

**Untersuchung von Technologien für  
Farbfilter und Mikrolinsen zur monolithischen  
Integration in CMOS-Fotosensorarrays**

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

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Phys. Peter Schicketanz**

aus Köln

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Günter Zimmer

Korreferent: Prof. Dr. sc. nat. Wolfgang Karthe

Tag der mündlichen Prüfung: 01.02.2001



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Dresden.

Mein Dank gilt daher zuerst dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr. Günter Zimmer für sein besonderes Interesse an meinem Thema, für die Betreuung dieser Arbeit und die einzigartigen Möglichkeiten, die mir am Institut zur Verfügung standen.

Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr. Wolfgang Karthe für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Alle Wafer-Präparationen der Polymerschichten (24 Chargen mit über 160 Wafern) sind in der hauseigenen 6-Zoll-Wafer-Prozeßlinie angefertigt worden, in der ich einen großen Teil meiner Arbeitszeit verbracht habe. Trotz der gewöhnungsbedürftigen Arbeitsbedingungen, (kaum Staub unter den Maschinen, keine Kekse in der Schublade) hat es mir immer viel Spaß bereitet dort zu arbeiten, und das hatte einen besonderen Grund: Die gute Stimmung unter den so netten Mitarbeitern. Ich möchte daher allen Reinraumbeschäftigten und dem Service-Team, insbesondere dem Leiter der Prozeßlinie, Dr. Wolfram Pufe, für die tolle Zusammenarbeit und die gute Stimmung danken, die ich nie vergessen werde.

Vor allem die Anfangsphase meiner Schichtpräparation war durch viele Mißerfolge geprägt. Nahe der Verzweiflung gab es aber stets zwei Personen, die mir mit ihrer Hilfsbereitschaft, dem Stepper und ihrer Erfahrung stets zur Seite standen: Ingrid Schweizer und Pia Steuer. Ich hatte nie das Gefühl im Weg zu sein, wenn ich das wichtigste Werkzeug eines Lithografen, das Mikroskop, blockierte und über neue Schichtdefekte staunte, die sich mir bei meiner neusten Präparation durch das Okular darboten.

Danken möchte ich auch Wolfram Grundke, der mit der Farbfilterpräparation begonnen hatte und von dem ich viel über Polymerschichten gelernt habe.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei Ed Wrasmann von der Firma Brewer Science bedanken, der mit wertvollen Ratschlägen zum Gelingen der Mikrofarbfilter beigetragen hat.

Bedanken möchte ich mich bei Thomas Haase, der mir beim Plasmaätzen der Polymere mit Rat und Tat zur Seite stand, und bei Björn Jensen, der maßgeblich an den Versuchen zum CMP-Prozeß mitgewirkt hat.

Auch allen anderen Mitarbeitern des IMS Dresden, die ich hier nicht namentlich erwähnt habe und die zu dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich meinen Dank aussprechen.

Viel konnte ich auch von Ralf Gottfried lernen, der als Leiter der Abteilung Sensorik

stets ein offenes Ohr für meine Probleme hatte, sowohl fachlicher auch als organisatorischer Natur. Er hat maßgeblich dazu beigetragen, daß die vielfältigen Möglichkeiten im Haus genutzt wurden und daß die Erkenntnisse, die ich gewonnen hatte, zu einem IMS-Produktionsprozeß entwickelt wurden.

Für die Integration der optischen Elemente auf CMOS-Schaltkreisen mußte der Standard-CMOS-Prozeß modifiziert werden. Meistens mußten in letzter Minute noch Änderungen vorgenommen werden. Thomas Kröger, als CMOS-Verantwortlicher der Duisburger Prozeßlinie, ist mir dabei sehr entgegengekommen. Viele organisatorische Sachen, wie das Besorgen von Stepper-Jobs, Reticlen und vielem anderen, hat er für mich übernommen.

Die Mikrolinsen wurden im Rahmen eines Fraunhofer Verbundprojektes mit dem Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik in Jena bearbeitet. Dr. Peter Schreiber, Dr. Peter Dannberg, Ulrich Streppel und Albrecht v. Pfeil möchte ich für die tolle Zusammenarbeit danken, speziell Uli Streppel für die Strahlverfolgungsrechnungen, Albrecht v. Pfeil für die wellenoptischen Berechnungen und die Messungen an den abgeformten Mikrolinsen und Dr. Peter Dannberg für die Abformungen.

Die ellipsometrischen Messungen wurden von Dr. Bolko Schöneich vom Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden durchgeführt. Bei ihm bedanke ich mich für sein Interesse an meiner Arbeit und die fruchtbaren Diskussionen, die wir geführt haben.

Für das Korrekturlesen bedanke ich mich bei Harald Schenk, Ralf Gottfried, Dr. Heiner Grüger, Thorsten Heimann und Ellen Wagner, und für viele fachliche Diskussionen bedanke ich mich bei Dr. Eberhard Kurth, Dr. Christian Kunath, Dr. Jürgen Lauche, Harald Schenk, Dr. Peter Dürr und Thorsten Heimann, der auch die schönen bunten Bilder mit dem CIF-Sensor und der Handycam angefertigt hat.

Desweiteren danke ich Rosemarie Büttner für die Korrekturen und das mühselige Vervollständigen meiner Literaturstellen und allen Kollegen der Abteilungen *Sensorik* und *Mikromechanische Sensor und Aktorsysteme*, die zum guten Arbeitsklima beigetragen haben.

Zum Schluß möchte ich ein besonderes Dankeschön an Asima Siddiqui aussprechen. Ihr ist es zu verdanken, daß ich in den letzten drei Monaten mit allen lebensnotwendigen Medien versorgt wurde, um mich nur auf das eine konzentrieren zu können: Seiten, Seiten und nochmals Seiten. Ihre freundliche Art und die Freude in ihren Augen, wenn ich doch noch am Abend nach Hause kam, sind die schönsten Erinnerungen an diese Doktorarbeit.

Pit Schicketanz

München, im März 2001

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Flächenbildsensoren in CMOS-Technologie</b>	<b>5</b>
2.1	Silizium-Fotosensoren . . . . .	5
2.2	CMOS als Basistechnologie für Bildsensoren . . . . .	6
2.3	Optik dünner Schichten . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Farbbildsensorik</b>	<b>13</b>
3.1	Dreikomponenten-Theorie des Farbensehens . . . . .	13
3.1.1	Vektordarstellung der Farben . . . . .	14
3.1.2	Farbräume . . . . .	17
3.1.3	Praktische Bedeutung der Farbmetriek . . . . .	19
3.2	Prinzip der Farbbildsensorik . . . . .	19
3.3	Einsatz von Farbfiltern . . . . .	21
3.3.1	Die idealen Farbfilter zur Bilddarstellung . . . . .	22
3.3.2	Farbfilterkombinationen zur Farbbilddetektion . . . . .	22
3.3.3	Farbkorrektur . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Untersuchung von Mikro-Farbfiltern</b>	<b>27</b>
4.1	Anforderungen . . . . .	27
4.2	Absorptions- und Interferenzfilter . . . . .	27
4.2.1	Absorptionsfilter . . . . .	28
4.2.2	Interferenzfilter . . . . .	28
4.2.3	Vergleich der Filterarten . . . . .	29
4.3	Stand und Entwicklung der Technik . . . . .	29
4.3.1	Einfärbung von Polymerstrukturen . . . . .	29
4.3.2	Gefärbte Polymere . . . . .	30
4.3.3	Farbfilter aus Farbstoff-Aufdampfschichten . . . . .	31
4.3.4	Marktanalyse bezüglich der Verfügbarkeit von Farbfiltermaterialien . . . . .	32
4.4	Entwicklung eines Farbfilterprozesses . . . . .	32
4.4.1	Das Farbfiltermaterial . . . . .	32
4.4.2	Der Farbfilterprozeß . . . . .	34
4.4.3	Strukturierungsergebnisse . . . . .	35

4.5	Monolithische Integration . . . . .	40
4.5.1	Ergebnisse des Chemisch-Mechanischen Polierens . . . . .	42
4.5.2	Ergebnisse einer Polymer-Planarisierung . . . . .	45
4.5.3	Lithografische Justage . . . . .	48
4.6	Ellipsometrische Untersuchungen . . . . .	48
4.6.1	Bestimmung der optischen Konstanten . . . . .	48
4.6.2	Untersuchung des Einfärbeverhaltens . . . . .	53
4.7	Temperatur- und Lichtstabilität . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Charakterisierung von Farb-Fotosensoren</b>	<b>57</b>
5.1	Flächenfotodioden mit Farbfiltern . . . . .	57
5.2	Farbbilderzeugung mit einem CMOS-Bildsensor . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Mikrolinsen zur Empfindlichkeitserhöhung</b>	<b>63</b>
6.1	Das Prinzip der Mikrolinse . . . . .	63
6.2	Stand der Technik refraktiver Mikrolinsen . . . . .	65
6.2.1	Herstellungsverfahren . . . . .	65
6.2.2	Anwendung bei Flächenbildsensoren . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Untersuchungen von Mikrolinsen</b>	<b>69</b>
7.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung . . . . .	69
7.2	Berechnungen zu 17 $\mu$ m-Pixel . . . . .	69
7.2.1	Beschreibung von Minimalprofilen . . . . .	70
7.2.2	Strahlverfolgungsberechnungen . . . . .	72
7.2.3	Wellenoptische Berechnungen und experimentelle Bestimmung der Spotform von abgeformten Mikrolinsen . . . . .	77
7.3	Untersuchungen von 10 $\mu$ m PMMA-Mikrolinsen . . . . .	79
7.3.1	Herstellung von PMMA-Mikrolinsen . . . . .	79
7.3.2	Charakterisierung von abgeformten Mikrolinsen . . . . .	85
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>89</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>93</b>

# 1 Einleitung

Die visuelle Wahrnehmung stellt für den Menschen die wichtigste Informationsquelle zur Erfassung seiner Umgebung dar. Man ist daher seit jeher bestrebt, diese Eindrücke in irgendeiner Form festzuhalten. Im Zeitalter der Computertechnik ist die digitale Bildverarbeitung fester Bestandteil des täglichen Geschehens geworden. Die zur digitalen Bilderfassung benötigten Festkörperbildsensoren bieten gegenüber konventionellen Methoden, wie z. B. dem fotografischen Film oder den Bildaufnehmerröhren für bewegte Bilder, viele Vorteile [1]. Die zur Herstellung der Festkörperbildsensoren benötigten komplexen Verfahren haben jedoch dazu geführt, daß von der Erfindung des CCD-Bildsensors (Charged Coupled Device) bei Philips [2] im Jahre 1969, bis zur ersten kommerziell erhältlichen Bunt-Video-Kamera [3] der Firma Hitachi fast 10 Jahre vergangen sind. Der Herstellungspreis eines Festkörpersensors skaliert mit seiner Fläche, die wiederum von der Pixelanzahl abhängt. Da für bewegte Bilder eine geringere Auflösung des Sensors ausreichend ist, als für die digitale Fotografie, begannen Festkörpersensoren schon in den siebziger Jahren die Bildaufnehmerröhren abzulösen. Aber erst in der letzten Zeit sind durch enorme Fortschritte in der Halbleiterprozessierung die Voraussetzungen geschaffen worden, weit mehr als 1 Million Pixel auf einem Chip akzeptabler Größe zu integrieren, und somit die Anforderungen an die Bildqualität digitaler Aufnahmen zu erfüllen. Dabei unterscheiden sich CCD von Aktiv-Pixel-Sensoren (APS) in der Funktionsweise und im Herstellungsverfahren [4]. Die Pixel eines CCD-Sensors werden zeilenweise ausgelesen, während die Pixel eines APS beliebig über eine X-Y-Adressierung ausgelesen werden können. Ein fundamentaler Unterschied besteht jedoch im Fertigungsverfahren. CCD-Sensoren werden mit einer speziellen Technologie hergestellt, die es nicht erlaubt, Logikschaltungen zur Bildbearbeitung und -auswertung auf einem Chip mit dem Sensor zu integrieren. APS, auch CMOS-Bildsensoren genannt, können hingegen mit Standard-CMOS-Prozessen hergestellt werden. Somit ist die Integration von Sensor und Auswerteschaltung auf einem Chip möglich, und es können kostengünstige Sensorsysteme mit hoher Funktionalität realisiert werden.

CCD-Bildsensoren galten bis vor kurzem als die leistungsfähigeren Sensoren, was damit zusammenhing, daß das Bildrauschen der CMOS-Sensoren im allgemeinen sehr stark war [5]. Heutzutage hat sich diese Situation jedoch geändert, und es wird inzwischen die Frage gestellt, ob CMOS-Bildsensoren die Qualität der CCD-Bildsensoren erreicht haben [6, 7, 8]. Aufgrund ihrer Eigenschaften können für viele Anwendungen sogar nur CMOS-Sensoren verwandt werden [9, 10, 11]. Kostengünstige Farbkameras benötigen nur einen Bildsensor. Diese Sensoren werden in einer monolithischen Bauweise hergestellt, indem man ein sogenanntes Farbfilterarray direkt auf der Chipoberfläche aufbringt und es somit möglich wird, die gesamte Farbinformation

des aufgenommenen Bildes zu rekonstruieren. CMOS-Sensoren werden in Standard-Schaltkreisfertigungslinien hergestellt, die diese Farbfiltertechnologien nicht enthalten. Daher müssen für eine Farb-Sensorfertigung zusätzliche Prozeßschritte eingeführt werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit besteht das Ziel darin, eine Farbfiltertechnologie zu entwickeln und zu untersuchen, welche als Modul direkt auf CMOS-Schaltkreise angewandt werden kann. Dabei sollen Gesichtspunkte wie Zuverlässigkeit und Ausbeute, welche für eine Fertigung von Interesse sind, berücksichtigt werden. Die Empfindlichkeit eines Bildsensors kann mit der sogenannten Mikrolinsentechnologie erhöht werden, welche eine weitere Methode ist, mit Hilfe von mikrotechnisch hergestellten optisch aktiven Elementen die Eigenschaften eines Bildsensors gezielt zu verändern. Dieses Verfahren hat sich bei den CCD-Sensoren etabliert. Der Sensoraufbau eines APS-Bildsensors ist durch den CMOS-Fertigungsprozeß bestimmt und unterscheidet sich von dem des CCD-Schichtaufbaus. Daraus ergeben sich Unterschiede in den optischen Eigenschaften. Außerdem werden für die Mikrolinsenherstellung bisher Materialien verwendet, die nur in CMOS-Prozessen für sehr hohe Integrationsdichten zur Anwendung kommen und für eigene Experimente nicht zur Verfügung standen. Eine Mikrolinsenentwicklung erfordert eine genaue Analyse der Fokussierungseigenschaften der optischen Elemente und ein Linsenmaterial mit hoher optischer Transparenz. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit obigen Fragestellungen.

Folgende Bedingungen müssen für die Entwicklung der Farbfilter und Mikrolinsen erfüllt werden:

- Anwendung von Herstellungsverfahren, welche für die Produktion von integrierten Schaltkreisen mit minimal  $0,5 \mu\text{m}$  Strukturgrößen üblich sind
- Verwendung von kommerziell erhältlichen Materialien, damit keine zusätzlichen Verfahren zur Synthese von Schichtmaterialien entwickelt werden müssen
- Die Farbfilter- und Mikrolinsentechnologie darf die Schaltung und die Eigenschaften der Fotosensoren nicht negativ beeinflussen
- Entwicklung kostengünstiger Herstellungsverfahren
- Farbfilter: Mit den verwendeten Filtern soll gewährleistet werden, daß die Farbwiedergabe mit den auf dem heutigen Markt erhältlichen Produkten vergleichbar ist
- Mikrolinsen: Der Empfindlichkeitsgewinn soll über 30% betragen

Die Aufgabe besteht darin, aufgrund farbmetrischer Betrachtungen und den Prozeßvoraussetzungen ein geeignetes Material zu finden, um dann mit üblichen Dünnschichtmethoden einen Farbfilterprozeß zu entwickeln, der für eine CMOS-Substratanwendung geeignet ist. Für die Mikrolinsen stehen optische Berechnungen im Vordergrund, um die Empfindlichkeitssteigerung eines damit versehenen CMOS-Bildsensors zu untersuchen. Außerdem werden Untersuchungen zur Materialwahl und zum Herstellungsverfahren durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert. Für die erfolgreiche Kombination optischer Elemente mit CMOS-Sensoren muß deren Aufbau und Funktionsweise bei den theoretischen Betrachtungen miteinbezogen werden. Aus diesem Grund wird in Kapitel 2 auf den prinzipiellen Aufbau von Fotosensoren und Bildsensoren in CMOS-Technologie eingegangen. Zusätzlich werden die Grundlagen für die optischen Berechnungen dargestellt, die in dieser Arbeit von Bedeutung sind. Da in der Literatur eine Fülle von Veröffentlichungen zu CMOS-Bildsensoren bzw. zur Optik dünner Schichten existiert, soll dieses Kapitel nur als kurze Einführung verstanden werden.

Mit der Filtermaterialauswahl sind die Sensoreigenschaften bezüglich der Farbreproduzierbarkeit vorbestimmt. Um die prinzipiellen Methoden der Farbbilddetektion verstehen zu können, ist es notwendig, grundlegende Begriffe der Farbmeterik einzuführen, was in Kapitel 3 geschieht.

Nach einer Analyse prinzipieller Herstellungsmethoden in Kapitel 4 werden Einzelheiten zur Materialauswahl und Prozeßentwicklung näher erläutert. Die Kombination von den Farbfiltern mit CMOS-Schaltkreisen wird dann auf der Basis verschiedener Planarisierungsverfahren diskutiert. Zur Charakterisierung der Farbschichten wird das spektralellipsometrische und das spektralfotometrische Verfahren angewandt. Mit Hilfe dieser Meßmethoden werden Temperatur und Lichtstabilität der Materialien untersucht.

In Kapitel 5 werden Messungen an Fotosensoren mit integrierten Farbfiltern beschrieben und eine Methode zur einfachen Buntbilderzeugung erläutert.

In Kapitel 6 wird das Prinzip der Empfindlichkeitserhöhung eines CMOS-Bildsensors durch Mikrolinsen beschrieben und das Ergebnis einer Literaturrecherche über Herstellungsverfahren vorgestellt.

Grundlegende Untersuchungen zur Füllfaktorerrhöhung werden in Kapitel 7 dargestellt, wozu Standard-Simulationsverfahren zur Anwendung kommen. Weiterer Bestandteil dieses Kapitels ist die Beschreibung eines Herstellungsverfahrens für Mikrolinsen und deren Charakterisierung.

Das letzte Kapitel enthält eine Zusammenfassung dieser Arbeit.



## 2 Flächenbildsensoren in CMOS-Technologie

Eingeleitet wird dieses Kapitel mit einer kurzen Einführung über Silizium-Fotosensoren, eine ausführliche Abhandlung kann der Literatur entnommen werden [12]. Für die Konzeption und Charakterisierung der in dieser Arbeit untersuchten optischen Elemente ist der Schichtaufbau der CMOS-Fotosensoren von großer Bedeutung. Daher werden im zweiten und dritten Teil dieses Kapitels grundlegende Sachverhalte dazu erläutert.

### 2.1 Silizium-Fotosensoren

Das Prinzip der Lichtdetektion macht sich den äußeren bzw. inneren Fotoeffekt zunutze, wobei Licht in elektronische Anregungen umgewandelt wird [13]. Die dabei erzeugten Ladungen können dann elektrisch ausgewertet werden. In vielen Bereichen der Technik finden Fotosensoren eine Anwendung, wobei es sich fast ausschließlich um Halbleitersensoren handelt, die aus verschiedenen Materialien hergestellt werden können. Für die CMOS-Fertigung ist jedoch stets eine dotierte Silizium-Scheibe (Wafer) das Ausgangsmaterial, auf deren Basis verschiedene Varianten von Fotosensoren realisiert werden können. Fotoleiter und Fototransistoren sollen hier als Beispiele angeführt werden [13]. Da jedoch für CMOS-Bildsensoren fast ausschließlich Fotodioden zur Anwendung kommen, soll am Beispiel dieser Sensoren die prinzipielle Funktionsweise erklärt werden.

In dem Substrat wird mittels Dotierung ein pn-Übergang erzeugt. Die sich dabei ausbildende Raumladungszone ist der eigentlich lichtempfindliche Teil des Fotosensors. In das Silizium eindringendes Licht erzeugt Elektron-Loch-Paare. Diese Ladungsträger werden dann im elektrischen Feld der Raumladungszone getrennt, und es baut sich die sogenannte Foto-Spannung auf. Alle Sensorkenngrößen<sup>1</sup>, vom Frequenzverhalten, welches durch die Grenzfrequenz charakterisiert wird, abgesehen, werden durch das Kennlinienfeld des Detektors wie folgt beschrieben [14]:

$$I = -R \cdot P + I_s(e^{eU/k_b T} - 1) \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $I$  der Strom durch den pn-Übergang,  $e$  die Elementarladung,  $U$  die äußere Spannung,  $P$  die einfallende Lichtleistung,  $T$  die Temperatur des Sensors,  $k_b$  die Boltzmannkonstante,  $R$  die Empfindlichkeit und  $I_s$  der Dunkelstrom. Die Kenngrößen sind alle abhängig von der technologischen Beschaffenheit des Sensors und von den physikalischen Gegebenheiten des Halbleitermaterials. Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, soll im Rahmen dieser Arbeit nur Einfluß auf die Sensorempfindlichkeit  $R$  genommen werden. Im folgenden wird angenommen, daß die Fotozelle als Stromquelle

---

<sup>1</sup>Sensorkenngrößen: Sensorsignal ohne optischen Reiz (Dunkelstrom), Innenwiderstand, Empfindlichkeit, Linearität des Fotostroms bezüglich der Bestrahlungsleistung

betrieben wird. Dann ergibt sich aus der Gleichung 2.1 der Fotostrom  $I$  als Signal des Sensors mit  $U = 0$  durch folgende Formel:

$$I(\lambda) = R(\lambda) \cdot P(\lambda) \quad (2.2)$$

Das heißt das Signal verhält sich proportional zur eingestrahnten Lichtleistung  $P$ . Dies gilt jedoch nur, solange der Strom nicht in Sättigung gerät, was bei sehr hohen Bestrahlungsstärken der Fall ist. Wird die Fotozelle als Spannungsquelle betrieben, so ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Spannung als Signal und der eingestrahnten Lichtleistung  $P$ . Die Empfindlichkeit  $R$  ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  des bestrahlenden Lichtfeldes. Diese Wellenlängenabhängigkeit ist in erster Linie durch die Eigenschaft des Halbleiters gegeben, absorbierte Lichtenergie in elektronische Anregung umzuwandeln. Prinzipiell wird die spektrale Empfindlichkeit im infraroten Wellenlängenbereich durch die Bandlücke des Halbleiters, und im Ultravioletten (UV) durch Ladungsträgerrekombinationen in der Nähe der Oberfläche des halbleitenden Materials eingeschränkt. Durch die Kombination eines Farbfilters mit dem Sensor kann jedoch die Empfindlichkeit wellenlängenselektiv manipuliert werden. Bei der Herstellung wird die Empfindlichkeit eines Fotosensors durch den Entwurf und den Herstellungsprozeß bestimmt. Folgende prozeßspezifische Faktoren beeinflussen die Empfindlichkeit des Sensors: Das Schichtsystem über dem pn-Übergang, die Tiefe des pn-Übergangs, die Dotierung des halbleitenden Substrates und die Reinheit des Halbleiterkristalls. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur Einfluß auf das Schichtsystem über dem pn-Übergang genommen, um gezielt die Empfindlichkeit  $R(\lambda)$  des Sensors beeinflussen zu können.

## 2.2 CMOS als Basistechnologie für Bildsensoren

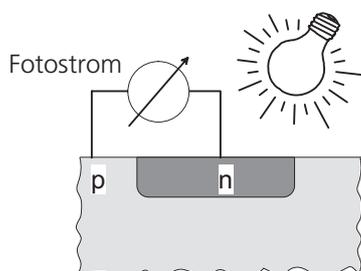
Um den Einfluß des Fertigungsprozesses auf die Sensoreigenschaften zu verstehen, ist es erforderlich, den Grundaufbau einer CMOS-Schaltung zu kennen. Es sollen daher Gesichtspunkte diskutiert werden, die für diese Arbeit von Bedeutung sind. Auf die Erstellung der Transistoren und der verschiedenen Isolationsvarianten soll hier nicht eingegangen werden. Eine detaillierte Beschreibung von CMOS-Prozessen findet man in [15].

Der Ablauf eines CMOS-Prozesses ist in erster Linie von der minimalen Strukturweite, die durch das lithografische Verfahren bestimmt wird, und von den Eigenschaften der zu realisierenden Bauelemente abhängig. Abgesehen von diesen speziellen Anforderungen haben die meisten CMOS-Prozesse eine grundlegende Gemeinsamkeit. Sie werden in der sogenannten Planartechnologie gefertigt. Mit zunehmender Integrationsdichte ist man jedoch bestrebt, auch die dritte Dimension auszunutzen. Grabenkondensatoren und Dünnschichttransistoren sind hierfür geeignet und werden in der Fertigung von dynamischen Speicherbausteinen verwandt [15]. Die Planartechnologie ist durch folgenden Schichtaufbau charakterisiert: Die wenige Mikrometer tiefe Oberflächenregion eines einkristallinen Siliziumsubstrates beinhaltet Transistoren und andere aktive Bauelemente, die durch die darüberliegende Verdrahtung miteinander verbunden sind. Die Bauelementeebene wird von der Verdrahtung, die wiederum aus mehreren Verdraht-

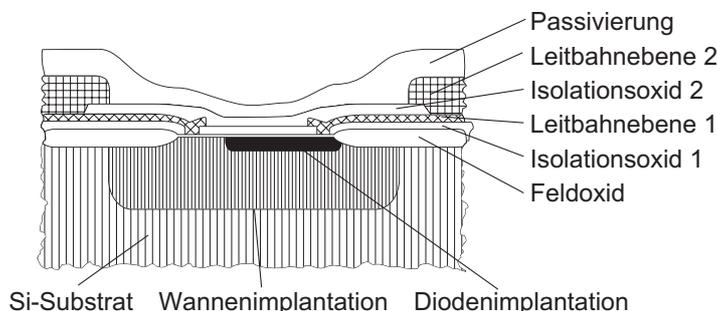
tungsebenen bestehen kann, durch eine Isolationsschicht, i. a. eine Siliziumoxidschicht isoliert.

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, besteht ein Silizium-Fotosensor aus einem elektronenleitenden (n-leitenden) und einem löcherleitenden (p-leitenden) Bereich. In der Planartechnologie wird diese Struktur realisiert, indem man z. B. in ein p-leitendes Substrat einen n-leitenden Bereich implantiert (Abbildung 2.1). Diese Bereiche werden als aktives Gebiet bezeichnet. Im Gegensatz dazu stellt das Feldgebiet Zonen dar, welche keine aktiven Bereiche enthalten. Damit die Fotodiode einfallendes Licht detektieren kann, darf ihre Sensorfläche nicht vollständig mit Metallbahnen abgeschattet sein. Der Diodenbereich ist daher nur mit den verschiedenen Isolationsoxiden abgedeckt, deren optische Eigenschaften jedoch im folgenden als gleich angenommen werden. Aus diesen Tatsachen heraus ergibt sich eine definierte Topologie der Schaltkreisoberfläche (siehe Abbildung 2.2). Die tiefsten Gebiete werden durch die Fotodioden und die höchsten Gebiete werden durch den Metallisierungsaufbau bestimmt. Die maximalen Höhenunterschiede sind jedoch abhängig vom entsprechenden CMOS-Prozeß und von entscheidender Bedeutung für die Integration optischer Elemente.

Die Sensoren, die für diese Arbeit zur Verfügung standen, wurden in einem  $1\text{-}\mu\text{m}$ - bzw. in einem  $0,5\text{-}\mu\text{m}$ -CMOS-Prozeß gefertigt. In Tabelle 2.1 sind die wesentlichen Kenndaten dieser beiden Prozesse zusammengefaßt. Da mit abnehmenden Strukturbreiten der Schichtaufbau zunehmend komplexer wird, hat dies auch Auswirkungen auf die Topologie der Schaltkreisoberfläche. Ausschlaggebend ist, ob Planarisierungsschritte enthalten sind.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung einer in Planartechnologie hergestellten Fotodiode. Detaillierte Darstellungen zum Ladungsträgertransport siehe z. B. [12]



**Abbildung 2.2:** Querschnitt durch eine Fotodiode in CMOS-Technologie. Man erkennt, daß die Oberfläche nicht eben ist, da es Gebiete mit und ohne Metallleitbahnen gibt

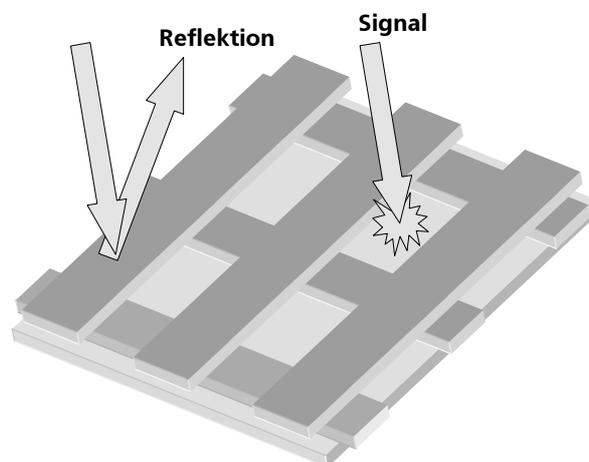
**Tabelle 2.1:** Kenndaten der verwendeten CMOS-Prozesse

	1- $\mu\text{m}$ -Prozeß	0,5- $\mu\text{m}$ -Prozeß
Anzahl der Metallebenen	2	3
Doppelwannenprozeß	ja	ja
Planarisierung der Metallebenen	nein	ja
Abstand Siliziumoberfläche-Chipoberfläche	4 $\mu\text{m}$	4,8 $\mu\text{m}$
Maximaler Höhenunterschied	2,4 $\mu\text{m}$	1,2 $\mu\text{m}$

Für die lithografische Strukturierung von sehr feinen Strukturen ist es erforderlich, daß die Topologie im Bereich der Tiefenschärfe der Projektionsbelichtungsanlage liegt. Daher werden Planarisierungsschritte eingeführt, um die anschließende Strukturierung vornehmen zu können.

Je nach Anwendung kommen Fotosensoren als einzelnes Element, als Zeile [9] oder als zweidimensionale Anordnung [3], wie beim Flächenbildsensor, zum Einsatz. Bei ein- und zweidimensionalen Fotosensoranordnungen wird eine Sensoreinheit als Pixel bezeichnet. In Abbildung 2.3 ist der prinzipielle Aufbau eines solchen Sensors gezeigt. Einzelne Fotosensoren sind zweidimensional angeordnet und werden mit den Metallisierungsebenen des CMOS-Prozesses verbunden, um ausgelesen zu werden. Die Auswerteschaltung kann ebenfalls auf dem Sensorchip untergebracht werden. Einzelheiten zur Sensorarchitektur und Eigenschaften von integrierten CMOS-Fotosensoren sind im Rahmen dieser Arbeit von geringem Interesse. Weiterführende Einzelheiten finden sich in der Fachliteratur [9, 10].

Durch den Entwurf wird direkt Einfluß auf die Größe der lichtempfindlichen Fläche genommen, die bei Vernachlässigung von Randeffekten linear in das Sensorsignal eingeht. Man ist bei Flächenbildsensoren insbesondere auf kleine Pixel angewiesen, um die Chipfläche möglichst gering zu halten. Dies hat zur Folge, daß die Metalleitbahnen



**Abbildung 2.3:** Aufbau eines CMOS-Bildsensors. Die fotoempfindliche Fläche des Sensors wird durch die Metalleitbahnen begrenzt

einen erheblichen Anteil der Pixelfläche in Anspruch nehmen und so die Empfindlichkeit des Sensors reduzieren. Licht, welches auf das Sensorarray fällt, wird zum einen vom Sensor registriert, zum anderen wird es von den Leitbahnen reflektiert und kann so nicht zum Signal beitragen. Ein Pixel ist also nur partiell fotoempfindlich.

## 2.3 Optik dünner Schichten

Das Signal eines Fotosensors ist abhängig von der Lichtmenge  $P_{ein}$ , die in den Festkörper eingedrungen ist und dort zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren beiträgt.  $P_{ein}$  ist wiederum abhängig von den optischen Eigenschaften der Schichten, die sich auf dem Silizium des Sensors befinden. Diese werden durch den Brechungsindex  $n$ , die Absorptionskonstante  $k$  und die Schichtdicke  $d$  charakterisiert. Die optischen Konstanten  $n$  und  $k$  können als der Real- und Imaginärteil eines wellenlängenabhängigen komplexen Brechungsindex  $\tilde{n}(\lambda)$  interpretiert werden<sup>2</sup>. Da im Rahmen dieser Arbeit gezielt das Schichtsystem über dem Fotosensor verändert wurde, soll kurz auf grundlegende Aspekte zur mathematischen Beschreibung eingegangen werden. Für eine detailliertere Darstellung sei auf die Literatur verwiesen [16, 17].

Wechselwirkt Licht mit Strukturen, deren Größenordnung im Wellenlängen- und Kohärenzlängenbereich des Lichtes sind, treten Interferenzerscheinungen auf, die nicht im Rahmen der geometrischen Optik beschrieben werden können. Strukturen, die mit Hilfe der Mikrotechnik erzeugt werden, können diese Bedingung erfüllen, weshalb eine Betrachtung auf der Grundlage der Wellenoptik erforderlich wird. Im Rahmen der Wellentheorie des Lichtes stehen für derartige Berechnungen die Fresnelschen Gleichungen zur Verfügung, mit denen man anhand von Schichtmodellen Berechnungen durchführen kann. Ein Lichtstrahl wechselwirkt mit einem beschichteten Substrat, wobei die Summe aus dem reflektierten Anteil  $R$ , dem transmittierten Anteil  $T$  und dem absorbierten Anteil  $A$  aus Gründen der Energieerhaltung eins ergeben muß:

$$R(\lambda, \alpha) + T(\lambda, \alpha) + A(\lambda) = 1 \quad (2.3)$$

Das Substrat ist im allgemeinen Fall mit einem Schichtstapel aus unterschiedlichen Materialien versehen. Die Anteile  $A$ ,  $T$  und  $R$  lassen sich anhand der Wellenbeschreibung des Lichtes berechnen. Das Beer'sche Absorptionsgesetz beschreibt die Schwächung einer elektromagnetischen Welle beim Durchlaufen eines Mediums mit der Absorptionskonstanten  $k$  nach der Wegstrecke  $x$ :

$$I(x, \lambda) = I_0 e^{-\frac{4\pi k}{\lambda} x} \quad (2.4)$$

Im Gegensatz zur Absorption und Transmission ist die Reflexion ein reiner Grenzflächeneffekt, der auf Brechungsindexsprünge zurückzuführen ist. Bei senkrechtem Ein-

---

<sup>2</sup>Da der Begriff *Absorptionskonstante* in der Literatur nicht eindeutig definiert ist, wird der Zusammenhang mit den Größen Absorptionskoeffizient  $\alpha$  und Absorptionsindex  $\kappa$  angegeben:  $\alpha = 4\pi n\kappa/\lambda$  mit  $n\kappa = k$  und  $\tilde{n}(\lambda) = n - ik$

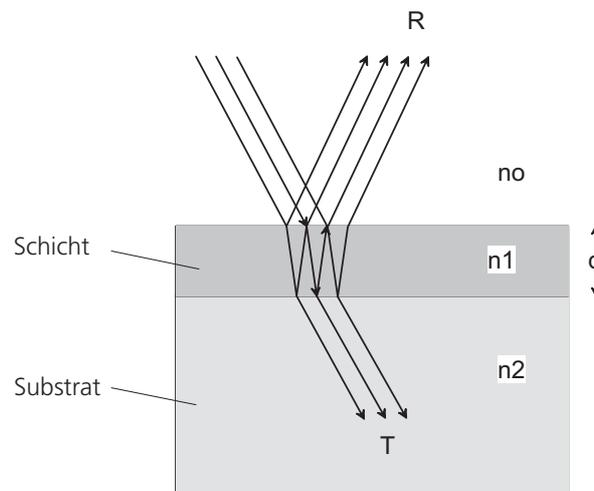
fall ergeben sich für den in Abbildung 2.4 dargestellten Schichtaufbau für  $T$  und  $R$  folgende Formeln:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\varphi}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\varphi} \quad T = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\varphi} \quad (2.5)$$

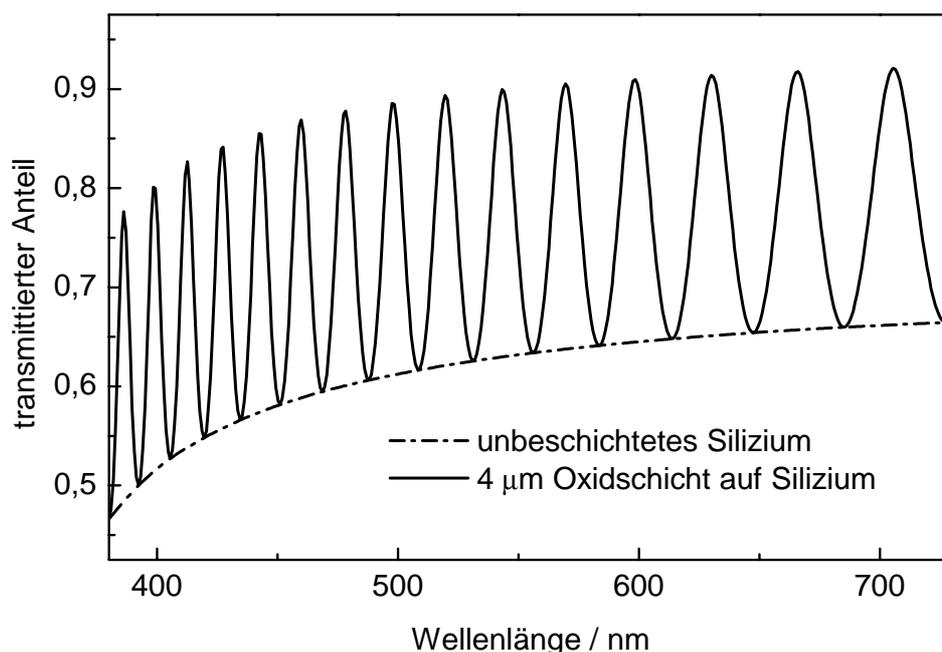
$$\text{mit} \quad r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad \varphi = 2\pi n_1 d / \lambda$$

Die Nomenklatur für die Brechungsindizes ist der Abbildung 2.4 zu entnehmen. Diese Formeln gelten für transparente Materialien. Für absorbierende muß formal  $n$  durch  $\tilde{n}$  ersetzt werden.

