, Cargille Lab. Inc., Cedar Grove, USA: Liquids and gels fill gaps in tricky optical designs
 — Photonics Spectra, no. 10, 1997, pp. 121–126
- [62] ES4G Spectral Ellipsometer SOPRA S.A., Frankreich
- [63] Datenblatt: Silikonöle AK, Wacker AG, München, 1996
- [64] Y. Hoshino et al., NTT Human Interface Laboratory, Japan: Light modulation by transverse electric field induced oil surface deformation — Applied Physical Letters 55 (11), 11 September 1989, pp. 1056–1058
- [65] G. Wyszecki et al.: Color Science
 Wiley-Intersience, New York, 1982, p. 56
- [66] Technologie-Lastenheft C5090, Silicon Gate CMOS Technologie Fraunhofer-Institut f
 ür Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden, Dez. 1999
- [67] Nanospec 8000 Nanometrics, Sunnyvale, USA
- [68] ANSYS(R) 5.5 Ansys Inc., Canonsburg PA, USA, 1999

- [69] D. Kunze: LITHSIM 1.0, Programm-Dokumentation
 Zentrum f
 ür Mikroelektronik Dresden, 1990
- [70] D. Kunze et al.: Bleachable dyed resist—Investigation of its process latitude in comparison with standard resists
 — Microelectronic Engineering 25, 1994, pp. 4–20
- [71] D. Kunze, Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden: Persönliche Mitteilung zur Verwendung des ANSYS-Makros für die Feldberechnung am MLM, Jan. 1997
- [72] K.-U. Kirstein, Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden: Integrierte Ansteuerschaltungen für mikromechanische Flächenlichtmodulatoren — Dem Fachbereich Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften vorgelegte Dissertation
- [73] A. Wolter et al., Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden:
 A spatial light modulator using moving liqid mirrors (MLM) on a CMOS-active-matrix.
 Actuators 2000, 19-21 Aug 2000, Bremen, pp.
- [74] B.J. Baliga [Hrsg.]: High voltage integrated circuits
 IEEE Press, 1988, p. 3
- [75] R. Melcher et al., Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Dresden: Active-matrix-addressed deformableelastomer-layer light-valve Projection: Active matrix and electronics
 — SID 92 Digest, Society for Information Display, 1992, pp. 447–450
- [76] H. Lakner et al., Faunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden, Germany: Micromirrors for direct writing systems and scanners
 — SPIE Conference on Miniaturized Systems with Micro-Optics and MEMS, Santa Clara, SPIE vol. 3878, September 1999, pp. 217–227
- [77] A.L. Lentine, AT&T Bell Laboritory, Illinois, USA: Introduction to the feature on spatial light modulators and their applications
 Applied Optics, vol. 33, no. 14, May 1994, pp. 2767

- [78] R. Kays, Universität Dortmund, Deutschland:
 Eidophor-Projektor für erhöhte Bildqualität
 Fernseh- und Kino-Technik, 39. Jahrgang, Nr. 5, 1985
- [79] A. Kaiser et al., CBS Technology Center, Connecticut, USA: Resolution requirements for HDTV based upon the performance of 35mm motion-picture films for theatrical viewing — SMPTE Journal, vol. 94, no. 6, June 1985, pp. 563
- [80] W.E. Glenn, Florida Atlantic University: Consumer displays of the future — IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 42, no. 3, pp. 573, 1996
- [81] B. Kuhlow, Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, Germany: Spatial frequency filtering in an opticalimiging system with an extended incoherent light source
 — Applied Optics, vol. 25, no. 14, July 1986, pp. 2351
- [82] R. Tepe, Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, Germany: Analysis of fluid light valve control layers for high-definition television large picture projection
 — Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 7, April 1985, pp. 2355
- [83] G. Wikkenhauser, Scophony Laboratories, UK: Synchronization of Scophony television receivers
 — Proceedings of the IRE, vol. 27, August 1939, pp. 483
- [84] H.W. Lee, Scophony Laboratories, UK: Some factors involved in the optical design of a modern television receiver using moving scanners
 — Proceedings of the IRE, vol. 27, August 1939, pp. 483
- [85] R. Gerhard-Multhaupt et al., Heinrich-Hertz-Institut, Berlin: Lichtventil-Großprojektion: Eine Übersicht
 — Fernseh- und Kino-Technik, 45. Jahrgang, Nr. 9, 1991
- [86] W. Greiner: Theoretische Physik, Bd. 3: Klassische Elektrodynamik
 Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1991, S. 170ff
- [87] R.G. Lerner et al.: Encyclopedia of Physics
 VCH Publishers Inc., New York, 1991, pp. 373, Ferroelectricity
- [88] Bergmann/Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II: Elektrizität und Magnetismus — deGruyter, Berlin, 1987