Als Beispiel soll hier der transmittierte Anteil  $T$  für ein mit Siliziumoxid beschichtetes Siliziumsubstrat berechnet werden. In Abbildung 2.5 ist das Ergebnis graphisch aufgetragen. Die Oszillationen werden dabei von der Interferenz, der an verschiedenen Grenzflächen reflektierter Strahlen, hervorgerufen. Je dicker die Schicht, desto mehr Oszillationen treten auf. Zum Vergleich ist auch der transmittierte Anteil für ein unbeschichtetes Siliziumsubstrat dargestellt, welcher der unteren Einhüllenden der oszillierenden Funktion entspricht. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, daß für manche Wellenlängen die Reflektivität des Systems minimal wird, was sich in einem vergrößerten transmittierten Anteil  $T$  äußert. Dieser Effekt wird bei sogenannten Antireflexionsschichten ausgenutzt, deren Schichtdicke gleich  $1/m \cdot \lambda/4n$  sein muß, damit die Bedingung für eine destruktive Interferenz erfüllt wird [17].  $m$  ist dabei eine ganze Zahl. Ausschlaggebend ist, daß  $n_1$  kleiner als  $n_0$  ist. Ist dies nicht der Fall, dann wird die Reflektivität maximiert und man spricht von einer dielektrischen Verspiegelung. Hinsichtlich eines Fotosensors sind diese Betrachtungen von Bedeutung, da das Sensor-signal von der Intensität des ins Silizium eingedrungenen Lichtes abhängig ist. Wird also ein Fotosensor mit zusätzlichen Schichten bedeckt, müssen oben genannte Effekte berücksichtigt werden.

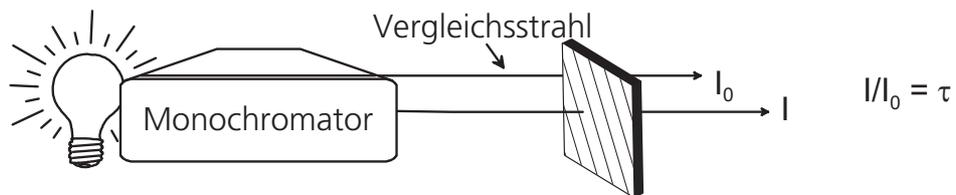


**Abbildung 2.4:** Vielstrahlinterferenzen an einer Schicht auf einem Substrat. Man beachte, daß mit  $T$  der Wert im Substrat bezeichnet ist



**Abbildung 2.5:** Berechneter transmittierter Anteil bei senkrechtem Einfall für eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht auf Silizium im Vergleich zum unbeschichteten Silizium-Substrat. Der Abfall zur kleineren Wellenlänge wird durch den Verlauf der Absorptionskonstanten des Siliziums hervorgerufen. Diese Berechnung wurde mit dem Programm Winelli (Sopra GmbH, Deutschland) angefertigt

Im Experiment kann der transmittierte Anteil  $T$  gemessen werden, indem man eine Schicht auf einem durchsichtigen Substrat durchleuchtet. Der Meßwert wird als Transmission  $\tau$  bezeichnet. Es muß dann jedoch beachtet werden, daß durch die Substratrückseite verursacht, ein zusätzlicher Reflexionsanteil hinzukommt. Mit dem in Abbildung 2.6 dargestellten Meßverfahren kann die Schwächung der Intensität eines Lichtstrahls der Wellenlänge  $\lambda$  beim Durchtreten einer Probe ermittelt werden. Das dazu verwendete Meßgerät wird als Zweistrahl-Spektralfotometer bezeichnet. Durch den Aufbau ist es möglich, direkt das Verhältnis  $I/I_0$  zu messen, welches  $\tau$  darstellt, wobei  $I_0$  die Intensität des einfallenden Lichtstrahls und  $I$  die Intensität nach der Probe darstellt. Mit diesem Meßverfahren ist es jedoch nicht möglich, anhand einer Probe die optischen Konstanten des Materials zu bestimmen, da  $\tau$  bei einem gegebenen Einfallswinkel eine Funktion von  $n$ ,  $k$  und  $d$  ist. Außerdem können nur Schichten auf durchsichtigen Substraten gemessen werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Beschichtungsanlagen waren ausschließlich für Siliziumscheiben geeignet, so daß die Verwendung des Spektralfotometers stark eingeschränkt war. Die Spektrellopsometrie, welche in Kapitel 4.6 beschrieben wird, stellt ein Meßverfahren dar, mit dem auf Siliziumsubstraten die optischen Konstanten bestimmt werden können. Die mit dem Spektralfotometer gemessene Transmission  $\tau$  enthält jedoch die Information über das Filterverhalten, was von großer Bedeutung für die Farbfilteruntersuchungen ist.



**Abbildung 2.6:** Schematisches Meßprinzip des Zweistrahl-Spektrofotometers. Einer der Strahlen gelangt direkt zum Detektor, der andere tritt zuvor durch die Probe

### 3 Farbbildsensorik

Farbmessung und Farbbilddetektion stehen in engem Zusammenhang mit der menschlichen Farbwahrnehmung, welche durch die Farbmatrik beschrieben wird. In diesem Kapitel soll daher auf die Grundlagen der Farbmatrik sowie auf allgemeine Gesichtspunkte zur Farbbilddetektion eingegangen werden. In der Literatur finden sich sehr ausführliche Darstellungen zu diesem Thema [18, 19]. Alle wichtigen funktionalen Zusammenhänge für farbmatische Berechnungen können aus [20] entnommen werden.

#### 3.1 Dreikomponenten-Theorie des Farbsehens

Das menschliche Auge ist in der Lage, elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 760 nm wahrzunehmen. Die Strahlung gelangt dabei auf unsere Netzhaut und stellt einen Farbreiz  $Q(\lambda)$  dar, der durch die spektrale Strahlungsverteilung  $P(\lambda)$  definiert ist. Der Farbreiz wird vom Menschen im allgemeinen als Farbe einer Leuchtquelle mit  $P(\lambda)$

$$Q(\lambda) = P(\lambda), \quad (3.1)$$

oder als Farbe einer nicht selbstleuchtenden Oberfläche empfunden, wobei die von der Oberfläche ausgehende Strahlung durch das Produkt aus der Beleuchtung  $P(\lambda)$  und der spektralen Reflektivität  $R(\lambda)$  der Oberfläche beschrieben wird:

$$Q(\lambda) = P(\lambda) \cdot R(\lambda). \quad (3.2)$$

Solche Farbreize rufen Empfindungen hervor, die als Körperfarben bezeichnet werden. Sie spielen eine große Rolle in der Farbbilddetektion. Die Gleichung 3.2 beschreibt keine Interferenz- und Fluoreszenzeffekte, die jedoch in der alltäglichen Farbwahrnehmung eine untergeordnete Rolle spielen. Unter Farbmatrik versteht man in erster Linie die Bewertung von Farbreizen nach Maßzahlen. Das menschliche Auge bewertet die wahrgenommenen Farben nach drei voneinander unterschiedlichen Wirkungsfunktionen. Sie bilden die Grundlage sogenannter Farbvergleichsexperimente, in denen das sinnesphysiologische Äquivalent einer Farbe durch additive Mischung von drei beliebigen, unterschiedlichen Primärfarben, z. B. Rot ( $R$ ), Grün ( $G$ ) und Blau ( $B$ ), ermittelt wird. Die Farbmaßzahlen oder Farbwerte stellen dann die Intensitäten der Primärfarben  $R$ ,  $G$  und  $B$  dar. Ein dafür konzipiertes Experiment kann folgende Form haben. Mit einem Projektor wird eine beliebige Farbe (Farbvalenz) auf eine Leinwand in Form eines Halbkreises projiziert. Der Kreis wird nun durch eine Überlagerung der drei Primärfarblichtstrahlen vervollständigt. Ein Beobachter reguliert nun die drei Primärintensitäten so, daß die gemischte Farbe bei ihm den gleichen Farbeindruck hervorruft. Die vom Beobachter als gleich empfundenen Farben werden dabei von physikalisch verschiedenen Farbreizen hervorgerufen.

### 3.1.1 Vektordarstellung der Farben

Es ist möglich, Farbvalenzen als Vektoren in einem dreidimensionalen Vektorraum darzustellen, welcher z. B. durch die drei Primärfarben  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  und  $\mathbf{B}$  aufgespannt wird. Die Intensität des Farbvektors ist dann durch seine Länge bestimmt. Im folgenden werden Farbvalenzen mit fettgedruckten Buchstaben kenntlich gemacht. In diesem linearen Raum sind die Gesetzmäßigkeiten zur Addition von Vektoren und Multiplikation von Vektoren mit Skalaren wie in der Mathematik definiert. Eine beliebige Farbvalenz  $\mathbf{Q}$ , die durch den Farbreiz  $Q$  hervorgerufen wird, läßt sich dann durch die entsprechenden Farbwerte bezüglich der Basis  $\{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\}$  darstellen:

$$\mathbf{Q} = R \mathbf{R} + G \mathbf{G} + B \mathbf{B} \quad (3.3)$$

Ein monochromatischer Farbreiz ruft eine spektrale Farbvalenz hervor. Analog zu Gleichung 3.3 schreibt man:

$$\mathbf{Q}_\lambda = R_\lambda \mathbf{R} + G_\lambda \mathbf{G} + B_\lambda \mathbf{B} \quad (3.4)$$

Um alle wahrnehmbaren Farben darstellen zu können, müssen die drei Basisvektoren linear unabhängig sein. Das Vorzeichen der Farbwerte kann dabei auch negative Werte annehmen. Durch Umstellen der Formel 3.3 wird die physikalische Bedeutung klar. Angenommen ein Farbwert des Farbreizes  $\mathbf{M}$  sei  $-R$ , dann läßt sich 3.3 wie folgt schreiben:

$$\mathbf{M} + R \mathbf{R} = G \mathbf{G} + B \mathbf{B} \quad (3.5)$$

Für ein entsprechendes Farbvergleichsexperiment bedeutet dies, das sich  $\mathbf{M}$  nicht mit einer Kombination der drei Primärfarben mischen läßt, sondern daß es erforderlich ist, den  $\mathbf{R}$ -Anteil zu  $\mathbf{M}$  hinzuzumischen. Wie später noch dargestellt wird, ist es nicht möglich, drei sichtbare Primärfarben zu finden, mit denen alle wahrnehmbaren Farben durch additive Farbmischung mit ausschließlich positiven Farbwerten erzeugt werden können.

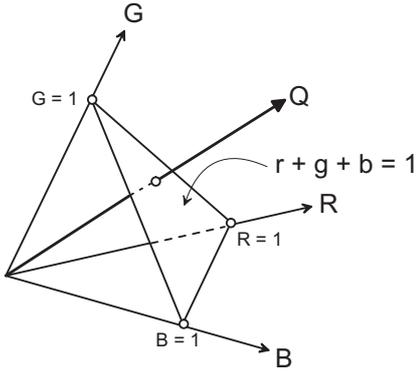
Da die Darstellung aller Farbreize in einem dreidimensionalen Raum eher unhandlich ist, bietet es sich an, eine zweidimensionale intensitätsfreie Darstellung zu wählen.

Da eine Farbe, bzw. die Richtung des Farbvektors, durch die relativen Verhältnisse der drei Primärfarbwerte definiert wird, lassen sich folgende Größen einführen:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R + G + B} & g &= \frac{G}{R + G + B} \\ b &= \frac{B}{R + G + B} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dann ergibt die Summe der drei Anteile eins, es ist also ausreichend zwei Farbanteile darzustellen. Abbildung 3.1 verdeutlicht diese Konstruktion.

Ein Farbreiz  $E$  mit einer konstanten Energieverteilung im sichtbaren Spektralbereich wird vom menschlichen Auge als weiß wahrgenommen. 1931 wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) ein Farbvergleichsexperiment durchgeführt, wobei die spektralen Bestandteile  $\mathbf{E}_\lambda$  von  $\mathbf{E}$  mit drei monochromatischen Primärfarben der Wellenlänge  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$  und  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$  von mehreren



**Abbildung 3.1:** Die Fläche  $r + g + b = 1$  kann als zweidimensionaler Schnitt durch den Farbraum interpretiert werden. Eine Farbvalenz kann nun durch zwei Farbanteile eindeutig definiert werden

Beobachter ermischt wurden [21]. Die Werte für  $\mathbf{E}_\lambda$  wurden auf eine Strahlungsleistung von Eins normiert. Die Farbgleichheit drückt sich mit folgender Formel aus:

$$\mathbf{E}_\lambda = \bar{r}(\lambda) \mathbf{R} + \bar{g}(\lambda) \mathbf{G} + \bar{b}(\lambda) \mathbf{B} \quad (3.7)$$

Die Farbwerte  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  und  $\bar{b}(\lambda)$  werden auch als Spektralwertfunktionen bezeichnet und sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Diese Kurven spiegeln die physiologische Farbempfindung wieder und bilden die Grundlage der Farbmotrik. Abbildung 3.3 zeigt die zweidimensionale Darstellung bezüglich der Farbanteile  $r$  und  $g$  und wird als Farbtafel oder Farbdreieck bezeichnet. Die Einheiten der Primärfarben wurden im Verhältnis  $R : G : B = 72,1 : 1,4 : 1,0$  gewählt, so daß der Farbreiz  $\mathbf{E}$  die Koordinaten  $r_E = g_E = 1/3$  in der Farbtafel erhält.

Ein beliebiger nichtmonochromatischer Farbreiz  $\mathbf{Q}$  ist physikalisch durch seine spektrale Leistungsverteilung  $P(\lambda)$  definiert. Multipliziert man die spektralen Komponenten  $\{P_\lambda d\lambda\}_\lambda$  mit  $\mathbf{E}_\lambda$ , so ergibt sich mit Gleichung 3.7:

$$(P_\lambda d\lambda) \mathbf{E}_\lambda = (P_\lambda d\lambda) \bar{r}(\lambda) \mathbf{R} + (P_\lambda d\lambda) \bar{g}(\lambda) \mathbf{G} + (P_\lambda d\lambda) \bar{b}(\lambda) \mathbf{B} \quad (3.8)$$

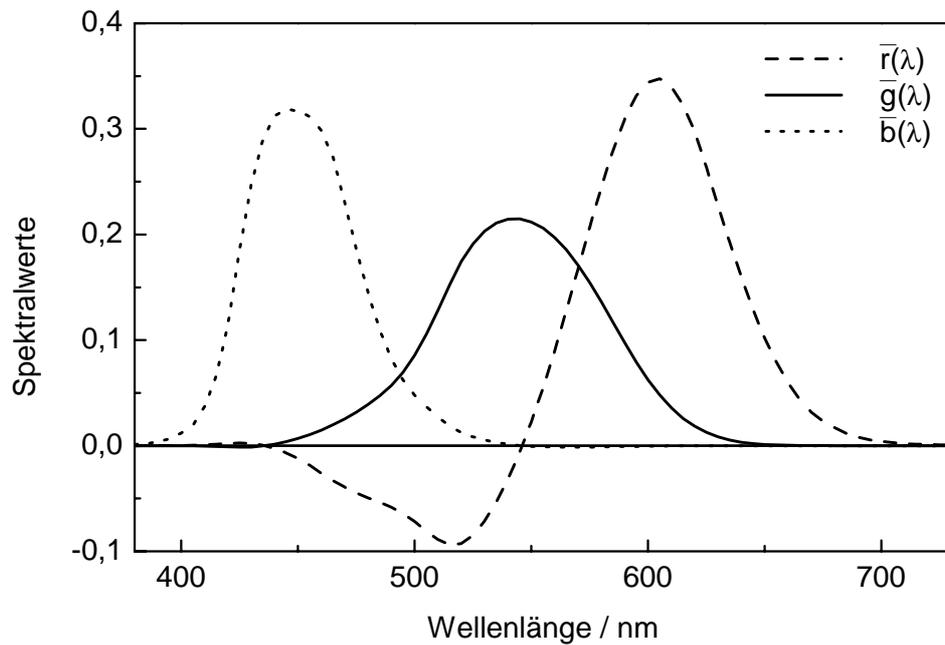
Diese Gleichung repräsentiert die Farbgleichheit von  $\mathbf{Q}_\lambda$  mit der Strahlungsverteilung  $P_\lambda d\lambda$  und dem additiven Gemisch aus den drei Primärfarben. Integriert man nun die Gleichung 3.8, so ergeben sich die Farbmaßzahlen  $R$ ,  $G$  und  $B$  zu:

$$R = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P_\lambda \bar{r}(\lambda) d\lambda, \quad G = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P_\lambda \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

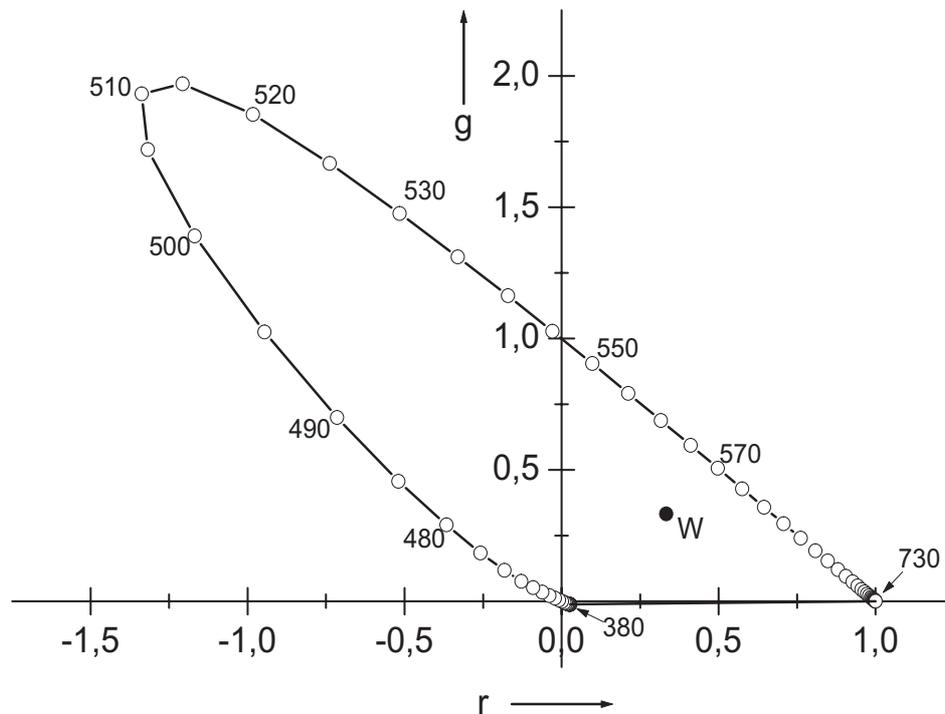
$$B = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P_\lambda \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

Die Maßzahlen für einen beliebigen, nichtmonochromatischen Farbreiz erhält man also durch Aufsummation der spektralen Maßzahlen. Die Integrale in der Gleichung 3.9 können als unendlichdimensionale Vektoren interpretiert werden.

Im Farbvergleichsexperiment beziehen sich die Maßzahlen auf die drei Primärfarben. In der Vektordarstellung definieren diese drei Primärfarben eine Basis  $B = \{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\}$  des Farbvektorraumes in dem ein beliebiger Farbvektor  $\mathbf{Q}$  die Koordinaten  $(R, G, B)$  hat. Beim Übergang von der Basis  $B$  zu einer anderen Basis  $B'$  ändern sich auch die Koordinaten von  $\mathbf{Q}$  zu  $(R', G', B')$  im neuen System. Aus der linearen Operation  $\hat{\mathbf{A}} = a_{ik}$ , die  $B$  in  $B'$  überführt, ergibt sich die Abbildungsvorschrift  $\hat{\mathbf{B}} = b_{ik}$



**Abbildung 3.2:** Spektralwertfunktionen  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  und  $\bar{b}(\lambda)$  des monochromatischen Farbreizes  $E_\lambda$  bezüglich der Primärreize  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  und  $\mathbf{B}$  mit den Wellenlängen  $\lambda_R = 700$  nm,  $\lambda_G = 546,1$  nm und  $\lambda_B = 435,8$  nm



**Abbildung 3.3:** (r,g)-Farbtafel in Form eines rechtwinkligen Koordinatensystems. Die gekrümmte Linie zeigt die monochromatischen Spektralfarben, die hier in 5 nm-Schritten durch die Kreise dargestellt sind. W kennzeichnet den Weißpunkt, der durch die Farbvalenz  $\mathbf{E}$  festgelegt ist

für die Koordinaten, wobei sich  $\hat{\mathbf{B}}$  durch  $\hat{\mathbf{B}} = (\hat{\mathbf{A}}^{-1})^T$  errechnet [22]. Unter der Voraussetzung, daß das additive Prinzip der Farbmischung beachtet wird, können mit den Gleichungen 3.10 und 3.11 die Basisvektoren des Farbraumes fast beliebig transformiert werden [20]. Die praktische Bedeutung solcher Transformationen wird im nächsten Kapitel verdeutlicht.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}' \\ \mathbf{G}' \\ \mathbf{B}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

### 3.1.2 Farbräume

Im Rahmen des CIE-Farbvergleichsexperimentes wurde eine Vektordarstellung der Farbvalenzen im  $RGB$ -Vektorraum eingeführt, wobei die damit verbundenen Spektralwertfunktionen negative Werte annehmen, was sich für viele farbmimetrische Betrachtungen als nachteilhaft erweist. Mit den Gleichungen 3.10 und 3.11 können jedoch Transformationen derart vorgenommen werden, daß die Spektralwertfunktionen ausschließlich positive Werte annehmen. Aufgrund der gekrümmten Form des in der Farbtafel dargestellten Spektralzuges ist es nicht möglich, mit drei sichtbaren Spektrallichtern alle wahrnehmbaren Farben additiv zu mischen. Das heißt, daß die gesuchte Basis nicht durch wahrnehmbare Farben aufgespannt werden kann, sie wird vielmehr durch sogenannte virtuelle Farben definiert, die übersättigte Farbreize darstellen. Ein wichtiges Beispiel einer solchen Basiswahl wird durch die Vektoren  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  und  $\mathbf{Z}$  gebildet. Da Farbräume nach den Basisvektoren benannt werden, spricht man vom  $XYZ$ -Farbraum, der auch als Normfarbraum bezeichnet wird. Entsprechend Gleichung 3.11 transformieren sich das Farbdreieck und die Spektralwertkurven, die nun als die Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  bezeichnet werden. Aus praktischen Gründen wurde zusätzlich für  $\bar{y}(\lambda)$  die Hellempfindungskurve  $V_\lambda$  zugrundegelegt. In Abbildung 3.4 und 3.5 sind die Normspektralwertkurven und die entsprechende Farbtafel grafisch dargestellt.

Ein großer Nachteil der bisher erwähnten Farbräume ist, daß der Abstand zwischen zwei Farben je nach Lage im Farbdreieck vom Menschen unterschiedlich empfunden wird. Daher ist es sinnvoll, durch sogenannte nichtlineare projektive Transformationen einen Farbraum zu erzeugen der dies ungefähr gewährleistet [20]. Mit Hilfe eines solchen Farbraumes ist es möglich, einen Farbabstand zu definieren.

Der  $L^*u^*v^*$ -Farbraum soll an dieser Stelle als wichtiges Beispiel erwähnt werden. Folgende Formeln verknüpfen den  $L^*u^*v^*$  und den  $XYZ$ -Farbraum:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3.12)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (3.13)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (3.14)$$

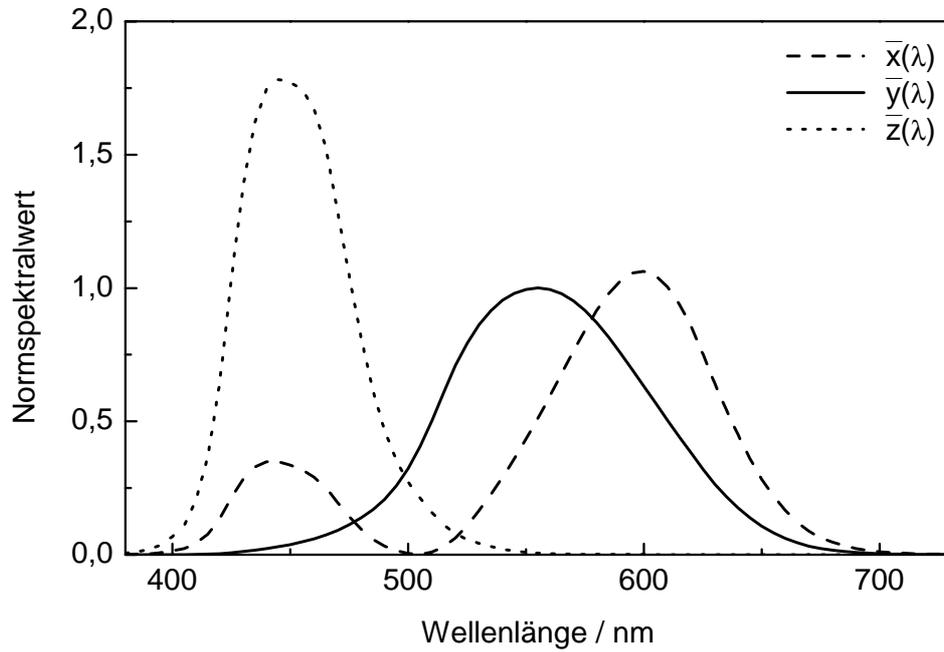


Abbildung 3.4: Normspektralwertfunktionen bezüglich der imaginären Farbreize **X**, **Y** und **Z**

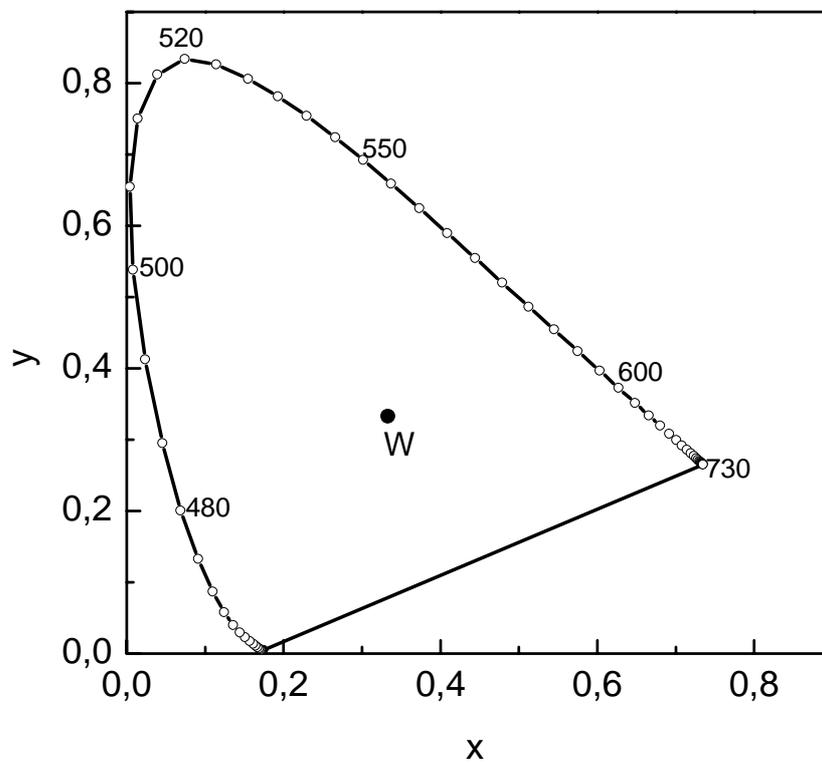


Abbildung 3.5: Normfarbtafel

Die Größen  $u'$ ,  $v'$ ,  $u'_n$  und  $v'_n$  werden wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} & v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \\ u'_n &= \frac{4X_n}{X + 15Y_n + 3Z_n} & v'_n &= \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$X_n$ ,  $Y_n$  und  $Z_n$  sind die Normspektalwerte für den Weißpunkt. Der Farbunterschied  $\Delta E_{uv}^*$  zwischen zwei Farbreizen wird dann mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta E^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (3.16)$$

### 3.1.3 Praktische Bedeutung der Farbmatrik

Die Feststellung, daß sich das menschliche Farbempfinden in der Sprache der Vektoralgebra beschreiben läßt, führt zu einer Reihe von Tatsachen, die für eine praktische Anwendung von großer Bedeutung sind, und daher im folgenden stichpunktartig aufgezählt werden. Diese Zusammenhänge folgen aus der oben beschriebenen mathematischen Beschreibung des Farbsehens:

- Mischt man additiv zwei Farben, die durch die Punkte  $(r_1, g_1)$  und  $(r_2, g_2)$  der Farbtafel beschrieben werden, dann liegt die ermischte Farbe auf deren Verbindungslinie und wird durch das Intensitätsverhältnis definiert. Dies ergibt sich direkt aus der Vektoraddition. In der Darstellung der Farbtafel muß dabei jedoch beachtet werden, daß die Leuchtdichteinheiten der Basisvektoren im Verhältnis  $R : G : B = 72,1 : 1,4 : 1,0$  gewählt werden.
- Mischt man zwei Farben, deren Verbindungslinie den Weißpunkt enthält, im richtigen Intensitätsverhältnis, so ergibt sich Weiß. Die Farben werden dann als komplementär bezeichnet.
- Mischt man additiv drei Farben, dann können nur Farben, die im aufgespannten Dreieck liegen, ermischt werden. Es ist jedoch nicht möglich, dieses Dreieck so zu wählen, daß alle wahrnehmbaren Farben dargestellt werden können. Der Grund liegt in der gekrümmten Form des Spektralfarbzuges.
- Da sich die Farbwerte einer Leistungsverteilung nach den Formeln 3.9 durch Integration berechnen, gibt es eine unendliche Zahl von Leistungsverteilungen, die auf den gleichen Punkt im Farbraum abgebildet werden. Dieser nichteindeutige Zusammenhang wird als Metamerie bezeichnet. Das heißt, daß auf einen Punkt im Farbraum alle Farbreize abgebildet werden, die das menschliche Auge als gleich empfindet.

## 3.2 Prinzip der Farbbildsensorik

Basierend auf der menschlichen Farbwahrnehmung wurde im vorigen Kapitel die Dreikomponenten-Theorie des Farbsehens erläutert. Um Farben zu reproduzieren,

müssen anhand einer Messung mindestens drei unterschiedliche Bewertungsfunktionen herangezogen werden. Im folgenden soll daher auf die prinzipielle Messung von Farben näher eingegangen werden. Sieht man von der sehr arbeits- und personalintensiven Methode der Farbvergleichsexperimente ab, dann kommen zwei Methoden zur Farbmessung in Frage. Aus den Gleichungen 3.9 wird ersichtlich, das nur die spektrale Leistungsverteilung gemessen werden muß (Spektralverfahren), um dann durch Integration die Farbmaßzahlen zu erhalten. Viel einfacher ist das sogenannte Dreibeereichsverfahren, mit dem die Farbmaßzahlen direkt gemessen werden, indem man den Farbreiz mit einen dreigeteilten Sensor detektiert. Die Empfindlichkeiten der drei Sensorteile müssen dann identisch mit den Spektralwertkurven sein, oder zumindest durch eine lineare Transformation aus diesen hervorgehen, so daß drei linear unabhängige Empfindlichkeiten entstehen. Da die Empfindlichkeit eines Sensors nie negativ sein kann, bietet es sich an, die Empfindlichkeiten den Normspektralwertkurven anzupassen. Der Sensor gibt dann direkt die Farbmaßzahlen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  aus, die Integration ist vom Sensor durchgeführt worden. Für eine ausführliche Diskussion der idealen Sensorempfindlichkeit sei an dieser Stelle auf Kapitel 3.3.1 verwiesen.

Farb-Flächenbildsensoren sind Farbsensoren mit einer Ortsauflösung, die durch die Aufteilung der Sensorfläche in viele Bildelemente (Pixel) erreicht wird. Sie werden zum Beispiel in Fernseh- und Videokameras eingesetzt und müssen je nach Anwendung verschiedenen Anforderungen genügen. Neben den rein technischen Eigenschaften sind Größe, Gewicht und Kosten des Bauteils für Massenproduktanwendungen von entscheidendem Interesse. Die obengenannten Methoden zur Farbmessung sind daher nur bedingt für einen Flächenbildsensor geeignet. Für eine Niedrig-Kosten-Anwendung ist das Spektralverfahren nicht praktikabel. Lange Meßzeiten und ein teurer und komplizierter Meßaufbau machen diese Verfahren ungeeignet.

Für die ortsaufgelöste Farbsensorik gibt es mehrere Methoden, die in der Vergangenheit zu verschiedenen Produkten geführt haben. Im folgenden soll auf drei Methoden eingegangen werden, die in diesem Zusammenhang in der Literatur erwähnt werden. Grundbestandteil ist immer ein Flächenbildsensor, der in der Lage ist, Schwarz/Weiß-Bilder zu detektieren. Heutzutage werden dafür Festkörperbildsensoren verwendet. Die Farbinformation muß nun aus mindestens drei verschiedenen Kamerasignalen extrahiert werden, wobei es dafür verschieden Herangehensweisen gibt. Die unterschiedlichen Kamerasignale werden dabei durch eine Kombination eines Flächenbildsensors und einem Farbfilter erhalten. Welche Filter dafür verwendet werden können, wird in Kapitel 3.3 diskutiert. Prinzipiell gibt es auch andere Möglichkeiten, die Empfindlichkeiten von Fotodioden zu verändern [24], die jedoch nicht für hochauflösende Flächenbildsensoren geeignet sind. Im folgenden werden die wichtigsten Methoden zur Buntbildaufnahme aufgelistet:

**Filterradmethode:** Vor einer Kamera dreht sich ein Filterrad mit verschiedenen Farbfiltern, z.B. Rot, Grün und Blau [25]. Das Kamerasignal enthält so alle Farbinformationen in einem zeitlich moduliertem Datenstrang der für eine Bildschirmdarstellung aufbereitet werden kann. Ein aufwendiger und teurer mechanischer Aufbau muß dabei die Kombination von Bildsensor und Filterradmechanismus gewährleisten, was diese Variante ungeeignet für Niedrig-Kosten-Anwendungen

macht. Da die einzelnen Farbanteile nacheinander aufgenommen werden, darf sich während einer Filterraddrehung die Szenerie nicht verändern, was einen Nachteil bei der Detektion von bewegten Bildern darstellen kann.

**3-Chip-Kamera:** Im Gegensatz zur Filterraddrehung werden hierbei drei Bildsensoren verwendet. Die Bildinformation wird mit einem optischen Strahlteiler in drei Strahlengänge aufgespalten, die jeweils einen Farbfilter enthalten, z.B. Rot, Grün und Blau. Die Farbinformation muß dann aus den einzelnen R-, G- und B-Signalen berechnet werden. Studiokameras arbeiten ausschließlich nach diesem Prinzip. Sie zeichnen sich durch sehr gute Farbwiedergabe und eine hohe Auflösung aus. Nachteilhaft ist jedoch das große Gewicht, welches durch die komplizierte optische Strahlführung hervorgerufen wird, und eine aufwendige Justage der drei Bildsensoren zueinander, um Überdeckungsfehler zu minimieren. Für kostengünstige Produkte ist dieser Ansatz ebenfalls ungeeignet.

**1-Chip-Kamera:** Die kostengünstigste Methode verwendet nur einen Bildsensor, über dessen Bildelemente Farbfilter periodisch angeordnet sind. Da die Pixelgröße moderner Flächenbildsensoren im Mikrometerbereich liegt, spricht man von Mikrofarbfiltern, die im allgemeinen direkt auf der Chipoberfläche aufgebracht sind. Somit kann eine feinmechanische Justage der Filter entfallen und es können kompakte zuverlässige Kameras realisiert werden. Für einen beliebigen Pixel wird ein Farbanteil gemessen, während die anderen Anteile aus den umgebenden Pixeln interpoliert werden müssen. Diese Variante kommt ohne zusätzliche Mechanik aus, bietet aber eine vergleichsweise geringe Auflösung und liefert Bildfehler, welche durch das Interpolationsverfahren generiert werden. Die Anordnung der Farbfilter auf dem Sensor hat dabei einen entscheidenden Einfluß auf die Bildqualität und hängt von der Sensorarchitektur und der Anwendung ab, wobei ein enger Zusammenhang mit dem Interpolationsalgorithmus besteht. Da eine Optimierung dieses Filtermosaiks nicht Gegenstand dieser Arbeit war, soll auf Literatur zu diesem Thema verwiesen werden [23].

Bisher wurde von roten, grünen und blauen Farbfiltern gesprochen. Im allgemeinen kann das Farbsignal auch aus anderen Farbanteilen zusammengesetzt werden. Grundlegend für die Farbdetektion und Reproduktion auf einem Bildschirm ist die spektrale Empfindlichkeit des Sensors  $R_S$ , welche sich mit dem Produkt aus Farbfilterkennlinie  $F$  und Empfindlichkeit des Schwarz/Weiß-Sensors  $R_{S/W}$  berechnet.

$$R_S(\lambda) = R_{S/W}(\lambda) \cdot F(\lambda) \quad (3.17)$$

In dieser Formel werden keine Interferenzeffekte berücksichtigt, wie sie bei Dünnschichtsystem auftreten können.

### 3.3 Einsatz von Farbfiltern

Bei den meisten praktischen Anwendungen wird das von einem Flächenbildsensor aufgenommene Bild auf einem Farbbildschirm dargestellt. Die Videokamera als gebräuchliches Massenprodukt ist dafür ein Beispiel. Die sich hieraus ergebenden Anforderungen an den Farbsensor sollen bezüglich der Sensorempfindlichkeiten diskutiert werden.

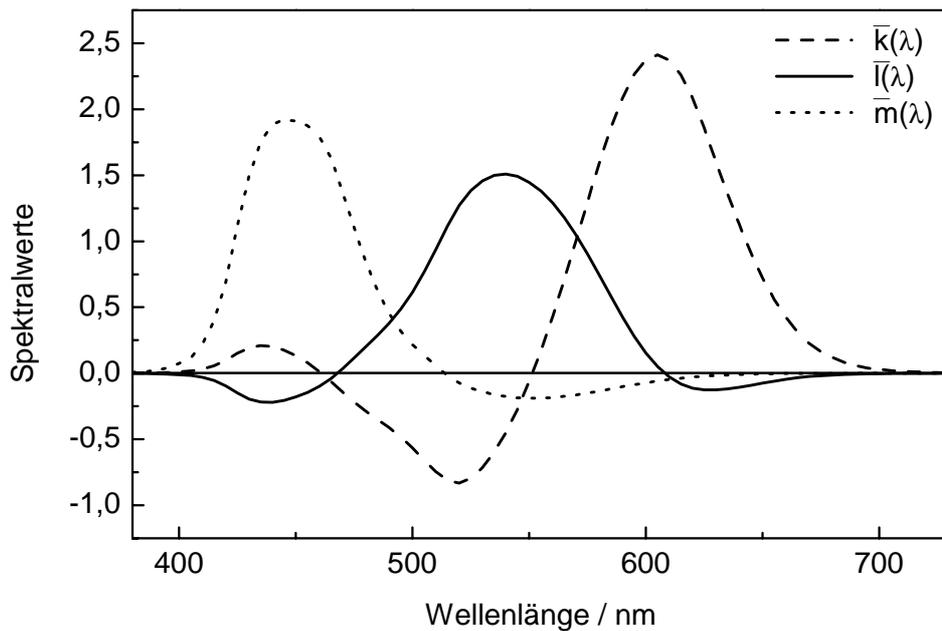
### 3.3.1 Die idealen Farbfilter zur Bilddarstellung

Zunächst soll an dieser Stelle auf den begrifflichen Unterschied von Farbmessung und Farbbewertung und den daraus folgenden Anforderungen an den Farbsensor hingewiesen werden. Beides sind wichtige Verfahren, die mit unterschiedlicher Zielsetzung z. B. in der Produktionskontrolle angewendet werden [26]. Bei der Farbmessung steht die Bestimmung der absoluten Farbkoordinaten im Vordergrund, wohingegen bei der Farbbewertung das Ziel ist, Farbunterschiede so genau wie möglich zu detektieren. Aus den unterschiedlichen Zielsetzungen ergeben sich andere Anforderungen an die spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren. Im folgenden soll auf die idealen Sensorempfindlichkeiten für eine absolute Farbmessung eingegangen werden, da dies eine Grundbedingung für die farbgetreue Darstellung eines detektierten Bildes auf einem Farbmonitor darstellt. Im vorhergehenden Kapitel wurde erwähnt, dass im idealen Fall die Sensorempfindlichkeiten beim Dreibereichsverfahren gleich den Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  und  $\bar{z}$ , oder aus deren Linearkombinationen bestehen müssen, so daß mindestens drei linear unabhängige Empfindlichkeiten entstehen. Wird jedoch eine Darstellung der Sensorsignale auf einem Farbbildschirm angestrebt, müssen zusätzliche Betrachtungen angestellt werden. Der Farbeindruck, den ein Bildschirm beim Betrachter hervorruft, wird durch die additive Farbmischung eines roten, grünen und blauen Leuchtphosphors erzeugt. Idealerweise steuern die Sensorsignale direkt diese drei Kanäle an, um den detektierten Farbreiz unverfälscht durch den Monitor zu reproduzieren. Aus folgenden Gründen sind dem jedoch physikalische Grenzen gesetzt. Die drei Leuchtphosphore können als Basisvektoren des Farbraumes aufgefaßt werden. Aus der Transformation, die diese Basisvektoren mit dem *RGB*-Raum verknüpft, ergeben sich neue Spektralwertfunktionen  $\bar{k}$ ,  $\bar{l}$  und  $\bar{m}$ , welche durch die Sensorempfindlichkeiten nachgebildet werden müssen, damit die Sensorsignale direkt an den Bildschirm weitergegeben werden können [27]. Abbildung 3.6 zeigt die Spektralwertfunktionen der Leuchtphosphore. Da die Spektralwertfunktionen  $\bar{k}$ ,  $\bar{l}$  und  $\bar{m}$  negative Anteile besitzen, ist es nicht möglich, diese durch physikalische Sensorempfindlichkeiten exakt nachzubilden. Um die physikalischen Sensorempfindlichkeiten den idealen Werten anzunähern sind verschiedene Näherungsmethoden entwickelt worden, auf die im Kapitel 3.3.3 näher eingegangen wird.

Das Kriterium des linearen Zusammenhangs von Sensorempfindlichkeiten und den Spektralwertfunktionen  $\bar{k}$ ,  $\bar{l}$  und  $\bar{m}$ , wird in der Literatur fast ausschließlich zur Bewertung und Kalibrierung von Video- und Fernsehkameras herangezogen.

### 3.3.2 Farbfilterkombinationen zur Farbbilddetektion

In der Praxis wird die Sensorempfindlichkeit durch den davor positionierten Farbfilter bestimmt, wobei der Filter durch die spektrale Transmission charakterisiert wird. Mit den Transmissionen ist ebenfalls ein Farbeindruck verbunden, auf den im folgenden Bezug genommen wird. Wie zuvor erwähnt, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Sensorempfindlichkeit zu gestalten, so daß eine fehlerfreie Farbmessung, bzw. Ansteuerung eines Monitors, gewährleistet wird. Eine Nachbildung der Spektralwertfunktionen oder deren Linearkombinationen durch die Sensorempfindlichkeiten ist in der Regel nur mit sehr aufwendigen Methoden möglich [20], welche nicht für eine Miniaturisierung in



**Abbildung 3.6:** Spektralwertfunktionen der Leuchtphosphore

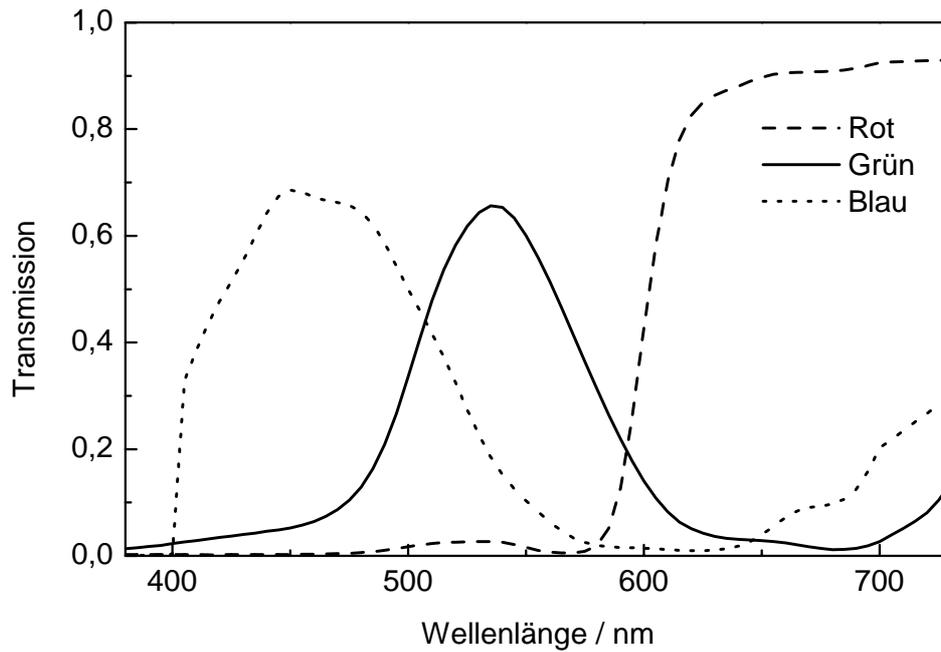
einem Farbmikrofilter geeignet sind. Da nicht beliebige Farbfiltercharakteristiken für die Mosaikfilter-Anwendung zur Verfügung stehen, ist die Herangehensweise eine ganz andere. Betrachtet man die Spektralwertfunktionen der Leuchtphosphore  $\bar{k}$ ,  $\bar{l}$  und  $\bar{m}$ , so fällt bis auf die negativen Anteile eine Ähnlichkeit mit den Spektren eines roten, grünen und blauen Filters auf (vgl. Abbildung 3.7). Ein Sensor mit solchen Filtern kann durch ein Farbkorrekturverfahren optimiert werden.

Am weitesten verbreitet sind die Primärfarben Rot, Grün und Blau, da annäherungsweise die entsprechenden Sensorsignale direkt an die Phosphore des Bildschirms weitergegeben werden können [23, 29]. Abbildung 3.7 zeigt beispielsweise die Transmissionen eines Rot-, Grün- und Blaufilters. Das sogenannte komplementäre Farbsystem mit den Farben Cyan, Gelb und Magenta ergibt sich aus den Primärfarben mit folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \text{Cyan} &= \text{Blau} + \text{Grün} & \text{Magenta} &= \text{Blau} + \text{Rot} \\ \text{Gelb} &= \text{Grün} + \text{Rot} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Diese Farben werden als die Primärfarben der subtraktiven Farbmischung bezeichnet, und spielen in der Drucktechnik eine große Rolle. Ein Vorteil dieses Systems besteht darin, daß ein Komplementärfilter mehr Licht transmittiert, als ein Primärfilter, da die entsprechenden Transmissionskurven breiter sind. Unter geringer Umgebungsbeleuchtung ist daher das Signal eines Komplementär-Sensors größer, als das eines Primärsensors. Daraus ergeben sich z. B. Vorteile bei hohen Bildaufnahmezeiten. Bei hoher Umgebungsbeleuchtung bietet der Komplementär-Sensor keinen Vorteil, da die Belichtungszeit üblicherweise elektronisch auf einen Maximalwert geregelt wird. Eine weitere Variante ergibt sich aus den Sekundärfarben durch die Substitution von Magenta durch Grün. Die Farben Cyan und Gelb enthalten beide Grün, was es ermöglicht, einen Grünfilter aus der Überdeckung von Cyan und Gelb herzustellen und so ein Material

einzusparen [28]. Nachteilig wirkt sich jedoch der schmalbandige Grünfilter im Gegensatz zu den breitbandigen komplementären Filtern Cyan und Gelb aus. Bei hoher Umgebungsbeleuchtung sättigen die Komplementär-Sensoren früher als der Grünsensor, womit eine lichtintensitätsabhängige Farbverschiebung erzeugt wird. Ein weiteres Farbfiltersystem wird durch eine Hinzunahme eines Weißpixels gebildet: Cyan, Grün, Gelb und Weiß [28], wodurch eine direkte Helligkeitsmessung ermöglicht wird. Von einer Kombination des Primärsystems mit Weiß wird in der Literatur nicht berichtet, jedoch von einer Kombination des Primärsystems mit einem Blau-Grün-Filter [30].



**Abbildung 3.7:** Transmissionen der Primärfilter Rot, Grün und Blau. Die Komplementärspektren ergeben sich aus der Addition, z. B.:  $Cy = B + G$

### 3.3.3 Farbkorrektur

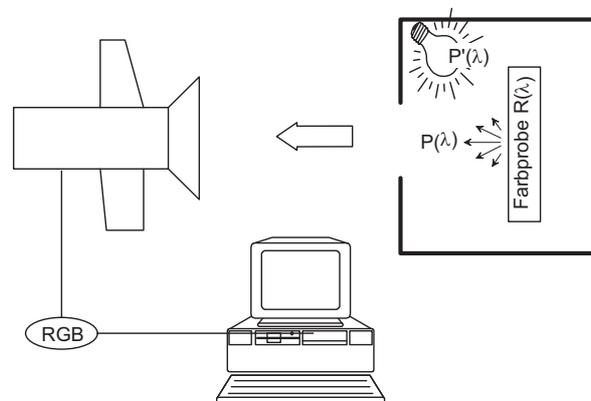
Die Aufgabe der Farbmessung besteht darin, einem Sensorantworttripel die richtigen Farbwerte zuzuordnen. Bei einem Sensor mit mehr als drei Einzelsensoren, z. B. Cyan, Magenta, Grün und Gelb, wird das Sensorantworttripel erst mit Hilfe von Gleichungen 3.18 erzeugt. Die Aufgabe ist erfüllt, wenn der Sensor durch eine geeigneten Operation das gleiche Farbempfinden wie das menschliche Auge hat, d. h. wenn alle Sensormetamere auf Augenmetamere abgebildet werden. Die Schwierigkeit besteht darin, drei unendlichdimensionale Farbsignalvektoren auf ein Sensorantworttripel abzubilden. Es ist daher verständlich, daß in der Praxis prinzipielle Einschränkungen und Annahmen gemacht werden müssen und Näherungsmethoden zum Einsatz kommen. Das Verfahren, welches damit verbunden ist, wird Farbkalibrierung genannt und ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Herstellung von Farbsensoren, Farbscannern und Farbbildkameras. Der in Kapitel 3.3.1 erwähnte lineare Zusammenhang zwischen den Sensorempfindlichkeiten und den Spektralwertfunktionen stellt den Idealfall dar und ist in der Regel nicht gegeben. Er drückt sich in der Tatsache aus, das zum einen metamere Farben dieselben Sensorsignale erzeugen und zum anderen alle Farben welche die gleichen Sensorsignale erzeugen durch das menschliche Auge als gleich empfunden werden. In der Video und Fernsehtechnik werden die linearen Abbildungen durch  $3 \times 3$  Matrizen dargestellt, die als Schaltkreise realisiert sind und zur Signalkorrektur dienen. Aus diesem Grund wird in diesem Zusammenhang häufig von Farbmatrixierung gesprochen [31]. Im folgenden beziehen sich die Begriffe Matrixierung und Kalibrierung auf den gleichen Sachverhalt.

Grundlegend für eine Kalibrierung ist ein Verfahren, mit dem die Farbwiedergabe beurteilt werden kann. Dafür sind in der Vergangenheit verschiedene Methoden vorgeschlagen worden, die unter anderem in [32, 33] veröffentlicht wurden. Um das Prinzip der Farbwiedergabebewertung zu verdeutlichen, soll auf zwei unterschiedliche Methoden eingegangen werden. Bei der einfachsten Methode wird eine bunte Probe bekannter Reflektivität  $R(\lambda)$  mit einer Strahlungsquelle bekannter Leistungsverteilung  $P'(\lambda)$  mit der zu untersuchenden Farbkamera aufgenommen (siehe Abbildung 3.8). Aus den bekannten Werten von  $R(\lambda)$  und  $P'(\lambda)$  lassen sich farbmetrische Koordinaten errechnen, welche mit den gemessenen verglichen werden können. Hierfür bietet es sich an, die Farbkoordinaten in den  $L^*u^*v^*$ -Farbraum zu transformieren, um dann anhand der Farbabstände die Bewertung vorzunehmen. Die in Abbildung 3.9 skizzierte zweite Variante erfordert wesentlich mehr Meßaufwand, da hier der zu untersuchende Farbsensor mit monochromatischem Licht im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 730 nm beleuchtet wird, um so die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit der Einzelsensoren  $R_S$  zu vermessen. Zur Bewertung wird nun das Kamerasignal  $SR$ , das unter Bestrahlung mit dem Farbreiz  $P(\lambda)$  entstehen würde, mit folgender Formel berechnet:

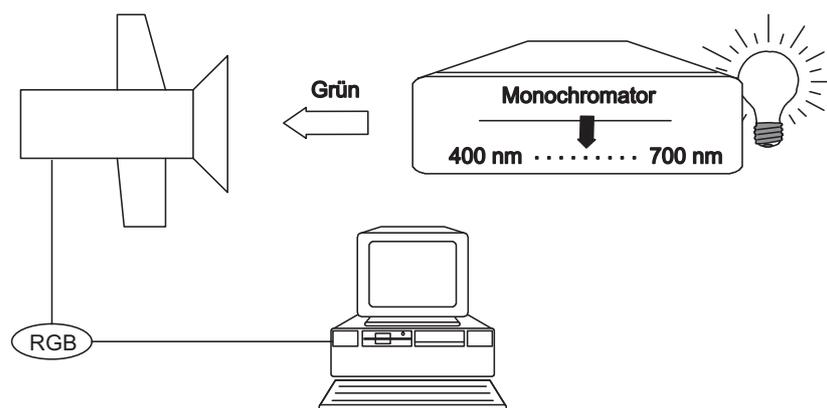
$$SR = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P_\lambda \cdot R_S(\lambda) d\lambda \quad (3.19)$$

Die Berechnung der Farbwerte von  $P_\lambda$  erfolgt mit den Gleichungen 3.9. Die eigentliche Bewertung wird nun wieder anhand der berechneten Farbunterschiede vorgenommen. Beide Verfahren sind im Ergebnis gleich, sie unterscheiden sich nur im meßtechnischen Aufwand.

Ein solches Bewertungsverfahren bildet die Grundlage einer Farbkalibrierung, welche die Farbfehler minimieren soll. Diese Korrektur stellt dabei im mathematischen Sinn eine Abbildung dar, die im Idealfall gewährleistet, daß Zielfarbwerte und Meßfarbwerte identisch sind, d. h. daß die Farbabstände aus den Bewertungsverfahren verschwinden. Dies ist der Fall, wenn die Sensorempfindlichkeiten sich als Linearkombinationen der Spektralwertfunktionen darstellen lassen. In der Praxis ist dies nicht der Fall, so daß mit einem geeigneten Verfahren die Farbabstände minimiert werden müssen. Eine solche Methode wird von Strachan et al. vorgeschlagen [34], wobei es sich um eine lineare Korrektur handelt. Andere, wesentlich aufwendigere Modelle, führen in der Regel zu besseren Ergebnissen. Da jedoch im Rahmen dieser Arbeit diese Thematik nicht bearbeitet wurde, soll auf die Fachliteratur verwiesen werden [35, 36, 37].



**Abbildung 3.8:** Bewertung der Farbwiedergabe mit Hilfe von beleuchteten Farbproben. Die Proben befinden sich in einem Gehäuse und werden mit einer bekannten Strahlungsquelle beleuchtet. Das aus einer Öffnung austretende Licht wird vom zu untersuchenden Sensor detektiert und die Intensität kann elektrisch gemessen werden



**Abbildung 3.9:** Bewertung der Farbwiedergabe mit der spektrophotometrischen Methode. Die Strahlungsverteilung einer Lichtquelle wird mit einem Monochromator in seine spektralen Bestandteile zerlegt, um den zu untersuchenden Sensor zu beleuchten. So können die spektralen Empfindlichkeiten der Einzelsensoren gemessen werden

## 4 Untersuchung von Mikro-Farbfiltren

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen der Mikrofarbfiltren vorgestellt. Für eine detaillierte Darstellung der Prozeßtechnologie integrierter Schaltungen sei auf die Fachliteratur verwiesen [15]. Zuerst sollen jedoch grundlegende Aspekte zu Mikrofarbfiltren erläutert werden.

### 4.1 Anforderungen

Für die Detektion bewegter Bilder ist man wegen kurzer Belichtungszeiten auf empfindliche Fotosensoren angewiesen, was durch die Verwendung von Komplementärfarbfiltren begünstigt wird. Das Fertigungsverfahren, das die geringsten Kosten verursacht, ist die monolithische Integration von Dünnschicht-Filtren, d. h. eine Deposition direkt auf die Schaltkreisoberfläche. Da die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Sensorschaltkreise in CMOS-Technologie gefertigt wurden, muß gewährleistet werden, daß der Farbfiltrenprozeß die Eigenschaften der Schaltung nicht negativ beeinflußt und hinsichtlich von Zuverlässigkeit und Ausbeute als Produktionsprozeß angewendet werden kann. Bei den in der Dünnschichttechnologie angewendeten Strukturierungsverfahren bestimmen die minimal erzeugbaren Strukturgrößen das Anwendungsgebiet. Die zugrunde liegenden CMOS-Bildsensoren hatten eine Pixelgröße von  $10\ \mu\text{m}$  -  $30\ \mu\text{m}$ , so daß dadurch die Anforderungen an den Farbfiltrenstrukturierungsprozeß definiert wurden. Es sollte nur auf kommerziell erhältliche Materialien zurückgegriffen werden, da die Synthese von gefärbten Polymermaterialien nicht Gegenstand der Untersuchungen war. Für die Herstellung eines Grünfilters, sollte eine Überlagerung von Cyan und Gelb untersucht werden, um die Prozeßkosten möglichst gering zu halten.

### 4.2 Absorptions- und Interferenzfilter

Zur Anpassung der Empfindlichkeit von Fotosensoren können sowohl Absorptions als auch Interferenzfilter monolithisch auf einem Sensorchip integriert werden [26, 38]. Ein Filter soll hier definiert werden als ein System, welches die spektrale Verteilung eines Lichtstrahls mit der spektralen Leistungsverteilung  $S(\lambda)$  zu  $S'(\lambda)$  verändert. Liegt die zu filternde Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich, dann spricht man von Farbfiltren. Die wesentliche Größe, die dessen Wirkung beschreibt, ist die Transmission  $T$ . In Kapitel 2 wurde anhand von Gleichung 2.3 auf die Anteile  $T$ ,  $A$  und  $R$  eingegangen. Die Filterwirkung eines Absorptionsfilters beruht hauptsächlich auf dem Absorptionsanteil  $A$ , während der reflektierte Anteil  $R$  die Funktionsweise eines Interferenzfilters bestimmt. Für die technische Anwendung ist es nun bedeutsam, die Transmission  $T$  eines Filters den Anforderungen anzupassen.

### 4.2.1 Absorptionsfilter

Absorptionsfilter werden in vielen Bereichen der Technik angewendet, wobei je nach Anforderungen unterschiedliche Herstellungsverfahren zum Einsatz kommen [39]. Die Färbung eines Glassubstrates und die Beschichtung eines transparenten Substrates mit einer farbigen Schicht sollen hier als Beispiele genannt werden. Im Falle einer monolithischen Integration tritt an die Stelle des transparenten Substrates eine Silizium-Scheibe mit den entsprechenden Sensoren, auf die z. B. eine dünne farbige Schicht aufgebracht und strukturiert werden kann. Dies ist die Methode, die fast ausschließlich für die Herstellung von Bunt-Flächenbildsensoren angewendet wird. Die spektrale Transmission des Filters wird dabei vom Färbematerial und von der Prozeßführung bestimmt. Die Absorption ist als Materialeigenschaft zu verstehen, die durch die chemische Zusammensetzung des Filtermaterials beeinflusst werden kann. Dies führt dazu, daß das Absorptionsverhalten nur in beschränktem Maße den Anforderungen angepaßt werden kann. So ist es z. B. noch nicht gelungen die Normspektralwertfunktionen als Filtertransmission nachzubilden, was eine wesentliche Voraussetzung für hochqualitative Farbsensoren ist. In [20] sind Methoden erwähnt, mit denen Filtertransmissionen, die nahezu gleich der Normspektralwertkurven sind, realisiert werden können. Diese sind jedoch nicht mittels Dünnschichttechnologie fertigbar.

### 4.2.2 Interferenzfilter

Interferenzfilter nutzen die wellenlängenselektive Transmission oder Reflexion aus, um entsprechende Wellenlängenbereiche aus einer Leistungsverteilung  $S(\lambda)$  herauszufiltern. Sie können aus nahezu transparenten Materialien aufgebaut sein, was bedeutet, daß der absorbierte Intensitätsanteil der einfallenden Strahlung im Transmissionsmaximum vernachlässigbar ist. Mit Hilfe solcher Schichtstrukturen wurden in der Gruppe von R. F. Wolfenbuttel die Empfindlichkeiten von Silizium-Fotodioden gezielt verändert [40].

Sehr schmalbandige Interferenzfilter, sogenannte Fabry-Perot Filter, bestehen aus zwei hochreflektierenden Schichten, welche durch eine transparente Zwischenschicht der optischen Dicke  $nd$  separiert sind. Im einfachsten Fall bestehen die Spiegelschichten aus sehr dünnen Metallagen, die jedoch durch nahezu absorptionsfreie dielektrische Vielfachschichten ersetzt werden können, um die Gesamttransmission zu erhöhen [41]. Anwendung finden diese Filter z. B. in der Laserspektroskopie, um die Laserbandbreite zu verringern. Von Correia et al. wurden solche Filter für ein Spektrometer monolithisch auf Silizium-Fotodiodenstrukturen integriert [42].

Die wellenlängenabhängige Reflexion wird z.B. von Frank et al. genutzt, um Farbfilter der Farben Cyan, Yellow und Magenta herzustellen [43]. Der nichterwünschte Wellenlängenbereich wird durch einen dielektrischen Spiegel zurückreflektiert und ist so im transmittierten Anteil nicht mehr enthalten.

Da Interferenzfilter aus einem Schichtstapel von Einzelschichten mit Schichtdicken im Wellenlängenbereich der zu filternden Strahlung bestehen, müssen Methoden der Dünnschichttechnik für die Herstellung angewandt werden, wobei die Filter auf einem transparenten Substrat [43], oder direkt auf einem Chip deponiert werden können [43, 42]. Für die monolithische Integration auf einem Schaltkreissubstrat gibt es bisher

jedoch einige grundlegende Nachteile. Für eine Strukturierung im Mikrometerbereich muß auf Materialien, wie z.B.  $\text{MgF}_2$  [43], zurückgegriffen werden, die eine Kontaminationsquelle für den Siliziumschaltkreis und die Prozeßanlagen darstellen.

Der Vorteil von Interferenzfiltern liegt in der Tatsache begründet, daß die Steilheit der Filterkurven extrem hoch gestaltet werden kann, was von großer Bedeutung für die Farbbewertung ist [44]. Anwendung finden solche Systeme u.a. in der Produktionskontrolle, um Farbunterschiede zu detektieren.

### 4.2.3 Vergleich der Filterarten

Absorptionsfilter sind in der Herstellung billiger und werden seit ca. 20 Jahren als Farbfilter für Flächenbildsensoren verwendet. Da Interferenzfilter mit Materialien und Abscheidemethoden hergestellt werden, die in der Fertigung von integrierten Schaltkreisen nicht gebräuchlich oder mit diesen nicht verträglich sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich mit Absorptionsfarbfiltern gearbeitet.

## 4.3 Stand und Entwicklung der Technik

Grundsätzlich können Dünnschicht-Absorptionsfarbfilter hinsichtlich ihres Materials klassifiziert werden. In der Literatur werden für die Bildsensoranwendung ausschließlich Farbstoffpigmente zum Aufdampfen sowie Polymere erwähnt. Mit den entsprechenden Dünnschichtverfahren sind diese Stoffe für die Herstellung von Mosaikfarbfiltern geeignet. Etabliert haben sich diese Technologien bei der Fertigung von CCD-Flächenbildsensoren (Charge Coupled Device) und LCD-Flachbildschirmen (Liquid Crystal Display) in den achtziger Jahren. Für die oben genannten Materialien sind verschiedene Herstellungsverfahren entwickelt worden. Im folgenden wird näher auf die Einfärbung von Polymerstrukturen, auf die Verwendung von gefärbten Polymermaterialien und auf die Erstellung von Filtern aus Farbstoffaufdampfschichten eingegangen.

### 4.3.1 Einfärbung von Polymerstrukturen

Nachdem 1975 erstmalig von einem CCD-Kamerasystem berichtet wurde, welches mit einem Strahlteiler und drei CCD-Sensoren arbeitete [45], wurde fortan die Entwicklung eines kostengünstigen und tragbaren Bunt-Kamerasystems intensiv verfolgt. Die Machbarkeit einer Ein-Chip-Farb-Videokamera wurde erstmals Ende der siebziger Jahre von Dillon et al. von der Firma Kodak nachgewiesen [46].

Die von Dillon gefertigten Mikrofarbfilterarrays wurden auf Glassubstrate aufgebracht und anschließend auf dem Bildsensor mit einem aufwendigem Justierverfahren befestigt. Ein Jahr später war man bei der Firma Kodak schon in der Lage, die Farbfilter direkt auf die Bildsensoren zu deponieren und so den Farbfilterprozeß kostengünstiger und zuverlässiger zu gestalten [47]. Hergestellt wurden diese Einschicht-Farbfilter, indem ein Polymerfilm auf einem Substrat aufgebracht und anschließend über die Öffnungen von Fotolackschichten nacheinander mit den Farben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) gefärbt wurde. Zur Färbung wurde Papier mit Farbstoff getränkt und mit dem Sensorwafer in Kontakt gebracht. Unter Hitzeeinwirkung konnte der Farbstoff verdampfen und durch die Fotolacköffnungen in die Basispolymerschicht diffundieren. Die

Anforderungen einer reproduzierbaren und gleichmäßigen Transmission konnten jedoch nur schlecht erfüllt werden [48].

Wenig später wurden Ergebnisse der japanischen Firma Hitachi bekannt, die ein komplementäres Farbfiltermosaik mit Cyan, Gelb, Grün und Weiß monolithisch realisieren konnten [49, 50]. Auch die Schichtabfolge und Färbetechnik dieser Mehrschicht-Farbfiler, unterschied sich von der Kodakversion. Erste Versuche der Firma Hitachi bestanden offensichtlich darin, die RGB-Farbfiltertechnologie auf Glassubstraten der Firma Kodak zu kopieren [51]. Jedoch gab es Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Filtertransmissionen und mit der gegenseitigen Färbung der Filter untereinander [50], woraufhin eine eigene Technologie entwickelt wurde. Eine strukturierte Polymer-schicht wurde nachträglich in einer Farbstofflösung gefärbt. In zwei Strukturierungs- und Färbeschritten entstanden Cyan- und Gelb-Filter und durch deren Überlappung der Grün-Filter. Schutzschichten waren notwendig um ein gegenseitiges Einfärben zu verhindern. Wegen der guten optischen Eigenschaften und der vergleichsweise hohen Hitzebeständigkeit wurde Gelatine als einzufärbende Schicht verwendet.

Inzwischen gibt es eine Fülle von veröffentlichten Farbfiltertechnologien, die auf eine der beiden dargestellten Methoden basieren. Gegenstand der Entwicklung war das zu färbende Polymermaterial. Hohe Auflösung, gute Färbereigenschaften, Hitze und Lichtbeständigkeit waren wesentliche Gesichtspunkte, um eine Optimierung vorzunehmen. Zwei Materialklassen haben sich dabei herausgebildet: Natürliche Protein-Polymere, wie Gelatine und Casein [52, 53, 55], die mit einer fotoaktiven Komponente, wie zum Beispiel Ammonium-Dichromat, versetzt werden sowie synthetische Polymere [56, 57, 58], die die Grundsubstanz von modernen Fotolacken bilden. Beide Materialklassen werden als eine Art Fotolack prozessiert, um dann jedoch nach dem Einfärbeschritt nicht wieder entfernt zu werden. Aufgrund ihrer natürlichen Herkunft läßt sich bei Gelatine und Casein nicht die Polymercharakteristik im Rahmen der Prozeßanforderungen exakt kontrollieren [56]. Dies war die Motivation dafür, trotz hervorragender Färbereigenschaften und Hitzebeständigkeit, synthetische Ersatzmaterialien zu erforschen. Andere Firmen, wie z. B. NEC, entwickelten Technologien, die Elemente aus beiden zuvor erwähnten Varianten enthalten [48].

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß jede Technologie Vor- und Nachteile aufweist und es nicht möglich erscheint, eine objektive Bewertung vorzunehmen. Grundsätzlich sei hier erwähnt, daß ein Erfolg der Einfärbetechniken in hohem Maße von der Beherrschung zahlreicher Prozeßparameter abhängt. Profitieren konnte man dabei von der Foto- und Beleuchtungsindustrie, die diese Materialien und Färbemethoden etabliert hatten [39]. Die Firma Mitsubishi erzielte Anfang der neunziger Jahre mit Casein-Polymerfiltern Strukturgrößen von  $5 \mu\text{m}$  [53].