- [89] F.A. Jenkins et al.: Fundamentals of optics, 4th Edition
 McGraw-Hill, Singapore, 1981
- [90] A. Rieck: Entwicklung einer Planarisierungstechnologie einschießlich Chemisch Mechanischen Polierens zur Fertigung hochauflösender Flächenlichtmodulatoren

 Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule
 Duisburg, Apr. 2000
- [91] Dokumentation Reinraumdispenser Typ MFR300
 Schiller, Sonnenbühl-Genklingen, Deutschland, März 1997
- [92] Wyko NT-2000 Surface Profiler, Technical Reference Manual
 Veeco Metrology Group, Tucson, USA, 1998
- [93] P.J. Caber: Interferometric profiler for rough surfaces
 Applied Optics, vol. 32, no. 19, Jul. 1993, pp. 3438–3441
- [94] K. Creath: An introduction to phase-measurement Interferometry.
 WYKO Corp. Application Note 87-004, 1987
- [95] M. Born und E. Wolf: Principles of Optics, 6th Edition
 Pergamon Press, Oxford, 1980, section 1.5
- [96] I. Underwood et al., University of Edinburgh, Scotland: Improving the performance of liquid-cristall-over-silicon spatial light modulators: issues and achievments
 — Applied Optics, vol. 33, no. 14, May 1994, pp. 2768–2774

136

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich beim Anfertigen dieser Arbeit unterstützt haben:

An erster Stelle gilt mein Dank Prof. Dr. G. Zimmer für die Betreuung dieser Dissertation und für die Möglichkeit, in einem anwendungsorientierten Forschungsgebiet der Mikromechanik zu arbeiten, wo ich im industrienahe Umfeld des Fraunhofer-Institutes für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Dresden wertvolle Erfahrungen sammeln konnte.

Besonders danke ich auch Prof. Dr. H. Kück, der mit an der Idee des neuen Flächenlichtmodulator-Bauelementes beteiligt war und die Entwicklung vor allem in der Anfangsphase stark förderte.

Herrn W. Doleschal danke ich ganz herzlich für die ständige Unterstützung in allen technologischen Fragen. Seine Kompetenz und seine stets kooperative Art haben ganz wesentlich zu der erfolgreichen Präparation sämtlicher Bauelemente beigetragen.

Bedanken möchte ich auch ganz besonders Herrn Dr. A. Gehner, der mir jederzeit offen seinen Erfahrungsschatz bereitgestellt hat. Auch die angenehme Arbeitsatmosphäre in unserem gemeinsamen Büro und viele Diskussionen oft auch zu fortgeschrittener Stunde sollen nicht unerwähnt bleiben.

Herrn Dr. D. Kunze und Herrn Gottfried-Gottfried möchte ich meinen Dank aussprechen, da auch sie zu den Urhebern des MLM-Prinzips gehören. Herr Dr. D. Kunze hat vor allem auch die Makros für die Simulationsumgebungen ANSYS und LITHSIM bereitgestellt und mich durch Vorarbeiten zur Theorie unterstützt.

Herrn Schenk danke ich sehr für das Korrekturlesen der Arbeit und für viele inhaltliche Hinweise. Für die wissenschaftliche Betreuung und den nötigen Freiraum danke ich meinem Abteilungsleiter Herrn Dr. H. Lakner. Besonders möchte ich mich auch bei Herrn W. Kluge bedanken, auf dessen sofortige Hilfe ich mich bei allen Widrigkeiten des Laboralltags und der Rechentechnik immer verlassen konnte.

Bei allen Reinraummitarbeitern möchte ich mich herzlich bedanken, denn jede bzw. jeder Einzelne hat mich mindestens einmal bei der Präparation der Bauelemente besonders unterstützt.

Dank auch an Frau G. Günther, die jeden Verwaltungsvorgang mit wenigen Worten auch für technisch orientierte Wissenschaftler praktisch durchführbar machte.

Herrn Schicketanz danke ich für mehrere fruchtbare Gespräche zu Fragen der Optik, für die ständig gute Laune, die er versprühte, und für den Ausgleich beim gemeinsamen Basketballspiel. Herr Kirstein, der die aktuelle Version der aktiven CMOS-Matrix entworfen hat, möchte ich dafür danken, dass er mir jederzeit sofort bei allen Fragen zum Design und zur effektiven Arbeit mit Cadence hilfreich zur Seite stand. Und Herr Dr. L. Schwenger hat sich meinen Dank mit vielen Anregungen zu dieser Arbeit verdient.

Nicht zuletzt danke ich auch meinen Freunden und WG-Mitbewohnern Ben und Viola, die mich mit ihrer positiven und ausgeglichenen Ausstrahlung beim Abschalten am Abend unterstützten. Ben half mir auch in vielen fachlichen Diskussionen, das Allgemeingültige vom Institutsinternen zu trennen.