### 4.3.2 Gefärbte Polymere

Alternativ zu der Einfärbung von Polymerstrukturen können Farbfiler auch direkt aus einer farbstoffenthaltenden Polymerschicht hergestellt werden. Forciert wurde diese Entwicklung von den Flachbildschirmherstellern, die nach einfacheren Beschichtungstechnologien suchten, die geeignet waren, auf großen Flächen Farbfiler mit hoher Lichtstabilität zu deponieren. Die UV-Lichtbeständigkeit der Gelatine-Farbfiler

ist eher gering, so daß synthetische Polymere bevorzugt werden. Da natürliche Polymere Metallionen enthalten, die sich als schädlich für die Zuverlässigkeit integrierter Schaltungen erwiesen [54], bieten synthetische gegenüber natürlichen Polymeren einen weiteren Vorteil. Die bisher besprochenen Einfärbe-Varianten eigneten sich wegen ihrer Komplexität immer weniger für stetig größer werdende Bildschirm-Substrate. Ende der achtziger Jahre stellte die amerikanische Firma Brewer Science eingefärbte Polyimidschichten in den Farben Rot, Grün und Blau für Flachbildschirme vor [59]. Die Polyimidschichten entstanden, indem eine Polyaminosäure auf ein Substrat aufgeschleudert wurde und dann in einem Temperprozeß in ein Polyimid umgewandelt wurde. Da das Polymermaterial den Farbstoff schon enthielt, konnte der komplette Färbeprozess entfallen. Die Farbschichten selbst waren nicht fotoempfindlich und mußten daher über eine Fotolackmaskierung strukturiert werden. Ein großer Vorteil der Polyaminosäure-Schichten war es, nach einer Vortemperung im Fotolackentwickler ätzbar zu sein, so daß das Entwickeln des Fotolacks und das Strukturieren der Farbschicht in einem Prozeßschritt durchgeführt werden konnte. Nach dem Ablösen des Fotolacks und einer weiteren Temperung waren die Filterstrukturen resistent gegenüber weiteren Farbbeschichtungsprozessen, so daß ein Dreifilter-Muster aufgebaut werden konnte.

Eine Weiterentwicklung bestand darin, den im Polymer gelösten Farbstoff durch Farbpigmente zu ersetzen, um eine bessere Licht-, Hitze- und chemische Stabilität zu erlangen. Laut [60] zeigen diese pigmentdispergierten Systeme die besten Eigenschaften für eine Flachbildschirmanwendung. Die Schichten haben die Charakteristik eines Negativfotolacks und der Prozeß konnte gegenüber der Polyimidvariante nochmals vereinfacht werden. Die Firma Matsushita berichtet in [61] von der Realisierung einer komplementären Farbfiltertechnologie mit den beschriebenen Eigenschaften.

Eine weitere Methode Mosaikfarbfilter aus gefärbten, nicht fotoempfindlichen Polymerschichten herzustellen wird in [62] beschrieben. Als Grundpolymer dient Polycarbonat, welches mit verschiedenen Farbstoffen rot, grün und blau gefärbt werden kann. Nach der Deposition der ersten Schicht wird diese mit Aluminium bedampft und anschließend mit Fotolack beschichtet. Nach der Strukturierung des Fotolacks erfolgt ein Naßätzschritt, um das Aluminium an den entsprechenden Stellen zu entfernen. Daraufhin wird im Sauerstoffplasma die Farbschicht geätzt und gleichzeitig der Fotolack entfernt. Weitere Farbschichten können nun auf die gleiche Weise prozessiert werden. Die zuvor erstellten Farbfilter werden in den folgenden Plasmaätzschritten von der Aluminiummaske geschützt. Diese wird erst nach der Strukturierung aller Farbfilter entfernt. Strukturgrößen von  $50\ \mu\text{m}$  konnten so erreicht werden. Die Anwendung für Flächenbildsensoren wird in der Literatur jedoch nicht erwähnt. Es ist anzunehmen, daß mit den Plasmaprozessen vergleichsweise hohe Herstellungskosten verbunden sind.

### 4.3.3 Farbfilter aus Farbstoff-Aufdampfschichten

Intensive Untersuchungen zu aufgedampften Farbstoffpigmenten wurden Ende der achtziger Jahre von Fritz et al. durchgeführt [63, 64, 65]. Das Ziel war die hohe Farbreinheit und die hervorragende chemische Resistenz dieser Schichten auszunutzen, um Cyan-, Gelb- und Grünfilter herzustellen. Der von Philips entwickelte Farbfilterprozeß mit aufgedampften Farbstoffpigmenten wird ausführlich in [66] beschrieben. In beiden

Fällen werden die Schichten mit einem sogenannten Lift-Off-Verfahren strukturiert. Eine Fotolackmaske bedeckt alle Flächen, die im nachfolgenden Bedampfungsschritt nicht mit der Farbschicht versehen werden sollen. Beim anschließenden Entfernen dieser Fotolackmaske bleiben nur an den erwünschten Stellen die Farbschichten haften. Aus der Anzahl der Veröffentlichungen kann man jedoch schließen, daß dieses Verfahren keine weite Verbreitung gefunden hat. Wahrscheinlich ist, daß dies mit der aufwendigen Aufdampftechnik zusammenhängt.

#### 4.3.4 Marktanalyse bezüglich der Verfügbarkeit von Farbfiltermaterialien

In der Literatur wird von verschiedenen Farbfiltertechnologien für Flächenbildsensoren berichtet. Diese stammen jedoch größtenteils von CCD-Herstellern, die diese Technologien für die eigene Anwendung bereitstellen und nicht kommerziell verfügbar machen. Da CMOS-Bildsensoren mit Standard-Prozessen gefertigt werden können, die keine Farbfiltertechnologien enthalten, muß auf kommerzielle Materialien und Technologien zurückgegriffen werden. Die in Kapitel 4.1 genannten Anforderungen schränken die Wahl für ein Farbfiltermaterial stark ein. Für eine eigene Farbfilterpräparation wurde ausschließlich nach gebrauchsfertigen Farbmaterialien, die zum Schleuderbeschichten geeignet sind, gesucht. Vier Anbieter konnten ausfindig gemacht werden, die in erster Linie Produkte für die Flachbildschirmherstellung produzieren. Fuji Hunt und Shipley bieten ein RGB-Farbfiltersystem an, welches auf einem negativ fotoempfindlichen Acrylatpolymer basiert und durch eine Pigmentdispersion gefärbt ist. Die Firma JSR Electronics bietet ebenfalls ein RGB-Farbfiltersystem an, jedoch nicht auf dem europäischen Markt. Auskünfte über das Materialsystem wurden nicht gegeben. Nach den durchgeführten Recherchen bietet die Firma Brewer Science als einzige Firma neben dem RGB-System auch ein komplementäres Farbfiltersystem aus Polyimidschichten an. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Untersuchungen zur Prozeßentwicklung ausschließlich auf dieses Materialsystem. Als neuestes Produkt bietet die Firma Brewer Science auch ein RGB-Filterssystem an, welches aus einem fotoempfindlichen Material besteht und mit i-Linie-Belichtungsanlagen prozessiert werden kann.

### 4.4 Entwicklung eines Farbfilterprozesses

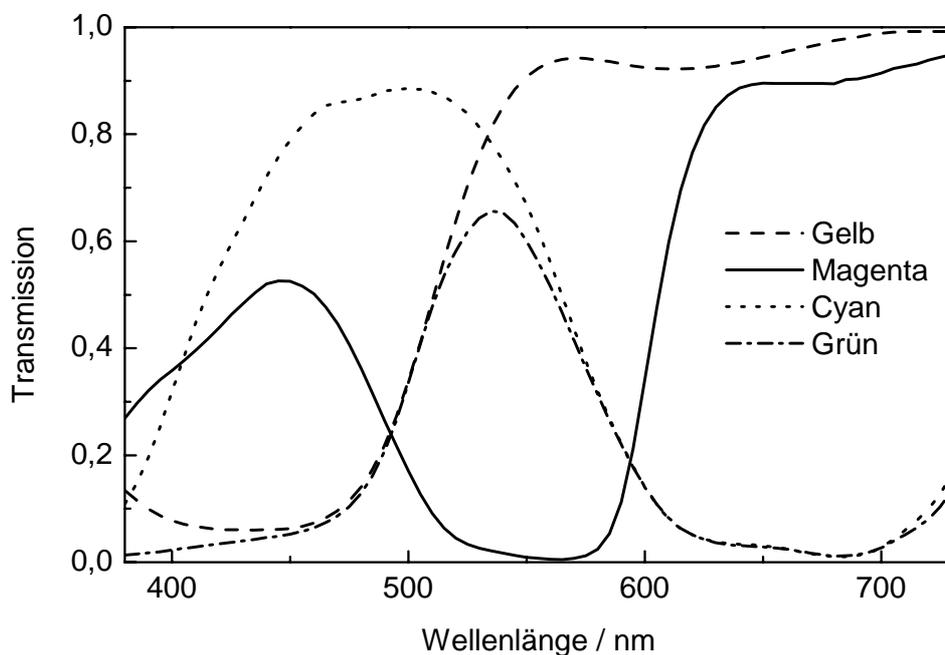
In diesem Kapitel soll auf die Präparation der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Mikrofarbfilter eingegangen werden. Wie im Kapitel 4.3.4 beschrieben, wurden alle Entwicklungsarbeiten mit den Produkten der Firma Brewer Science durchgeführt. Die verwendeten Schichtmaterialien Cyan01, Yellow12 und Magenta waren als Experimentiermuster deklariert und nur durch die Transmission spezifiziert. Andere Eigenschaften wurden im Rahmen dieser Arbeit mit ausgewählten Methoden analysiert.

#### 4.4.1 Das Farbfiltermaterial

Bei dem verwendeten Material handelt es sich um eine Lösung aus Polyaminosäuren, die durch einen Temperprozeß zu einem Polyimid umgewandelt werden. Die mit dem

Farbeindruck verbundene wellenlängenabhängige Absorption wird dabei von Metallkomplexen hervorgerufen, welche als Färbemittel im Polymer gebunden sind. Nähere Informationen über das Materialsystem wurden von der Firma Brewer Science aus Geheimhaltungsgründen nicht gegeben. Nach Angaben von Brewer Science sind die Metallkomplexe derart im Polymer eingebunden, daß sie für eine Anwendung für Siliziumsichtungen geeignet sind. In der Fertigung von integrierten Schaltungen haben sich Polyimide in einigen Anwendungsbereichen etabliert. Zum Beispiel werden sie in DRAM-Bausteinen (Dynamic Random Access Memory) als Passivierung eingesetzt, um Gehäusespannungen vom Chip fernzuhalten und Alpha-Teilchen zu absorbieren, welche zu Fehlfunktionen im Schaltkreis führen können.

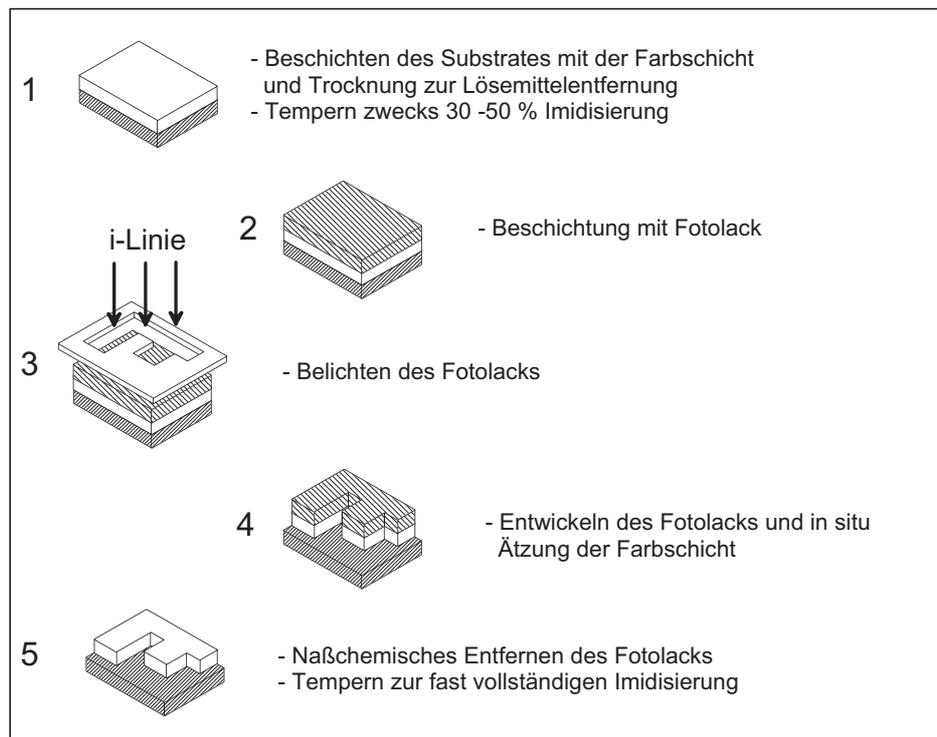
Als grundlegende Eigenschaft eines Farbfilters wurde die Transmission  $\tau$  mit dem Zweistrahl-Spektralfotometer gemessen (siehe Abbildung 4.1). Dazu wurden Farbschichten auf Glassubstraten deponiert. Durch den großen überlappenden Spektralbereich der Cyan- und Gelbfilter kann ein Grünfilter durch die Überlagerung einer Gelb- und Cyanfarbschicht mit einer Maximaltransmission von 65% erzeugt werden. Besonders die Filter Cyan und Gelb zeichnen sich durch hohe Durchlässigkeiten von über 80% im Transmissionsmaximum aus.



**Abbildung 4.1:** Transmissionskurven der Farbschichten Cyan, Magenta und Gelb der Dicke 590 nm, 820 nm bzw. 620 nm, gemessen in einem Zweistrahl-Spektralfotometer. Die Transmission des Grünfilters, aus der Überlagerung von Cyan und Gelb, ist ebenfalls eingetragen. Im Referenzstrahlengang befand sich ein unbeschichtetes Glassubstrat

#### 4.4.2 Der Farbfilterprozeß

Die Mikrofarbfilter werden mit der fotolithografischen Methode hergestellt. Im wesentlichen besteht dieses Verfahren aus der ganzflächigen Beschichtung einer Siliziumscheibe mit einer Farbschicht und dem anschließenden Entfernen der Beschichtung an bestimmten Stellen. So können Strukturen mit Abmessungen von wenigen Mikrometern erzeugt werden. Diese Prozeßsequenz wird mehrmals wiederholt, um verschiedene Farbfilter zu erstellen. Gegenstand der Untersuchung zum Strukturierungsverfahren war in erster Linie, ob die in Kapitel 4.1 genannten Anforderungen erfüllt werden können. Alle Versuche wurden in einem Klasse-10-Reinraum<sup>3</sup> auf 6 Zoll Silizium-Substraten durchgeführt, was einer üblichen Fertigungsumgebung für integrierte Schaltkreise mit  $0,5 \mu\text{m}$  bis  $1 \mu\text{m}$  Strukturbreiten entspricht. In Abbildung 4.2 ist der Prozeßablauf schematisch dargestellt. Die Schichterstellung erfolgte mit dem Aufschleuderverfahren, wozu eine Anlage der Firma Convac zur Verfügung stand. Die Scheiben werden von zwei Roboterarmen zu den integrierten Heiz- und Kühlplatten transportiert, wodurch eine hohe Reproduzierbarkeit und Partikelfreiheit gewährleistet ist. Beim Aufschleuderverfahren wird durch die Umdrehungszahl der Scheibe die Schichtdicke eingestellt. Nach einer Rotationsdauer von ca. einer Minute ist das Lösemittel zum großen Teil aus der Schicht verdampft. Durch das folgende Trocknen auf einer Heizplatte bei  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  wird



**Abbildung 4.2:** Prozeßschrittfolge der Farbfilterstrukturierung. Beschrieben sind jeweils die Prozesse, die zum dargestellten Zustand führen

<sup>3</sup>Die Klasse eines Reinraums wird definiert durch die Anzahl der Partikel einer Mindestgröße in einem Kubikfuß (ca. 28 l)

noch verbliebenes Lösemittel verdampft und die Schicht zum Transport der Scheibe fixiert. In einem weiteren Temperschnitt bei ca. 180 °C wird die basische Löslichkeit der Schicht drastisch reduziert. Dies wird im folgenden Strukturierungsschritt ausgenutzt. Auf die Farbschicht wird eine Fotolackschicht mit dem gleichen Beschichtungsverfahren aufgebracht, getrocknet und anschließend mit einer Projektionsbelichtungsanlage belichtet. Beim anschließenden Entwickeln des Fotolacks mit basischem Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) in wässriger Lösung, wird gleichzeitig die zugrundeliegende Farbschicht geätzt. Sobald der Fotolack naßchemisch mit Polyglycolmonomethyletheracetat (PGMEA) entfernt wird, kann im dritten Temperschnitt bei 230 °C durch eine thermisch aktivierte chemische Reaktion das Farbmateriale in ein Polyimid umgewandelt werden. In diesem Zustand ist die Farbschicht resistent gegenüber Lösemitteln, so daß weitere Farbbeschichtungen stattfinden können, um verschiedene Farbfilter auf demselben Substrat zu deponieren.

#### 4.4.3 Strukturierungsergebnisse

In der Dünnschichttechnologie sind verschiedene Verfahren bekannt, Strukturen im Mikrometerbereich herzustellen, wobei in der Fertigung von integrierten Schaltkreisen ausschließlich die lithografische Methode angewandt wird. Je nach Ätzverfahren und Ätzverhalten entstehen charakteristische Ätzprofile. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Naß- und Trockenstrukturierungsverfahren, bzw. zwischen isotropen und anisotropen Ätzverhalten. Im Gegensatz zu Trockenätzprozessen ist der anlagentechnische Aufwand von Naßätzprozessen wesentlich geringer. Sehr kleine Strukturen können jedoch mit dem Naßätzen nicht erreicht werden. Für eine ausführliche Darstellung zu diesem Thema wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [67, 68, 69].

Zur Charakterisierung eines Ätzprozesses verwendet man folgende Größen: Die Kantenverschiebung  $KV$ , welche aus der Differenz von Lackmaskengröße und geätzter Strukturgröße berechnet wird (siehe Abbildung 4.3) und die Auflösung  $AL$ , welche die minimal erstellbare Strukturgröße angibt. Die Kantenverschiebung entsteht also aus dem Unterätzen der Fotolackschicht.  $KV$  und  $AL$  sind miteinander gekoppelt. Es ist nicht möglich Lackmaskenmaße, die kleiner als  $2 \cdot KV$  sind, als Struktur zu übertragen (siehe Abbildung 4.4). Ideal ist eine Auflösung, welche nur durch die Belichtungsanlage begrenzt ist, was einer Kantenverschiebung von Null entspricht. Ist die Haftung des Fotolacks nicht ausreichend, kann es zu weiteren Effekten führen, die die minimalen Strukturgrößen begrenzen [92].

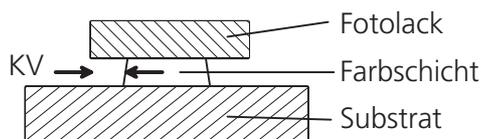
Um Kantenverschiebung und Auflösung im Rahmen dieser Arbeit experimentell zu bestimmen, sind entsprechende Teststrukturen entworfen und auf den Lithografiefmasken integriert worden. In Abbildung 4.5 ist eine Struktur dargestellt, mit deren Hilfe die Größe  $KV$  bestimmt werden kann. Die Karos der Lackmaske überlappen sich um jeweils  $2 \cdot b$ . Stoßen die strukturierten Farbpixel an den Ecken zusammen, dann ist  $b = KV$ . Da  $b$  bekannt ist, kann  $KV$  bestimmt werden. Zur Bestimmung der Auflösung können verschieden große Pixel herangezogen werden.

Die Qualität eines isotropen Ätzprozesses wird jedoch auch von der Schichtdickenhomogenität der zu ätzenden Schicht beeinflusst, da es nicht möglich ist, die Ätzzeiten lokal auf dem Substrat anzupassen. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Untergrund

so planar wie möglich zu gestalten. Entsprechende Planarisierungsverfahren werden in Kapitel 4.5 vorgestellt. Ist jedoch schon eine Farbfilterschicht vorhanden, dann muß diese Topologie in den Strukturierungsprozeß miteinbezogen werden, so daß die grundlegenden Versuche zur Auflösung und Kantenverschiebung nur noch bedingt aussagefähig sind.

Nach der Erläuterung des Strukturierungsverfahrens sollen nun die damit erzielten Ergebnisse vorgestellt werden. Dabei wird zwischen Untersuchungen an Einzelschichtsystemen und Farbfiltermosaiken unterschieden. Versuche an Einzelschichtsystemen ermöglichen eine einfache und schnelle Charakterisierung des Strukturierungsverhaltens einer Farbschicht. Bei der Erstellung eines Mosaiks spielen auch die Abstände zwischen verschiedenen Pixeln eine Rolle und können anhand realistischer Pixelstrukturen für CMOS-Bildsensoren untersucht werden.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Teststrukturen konnte das Ätzverhalten und die damit verbundene minimale Auflösung ermittelt werden. Die Auswertung der Teststrukturen ergaben bei optimierter Ätzzeit eine Kantenverschiebung von  $(0 \pm 0,2) \mu\text{m}$  für Cyan und eine Kantenverschiebung von  $(0,5 \pm 0,2) \mu\text{m}$  für Gelb und Magenta. Anhand der Abbildungen 4.6 und 4.7 erkennt man das Ätzprofil von Cyan und Gelb. Vor allem bei der Gelbschicht macht sich ein Ätzprofil bemerkbar, welches mit einer nicht ideal haftenden Lackmaske erklärt werden kann [92]. Die Materialien werden also unterschiedlich stark und mit verschiedenen Profilen unterätzt. Es konnten minimale Strukturgrößen von ca.  $3 \mu\text{m}$  erzielt werden. Weitere Untersuchungen zur Kantendefinition sind jedoch für eine minimal erforderliche Pixelgröße von  $9 \mu\text{m}$  nicht notwendig, da es sich hierbei um Randeffekte handelt, die erst an Bedeutung gewinnen, wenn die minimale Pixelgröße weit geringer als  $9 \mu\text{m}$  betragen soll, was nicht Ziel dieser Untersuchungen gewesen ist.

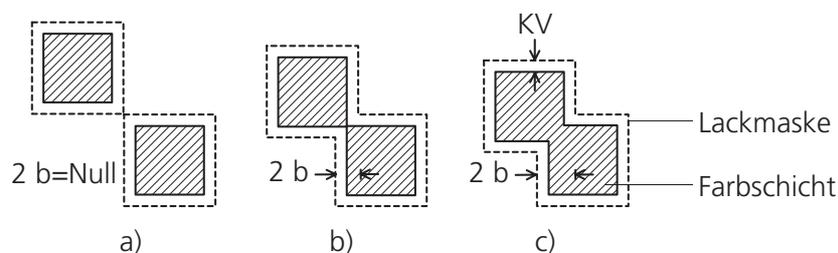


**Abbildung 4.3:** Die Kantenverschiebung ergibt sich aus der Unterätzung des Fotolacks

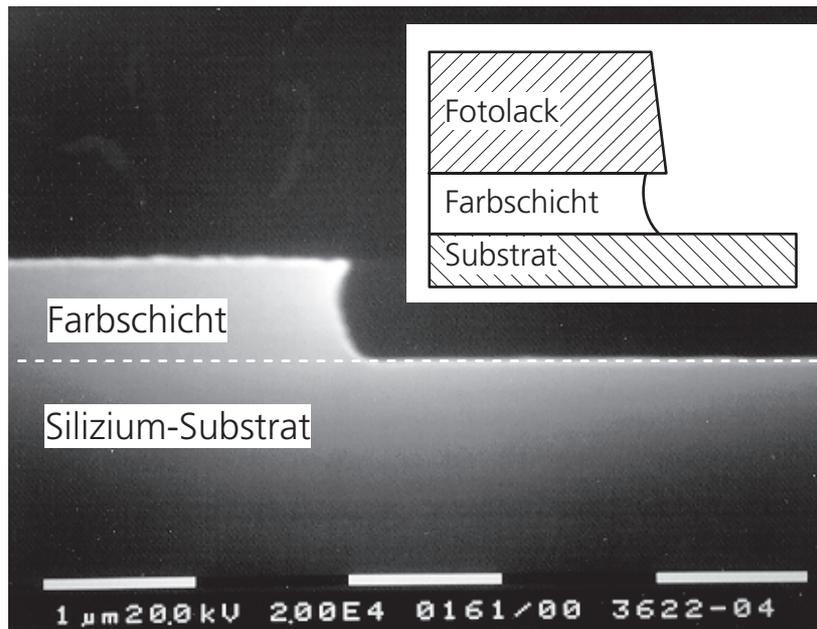


**Abbildung 4.4:** Zusammenhang von Auflösung  $AL$  und Kantenverschiebung  $KV$ . a) aufgelöste Strukturbreite gleich Null; b) aufgelöste Strukturbreite gleich  $KV$

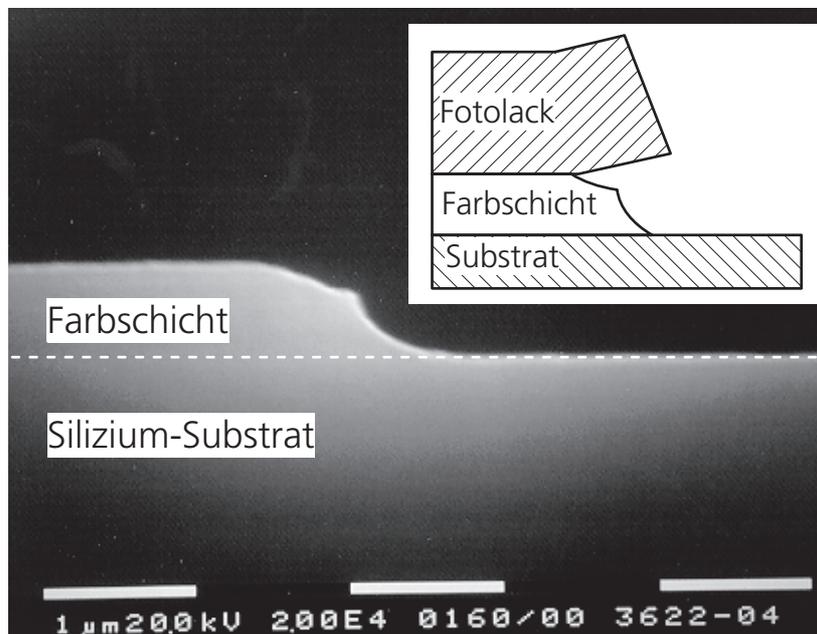
Nach der Untersuchung von Einzelschichten wurde die Erstellung von Pixelanordnungen analysiert, wie sie für eine Kameraanwendung realistisch sind. Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Cyan/Magenta/Grün/Gelb-, bzw. eines Cyan/Grün/Gelb-Farbfiltermosaiks. Die Seitenlänge eines Farbfilterpixels beträgt  $25\ \mu\text{m}$ , bzw.  $10\ \mu\text{m}$ , wobei die Pixel untereinander einen Abstand von  $1\ \mu\text{m}$  haben. In Abbildung 4.10 ist eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Cyan/Gelb/Grün-Farbfiltermosaiks zu sehen. Die deponierten Farbfilter haben eine Kantenlänge von  $9\ \mu\text{m}$  und einen Abstand von  $1\ \mu\text{m}$  zwischen den verschiedenen Farbpixeln, was einer Translationsperiode des Sensorarrays von  $10\ \mu\text{m}$  entspricht. Die Anforderungen an die minimalen Strukturgrößen konnten also mit dem beschriebenen Strukturierungsverfahren erfüllt werden.



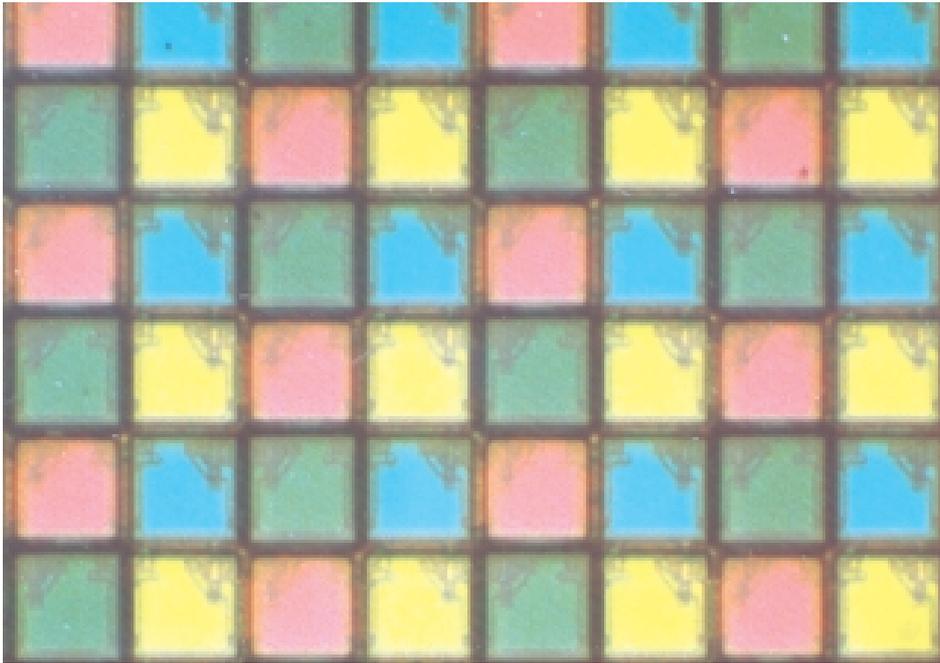
**Abbildung 4.5:** Teststrukturen zur Kontrolle der Kantenverschiebung. Der Überlapp der Fotolackpixel wird hier mit  $2 \cdot b$  bezeichnet. Dargestellt sind Farbschichtstrukturen mit Fotolackmaske nach der Strukturierung. In allen drei Teilbildern ist die Unterätzung und somit  $KV$  gleich. a)  $2 \cdot b = 0$ ; b)  $b = KV$ , die Farbschichtstrukturen stoßen zusammen; c)  $b \gg KV$



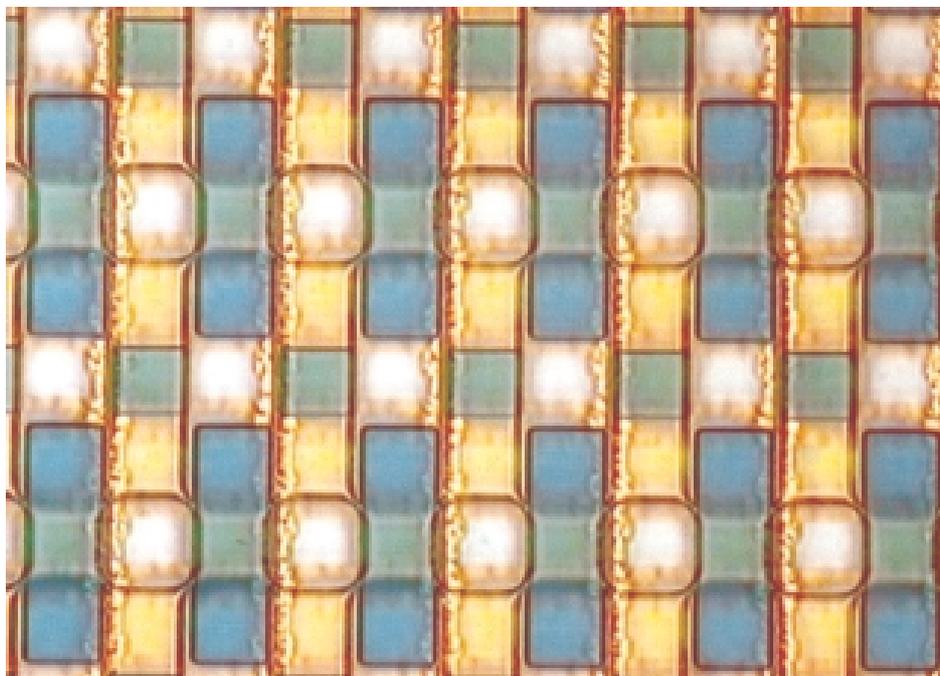
**Abbildung 4.6:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Cyan-Struktur. Ansicht: Frontal auf die Bruchkante. Zur Verdeutlichung ist die Substratoberfläche mit der gestrichelten Linie gekennzeichnet. Die eingesetzte schematische Darstellung zeigt die vermutete Form der Fotolackmaske



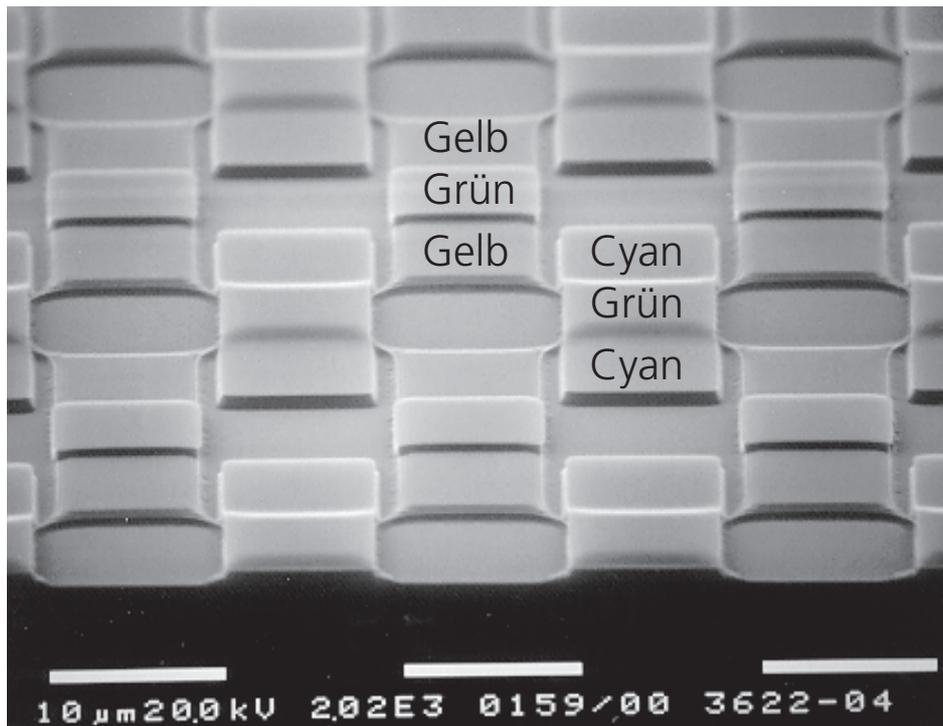
**Abbildung 4.7:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Gelb-Struktur. Ansicht: Frontal auf die Bruchkante. Zur Verdeutlichung ist die Substratoberfläche mit der gestrichelten Linie gekennzeichnet. Die eingesetzte schematische Darstellung zeigt die vermutete Form der Fotolackmaske. Ein Abheben der Lackmaske an der Kante könnte das Ätzprofil verursachen



**Abbildung 4.8:** Mit einem Lichtmikroskop angefertigte Aufnahme eines Cyan/Magenta/Grün/Gelb-Farbfiltermosaiks mit  $25\ \mu\text{m}$  Translationsperiode und  $1\ \mu\text{m}$  Abstand der Filter untereinander



**Abbildung 4.9:** Mit einem Lichtmikroskop angefertigte Aufnahme eines Cyan/Grün/Gelb/Weiß-Farbfiltermosaiks mit  $10\ \mu\text{m}$  Translationsperiode und  $1\ \mu\text{m}$  Abstand der Filter untereinander

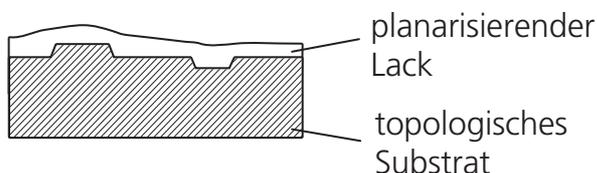


**Abbildung 4.10:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Farbfiltermosaiks mit  $10\ \mu\text{m}$  Translationsperiode und  $1\ \mu\text{m}$  Abstand der Filter untereinander

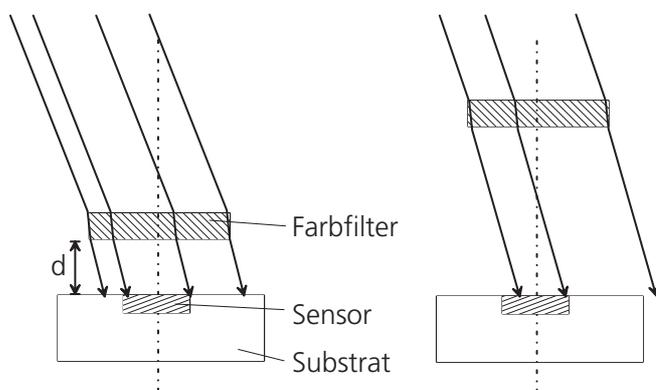
## 4.5 Monolithische Integration

Ein Aufbringen weitere Schichtsysteme direkt auf die Schaltkreisoberfläche gewährleistet ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Bauelemente. Man spricht dann von einer monolithischen Integration. Prinzipiell kann man auch weitere Schichtaufbauten auf zusätzlichen Substraten aufbringen, die dann in einem aufwendigen Arbeitsschritt mit dem eigentlichen Sensor verbunden werden. Standard CMOS-Prozesse sind nicht für die monolithische Integration weiterer optischer Elemente optimiert. Um die entsprechenden Voraussetzungen zu schaffen, wurden im Rahmen dieser Arbeit zusätzliche Prozeßschritte untersucht.

In Kapitel 4.4.3 wurde auf die Notwendigkeit eines ebenen Substrates hingewiesen. In Abbildung 4.11 ist die planarisierende Wirkung einer Aufschleuderschicht und die damit verbundene Schichtdickeninhomogenität anhand einer schematischen Zeichnung erläutert. In Kapitel 2.2 wurde festgestellt, daß CMOS-Schaltungen nicht eben sind, weshalb ein zusätzliches Verfahren angewendet werden muß, um dies zu gewährleisten. Hierbei dürfen die optischen Eigenschaften der Fotosensoren nicht verschlechtert werden. Das Planarisierungsmaterial muß daher im Wellenlängenbereich von  $400\ \text{nm}$  bis  $800\ \text{nm}$  transparent sein und möglichst den gleichen Brechungsindex wie Siliziumoxid haben, um Reflexionen zu minimieren. Da in der Mikroelektronik üblicherweise ganzflächige Beschichtungen angewendet werden, muß eine nachträgliche Freilegung der Bondfenster realisierbar sein. Eine weitere Anforderung wird mit Abbildung 4.12



**Abbildung 4.11:** Planarisierende Wirkung von Aufschleuderschichten



**Abbildung 4.12:** Für große Abstände  $d$  zwischen Filter und Sensor und schräg einfallende Lichtstrahlen wird nicht die ganze Sensorfläche ausgeleuchtet

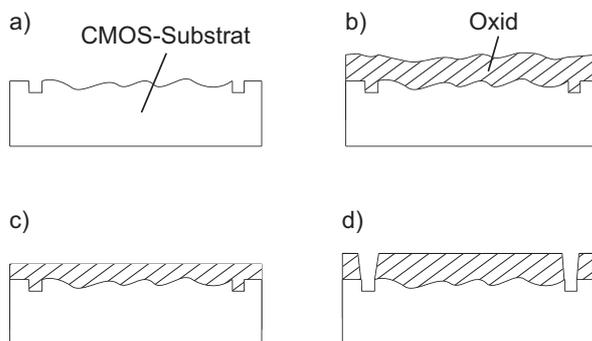
verdeutlicht: Wird der Abstand  $d$  zwischen optischem Element und Sensor zu groß, dann können schräg einfallende Lichtstrahlen den Sensor nicht mehr erreichen. Es ist also günstig,  $d$  so gering wie möglich zu halten. Für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen wurden in der Vergangenheit verschiedene Planarisierungsverfahren entwickelt, da die Ebenheit der Isolationsebenen von fundamentaler Bedeutung für eine weitere Verringerung der Strukturweiten ist [15]. Man unterscheidet lokale von globalen Verfahren, womit die laterale Ausdehnung der Planarisierung klassifiziert wird. Lokal bezieht sich auf eine Ausdehnung von mehreren Mikrometern und global auf mehrere hundert Mikrometer. In [15] sind diese Verfahren sehr übersichtlich zusammengestellt. Zur Planarisierung der Bildsensorstrukturen wurden im Rahmen dieser Arbeit das Chemisch-Mechanische Polieren und eine Polymerplanarisierung untersucht.

Bei der Herstellung von Bunt-CCD-Flächenbildsensoren werden ebenfalls Planarisierungsverfahren eingesetzt, die anderen topologischen Anforderungen angepaßt sind. In der Literatur wird jedoch kaum über die verwendeten Materialien berichtet. Als Beispiel soll hier eine Veröffentlichung der Firma Philips erwähnt werden, die eine Spin-On-Glas-Planarisierung für Mikrolinsen anwendet [82]. Es wird ein Verfahren beschrieben, bei welchem mehrere dünne Schichten aufgebracht werden, um die entsprechende Planarisierung zu erreichen. Für einen einfacheren Prozeß ist es jedoch erstrebenswert, nur eine Planarisierungsschicht entsprechender Dicke zu verwenden.

#### 4.5.1 Ergebnisse des Chemisch-Mechanischen Polierens

Das Chemisch-Mechanische Polieren (CMP) ist ein weitverbreitetes Verfahren in der Mikroelektronik, dessen Bedeutung mit zunehmender Integrationsdichte gewachsen ist [15, 83, 84]. Als wichtiger Prozeßschritt wird es zur Strukturierung von Metallen eingesetzt, die sich nicht mit üblichen Trockenätzverfahren strukturieren lassen [85, 86]. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften dieses Planarisierungsverfahrens wird es zunehmend auch in anderen Bereichen der Mikrotechnik angewandt, z.B. bei räumlichen Lichtmodulatoren [89]. CMP-Prozesse können nach dem Material klassifiziert werden, welches durch das Polieren abgetragen wird. In dieser Arbeit wurde ausschließlich das Siliziumoxid-CMP angewandt.

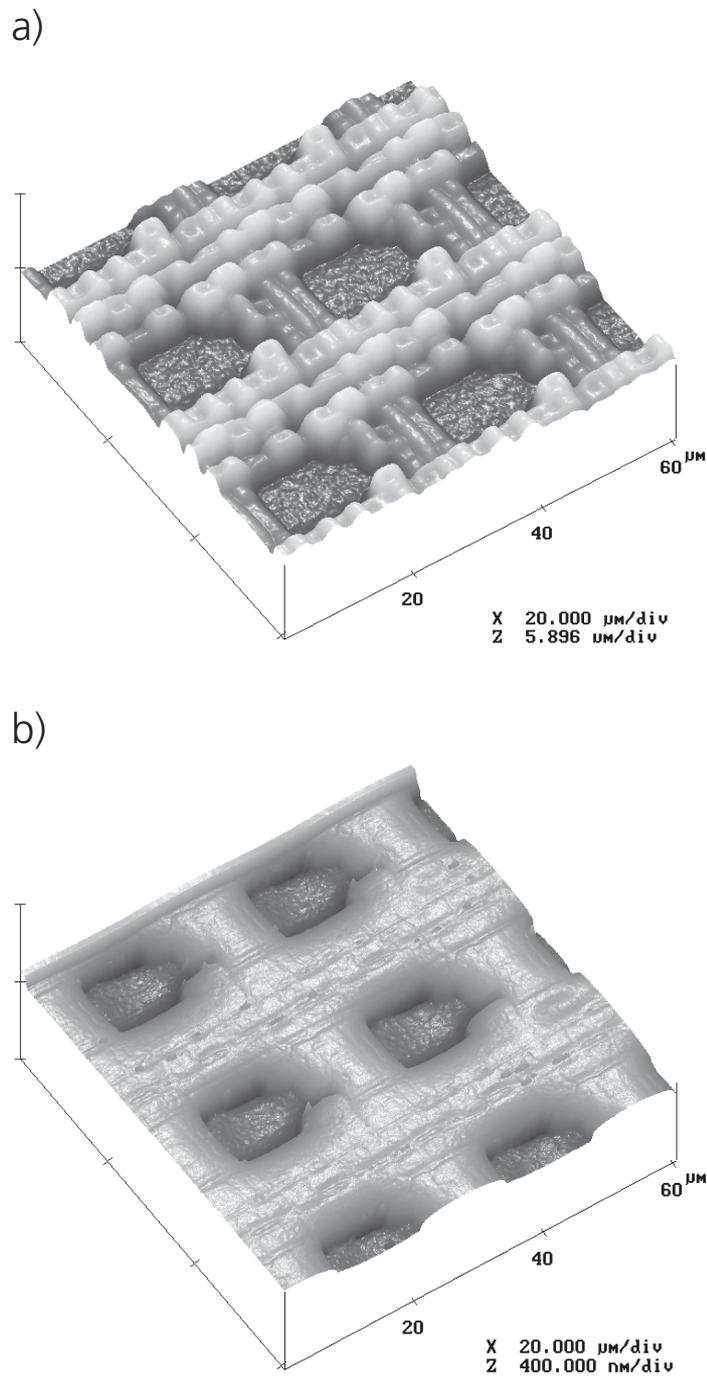
Abbildung 4.13 zeigt eine schematische Darstellung der Prozeßschritte. Soll eine stark topologische Oberfläche mit dem CMP-Verfahren planarisiert werden, muß zuvor eine Oxidschicht, deren Dicke größer ist als die maximale Stufenhöhe der zu planarisierenden Strukturen, aufgebracht werden. Da CMOS-Bildsensoren mit einer Passivierungsschicht überzogen sind, wird dieses Material dazu verwendet. Die Passivierungsschicht besteht aus einem Phosphorsilikatglas (PSG), welches die Eigenschaft hat, für den Schaltkreis schädliches Natrium an sich zu binden und so ein weiteres Vordringen in das Silizium zu verhindern. Das Aufbringen der Oxidschicht geschieht mit dem PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition). Die Polierzeit mußte experimentell ermittelt werden, da zu kurzes Polieren nicht die geforderte Planarisierung erzielt, bzw. zu langes Polieren die Metallstrukturen angreift. Üblicherweise werden sogenannte Stoppschichten eingesetzt, z.B. Siliziumnitrid, auf denen der Polierprozeß automatisch zum Erliegen kommt, da die Abtragsrate deutlich geringer ist als die der abzutragenden Schicht. Nach dem Freilegen dieser Stoppschicht kann diese dann naß- oder plasmachemisch entfernt werden. Dieses Verfahren ist jedoch sehr aufwendig und es konnten auch ohne Stoppschichten gute Ergebnisse erzielt werden. Nach dem Polierprozeß können die Bondfenster mit einem Trockenätzprozeß freigelegt werden und es kann eine Wasserstofftemperung erfolgen. Das so vorbehandelte Schaltkreissubstrat kann nun für die Deposition der optisch aktiven Schichten verwendet werden.



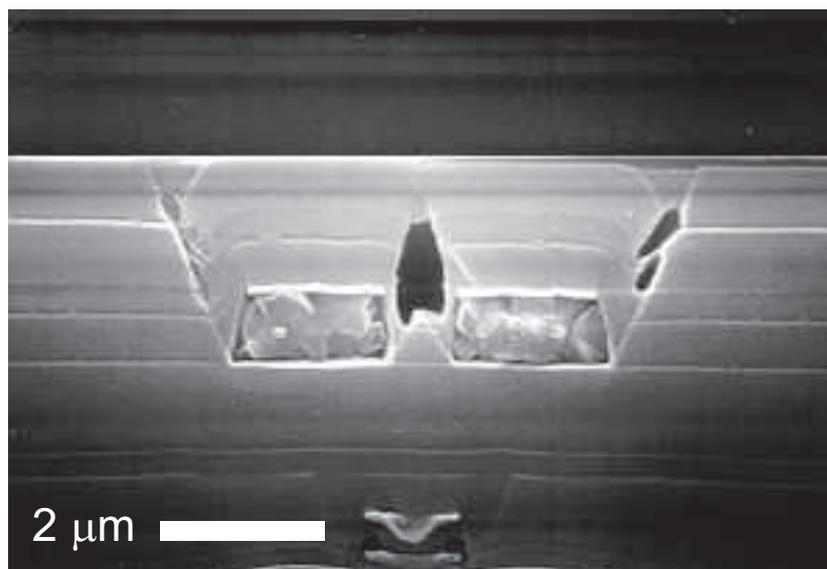
**Abbildung 4.13:** Prozessschrittfolge der CMP-Planarisierung. a) Topologischer Zustand des CMOS-Schaltkreissubstrates; b) nach konformer Oxidabscheidung; c) CMP; d) Öffnung der Bondfenster und Wasserstofftemperung

Eine Farbfilterstrukturierung setzt eine Topologie von weniger als 150 nm voraus. Dieser Wert wurde ermittelt, indem Farbschicht-Strukturierungsversuche mit unterschiedlich planarisierten Substraten durchgeführt und anhand der Teststrukturen bewertet wurden. Es wurde eine Zielgröße für  $KV$  im Bereich der Schichtdicken, d. h. kleiner als ein Mikrometer, festgelegt. Bei schlecht planarisierten Substraten muß eine sehr lange Ätzzeit gewählt werden, damit in topologisch tiefen Gebieten keine Rückstände entstehen. Lange Ätzzeiten bewirken eine große Kantenverschiebung. Stufenhöhenmessungen wurden mit einem Rasterkraftmikroskop angefertigt. Planarisiert wurden CMOS-Sensoren mit einem Pixelpitch von ca.  $25\ \mu\text{m}$ , die in einem  $1\text{-}\mu\text{m}$ -Prozeß gefertigt wurden. Es treten dabei Höhenunterschiede von ca.  $2,3\ \mu\text{m}$  auf. In Abbildung 4.14 sind AFM-Messungen (Atomic Force Microscope) nach verschiedenen Prozeßschritten zu sehen. Um solche Topologien mit einer Polymerplanarisierung einzuebren sind Schichtdicken von mehr als  $3\ \mu\text{m}$  erforderlich, womit ein großer Abstand des optischen Elements zum Sensor verbunden ist. Der Verlauf schräg einfallender Strahlen muß dann sehr genau untersucht werden. Wie im vorherigen Kapitel angedeutet, ist die Topologie des  $0,5\ \mu\text{m}$ -Prozesses geringer und wird im wesentlichen durch die oberste Metallisierungsebene bestimmt, welche eine Dicke von 1000 nm hat. Solche Topologien eignen sich, um eine Polymerplanarisierung anzuwenden. CMP-Ergebnisse von Strukturen aus dem  $0,5\ \mu\text{m}$ -Prozeß sollen hier nicht vorgestellt werden, da diese im wesentlichen mit den besprochenen vergleichbar sind. Die RMS-Oberflächenrauigkeit der Oxidschichten nach dem CMP-Prozeß beträgt weniger als 2 nm und ist damit besser als  $\lambda/20$ , womit ein Kriterium für optisch hochwertige Oberflächen erfüllt ist.

Ein Nachteil des CMP-Verfahrens ist die Bildung von Hohlräumen an den Leitbahnen. Abbildung 4.15 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Waferbruchkante. Man erkennt zwei Leitbahnen und mehrere Einschlüsse in der Oxidschicht, welche durch eine nicht konforme Abscheidung hervorgerufen wurden. Befinden sich diese Hohlräume im Fotosensorgebiet, können die dadurch hervorgerufenen Streuzentren die Effizienz des Sensors reduzieren. Um die Hohlraumbildung zu unterdrücken, besteht die Möglichkeit, die Schichtabscheidung mit einem Ionenätzprozeß zu kombinieren, der die Aufgabe hat, die entstehenden Kanten zu verrunden. Da dazu jedoch die Prozeßkammer gewechselt werden muß, ist dies mit einem höheren Aufwand verbunden.



**Abbildung 4.14:** AFM-Aufnahmen einer Oberfläche eines CMOS-Bildsensors. a) Nach einem Standard-1- $\mu\text{m}$ -CMOS-Prozeß, max. Höhendifferenz = 2,3  $\mu\text{m}$ ; b) nach CMP, max. Höhendifferenz = 130 nm

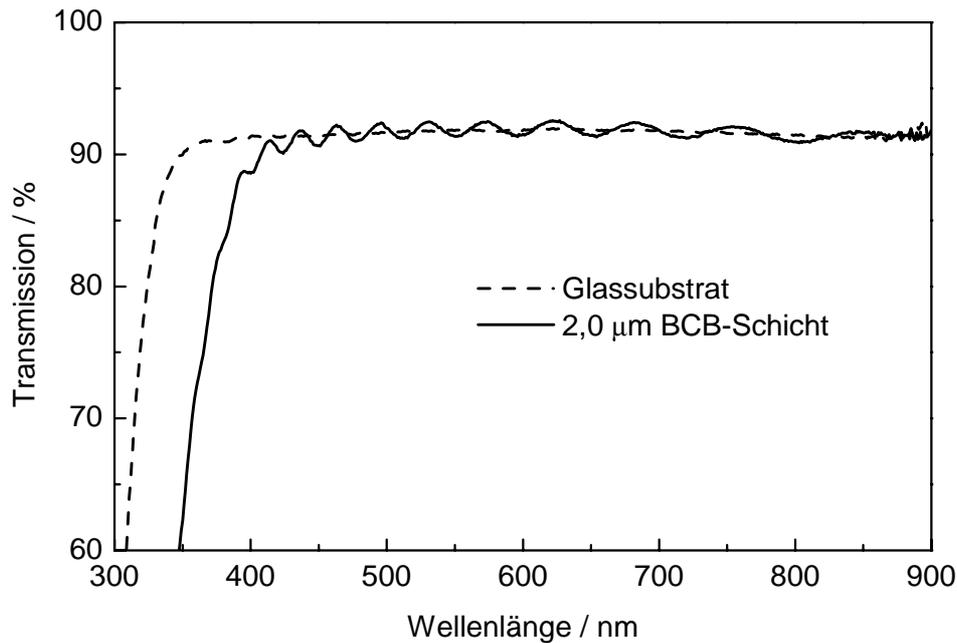


**Abbildung 4.15:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Waferbruchkante von einer mit CMP planarisierten Schaltkreisstruktur. Bei der Abscheidung der Oxidschicht bilden sich Hohlräume. Die Waferoberfläche kann mit dieser Aufnahme nicht charakterisiert werden, da mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms irritierende Strukturen weggeschnitten wurden

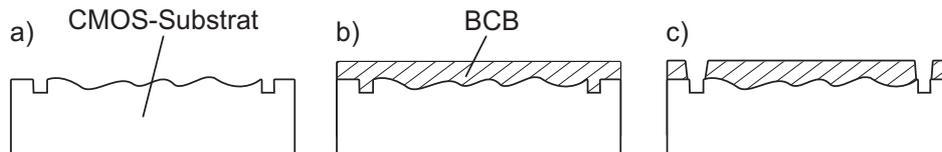
#### 4.5.2 Ergebnisse einer Polymer-Planarisierung

Der hohe Aufwand der CMP-Prozeßführung gab dafür Anlaß, eine kostengünstigere Planarisierungsvariante zu untersuchen, die die Deposition optisch aktiver Schichten ermöglicht. Alternativ zu der Poliervariante ist es möglich, die Strukturen mit einem planarisierenden Polymerfilm zu beschichten. Im Gegensatz zu vielen plasmagestützten Abscheidungsprozessen, die durch die deponierte Schicht die Topologie der Oberfläche nachbilden (konforme Abscheidung), haben aufgeschleuderte Polymerbeschichtungen die Eigenschaft, die zugrundeliegenden Strukturen einzuebnen (siehe Abbildung 4.11). In der Literatur wird von verschiedenen Materialien berichtet, welche mit dem kostengünstigen Aufschleuderverfahren deponiert werden können [87, 88, 90]. Motiviert wurde deren Entwicklung, um kostengünstige Planarisierungen mit niedriger Dielektrizitätszahl für die Schaltkreisfertigung zur Verfügung zu stellen.

Besonders geeignet für die Planarisierung der CMOS-Fotosensoren ist wegen seiner guten optischen und planarisierenden Eigenschaften das Material Cyclotene der Firma Dow Chemical, welches auf dem Markt erhältlich ist. Dabei handelt es sich um ein siliziumhaltiges Polymer der Basis Benzocyclobuten (BCB) und kann mittels Aufschleuderverfahren angewendet werden. Es werden verschiedene Modifikationen angeboten [91]. Für die Planarisierung der Fotosensoren wurde ein Material ausgewählt, welches speziell auf optische Transparenz optimiert wurde und als Material für die Flachbildschirmherstellung angeboten wird. In Abbildung 4.16 ist das Transmissionspektrum eines  $2\mu\text{m}$  dünnen BCB-Films im Vergleich zu Glas dargestellt. Oberhalb  $400\text{ nm}$  ist die Transmission des BCB-Films vergleichbar mit der des Glassubstrates. Angewendet wurde das Material mit folgendem Prozeß, der in Abbildung 4.17 ver-



**Abbildung 4.16:** Mit einem Zweistrahl-Spektralfotometer gemessene Transmission eines  $2,0 \mu\text{m}$  dicken BCB-Films, deponiert auf einem Glassubstrat im Vergleich zu der Transmission des unbeschichteten Glassubstrates



**Abbildung 4.17:** Prozessschrittfolge der Polymerplanarisierung. a) Topologischer Zustand des CMOS-Schaltkreissubstrates mit erfolgter Wasserstofftemperung; b) BCB-Beschichtung; c) Öffnung der Bondfenster

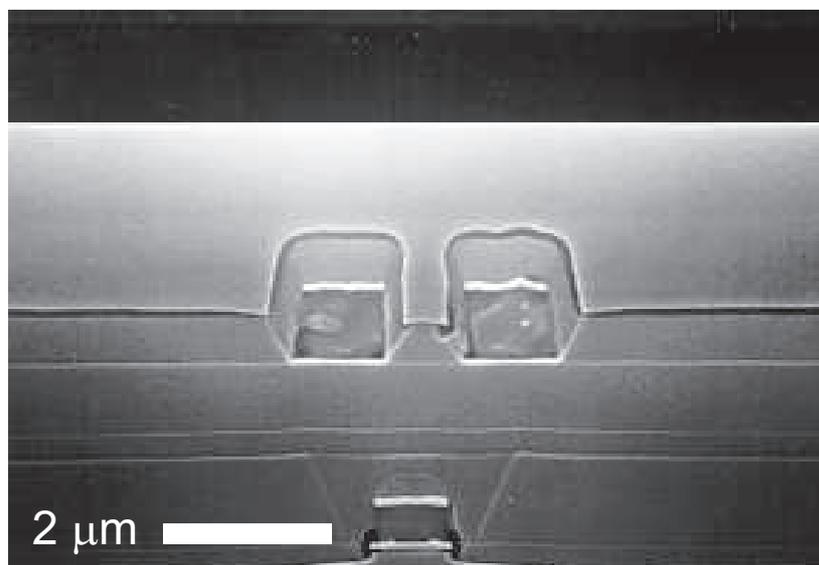
deutlich ist. Nach der Beschichtung des Substrates mit dem Aufschleuderverfahren wurde die Schicht in einem Umluftofen unter Stickstoffatmosphäre bei  $250^\circ\text{C}$  thermisch vernetzt. Die Freiätzung der Bondpads erfolgte in einem Triodenreaktor T384 der Firma Lam Research. Über eine Fotolackmaske wurde das BCB in einem  $\text{O}_2/\text{CF}_4$ -Plasma mit einer Ätzrate von  $2000 \text{ nm/min}$  und einer Selektivität zum Fotolack von ungefähr 1:1 strukturiert. Ein Anteil von 20%  $\text{CF}_4$  im Ätzgas war erforderlich, um den Siliziumbestandteil in ein gasförmiges Beiprodukt umzuwandeln. Es konnten Schichten mit einer Homogenität von weniger als einem Prozent hergestellt werden. Die mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM) gemessene Oberflächenrauigkeit lag unter einem Nanometer. Die Planarisierung wurde anhand von Oxid-Rippenstrukturen bewertet, deren Stufenhöhe vor und nach der BCB-Beschichtung gemessen wurde. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse zusammengefaßt. Es ist zu bemerken, daß eine Reduzierung der Ausgangsstufenhöhe auf  $1,5 \mu\text{m}$  eine Reststufenhöhe von nur  $120 \text{ nm}$  zur Folge hat. Je dicker die Polymerschicht ist, bzw. je geringer die Stufenhöhen sind, desto besser ist der Effekt der Planarisierung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß für eine Polymerplanarisierung die Schicht-

**Tabelle 4.1:** Werte für die Stufenhöhe vor und nach einer BCB-Planarisierung. Planarisiert wurden ca.  $1\ \mu\text{m}$  breite Rippen mit  $7\ \mu\text{m}$  Abstand

Stufenhöhe vor BCB / $\mu\text{m}$	1,0	1,5	2,2
Stufenhöhe nach BCB / $\mu\text{m}$	0,06	0,12	0,23

dicke ca. das 1,5-fache der maximalen Stufenhöhe der Strukturen betragen sollte. Mit dem verwendeten Material (maximal mögliche Schichtdicke:  $2,3\ \mu\text{m}$ ) war es nicht möglich einen Schaltkreis, der mit der  $1\text{-}\mu\text{m}$ -Technologie gefertigt wurde, zu planarisieren. Um dies zu gewährleisten, sind BCB-Schichten von mindestens  $3,5\ \mu\text{m}$  Dicke erforderlich, wodurch jedoch die optischen Eigenschaften beeinflusst werden (vgl. Abbildung 4.12). AFM-Messungen von mit BCB planarisierten Schaltkreisen mit maximal  $1\ \mu\text{m}$ -Stufen haben gezeigt, dass diese mit einer Resttopologie von  $60\ \text{nm}$  planarisiert werden können, so daß eine Mosaikfilterstrukturierung mit einer Kantenverschiebung von ca.  $0\ \mu\text{m}$  bis  $0,5\ \mu\text{m}$  gelang. Die Anforderungen bezüglich der Strukturierbarkeit der Farbfilter konnten mit der BCB-Planarisierung erfüllt werden. Nach dem Strukturieren der Bondfenster kann keine Wasserstoff-Temperung durchgeführt werden, da BCB eine Temperatur von maximal  $350\ ^\circ\text{C}$  aussetzbar ist. Daher wird diese Temperung vor dem Polymerprozeß durchgeführt. Bei Untersuchungen der CMOS-Bauelementeeigenschaften wurde kein negativer Einfluß des Plasmaprozesses nachgewiesen. Abschließend wird eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer mit BCB planarisierten Schaltkreisstruktur in Abbildung 4.18 gezeigt. Die für das CMP-Verfahren typischen Einschlüsse sind hier nicht vorhanden (vgl. Abbildung 4.15).



**Abbildung 4.18:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Waferbruchkante von einer mit BCB planarisierten Schaltkreisstruktur. Es treten keine Hohlräume auf. Die Waferoberfläche kann mit dieser Aufnahme nicht charakterisiert werden, da mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms irritierende Strukturen weggeschnitten wurden

### 4.5.3 Lithografische Justage

Neben der Entwicklung des Strukturierungsprozesses bestand eine weitere Aufgabe darin, die relative Justage der Farbfilter zu den Schaltkreisstrukturen zu gewährleisten. Um dies zu erläutern ist es notwendig, das von der Projektionsbelichtungsanlage verwendete Justiermarkenerkennungssystem näher zu beschreiben. Dieses wird für die relative Justage unterschiedlicher Maskenebenen benötigt. Mit diesem System kann der lithografische Belichtungszyklus vollautomatisch durchgeführt werden, was die Voraussetzung für eine reproduzierbare Fertigung mit hohem Durchsatz ist. Auf der apparativen Seite besteht das System aus einem Laser der Wellenlänge 650 nm und einer Fotodiode, auf welche der von der Scheibe gestreute Laserstrahl trifft. Auf der Scheibe befinden sich Justagestrukturen in Form von kleinen Löchern oder Erhebungen. Diese befinden sich im sogenannten Ritzgraben, der beim späteren Vereinzeln der Chips als Sägepfad dient. Der Laserstrahl rastert über diese Strukturen und es kann so mit dem Signal der Fotodiode eine absolute Scheiben-Position errechnet werden, womit ein örtlicher Bezug zwischen einzelnen Lithografieebenen gewährleistet ist. Dieses Justageverfahren gewährleistet Überdeckungsgenauigkeiten von weniger als  $0,2 \mu\text{m}$ .

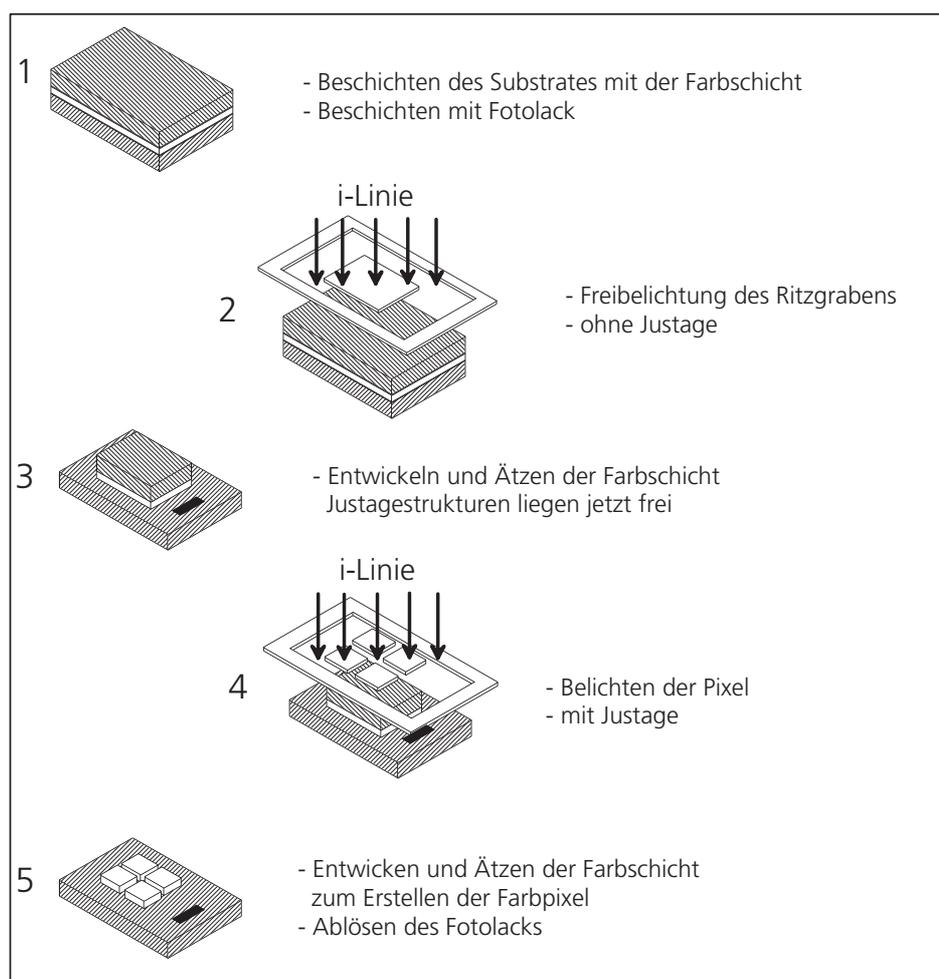
Da die Farbschicht Cyan das Laserlicht der Wellenlänge 650 nm absorbiert, konnte diese Ebene mit dem Standard-Verfahren nicht justiert werden. Um dies dennoch zu gewährleisten, war es notwendig, den Ritzgraben in einem extra dafür vorgesehenen lithografischen Schritt freizuätzen. Diese Belichtung konnte ohne Verwendung der Justiermarken durchgeführt werden, da keine Strukturen erstellt werden sollten. Die Farbfilterstrukturen wurden dann in einem zusätzlichen Belichtungs- und Ätzschritt erstellt, jedoch mit dem zuerst deponierten Fotolack und einer Justage auf die zugrundeliegenden CMOS-Strukturen. In Abbildung 4.19 ist die Ritzgrabenfreibelichtung schematisch dargestellt.

## 4.6 Ellipsometrische Untersuchungen

Für eine Untersuchung von prozeßtechnisch bedingten Einflüssen auf die Farbfiltertransmission und zur Prozeßkontrolle sind Transmissionsmessungen nicht geeignet, da im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Siliziumscheiben als Substratmaterial zur Anwendung kamen und diese im optischen Wellenlängenbereich nicht transparent sind. Die Ellipsometrie stellt ein sehr leistungsfähiges Verfahren dar, um die optischen Konstanten von dünnen Schichten zu ermitteln. Speziell bei dünnen und leicht absorbierenden Materialien, wie sie durch die Farbfilter repräsentiert werden, sind die Anforderungen an die Meßapparatur und die mathematischen Anpassungsverfahren besonders hoch. Die Kenntnis der optischen Konstanten ist weiterhin für genaue Berechnungen von Dünnschichtsystemen erforderlich.

### 4.6.1 Bestimmung der optischen Konstanten

Die wesentliche Eigenschaft einer Farbschicht wird durch ihre Transmissison ausgedrückt, welche mit dem imaginären Brechungsindex  $\tilde{n} = n - ik$  beschrieben wird. Um die optischen Konstanten und Schichtdicken von schwach absorbierenden Dünnschichten zu bestimmen, werden verschiedene Methoden angewandt [70, 71, 72, 73, 74], wobei



**Abbildung 4.19:** Prozessschrittfolge der Ritzgrabenfreibelichtung

die Spektralellipsometrie weit verbreitet ist [75]. Die hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit bei der Untersuchung von Oberflächen liegt in der Tatsache begründet, daß nur relative Intensitäts- und Phasenmessungen durchgeführt werden. Generell werden bei diesem Verfahren indirekte Meßmethoden angewandt, d. h. die optischen Konstanten werden nicht direkt ermittelt, sondern aus Meßgrößen bestimmt, die eine Funktion von  $n$  und  $k$  sind [76]. Unter Annahme eines Schichtmodells können dann die Ellipsometrischen Größen berechnet und mit den gemessenen verglichen werden. Die Schwierigkeit besteht in der Tatsache, daß die zu bestimmenden Größen über transzendente Funktionen zusammenhängen, so daß numerische Methoden angewendet werden müssen, um die gesuchten optischen Konstanten zu extrahieren.

Ellipsometrische Meßverfahren werden seit vielen Jahren intensiv erforscht und weiterentwickelt, so daß eine Fülle von Literatur zur Verfügung steht (siehe dazu z. B. [77]). Inzwischen sind die dafür benötigten Meßgeräte (Ellipsometer) und die entsprechenden Auswertprogramme von verschiedenen Firmen kommerziell erhältlich. Aus diesen Gründen wird im folgenden nur eine sehr knappe theoretische Einführung zu diesem Thema gegeben und für ausführlichere Darstellungen auf die Literatur verwiesen.

Wird Licht von einer Oberfläche reflektiert, so ändert sich im allgemeinen der Polarisationszustand. Dieser Effekt wird bei der Ellipsometrie ausgenutzt, um aus dem Polarisationszustand eines einfallenden und von einer Oberfläche reflektierten Lichtstrahls das Verhältnis der komplexen Fresnelkoeffizienten  $r_p$  und  $r_s$  zu bestimmen, welches wiederum durch die ellipsometrischen Winkel  $\psi$  und  $\Delta$  durch  $\tan \psi e^{i\Delta} = r_p/r_s$  dargestellt werden kann. Das Schichtmodell für die in dieser Arbeit untersuchten Systeme bestand aus den drei Materialien Silizium, Farbschicht und Luft als umgebende Atmosphäre mit den imaginären Brechungsindizes  $\tilde{n}_S$ ,  $\tilde{n}_F$  und  $\tilde{n}_L$ .  $\psi$  und  $\Delta$  sind Funktionen der Materialkonstanten, der Schichtdicke  $d$ , des Einfallswinkels  $\phi$  und der Wellenlänge  $\lambda$ . Da die optischen Konstanten von Silizium und Luft bekannt sind, vereinfacht sich der Zusammenhang zu:

$$\begin{aligned}\psi &= F(\tilde{n}_F, d, \phi, \lambda) \\ \Delta &= G(\tilde{n}_F, d, \phi, \lambda)\end{aligned}\quad (4.1)$$

Die Parameter Einfallswinkel und Schichtdicke sind durch den apparativen Aufbau des Ellipsometers vorbestimmt, bzw. frei wählbar. Damit das Gleichungssystem 4.1 prinzipiell nach  $\tilde{n}_F$  auflösbar ist, muß die Schichtdicke  $d$  bekannt sein. Um nicht auf ein zusätzliches Schichtdickenmeßverfahren angewiesen zu sein, besteht die Möglichkeit,  $\phi$  zu variieren, und so die Anzahl der Gleichungen zu erhöhen, ohne neue Parameter einzuführen [78, 79, 77]. Dieses Verfahren erwies sich als sehr vorteilhaft und wird in der Literatur als Multiple-Angle-of-Incidence oder als Variable-Angle-of-Incidence Spectroscopic Ellipsometry bezeichnet. Wie zuvor erwähnt, lassen sich die Gleichungen 4.1 nicht ohne weiteres nach den gesuchten Variablen separieren. Zur Lösung solcher Aufgaben werden numerische Verfahren angewandt, deren Erfolg jedoch im hohen Maße von der Wahl der Anfangsbedingungen abhängt. Mit Hilfe der spektralen Messung kann dann für jede Wellenlänge das Gleichungssystem 4.1 gelöst werden (Punkt-für-Punkt-Berechnung), um Real- und Imaginärteil von  $\tilde{n}_S(\lambda)$  und die Schichtdicke zu ermitteln. Stehen jedoch parametrisierte Modelle für die optischen Konstanten zur Verfügung, wird die Anzahl der Unbekannten deutlich gesenkt und eine Anpassung der theoretischen an die gemessenen Daten vereinfacht. An dieser Stelle sollen nur zwei Modelle erwähnt werden, das Cauchy- und das Lorentz-Modell, die auch bei den folgenden Untersuchungen eine Rolle spielen. Das erste Modell (Cauchymodell) hat folgende Form: Der Brechungsindex  $\tilde{n}$  hängt über  $\epsilon = \sqrt{1/\tilde{n}}$  mit der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$  zusammen.  $\epsilon$  vieler transparenter Materialien wird durch folgende von Cauchy angegebenen Formeln beschrieben:

$$\epsilon_r = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 \quad (4.2)$$

$$\epsilon_i = D/\lambda + E/\lambda^3 + F/\lambda^5 \quad , \quad (4.3)$$

wobei  $A, B, C, D, E$  und  $F$  die anzupassenden Parameter darstellen. Der Verlauf der optischen Konstanten in absorbierenden Bereichen läßt sich mit den Cauchy-Formeln schlecht beschreiben. Absorptionsmaxima können dagegen mit dem Lorentzmodell beschrieben werden, welches aus einer Summe von Lorentzfunktionen besteht:

$$\epsilon = A + \sum_k \frac{B_k}{E_k^2 - (h\nu)^2 - iC_k h\nu} \quad (4.4)$$

Das zur Untersuchung der Farbschichten [80] verwendete Ellipsometer wurde von der Firma Woollam hergestellt und ist in der Lage, spektroskopisch im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1700 nm bei verschiedenen Winkeln vollautomatisiert zu messen. Alle Messungen wurden bei den drei Winkeln  $\phi = 65^\circ, 70^\circ$  und  $75^\circ$  in 10 nm Schritten zwischen 300 nm und 1700 nm Beleuchtungswellenlänge durchgeführt. Der Winkelbereich wurde so gewählt, daß die Sensitivität des Verfahrens möglichst hoch war, was bedeutet, daß die Winkel in der Nähe des Pseudobrewsterwinkels von Silizium liegen müssen [77]. Zur Auswertung wurde das Programm WVASE32, welches ebenfalls von der Firma Woollam hergestellt wurde, verwendet [80]. Die Proben bestanden aus mit jeweils einer Farbschicht beschichteten Siliziumwafern. Die Schwierigkeit bestand in der Tatsache, daß für die im optischen Wellenlängenbereich absorbierenden Farbschichten kein Modell für die optischen Konstanten bekannt waren und daß das Absorptionsverhalten für jede Farbschicht unterschiedlich ist, was auf die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen zurückzuführen ist. Es wurde daher eine Strategie erarbeitet, um iterativ (in drei Schritten) die Fehlersummen für die Anpassung zu verkleinern. Die Fehlersumme stellt dabei ein Bewertungskriterium für die Qualität der Anpassung dar.

Die Transmissionsmessungen (siehe Abbildung 4.1) ließen vermuten, daß alle Farbschichten oberhalb von 800 nm Beleuchtungswellenlänge nur noch schwach absorbieren. Mit dieser Annahme konnten im ersten Schritt die optischen Konstanten mit Hilfe der Cauchy-Formeln parametrisiert werden. Auf diese Weise konnte die Schichtdicke am Meßpunkt mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern ermittelt werden wobei sich die Anzahl der zu bestimmenden Größen reduzierte. Mit der bekannten Schichtdicke wurde dann im zweiten Schritt der absorbierende Bereich mit Lorentzoszillatoren modelliert. Eine Modellierung mit Hilfe von Lorentzfunktionen konnte wieder aus der Betrachtung der Transmissionskennlinien motiviert werden, die starke Absorptionsmaxima vermuten ließen. Die erhaltenen optischen Konstanten  $n$  und  $k$  wurden im dritten Schritt als Anfangsbedingung einer Punkt-für-Punkt-Berechnung herangezogen, um ein Konvergieren zu unterstützen.

Mit dem beschriebenen Verfahren konnten für die Schichten Magenta und Gelb zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die Fehlersumme für die Anpassung der optischen Konstanten der Cyanschichten lag jedoch noch um den Faktor drei höher. Aus diesem Grund wurden Reflektionsmessungen bei einem Einfallswinkel von  $25^\circ$  angefertigt, um zusätzliche Informationen in den Auswertalgorithmus zu integrieren. Die Fehlersumme wurde so verringert. Die optischen Konstanten sind in den Abbildungen 4.20, 4.21 und 4.22 zu sehen. Es fällt eine starke Wellenlängenabhängigkeit auf. Die Absorptionskonstante zeigt bei allen drei Materialien starke Absorptionsmaxima im sichtbaren Wellenlängenbereich, wobei  $k$  kleiner als 0,4 ist.

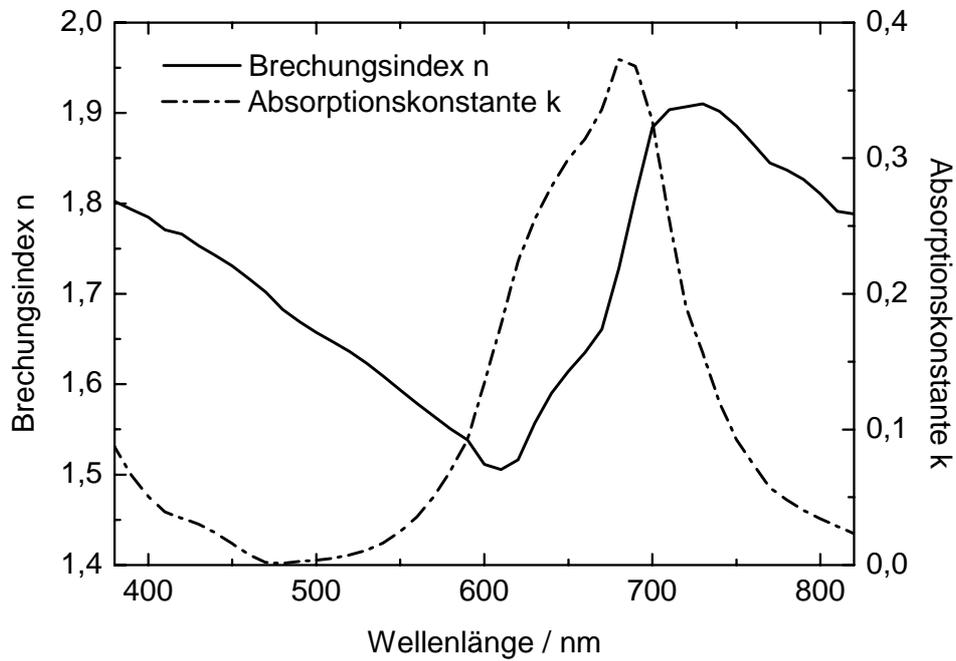


Abbildung 4.20: Optische Konstanten einer Cyan-Schicht der Dicke 390 nm

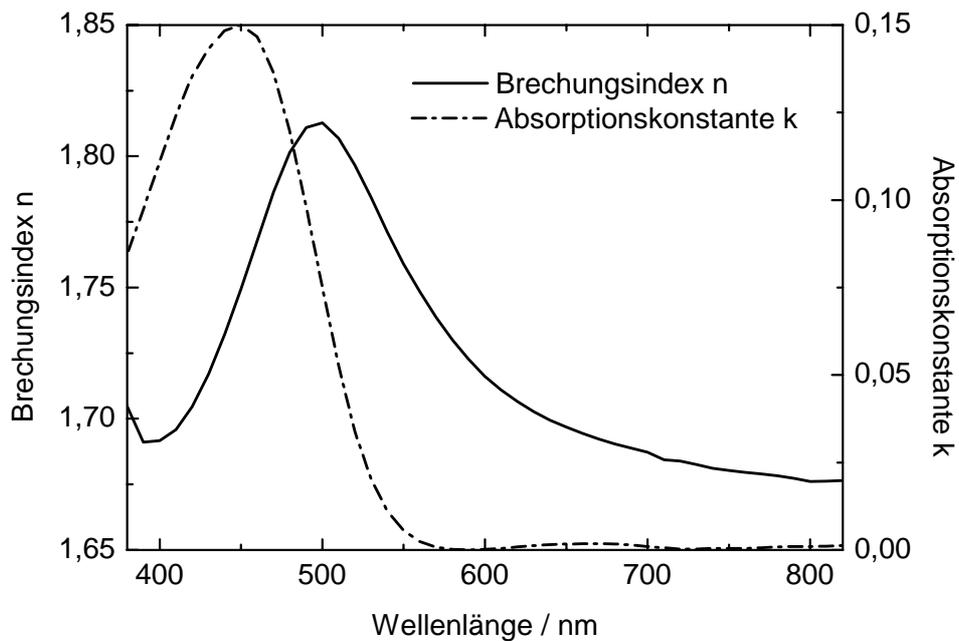


Abbildung 4.21: Optische Konstanten einer Yellow-Schicht der Dicke 270 nm

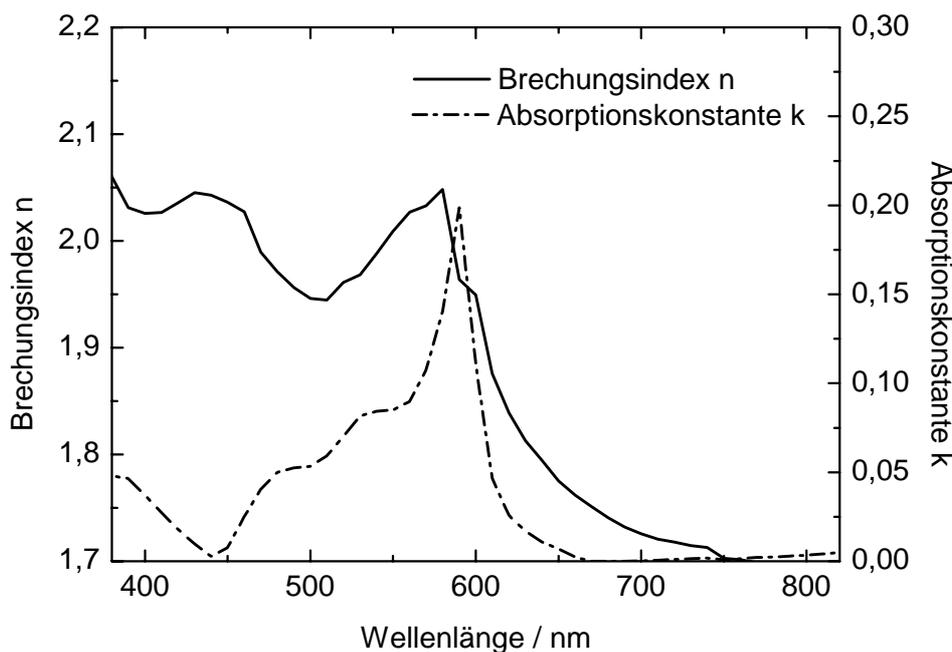
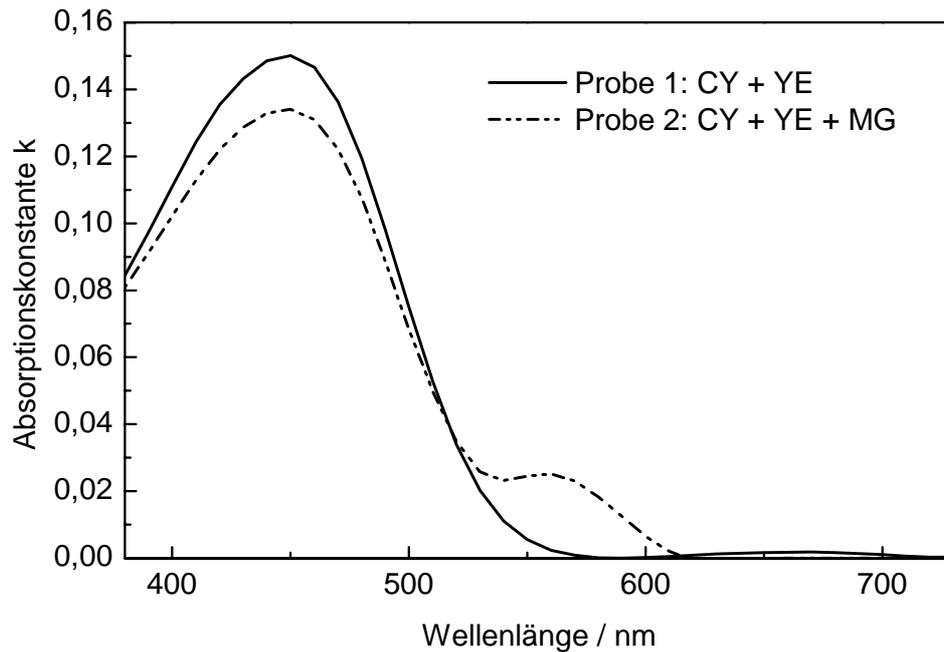


Abbildung 4.22: Optische Konstanten einer Magenta-Schicht der Dicke 530 nm

#### 4.6.2 Untersuchung des Einfärbeverhaltens

Es ist bekannt, daß bei der Überlagerung von gefärbten Polymerschichten deren Farbstoffe ineinanderdiffundieren und es so zu einer Transmissionsänderung der Filter kommen kann. Um dem entgegenzuwirken wird in der Literatur von Versiegelungsschichten berichtet, die zwischen verschiedenen Farbschichten deponiert werden, womit jedoch ein zusätzlicher Aufwand verbunden ist. Für den in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Farbfilterprozeß wurden Versuche durchgeführt, um das Einfärbeverhalten zu untersuchen und zu überprüfen, ob solche zusätzlichen Schichten notwendig waren.

Da bei der Erstellung einer Farbpixelart zuerst das ganze Substrat beschichtet werden muß, werden die zuvor erstellten Farbpixel vollständig bedeckt. In diesem Zustand können die Farbstoffe der einen Schicht in die andere diffundieren. Während der Strukturierung wird dann die Schicht auf den zugrundeliegenden Pixeln entfernt. Für die Untersuchungen wurden  $1\text{ cm}^2$  große Farbpixel der Farben Cyan, Yellow und Magenta hergestellt, wobei für verschiedene Proben die Reihenfolge der Beschichtungen vertauscht wurde, so daß Farbpixel mit unterschiedlichen Prozeßfolgen zur Verfügung standen. Die Schichten wurden direkt auf das Siliziumsubstrat aufgebracht. Anhand dieser Proben wurden dann die optischen Konstanten mit dem in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Verfahren bestimmt und miteinander verglichen. Zusammenfassend soll hier festgestellt werden, daß die Schicht Magenta die Eigenschaft hat, die darunterliegenden Farbpixel einzufärben. Dieses Einfärben macht sich im Verlauf der Absorptionskonstanten bemerkbar. In Abbildung 4.23 sind die Absorptionskonstanten von Gelb-Schichten dargestellt, welche mit verschiedenen Prozeßsequenzen hergestellt wurden. Probe zwei zeigt eine Absorptionserhöhung bei 560 nm. Da das Schichtmaterial Magenta bei dieser Wellenlänge stark absorbiert, kann vermutet werden, daß Magenta-Farbstoff in die Gelb-Schicht diffundiert ist. Alle anderen Schichtreihenfolgen zeigten

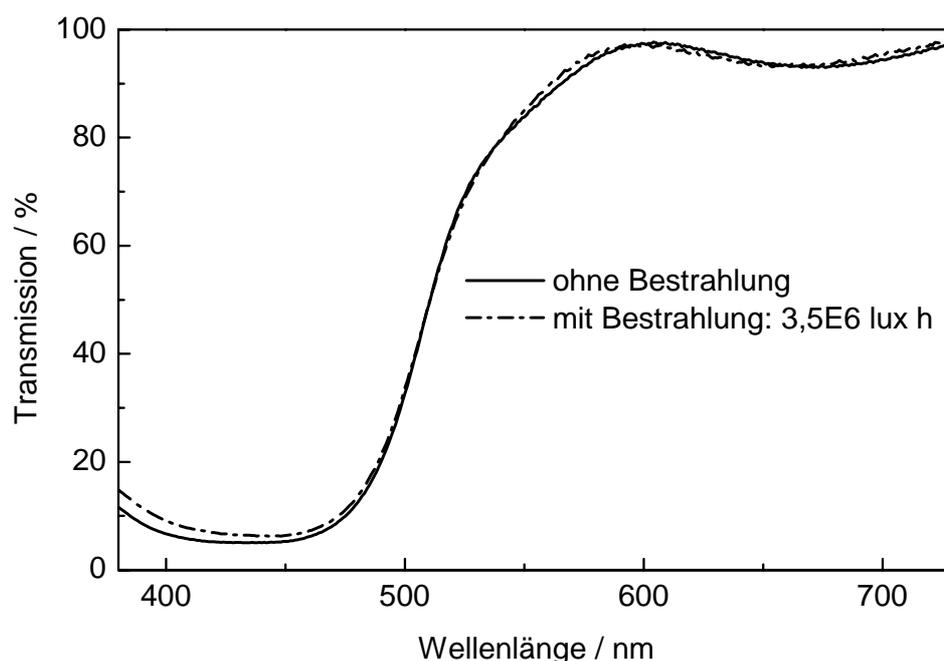


**Abbildung 4.23:** Absorptionskonstanten von Gelb-Schichten mit verschiedenen Prozeßreihenfolgen. Probe 2 wurde mit einer Magentaschicht bedeckt, welche dann wieder entfernt wurde. Bei Probe 1 folgten nach der Deposition der Gelb-Schicht keine Prozesse mehr. Das Absorptionsmaximum um 560 nm von Probe 2 kann als Eindiffusion des Magentafarbstoffes interpretiert werden

im Rahmen der Meßgenauigkeit keine Absorptionsänderungen, daher werden hier keine Meßergebnisse angegeben. Folgende Schichtreihenfolgen sind daher zu empfehlen: MG/YE/CY, oder MG/CY/YE. Da Siliziumfotosensoren im Blauen am unempfindlichsten sind, empfiehlt es sich besonders beim Cyan-Filter auf maximale Transmission zu achten, d. h. die Cyan-Beschichtung als letzten Beschichtungsschritt vorzusehen.

## 4.7 Temperatur- und Lichtstabilität

Die Temperatur- und Lichtstabilität der Farbfilter sind wichtige Kenngrößen für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Aus diesem Grund wurden dazu Experimente durchgeführt. Es wurden Cyan-, Gelb- und Grün-Farbfilter hergestellt, indem Glassubstrate beschichtet wurden. Der Grünfilter bestand aus einer Doppelschicht von Cyan und Gelb. Die Transmission wurde vor und nach einer 16-Stunden-Temperung bei 150 °C bzw. vor und nach einer Bestrahlung mit einer 500-Watt-Halogenlampe unter Luftatmosphäre mit dem Spektralfotometer gemessen. Die Bestrahlungsstärke betrug auf der Probe 3,  $5 \cdot 10^6$  lux · h, wobei der Wellenlängenbereich unterhalb von 300 nm mit einer Glasscheibe herausgefiltert wurde. Bei einer Kameraanwendung wird diese UV-Filterfunktion von den Linsen des Objektivs übernommen. Durch die Temperaturbelastung konnte bei keiner der Farbschichten eine Veränderung der Schichttransmission nachgewiesen werden, wohingegen die Schicht Gelb unter Halogenlichtbestrahlung eine geringfügige Transmissionsänderung zeigte (Abbildung 4.24). Da sich die Gesamttransmission nach der Bestrahlung erhöht hat, wird dies als ein Ausbleichen des Farbstoffes



**Abbildung 4.24:** Mit dem Spektralfotometer gemessene Transmissionen, vor und nach Bestrahlung mit einer 500 Watt Halogenlampe

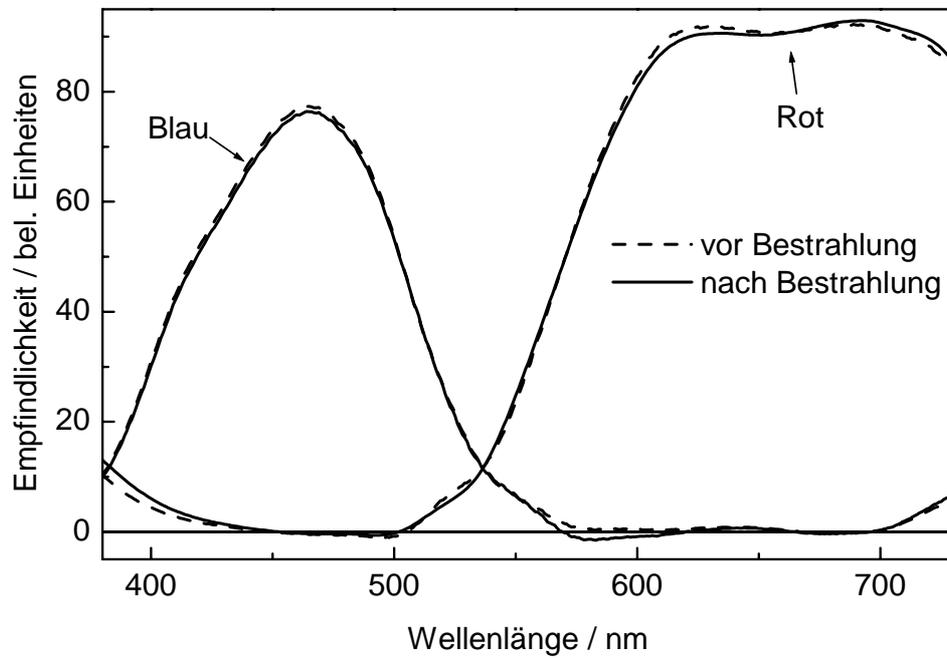
interpretiert. Die Schicht Cyan zeigte keine meßbare Änderung, und die Grün-Probe wies um 450 nm eine leichte Transmissionserhöhung auf. Dies kann mit der Degradation der Gelb-Schicht erklärt werden.

Bei der Anwendung der Farbfilter für einen Farbsensor sind die Funktionen für die Rot-, Grün- und Blauempfindlichkeit entscheidend. Es wird nun anhand einer qualitativen Argumentation gezeigt, daß selbst die Degradation der Gelbschicht unter Lichtbestrahlung auf die Sensorempfindlichkeiten eine vernachlässigbare Auswirkung hat. Für eine quantitative Diskussion der Farbproduktion muß ein Farbkorrekturverfahren der Farbkamera mit einbezogen werden. Die Senorempfindlichkeit ergibt sich multiplikativ aus der Transmission des Farbfilters  $\tau(\lambda)$  und der Empfindlichkeit des Siliziumsensoren  $R(\lambda)$ . Im folgenden soll  $R(\lambda) = 1$  angenommen werden. Die Empfindlichkeiten für Rot und Blau ergeben sich durch Umstellen der Gleichungen 3.18 zu:

$$\text{Blau} = \text{Cyan} - \text{Grün} \quad \text{Rot} = \text{Gelb} - \text{Grün} \quad (4.5)$$

In Abbildung 4.25 sind die so berechneten Empfindlichkeiten für Blau und Rot vor und nach der Lichtbestrahlung dargestellt. Die Veränderung der Schichttransmission hat auf die betrachtete Sensorfunktion ein sehr geringe Auswirkung.

Nach Angaben des Farbmaterialherstellers stellt die Lichtbestrahlung unter Sauerstoffeinwirkung die Ursache für die Degradation dar. Um die Lichtstabilität zu verbessern, besteht die Möglichkeit, die Farbschichten hermetisch zu versiegeln oder eine Sauerstoffbarriereschicht (z. B. eine Polyvinylalkohol-Schicht) auf den Farbschichten zu deponieren.



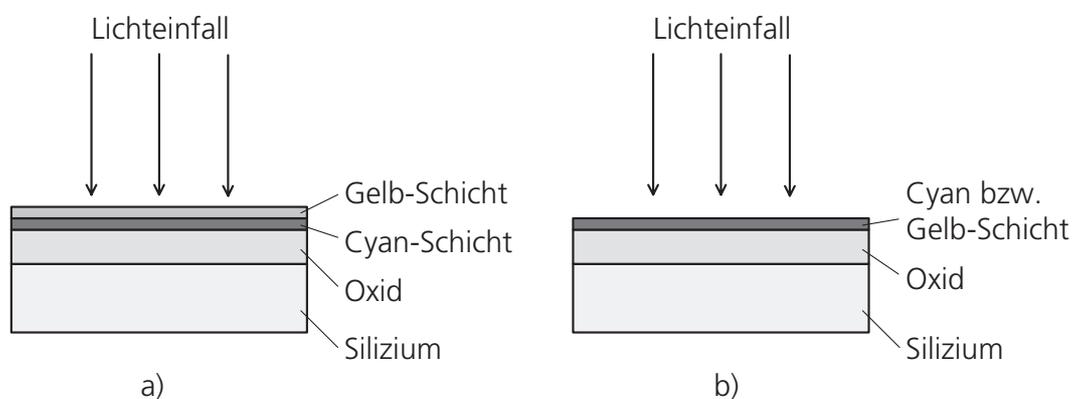
**Abbildung 4.25:** Errechnete Sensorempfindlichkeiten für Rot und Blau aus den gemessenen Filtertransmissionen vor und nach der Lichtbestrahlung

## 5 Charakterisierung von Farb-Fotosensoren

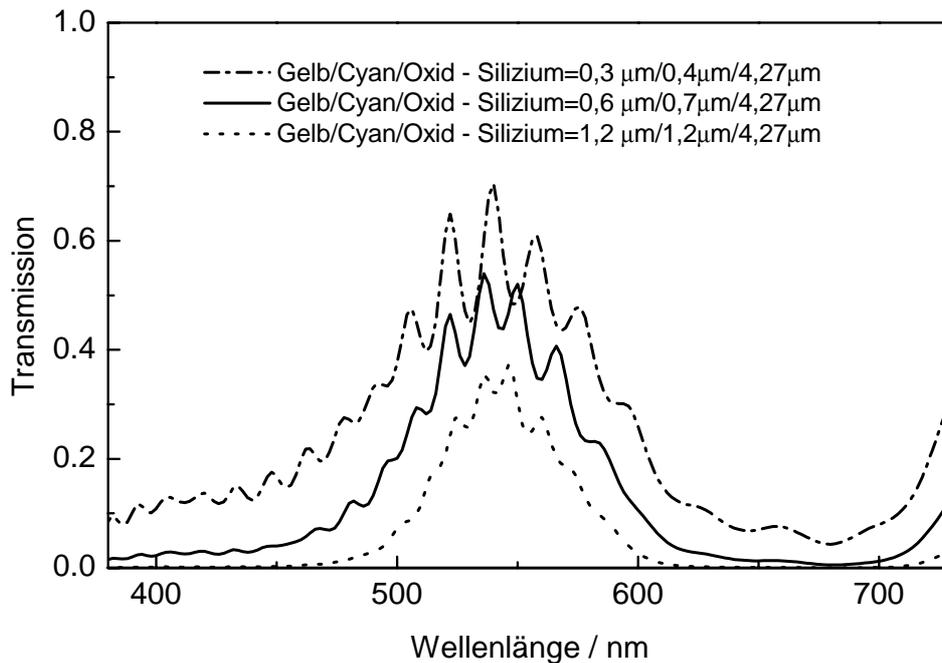
In diesem Kapitel werden Messungen der spektralen Empfindlichkeit von CMOS-Fotosensoren mit Farbfiltern vorgestellt. Diese Untersuchungen konnten an Teststrukturen durchgeführt werden, die eigens dafür entworfen wurden. Mit Hilfe der optischen Konstanten der Farbschichten, deren Bestimmung in Kapitel 4.6.1 beschrieben wurde, konnten dann die Empfindlichkeiten berechnet und mit den gemessenen verglichen werden. Die spektralen Empfindlichkeiten sind ausschlaggebend für die Farbproduzierbarkeit eines Farbsensors. Speziell bei Farbkameras wird jedoch durch ein Farbkorrekturverfahren die Qualität des Bildes mitbestimmt. Um die Erzeugung von Farbbildern mit den untersuchten Filtern prinzipiell nachzuweisen, soll ein Experiment vorgestellt werden, mit dem ein Vergleich mit einer kommerziellen Farbvideokamera möglich ist.

### 5.1 Flächenfotodioden mit Farbfiltern

Die Berechnung der Sensorsignale wurde auf der Grundlage der Fresnelschen Gleichungen mit dem Programm WinElli (Sopra GmbH, Deutschland) durchgeführt. Die Erweiterung des Programms mit den gemessenen optischen Konstanten der Farbschichten erlaubte es, den Wert der Transmission  $\vartheta$  (dieser entspricht dem Wert des transmittierten Anteils  $T$ ) im Silizium zu berechnen. Dazu wurde folgender Schichtaufbau angenommen, der sich aus dem Fertigungsprozeß ergibt: Ein einkristallines Siliziumsubstrat ist mit einer  $4,27\ \mu\text{m}$  dicken Oxidschicht bedeckt, auf der sich die Farbfilter befinden (siehe Abbildung 5.1). Der Zusammenhang von Lichtintensität und Sensorsignal im Silizium wurde als linear angenommen, was durch die geringen Bestrahlungsstärken, die bei den Versuchen auftrat, gerechtfertigt war.



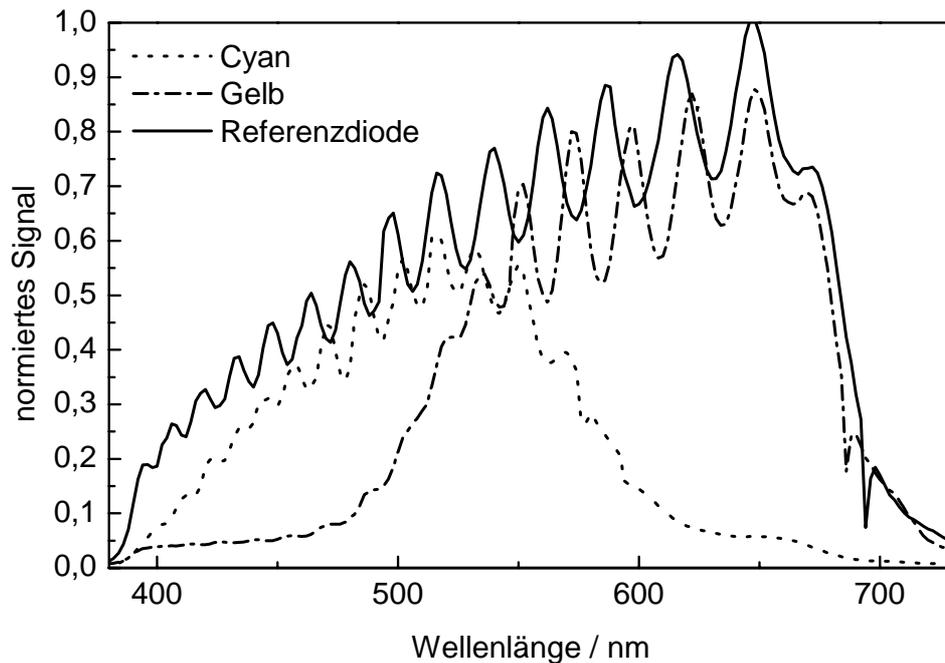
**Abbildung 5.1:** Schichtmodelle für die Transmissionsberechnung. a) Sensor mit Grünfilter aus einer Cyan-Gelb-Doppelschicht; b) Sensor mit Cyan- bzw. Gelb-Filter



**Abbildung 5.2:** Berechnete Transmissionen verschiedener Grünfilter

Die Transmission der Farbfilter wird in erster Linie durch deren Dicke bestimmt (vgl. Formel 2.4). Die Wahl der Schichtdicken soll anhand des Grünfilters, der durch eine Gelb-Cyan-Doppelschicht hergestellt wurde, erläutert werden. Je dicker die Schichten, desto kleiner ist die Transmission im Maximum und desto geringer ist der Wellenlängenbereich, in dem der Filter durchlässig ist (siehe Abbildung 5.2). Zur Bewertung der Filter, bezüglich einer Farbkamerafunktion, können die Spektralwertfunktionen der Leuchtphosphore aus Abbildung 3.6 herangezogen werden. Die Kurve  $\bar{I}(\lambda)$  stellt die Idealtransmission des Grünfilters dar (siehe Kapitel 3.3.1). Die charakteristischen Merkmale sind: Das Maximum liegt bei 540 nm, und die positiven Werte liegen zwischen 470 nm und 605 nm. Diese Eigenschaften werden von einem Grünfilter am besten erfüllt, der aus den 1,2  $\mu\text{m}$  dicken Schichten aufgebaut ist. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch aus, daß die Maximaltransmission bei unter 40 % liegt. Aufgrund technologischer Randbedingungen konnten maximale Gelb- und Cyan-Schichtdicken von 0,6  $\mu\text{m}$ , bzw. 0,7  $\mu\text{m}$  hergestellt werden, d. h. daß mit dem zweiten Schichtstapel die Anforderungen am besten erfüllt wurden.

Die experimentelle Bestimmung der Sensorsignale wurde an einem Testchip durchgeführt, der in einem 1- $\mu\text{m}$ -CMOS-Prozeß gefertigt wurde. Das Layout bestand aus vier Fotodioden der Fläche (250 x 250)  $\mu\text{m}^2$ , wovon drei mit den Farbfiltern Gelb, Cyan und Grün beschichtet wurden. Die unbeschichtete Diode diente als Referenzsignalquelle. Der Farbfilterprozeß wurde in Kapitel 4.4.2 beschrieben. Die Schichtdicken für Cyan und Gelb wurden auf 0,7  $\mu\text{m}$ , bzw. 0,6  $\mu\text{m}$  eingestellt. Ladungsträger, welche durch außerhalb der Diodenflächen einfallendes Licht erzeugt werden, können in die Raumladungszone diffundieren und so einen parasitären Signalbeitrag leisten. Aus diesem Grund wurde jede Fotodiode mit einer zweiten, in sich kurzgeschlossenen Diode umgeben. Um die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit der einzelnen Sensorelemente zu bestimmen, wurden diese mit monochromatischem Licht beleuchtet und der Foto-



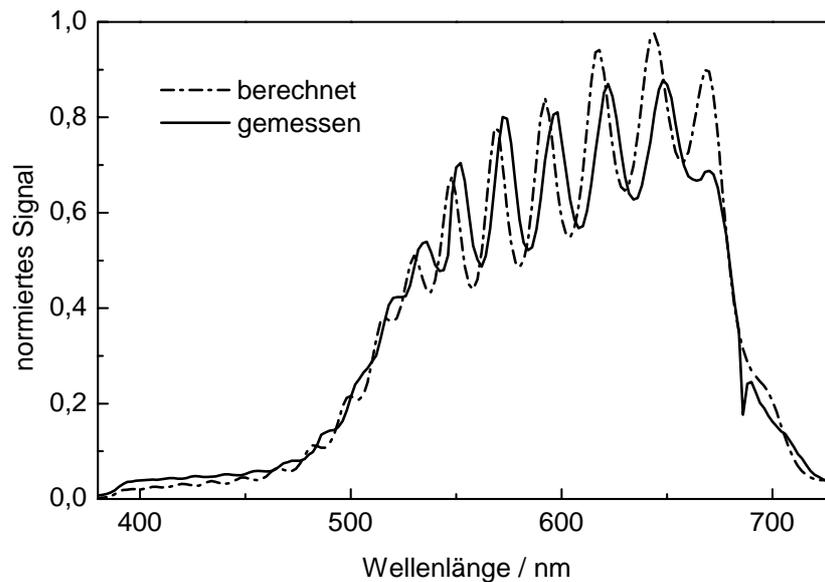
**Abbildung 5.3:** Gemessene Sensorsignale (Fotostrom) von Farb-Fotodioden der Größe  $(250 \times 250) \mu\text{m}^2$ . Die Signale sind auf den Maximalwert des unbeschichteten Sensors (Referenzdiode) normiert

strom gemessen (vgl. Abbildung 3.9). Dazu wurde das Licht einer Halogenlampe mit einem Gittermonochromator (Spectra Pro 500, Acton Research Corporation) in seine spektralen Bestandteile zerlegt und der Fotostrom mit einem Elektrometer (Modell 617, Keithley) gemessen. Im Strahlengang des Monochromators befand sich ein Filter (BWG 486, B+W Filter GmbH, Bad Kreuznach), mit dem infrarote Strahlung (IR-Strahlung) unterdrückt wurde, da die Polymerfarbfilter im Wellenlängenbereich über 700 nm transparent sind. In Abbildung 5.3 ist das normierte Signal über der Wellenlänge aufgetragen. Der besseren Übersichtlichkeit halber sind nur die Kurven für das Gelb-, Cyan- und Referenzsignal abgebildet. Die Oszillationen werden von Interferenzen der an verschiedenen Grenzflächen reflektierten Teilstrahlen verursacht (vgl. Abbildung 2.5). Der steile Abfall bei 700 nm wird durch den IR-Filter hervorgerufen. Deutlich ist die Filterwirkung der Polymerschichten zu erkennen. Um abschätzen zu können, ob die volle Filterwirkung der Polymerfilter während der Dünnschichtprozesse erhalten geblieben ist, wurde anhand des oben genannten Schichtsystems das wellenlängenabhängige Sensorssignal errechnet.

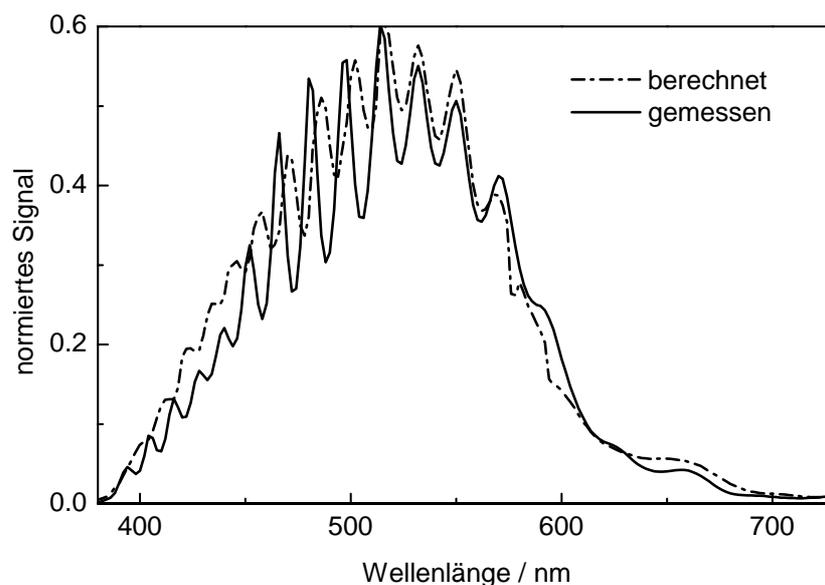
Da die mikroskopische Beschaffenheit des Schichtsystems nicht bekannt war, mußten für die Berechnungen einige grundlegende Vereinfachungen gemacht werden. Zum einen wurde der Schichtstapel der verschiedenen dotierten Silikatgläser über dem Silizium mit dem Brechungsindex von  $\text{SiO}_2$  [81] angenähert und zum anderen wurden perfekte Grenzflächen ohne Rauigkeit angenommen. Die Charakteristik des IR-Filters und das typische Abfallen der Empfindlichkeit mit abnehmender Wellenlänge eines Silizium-sensors wurde im Modell berücksichtigt. Am Beispiel der gemessenen und berechneten Spektren eines Cyan- und eines Gelb-Sensors können die Ergebnisse, welche in Abbildung 5.4 und 5.5 dargestellt sind, bewertet werden. Die experimentell bestimmten und

die numerisch gewonnenen Signalkurven stimmen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten der realen Filterdicken, die zu einer Verschiebung der Oszillationen führen, in sehr guter Näherung überein.

Die experimentell bestimmten optischen Konstanten der Polymermaterialien (siehe Kapitel 4.6.1) beschreiben im Rahmen eines einfachen Modells das Dünnschichtsystem aus CMOS-Sensor und Farbfilterschichten sehr genau, so daß es möglich ist, die entsprechenden Empfindlichkeiten zu berechnen. Außerdem kann davon ausgegangen werden, daß während des beschriebenen Farbfilterprozesses keine Degradation der Polymerfilter auftritt.



**Abbildung 5.4:** Gemessenes und berechnetes Sensorsignal einer Fotodiode mit Gelb-Filter



**Abbildung 5.5:** Gemessenes und berechnetes Sensorsignal einer Fotodiode mit Cyan-Filter

## 5.2 Farbbilderzeugung mit einem CMOS-Bildsensor

Im folgenden wird eine schnelle, einfache und qualitative Methode vorgestellt, mit der nachgewiesen werden kann, daß die in dieser Arbeit beschriebenen Farbfilter prinzipiell für eine Farbbildgeneration geeignet sind.

Der experimentelle Aufbau besteht aus einer örtlich fixierten Schwarz/Weiß-CMOS-Kamera (CIF-Format) und einer Beleuchtungsquelle. Um ein Buntbild einer Szenerie zu erzeugen, werden drei Einzelbilder mit den entsprechenden Farbanteilen benötigt. Dies wird realisiert, indem direkt vor die Kamera nacheinander die drei Farbfilter Cyan, Gelb und Grün positioniert werden. Die Farbfilter bestanden aus Glassubstraten, die mit den in dieser Arbeit beschriebenen Polymerfarbfilterschichten versehen waren. Die Transmissionskurven sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Mit den Gleichungen 3.18 konnte dann das RGB-Videosignal zurückgerechnet werden. Ein so erzeugtes Bild einer Testfarbtafel ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Es ist zu beachten, daß keine Farbkorrektur vorgenommen wurde. Zum Vergleich zeigt Abbildung 5.7 das gleiche Bild, das jedoch mit einer kommerziellen Farbvideokamera (Handycam CCD-TRV66E PAL, Sony) aufgenommen wurde. Bei einem visuellen Vergleich der aufgenommenen Bilder mit dem nicht abgebildeten Original-Testbild konnte folgendes festgestellt werden: Das farbkorrigierte Bild, welches die Sony-Kamera liefert, ähnelt eher dem Testbild als das der CMOS-Kamera. Daher kann für einen Vergleich der beiden Kameras das Bild der Sony-Kamera als eine Art Referenz herangezogen werden. In der letzten Zeile des Testbildes sind nur Graustufen dargestellt. Das CMOS-Kamerabild zeigt in dieser Zeile jedoch Farbanteile. Dies ist auf das nichtlineare Verhalten des CMOS-Sensorsignals bezüglich der detektierten Strahlungsleistung zurückzuführen, d. h. das bei unterschiedlichen Signalpegeln die Verhältnisse der Farbkanäle unterschiedlich sind. Dies hat zur Folge, daß die vom Sensor gemessenen Farbkoordinaten einer Farbprobe abhängig von der Intensität der Ausleuchtung, bzw. von der Helligkeit der Probe ist. Diese Eigenschaft kann jedoch durch ein Linearisierungsverfahren eliminiert werden. Desweiteren fällt in Abbildung 5.6 eine verhältnismäßig dunkle Darstellung der Farbe Blau auf. Dies hängt mit der geringen Empfindlichkeit des Cyan-Sensors zusammen, wie man in Abbildung 5.3 erkennt. Die Empfindlichkeit bei der Wellenlänge 450 nm ist im Vergleich zur Empfindlichkeit bei 600 nm nur halbsogroß. Durch eine Farbmatrizierung sollte es jedoch möglich sein, ein dem Sony-Bild vergleichbares Ergebnis zu erzielen.



**Abbildung 5.6:** Errechnetes Farbbild der Testfarbtafel. Dazu wurden drei Bilder aufgenommen, indem vor einen Schwarz/Weiß-CMOS-Bildsensor nacheinander die Filter Cyan, Gelb und Grün gehalten wurden



**Abbildung 5.7:** Dargestellt ist ein Bild der Testfarbtafel, welches mit einer kommerziellen Farbvideokamera (Handycam, Sony) aufgenommen wurde

## 6 Refraktive Mikrolinsen zur Empfindlichkeits- erhöhung von Flächenbildsensoren

Die absolute Empfindlichkeit eines Flächenbildsensors mit aktiver Beschaltung ist durch dessen Aufbau stark eingeschränkt. Transistoren als Schaltelemente und Leitbahnen verringern die lichtempfindliche Fläche des Sensors. Mit Hilfe von Mikrolinsenarrays kann jedoch die Empfindlichkeit erhöht werden. Neben der Farbfiltertechnologie sollte daher ein zweites Verfahren untersucht werden, mit dem CMOS-Bildsensoren aufgewertet werden können. In diesem Kapitel wird allgemein auf die Eigenschaften von Mikrolinsen und deren Herstellung eingegangen, um die Grundlagen für die Untersuchungen zu schaffen, die im nächsten Kapitel beschrieben werden.

### 6.1 Das Prinzip der Mikrolinse

Unterschreitet der Durchmesser einer Linse wenige Millimeter, dann müssen Fertigungsverfahren, welche aus der Mikrotechnik bekannt sind, zur Herstellung der Mikrolinsen angewendet werden. Eingesetzt werden Mikrolinsen z. B. in Mikroobjektiven [93], als Glasfaser-Chip-Koppler in der Kommunikationstechnik [94], für die Herstellung von Wellenfrontsensoren [95] und als Laserstrahlhomogenisierer [96]. In der Sensortechnik werden Mikrolinsenarrays mit Fotosensoren integriert, um deren Eigenschaften zu verbessern [97, 98, 99]. Die fokussierende Wirkung kann dabei durch zwei unterschiedliche physikalische Effekte hervorgerufen werden, die als Lichtbrechung (Refraktion) und Lichtbeugung (Diffraktion) bekannt sind. Zur Kombination mit Bildsensoren für kostengünstige Produkte werden jedoch ausschließlich refraktive Mikrolinsen verwendet.

In Kapitel 2.2 ist der prinzipielle Aufbau eines CMOS-Flächenbildsensors erläutert worden. Durch die Abschattung der Metalleitbahnen ist nur ein Bruchteil der Pixelfläche lichtempfindlich. Das Verhältnis von lichtempfindlicher Fläche zur Pixelfläche wird als Füllfaktor  $F$  des Sensorarrays bezeichnet. Positioniert man nun über jeden Pixel eine Linse, dann gelingt es, Licht, welches ohne Linsen auf die Metallbahnen fällt und dort reflektiert wird, auf die Sensorfläche zu bündeln und so das Sensorsignal von  $S$  auf  $k \cdot S$  zu erhöhen, wobei  $k$  der Verstärkungsfaktor ist (siehe Abbildung 6.1). In dieser Arbeit wird zur Charakterisierung der mit Mikrolinsen versehenen Sensorelemente die prozentuale Empfindlichkeitssteigerung  $\Omega$  verwendet, die wie folgt definiert ist:

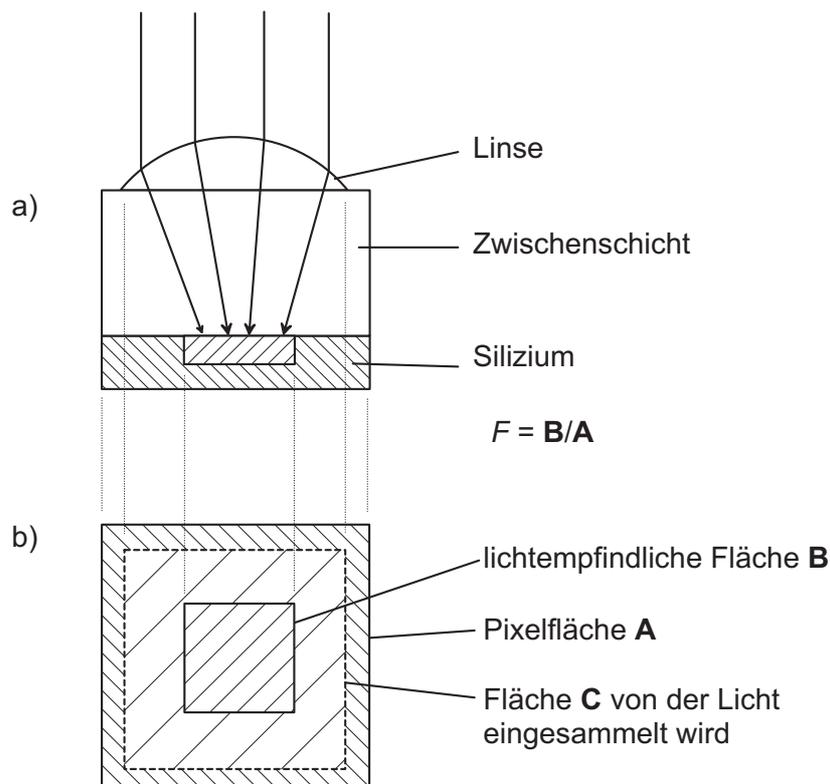
$$\Omega = \frac{k \cdot S - S}{S} \quad (6.1)$$

Die folgende Darstellung beschränkt sich auf refraktive Linsen, deren Wirkungsweise auf der Brechung von Licht an gekrümmten Grenzflächen beruht und durch das

Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben wird:

$$\frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6.2)$$

Hierbei ist  $\phi_1$  der von der Oberflächennormalen gemessene Einfallswinkel,  $\phi_2$  der von der Oberflächennormalen gemessene Ausfallwinkel,  $n_1$  die Brechzahl des umgebenden Mediums und  $n_2$  die Brechzahl der Linse. Alternativ dazu kann der Brechungsindexsprung auch durch einen kontinuierlichen Brechungsindexübergang ausgebildet sein. Man spricht dann von einer Graded-Index-Linse. Der Strahlengang berechnet sich dann mit dem ortsabhängigen Brechungsindex. Auch diese Art von Linsen sind mit mikro-technischen Verfahren hergestellt worden [100, 101, 102], sollen jedoch im folgenden nicht Gegenstand der Betrachtung sein, da diese Linsenart aufgrund der hohen Fertigungstemperatur nicht für die Füllfaktorvergrößerung von Bildsensoren geeignet ist. Um die fokussierende Wirkung der Linse möglichst effektiv zu gestalten, muß das Linsenmaterial transparent im verwendeten Wellenlängenbereich sein.



**Abbildung 6.1:** Wirkungsweise einer Mikrolinse mit quadratischer Grundfläche. Die Flächen C und A können nicht gleich sein, da durch die Herstellung immer eine Totzone entsteht. a) Seitenansicht; b) Draufsicht

## 6.2 Stand der Technik refraktiver Mikrolinsen

### 6.2.1 Herstellungsverfahren

In der Literatur wird von den verschiedensten Herstellungsverfahren für Mikrolinsen berichtet. In erster Linie hängt das Verfahren von der Größe, bzw. von der Brennweite der Linse ab. Fünf verschiedene Methoden sollen hier vorgestellt werden, die sich auch kombinieren lassen:

**Aufschmelzen von Polymerstrukturen:** Durch das Aufschmelzen von Polymerstrukturen gehen diese in einen viskosen Zustand über und verlieren ihre ursprüngliche Form. Die sich bildende Oberfläche wird ähnlich wie bei einer Flüssigkeit durch die Oberflächenspannung bestimmt. Es bildet sich eine Minimalfläche aus, um die Oberflächenenergie zu minimieren. Die Glasatemperatur  $T_g$  stellt für das Polymer eine charakteristische Größe dar und vermittelt einen Anhaltspunkt über die Formbeständigkeit unter Wärmeeinwirkung [103]. Beim Erhitzen eines Polymers kann sich die chemische Struktur verändern, z. B. durch thermisch induziertes Vernetzen, wodurch auch die Schmelzeigenschaften beeinflusst werden können. Üblicherweise entsteht durch Vernetzung eine stabilere Polymerverbindung, was zur Folge hat, daß das Fließen beim Erhitzen und das Vernetzen zwei konkurrierende Prozesse sind. Die genaue Form der Oberfläche wird in erster Linie durch die Haftung der Polymerstruktur zum Substrat bestimmt. Man kann zwei Grenzfälle unterscheiden: Die Haftung ist sehr gut, so daß der Fußpunkt der Polymerstruktur erhalten bleibt, oder die Haftung kann vernachlässigt werden, und die Polymerstruktur bildet eine Kugelkalotte mit kreisförmiger Grundfläche, unabhängig von der Ausgangsgrundfläche.

Die Prozeßschritte zur Strukturdefinition sind davon abhängig, ob die Polymerschicht lichtempfindlich bzw. lichtunempfindlich ist. Das Belichten und Entwickeln einer strahlungsempfindlichen Polymerschicht ist die einfachste Variante. Als Strahlungsarten können dafür zum Beispiel Synchrotronstrahlung [104], Elektronen [105] oder Licht [106] eingesetzt werden. Nachteilhaft können sich jedoch die fotoaktiven Zusätze auswirken, die im Wellenlängenbereich der Belichtungswellenlänge stark absorbieren. Dieser Effekt muß bei einer Anwendung beachtet werden und macht sich als eine Dämpfung im absorbierenden Wellenlängenbereich bemerkbar. Die Belichtung kann durch die Abbildung einer Maske oder durch die Abbildung eines Interferenzmusters [107] erfolgen. Die Strukturierung einer nicht fotoempfindlichen Polymerschicht erfordert zusätzliche Prozeßschritte. In Kapitel 7.3.1 wird darauf näher eingegangen. Merkmal der Aufschmelz-Technologie ist ein sehr kostengünstiges und einfaches Herstellungsverfahren, mit dem jedoch nur Minimaloberflächenprofile realisierbar sind. Mikrolinsen von wenigen Mikrometern bis mehreren hundert Mikrometern sind mit diesem Verfahren bereits hergestellt worden.

**Quellen von Polymerstrukturen durch Lösungsmitteldiffusion:** Ähnlich wie beim Aufschmelzen können Polymerstrukturen unter Eindiffusion von Lösungsmittel ihre Form verändern. Das Polymer beginnt bei einer Temperatur weit

unterhalb des Glasübergangs zu fließen und bildet ebenfalls ein Minimalflächenprofil. Da keine erhöhten Temperaturen benötigt werden, gibt es auch keine chemischen Veränderungen, wie z. B. Vernetzung. Die Eigenschaften des Polymers bleiben erhalten, was von Vorteil sein kann [108, 109]. In der Literatur wird diese Technologie nicht im Zusammenhang mit der Füllfaktorvergrößerung von Bildsensoren erwähnt. Zur Herstellung werden Geräte benötigt, welche nicht zur Fertigung von integrierten Schaltkreisen üblich sind.

**Prägen:** Bei diesem Verfahren wird zunächst eine Form hergestellt, mit deren Hilfe durch ein anschließendes Prägeverfahren die Strukturen erstellt werden. In [93] ist eine solche Technologie beschrieben. Zunächst wird mit Synchrotronstrahlung eine Schicht aus Polymethyl-Methacrylat (PMMA) strukturiert und aufgeschmolzen, so daß PMMA-Mikrolinsen entstehen. Durch die vollständige Bedeckung mit einer galvanisch abgeschiedenen Metallschicht und anschließendem Herauslösen der PMMA-Strukturen entsteht eine Prägeform, mit der sich weitere Mikrolinsen in einem Prägeverfahren vervielfältigen lassen. Diese Methode ist geeignet, um mehrere Millimeter große Mikrolinsen herzustellen. Positioniergenauigkeiten unterhalb eines Mikrometers können mit diesem Verfahren nicht erreicht werden, weshalb es nicht für die Anwendung in dieser Arbeit geeignet ist.

**Grautonbelichtung:** Das in der Mikrotechnik übliche fotolithografische Verfahren ist in erster Linie zu Erstellung einer Maskierungsschicht mit steilen Kanten geeignet, um bei einem nachfolgenden Ätzschritt spezielle Flächenteile abzudecken. Die Belichtung des Fotolacks erfolgt dabei durch die Abbildung einer Chrommaske, deren Transmissionswerte im einfachsten Fall nur Eins und Null annehmen. Für die Erzeugung eines dreidimensionalen Reliefs bietet sich die Grautonlithografie an. Bei diesem Verfahren kann die Transmission der Chromstrukturen partiell auch Zwischenwerte annehmen, so daß Grauwerte dargestellt werden können. Die Zwischenwerte in der optischen Transmission können zum Beispiel durch unterschiedlich dicht mit Chrom belegte Flächen realisiert werden, deren Größe jedoch unterhalb der Auflösungsgrenze des Abbildungsmechanismus sein muß [98].

**Proportionaltransfer:** Im Gegensatz zur reinen Maskierungsfunktion von Fotolack werden beim Proportional-Transfer der Fotolack und das Substrat mit vergleichbaren Ätzraten abgetragen. So wird sukzessive die Primärstruktur des Fotolacks in das Substrat abgebildet. Das Übertragen einer Polymermikrolinse in ein Substrat, z. B. Silizium oder Glas, erfolgt hierbei mit einem Trockenätzschritt. Der Trockenätzprozeß muß dahingehend optimiert sein, daß er möglichst genau die Topologie der Lacklinse in das Substrat überträgt, dafür muß die Ätzrate von Fotolack und Substrat gleich sein. Die zu übertragenden Strukturen können mit verschiedenen Methoden hergestellt werden. Aufschmelzen von Polymeren [110, 111], Quellen von Polymeren [108] und die Grautonlithografie [98] kommen hierbei zum Einsatz.

### **6.2.2 Anwendung bei Flächenbildsensoren**

Schon 1983 hat man erkannt, daß mit Mikrolinsen die Empfindlichkeit von CCD-Bildsensoren erhöht werden kann [112]. Anfang der 90er Jahre folgten weitere Veröffentlichungen auf diesem Gebiet [113, 114]. Empfindlichkeitssteigerungen von  $\Omega = 150\%$ , bei einem Füllfaktor von  $30\%$  und einer Pixelgröße von  $(7,5 \times 9,6) \mu\text{m}^2$  konnten erzielt werden [115]. Bei der Herstellung von CCD-Flächenbildsensoren ist heutzutage die Mikrolinsenpräparation ein etabliertes Verfahren, um den Füllfaktor des Sensors zu erhöhen. Üblicherweise wird dazu DUV-Fotolack (Deep Ultra Violet) verwendet, der im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent ist. Zur Kombination von CMOS-Flächenbildsensoren mit Mikrolinsenarrays wurde in der Literatur kein Hinweis gefunden. Durch den Unterschied im topologischen Aufbau ergeben sich grundsätzliche Unterschiede zwischen beiden Technologien, auf die im folgenden Kapitel genau eingegangen werden soll.



## 7 Untersuchungen von Mikrolinsen

### 7.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Für die Herstellung kostengünstiger Bildsensoren spielt deren Chipgröße eine entscheidende Rolle. Da die Sensorfläche von der Pixelgröße mitbestimmt wird, ist man bestrebt, diese besonders klein zu gestalten, wobei jedoch auch die Lichtempfindlichkeit des Sensors reduziert wird. Mit dem Einsatz eines Mikrolinsenarrays kann dem entgegengewirkt werden. Heutzutage betragen die Pixelgrößen von CMOS-Bildsensoren ca.  $10\ \mu\text{m}$ . Solche Sensoren können in einer  $0,5\text{-}\mu\text{m}$ -CMOS-Technologie hergestellt werden. Als Ziel dieser Arbeit sollte daher eine Mikrolinsentechnologie entwickelt werden, welche für einen Pixelpitch von  $10\ \mu\text{m}$  geeignet ist. Die Analyse der Herstellungsverfahren refraktiver Mikrolinsen in Kapitel 6.2 zeigt, daß das Aufschmelzen von Polymeren dafür eine geeignete Methode darstellt. Die Lithografiemodule einer  $0,5\text{-}\mu\text{m}$ -CMOS-Technologie werden jedoch üblicherweise mit Belichtungsgeräten ausgestattet die mit einer Wellenlänge von  $365\ \text{nm}$  (Hg i-Linie) auskommen. Die dafür gebräuchlichen Fotolacke absorbieren stark im Wellenlängenbereich um  $500\ \text{nm}$  und sind daher nicht für eine Mikrolinsenherstellung geeignet (vergleiche Kapitel 7.3.1).

Aus dieser Ausgangssituation ergaben sich zwei grundsätzliche Aufgabenstellungen, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Die erste Aufgabe bestand darin, grundlegende Überlegungen zur Optik von Mikrolinsen anzustellen. Für diese Untersuchungen standen Geometrien von CMOS-Bildsensoren zur Verfügung, welche einen Pixelpitch von  $17\ \mu\text{m}$  bei  $40\ \%$  Füllfaktor hatten. Als zweite Aufgabe sollte ein Herstellungsprozeß für Mikrolinsen entwickelt werden, der für Bildsensoren mit einem Pixelpitch von  $10\ \mu\text{m}$  geeignet ist. Bei der Materialwahl mußte beachtet werden, daß keine Prozessiermöglichkeit für Fotolacke zur Verfügung stand, die mit DUV-Strahlung (Deep Ultra Violet) belichtet werden. Um den Mehraufwand einer Mikrolinsenpräparation zu rechtfertigen, sollte die Füllfaktorerrhöhung bei mindestens  $30\ \%$  liegen. Das dafür geeignete Material muß möglichst transparent sein und bei Temperaturen von  $150\ ^\circ\text{C}$  -  $250\ ^\circ\text{C}$  in einen flüssigen Zustand übergehen. Höhere Schmelztemperaturen sind für eine Kombination von Farbfiltern und Mikrolinsen nicht geeignet. Bei der Materialwahl mußte darauf geachtet werden, daß die Anforderungen an die Reinheit bezüglich der Partikel- und Schwermetallkontamination den Standards der CMOS-Prozessierung entsprach.

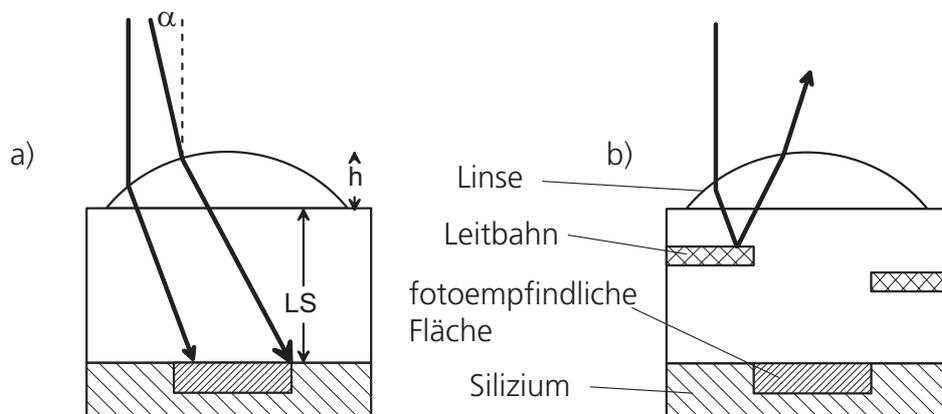
### 7.2 Berechnungen zu $17\ \mu\text{m}$ -Pixel

Der Pixelschichtaufbau spielt eine entscheidende Rolle, da durch ihn Abschattungen erzeugt werden können, wodurch die Effizienz der Lichtfokussierung beeinträchtigt wird (Abbildung 7.1b)). Um diesen Einfluß zu untersuchen, werden im Rahmen dieser Ar-

beit Füllfaktorberechnungen mit und ohne Berücksichtigung des Leitbahnaufbaus vorgestellt. In Abbildung 7.1 sind die Parameter Abstand Linse-Sensor  $LS$  und die Höhe der Linse  $h$  dargestellt. Dies sind die Parameter, welche durch die Linsenherstellung direkt beeinflussbar sind. Mit  $LS$ ,  $h$  und der Form der Linse wird das optische System beschrieben. Es gilt nun unter Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit, den optimalen Parametersatz zur Füllfaktorerrhöhung zu finden. Dazu wurden Strahlverfolgungsrechnungen angefertigt, die sich auf Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik stützen, d. h. die Wellennatur des Lichtes wird nicht berücksichtigt [17]. Um zu untersuchen, ob Beugungseffekte einen Einfluß auf die Lichtbündelung haben, werden Ergebnisse wellenoptischer Berechnungen vorgestellt, die dann mit den strahlenoptischen Vorhersagen verglichen werden.

### 7.2.1 Beschreibung von Minimalprofilen

Durch das Aufschmelzen verändert eine aus Polymer bestehende Struktur ihre Form. Unter der Voraussetzung, daß beim Schmelzen keine chemischen Reaktionen den Polymeraufbau und damit, z. B. durch thermisches Vernetzen, die Eigenschaften verändern, nimmt die Form bei vollständiger Verflüssigung eine Gestalt an, bei der die Oberfläche und die damit verbundene Oberflächenenergie unter den gegebenen Randbedingungen minimal wird. Die Randbedingungen sind gegeben durch das Volumen der Polymerstruktur, dem Volumenverlust, welcher durch das Abdampfen des Lösemittels verursacht wird, und der Benetzungseigenschaft des flüssigen Polymers bezüglich der Unterlage. Da eine Mikrolinse das ganze Licht, welches auf den Sensorpixel fällt, bündeln soll, muß die Form der Grundfläche der Mikrolinse mit der des Pixels identisch sein [116]. Aus diesem Grund soll für die folgenden Betrachtungen von einer quadratischen Grundfläche der Polymerstrukturen ausgegangen werden. Man kann zwei Fälle unterscheiden, bei denen nach dem Aufschmelzen jeweils eine andere Oberfläche entsteht (siehe Abbildung 7.2). Bild a) zeigt den Fall, daß beim Verflüssigen das Polymer die



**Abbildung 7.1:** Schematische Darstellung eines Sensorpixels mit Mikrolinse. a) Ohne Berücksichtigung des Schichtaufbaus; b) Mit Berücksichtigung des Schichtaufbaus, welcher zur Abschattung führt

Gestalt einer Kugelkalotte annimmt, die sich durch die Oberflächenspannung einstellt und mit dem materialabhängigen Kontaktwinkel  $\alpha$ , dem Durchmesser der Auflagefläche und der Höhe beschrieben wird. Bleibt die Grundfläche des Polymer erhalten, stellt sich ein anderer Kontaktwinkel ein, der nicht materialabhängig ist (siehe Teilbild b)). Für diesen Fall wird die Höhe der Oberfläche mit folgender Formel beschrieben [108]:

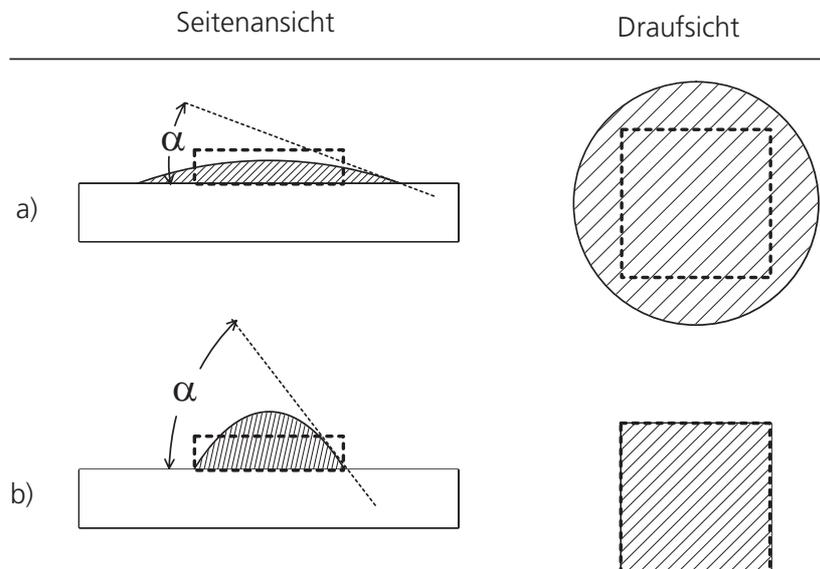
$$H(x, y) = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot \sum_{n=1, m=1}^{\infty} c_{n,m} \cdot \sin \left( \frac{n \cdot \pi \cdot x}{a} \right) \cdot \sin \left( \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b} \right) \quad (7.1)$$

Wobei  $a$  und  $b$  die Kantenlängen des Polymerquaders vor dem Aufschmelzen darstellen und  $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  und  $c_{n,m}$  durch die folgenden Formeln berechnet werden können:

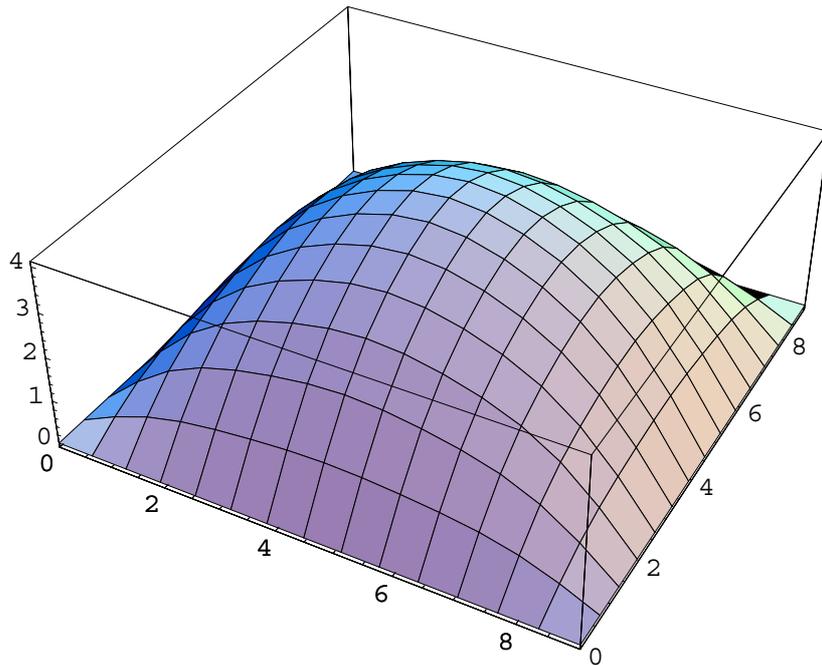
$$c_{n,m} = \frac{4 \cdot [(-1)^{n+1} + 1] \cdot [(-1)^{m+1} + 1]}{\pi^4 \cdot \left( \frac{n^3 \cdot m}{a^2} + \frac{m^3 \cdot n}{b^2} \right)} \quad (7.2)$$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{V}{\sum_{n=1, m=1}^{\infty} \frac{c_{n,m} \cdot a \cdot b \cdot ((-1)^n - 1) \cdot ((-1)^m - 1)}{\pi^2 \cdot n \cdot m}} \quad (7.3)$$

$V$  ist das Polymer-Volumen, welches als konstant angenommen werden kann, und  $R_1$  und  $R_2$  sind die sogenannten Hauptkrümmungsradien [117]. In Abbildung 7.3 ist beispielhaft ein Linsenprofil mit einer quadratischen Grundfläche von  $81 \mu\text{m}^2$  dargestellt. Aus dieser Abbildung kann auch die Lage des Koordinatensystem entnommen



**Abbildung 7.2:** Unterschiedliches Verfließen einer Polymerstruktur. Die Struktur vor dem Aufschmelzen ist durch die gestrichelte Linie dargestellt. a) Materialabhängiger Randwinkel, der sich durch das Fließen auf der Unterlage einstellt; b) Materialunabhängiger Kontaktwinkel. Die Grundfläche bleibt beim Aufschmelzen erhalten



**Abbildung 7.3:** Berechnetes Minimalprofil über einer quadratischen Grundfläche von  $81 \mu\text{m}^2$ . Die Ausgangsschichtdicke des Polymers beträgt  $2 \mu\text{m}$ , womit ein Volumen von  $(9 \times 9 \times 2) \mu\text{m}^3$  aufgeschmolzen wird und eine Linsenhöhe von  $3,0 \mu\text{m}$  entsteht

werden. Wegen der Form werden diese Linsen auch Kissenlinsen genannt. Gleichung 7.1 stellt einen Fourierreihenansatz dar, der eine Differentialgleichung löst, welche die Oberflächenspannungen des Systems Luft, flüssiges Polymer und Substrat unter Vernachlässigung der Schwerkraft beschreibt [108].

### 7.2.2 Strahlverfolgungsberechnungen

Zuerst soll anhand einer geometrischen Betrachtung die maximal erreichbare Empfindlichkeitserhöhung abgeschätzt werden. Dafür wird die Krümmung der Linsenoberfläche nicht berücksichtigt, da die Reflexionsverluste größer sind als von einer ebenen Oberfläche. Bei einer Pixelfläche von  $(17 \times 17) \mu\text{m}^2$  und einer Linsengrundfläche von  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  kann höchstens  $88,6 \%$  des einfallenden Lichtes eingesammelt werden. Die Reflexionen an den Grenzflächen Luft/PMMA und PMMA/Silizium werden mit den Fresnelschen Koeffizienten  $r_1$  bzw.  $r_2$  berücksichtigt. Mit Hilfe der Fresnelschen Gleichungen können diese Größen berechnet werden und betragen für Lichtstrahlen, die senkrecht zur Oberfläche einfallen:  $r_1 = 0,039$ , bzw.  $r_2 = 0,18$ , d. h. daß  $4 \%$ , bzw.  $18 \%$  des Lichtes an der entsprechenden Grenzfläche reflektiert wird. Verfolgt man nun das den Pixel beleuchtende Strahlenbündel mit der Intensität  $I_0$  durch das Schichtsystem, dann errechnet sich der normierte Wert für die Intensität  $I$  im Silizium zu  $I/I_0 = 0,886 \cdot (1 - 0,039) \cdot (1 - 0,18) = 0,7$ . Dieser Wert kann durch die Fokussierung der Mikrolinse nicht überschritten werden und soll als Vergleichswert in der folgenden Diskussion dienen. Betrachtet man das Schichtsystem ohne Mikrolinsen, so ergibt sich für  $I/I_0$  bei einem Füllfaktor von  $40 \%$  ein Wert von  $0,4 \cdot (1 - 0,039) \cdot (1 - 0,18) = 0,32$ .

Wenn das Sensorsignal proportional zu  $I$  ist<sup>4</sup>, ergibt sich die maximale Empfindlichkeitserhöhung  $\Omega$  zu 119 %. Die Größe  $I/I_0$  soll als Transmission  $\vartheta$  bezeichnet werden und entspricht dem transmittierten Anteil  $T$ , der in Kapitel 2.3 eingeführt wurde.

Folgendes vereinfachtes Modell wurde für die Strahlverfolgungsberechnungen zugrundegelegt. Eine transparente Linse mit dem Brechungsindex  $n$  und der Höhe  $h$  wird durch eine Schicht des gleichen Materials der Dicke  $LS$  vom Silizium-Sensor getrennt (vergleiche Abbildung 7.1a)). Die Pixelfläche beträgt  $(17 \times 17) \mu\text{m}^2$ . Mit dem Herstellungsprozeß (vgl. Kapitel 7.3.1) ist es nicht möglich, die Mikrolinsen lückenlos aneinander zu positionieren. Daher wird ein Linse-Linse-Abstand von  $1 \mu\text{m}$  angenommen, womit eine Totzone verbunden ist, aus der kein Licht fokussiert werden kann. Die Linsenform wird durch ein Minimalflächenprofil mit einer quadratischen Grundfläche der Größe  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  nach Formel 7.1 beschrieben. Ein Füllfaktor von 40 % definiert die quadratische, lichtempfindliche Fläche des Sensors. Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Strahlverfolgungsprogramms Opticad (Version 6, Opticad Corporation, Santa Fe) angefertigt [118], welches kommerziell erhältlich ist und für die Entwicklung von optischen Geräten und Linsen eingesetzt wird. Es werden parallele Strahlenbündel mit dem Einfallswinkel  $\alpha$  mit der Intensität  $I_0$  pro Pixelfläche und der Wellenlänge  $656,3 \text{ nm}$  eingesetzt, um die Intensität  $I$  im Silizium innerhalb der lichtempfindlichen Fläche des Sensors zu bestimmen. Effekte wie Brechung und Reflexion an den Grenzflächen werden dabei berücksichtigt. Eine paraxiale Näherung wird nicht vorgenommen.

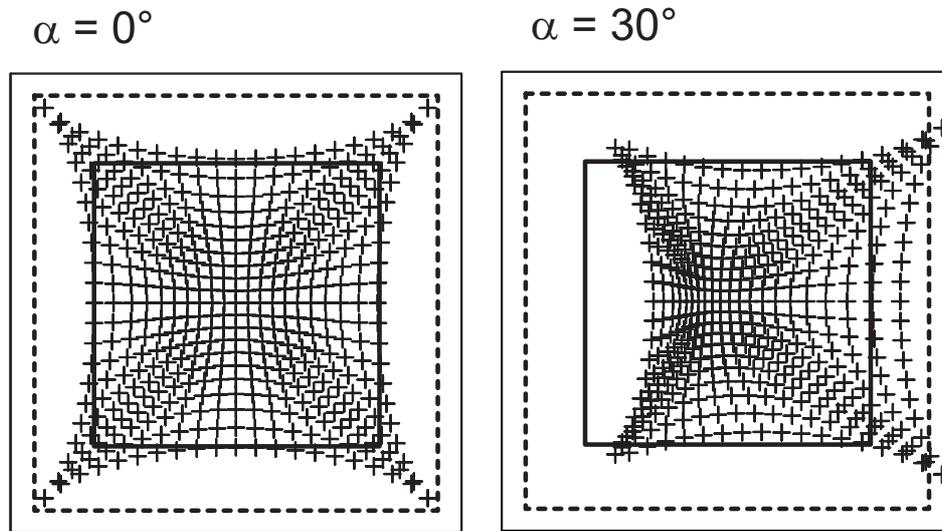
Paralleles Licht wird von einer Konvex-Linse gebündelt. Projiziert man das fokussierte Strahlenbündel in einem beliebigen Abstand  $l$  auf einen Schirm, dann kann man die Intensitätsverteilung (Spotform) sichtbar machen. Mit der strahlenoptischen Berechnung der Spotdiagramme kann die Intensitätsverteilung auf der lichtempfindlichen Fläche des Sensors dargestellt werden. In Abbildung 7.4 sind solche Diagramme für die Einfallswinkel  $0^\circ$  und  $30^\circ$ , einem Abstand  $LS$  von  $6 \mu\text{m}$  und einer Linsenhöhe von  $4,5 \mu\text{m}$  dargestellt. Summiert man die Strahlintensitäten bei senkrechtem Einfall im Bereich der lichtempfindlichen Fläche auf, so erhält man für die Transmission  $\vartheta$  einen Wert von 0,58, was einer Empfindlichkeitserhöhung von  $\Omega = 81 \%$  entspricht. Es werden also nicht alle Lichtstrahlen auf die lichtempfindliche Fläche fokussiert (vgl. Abbildung 7.4), ansonsten müßte  $\vartheta$  annähernd einen Wert von 0,7 ergeben.

Im folgenden wird gezeigt, daß durch die Vergrößerung von  $h$ , bzw.  $LS$  die Effizienz weiter erhöht werden kann.  $LS$  und  $h$  sind direkt mit der Fertigung beeinflussbar, und stellen somit die wichtigsten Größen für den Herstellungsprozeß dar. Bei einer Abbildung über ein Objektiv, wie es für eine Kameraanwendung der Fall ist, treffen die abgebildeten Strahlen mit unterschiedlichen Winkeln (typische Werte:  $0^\circ - 30^\circ$ ) auf den Sensor. Der Einfluß der Linsenhöhe  $h$  und des Abstandes  $LS$  auf die Füllfaktorvergrößerung wurde daher winkelabhängig untersucht. In den Abbildungen 7.5 und 7.6 sind die berechneten Winkelabhängigkeiten für die Parameter  $LS$  und  $h$  dargestellt.

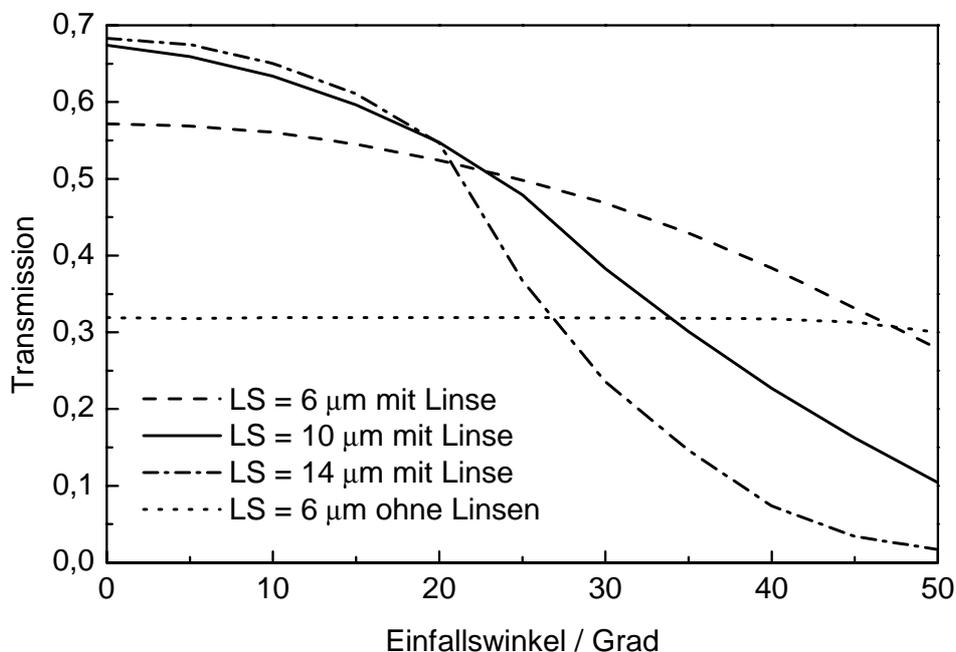
Ideal wäre ein vom Einfallswinkel unabhängiger Füllfaktorgewinn. Die Berechnungen zeigen jedoch, eine starke Winkelabhängigkeit. Die maximale Transmission bei Variation von  $LS$  beträgt 0,68 bei einem Wert  $LS = 14 \mu\text{m}$ , wobei jedoch dieser Wert

---

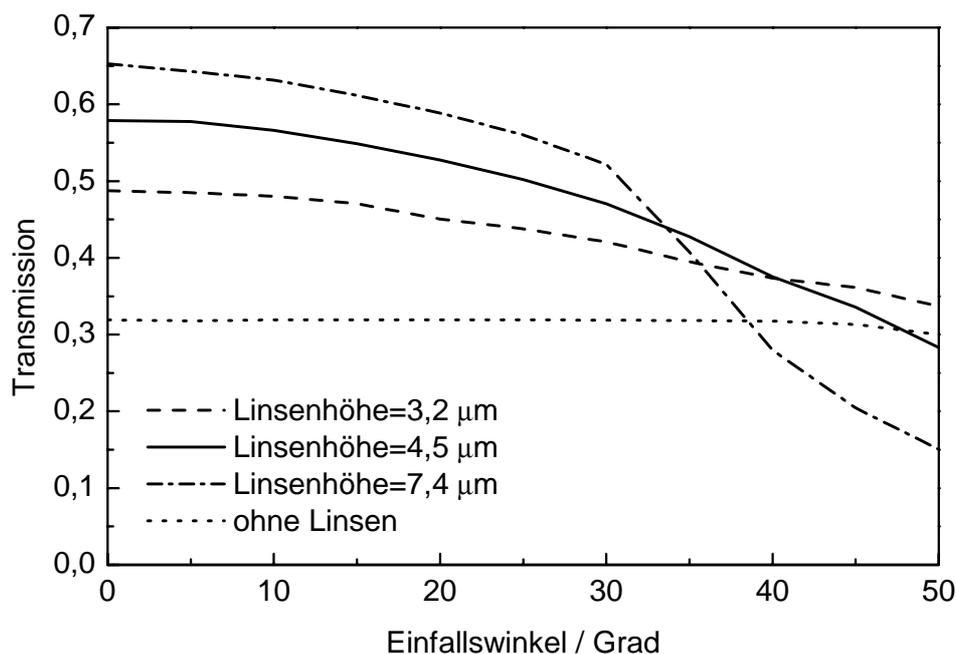
<sup>4</sup>Dies gilt nur bis zu einer maximalen Bestrahlungsstärke, ab der der Zusammenhang von Bestrahlungsstärke und Signal nichtlinear wird



**Abbildung 7.4:** Mit Strahlverfolgung berechnete Intensitätsverteilung bei den Einfallswinkeln  $0^\circ$  und  $30^\circ$  für  $LS = 6 \mu\text{m}$  und  $h = 4,5 \mu\text{m}$ . Dargestellt ist ein Pixel mit der Fläche von  $(17 \times 17) \mu\text{m}^2$ . Die lichtempfindliche Fläche, welche sich aus dem Füllfaktor von 40 % ergibt, ist mit dem inneren Quadrat und die Linsengrundfläche von  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  mit der gestrichelten Linie dargestellt



**Abbildung 7.5:** Ergebnisse der Strahlverfolgungsrechnung zur Transmission mit dem Abstand Linse-Sensor  $LS$  als Parameter im Vergleich zum System ohne Linse. Der Pixelschichtaufbau wurde nicht berücksichtigt. Es wurde ein Minimalflächenprofil mit  $4,5 \mu\text{m}$  Höhe und  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  Grundfläche angenommen



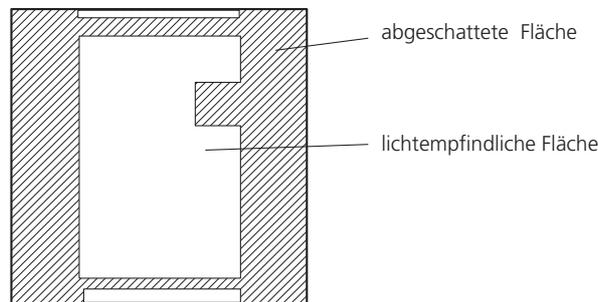
**Abbildung 7.6:** Ergebnisse der Strahlverfolgungsrechnung zur Transmission mit der Linsenhöhe  $h$  als Parameter im Vergleich zum System ohne Linse. Der Pixelschichtaufbau wurde nicht berücksichtigt. Es wurde ein Linse-Sensor Abstand  $LS$  von  $6 \mu\text{m}$  und eine Grundfläche von  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  angenommen

bei einem Einfallswinkel von  $30^\circ$  um 65 % abfällt. Die maximale Transmission  $\vartheta$  bei Variation der Linsenhöhe beträgt 0,65 mit einer Linsenhöhe  $h = 7,4 \mu\text{m}$  und fällt bei einem Einfallswinkel von  $30^\circ$  nur um 20 % ab. Bei schräg einfallenden Strahlen gerät der Spot aus der lichtempfindlichen Fläche heraus (siehe 7.4b)) und die Transmission  $\vartheta$  verringert sich. Tendenziell empfiehlt es sich bei einer Füllfaktorvergrößerung die Lichtstrahlen mit stark gekrümmten Linsen zu fokussieren, die möglichst nah am Sensor positioniert sind. Zu bemerken ist auch, daß die maximale Transmission schon annähernd bei einem Wert  $LS = 10 \mu\text{m}$  erreicht wird, d. h. daß bei dieser Konfiguration das gesamte gebündelte Licht auf die lichtempfindliche Fläche gelangt. Eine Transmission von 0,65 entspricht ungefähr einer Verdopplung der Empfindlichkeit des Sensors.

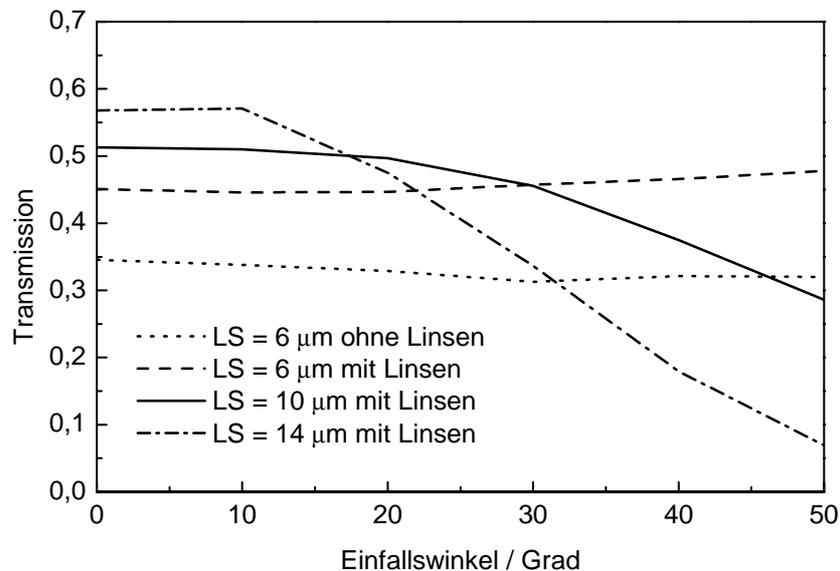
In Kapitel 2.2 wurde die topologische Beschaffenheit der Pixel erläutert, welche mit dem Herstellungsprozeß des Fotosensors verbunden ist. Diese ergibt sich aus dem Schichtaufbau des CMOS-Prozesses und der Konstruktion (Layout) des Pixels. Die im Schichtaufbau enthaltenen undurchsichtigen Metalleitbahnen bilden eine Art Schattenmaske über der lichtempfindlichen Fläche und schränken die Wirkung einer Mikrolinse ein (siehe Abbildung 7.1b)). Dies soll exemplarisch anhand der folgenden Berechnung gezeigt werden, welche von einem definierten Pixelschichtaufbau eines CMOS-Bildsensors mit 40 % Füllfaktor ausgeht. Die Projektion der Metalleitbahnen auf die Siliziumfläche ist in Abbildung 7.7 gezeigt. In Abbildung 7.8 ist die berechnete Transmission in Abhängigkeit vom Einfallswinkel dargestellt. Die Linsenparameter können der Abbildung entnommen werden. Es fällt auf, daß der Transmissionswert von 0,57 bei  $LS = 14 \mu\text{m}$  um 16 % niedriger ausfällt, als bei einem Pixel ohne Abschattungen durch Metalleitbahnen. Ein weiterer Effekt macht sich in der Winkelabhängigkeit der

Transmission bemerkbar. Bei einem Wert von  $LS = 6 \mu\text{m}$  fällt die Transmission nicht mit zunehmendem Winkel ab. Dies kann mit der rechteckigen Form der lichtempfindlichen Fläche begründet werden und ist anhand von Abbildung 7.9 verdeutlicht. Ein Vergleich mit Abbildung 7.4 b) zeigt, daß bei einer zentrierten quadratischen Grundfläche ein erheblicher Anteil des einfallenden Lichtes nicht mehr zum Signal beitragen kann und daher das Signal mit zunehmendem Winkel abnimmt.

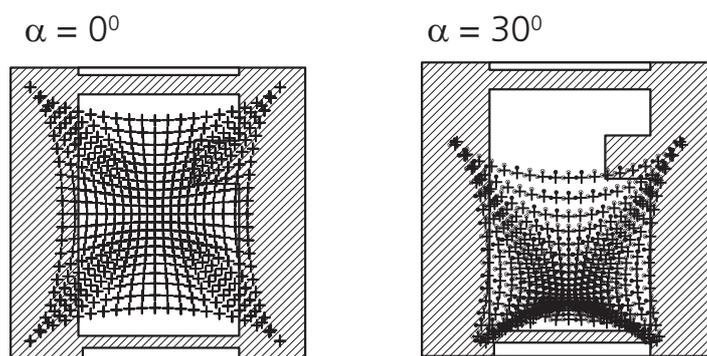
Es läßt sich also hiermit zeigen, daß das Layout des Sensors für eine genaue Füllfaktorberechnung miteinbezogen werden muß. In der Praxis ist man in den Werten für  $LS$  und  $h$  beschränkt, da nicht beliebig dicke Schichten hergestellt werden können. Realistisch erscheinen Werte für  $LS$  von  $6 - 8 \mu\text{m}$  und für  $h$  von ca.  $4 - 5 \mu\text{m}$ , womit eine Empfindlichkeitssteigerung von ca. 30 % erreichbar ist.



**Abbildung 7.7:** Dargestellt ist die Form der lichtempfindlichen Fläche eines ( $17 \times 17$ )  $\mu\text{m}^2$  Pixels einer CMOS-Kamera. Die lichtempfindliche Fläche ergibt sich dabei als Projektion der Metalleitbahnen auf das Silizium



**Abbildung 7.8:** Ergebnisse der Strahlverfolgungsrechnung zur Transmission mit dem Abstand Linse-Sensor  $LS$  als Parameter im Vergleich zu einem System ohne Linse. Der Pixelschichtaufbau wurde berücksichtigt. Für die Berechnung wurde ein Minimalflächenprofil mit  $4,5 \mu\text{m}$  Höhe und  $(16 \times 16) \mu\text{m}^2$  Grundfläche angenommen



**Abbildung 7.9:** Die Lichtmenge, die unter einem Einfallswinkel von  $0^\circ$  und  $30^\circ$  auf die lichtempfindliche Fläche des Sensors fällt ist vergleichbar. Die Werte für  $\vartheta$  bei  $0^\circ$  und  $30^\circ$  betragen  $0,45$  bzw.  $0,46$ .  $LS = 6\ \mu\text{m}$  und  $h = 4,5\ \mu\text{m}$

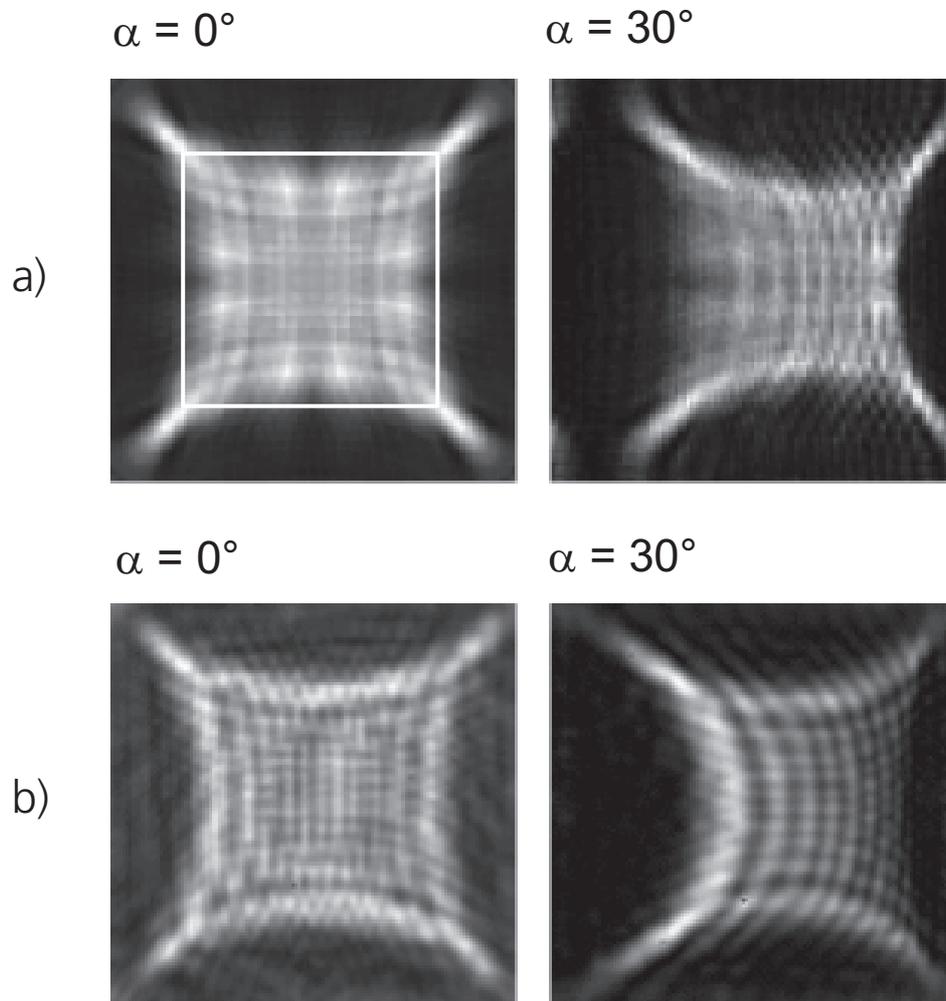
### 7.2.3 Wellenoptische Berechnungen und experimentelle Bestimmung der Spotform von abgeformten Mikrolinsen

Um Einflüsse von Beugungseffekten zu untersuchen, wurden wellenoptischen Berechnungen angefertigt [119], die mit den Strahlverfolgungsrechnungen verglichen werden konnten. Dazu wurde das Programm Diffractica verwendet [120]. Da im Experiment die Spotform zugänglich war, wurde diese als Grundlage für einen Vergleich von experimentellen und wellenoptisch berechneten Werten herangezogen.

Für das Experiment wurden Mikrolinsen auf einem transparenten Substrat erzeugt, da das Siliziumsubstrat nicht durchleuchtet werden kann. Im folgenden wird das angewandte Verfahren beschrieben: Auf einem Silizium-Wafer wurden Mikrolinsen mit quadratischer Grundfläche der Seitenlänge  $16\ \mu\text{m}$  und der Höhe  $4,5\ \mu\text{m}$  durch das Aufschmelzen von Fotolack hergestellt. Mit einem Abformverfahren wurde damit ein Werkzeug aus Silikongießharz (Basismaterial: Polydimethylsiloxan) erstellt. In einem zweiten Schritt konnte das Mikrolinsenarray mit der Prägeform in einem Acrylatpolymer dupliziert und mit UV-Strahlung unter Wärmeeinwirkung ausgehärtet werden. Dies erfolgte auf einem transparenten Substrat. Mit diesem Verfahren konnten die PMMA-Mikrolinsen sehr genau abgeformt werden, lediglich die Höhe der Strukturen nimmt um wenige Prozent ab. Die so hergestellte Probe konnte mit parallelem Licht bestrahlt werden, um auf der Bildseite mit einer CCD-Kamera über ein Mikroskopobjektiv die Spotform in einem beliebigen Abstand  $l$  zu messen. Unsicherheiten von wenigen Prozent ergaben sich aufgrund der Positioniergenauigkeit von Probe zu Objektiv.

In Abbildung 7.10 sind zum Vergleich die Ergebnisse der wellenoptischen Berechnungen den Meßergebnissen gegenübergestellt. Mit diesem rein qualitativen Vergleich soll gezeigt werden, daß die Berechnung anhand eines Minimalflächenprofils mit der Messung an einem experimentell erstellten Oberflächenprofil vergleichbare Ergebnisse liefert. Die Linsenform, die durch das Aufschmelzen des Fotolacks entsteht kann also annähernd mit einem Minimalflächenprofil beschrieben werden. Dies konnte auch anhand einer AFM-Messung (Atomic Force Microscope) bestätigt werden. Der Vergleich eines berechneten mit einem gemessenen Profil ergab eine mittlere quadratische Abweichung von weniger als 10 %.

Die Ergebnisse der wellenoptischen Berechnungen können nun mit den Ergebnissen der Strahlverfolgungsrechnungen verglichen werden. Die Intensitätsverteilung auf der Sensorfläche kann wieder anhand der Spotdiagramme aus Abbildung 7.4 und Abbildung 7.10 dargestellt werden. Die Unterschiede können mit den aufsummierten Intensitäten im lichtempfindlichen Bereich bewertet werden. Die Strahlverfolgungsrechnung ergibt bei den Winkeln  $0^\circ$  und  $30^\circ$  Transmissionswerte von 0,61, bzw. 0,52. Die Werte der wellenoptischen Berechnung ergeben 0,57, bzw. 0,52. Die Werte sind mit einer Abweichung von weniger als 5% behaftet und damit vergleichbar. Es konnte also gezeigt werden, daß Beugungseffekte eine vernachlässigbare Rolle spielen. Die Form der Kissenlinsen weicht stark von der einer sphärischen Linse ab. Die damit verbundenen Linsenfehler (Aberrationen) überdecken die auftretenden Beugungseffekte.



**Abbildung 7.10:** Vergleich zwischen wellenoptisch berechneten und gemessenen Spotdiagrammen bei den Einfallswinkel  $0^\circ$  und  $30^\circ$ . Das weiße Quadrat in Bild a) entspricht der Umrandung der lichtempfindlichen Fläche bei 40 % Füllfaktor. a) Berechnet; b) Gemessen

## 7.3 Untersuchungen von 10 $\mu\text{m}$ PMMA-Mikrolinsen

### 7.3.1 Herstellung von PMMA-Mikrolinsen

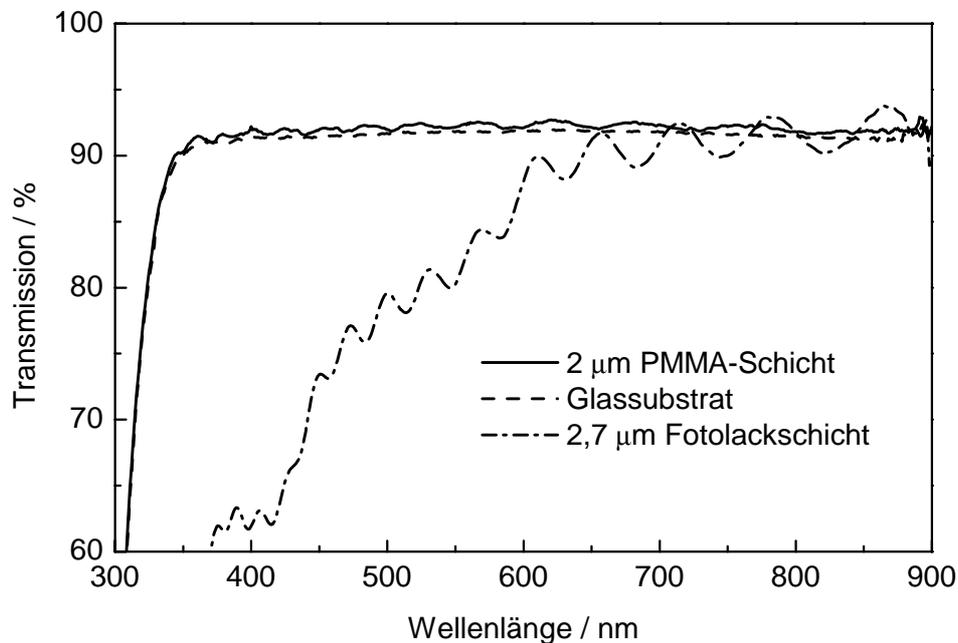
Wegen der guten optischen Eigenschaften von Polymethyl-Methacrylat (PMMA), die mit denen von Silikatglas vergleichbar sind, und der kommerziellen Verfügbarkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit dieses Material für die Herstellung von Mikrolinsen verwendet. In der Mikrotechnik hat sich PMMA als gebräuchliches Material etabliert, da es mit Hilfe verschiedener Strahlungsarten strukturiert werden kann [104, 109, 121, 122]. Als Standardmaterial wird es z. B. in der Elektronenstrahl-Lithografie und im LIGA-Verfahren (Lithografie Galvanoformung Abformung) als röntgenempfindliches Material verwendet. Speziell bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen hat sich PMMA als nützliches Material für die Maskenherstellung erwiesen, was zur Folge hat, daß es in entsprechender Reinheit kommerziell erhältlich ist. Das linsenförmige Verfließen von PMMA-Strukturen wird von Hatzakis beschrieben [123]. In [106] wird auf PMMA als geeignetes Mikrolinsenmaterial hingewiesen. Die Möglichkeit, dieses Material mit sehr großen Schichtdicken noch belichten und entwickeln zu können, wird als vorteilhaft für die Erstellung von Mikrolinsen mit sehr großem Durchmesser genannt. Von Ahn et al. wird die Herstellung von PMMA-Mikrolinsen vorgestellt [124]. Mit dem beschriebenen Verfahren wurden sphärische Linsen (keine quadratische Grundfläche) mit einem Durchmesser von mindestens 200  $\mu\text{m}$  erstellt. Das Verfahren ist daher nicht für die Bildsensoranwendung geeignet. Außerdem wird dabei ein Strukturierungsprozeß mit einer Aluminium- bzw. Titanhartmaske eingesetzt. Die einfachste und kostengünstigste Methode besteht jedoch in der Verwendung einer Fotolackmaske.

Als Strukturierungsverfahren kam im Rahmen dieser Arbeit nur das Trockenätzen in Frage, da mit Naßätzverfahren nicht ausreichend kleine Strukturen erzeugt werden können. Das Trockenätzen von Polymeren kommt in verschiedenen Prozessen zum Einsatz. Das Plasmalackentfernen [125, 126, 127], die Mehrlagenresisttechnik [128, 129, 130], das Strukturieren von Polymerplanarisierungen [131, 132] und das Strukturieren von polymeren Lichtwellenleitern [133] sollen hier nur als Beispiele angeführt werden. Prinzipiell werden Polymere mit Sauerstoff geätzt. Die Oxidation der Kohlenstoffketten des Polymers durch Sauerstoffradikale, welche im Plasma entstehen, führt zu den flüchtigen und stabilen Endprodukten  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Zusätze wie z. B. Fluor ermöglichen weitere Ätzmechanismen, um den Ätzprozeß zu unterstützen [134], oder um weitere Polymerbestandteile in flüchtige Reaktionsprodukte zu überführen. Ein ausführlicher Übersichtsartikel zum Sauerstoff-Plasma-Ätzen von Polymeren findet sich in [135]. Speziell über das Trockenätzen von PMMA wird in [128, 129, 136, 137, 138, 139] berichtet.

PMMA ist ein Werkstoff, der auch unter dem Namen Acrylglas bekannt ist. Die Summenformel des Monomers lautet:  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ . Als Acrylat gehört es zu der Gruppe der Polyvinyle [140], die jedoch wegen der großen wirtschaftlichen Bedeutung oft gesondert aufgeführt werden. Weiterhin kann es den Thermoplasten zugeordnet werden und hat eine Glasatemperatur von ungefähr  $105^\circ\text{C}$  (die Glasatemperatur ist abhängig von der Molekulargewichtsverteilung). Da es jedoch nicht mit dem zur Verfügung stehenden

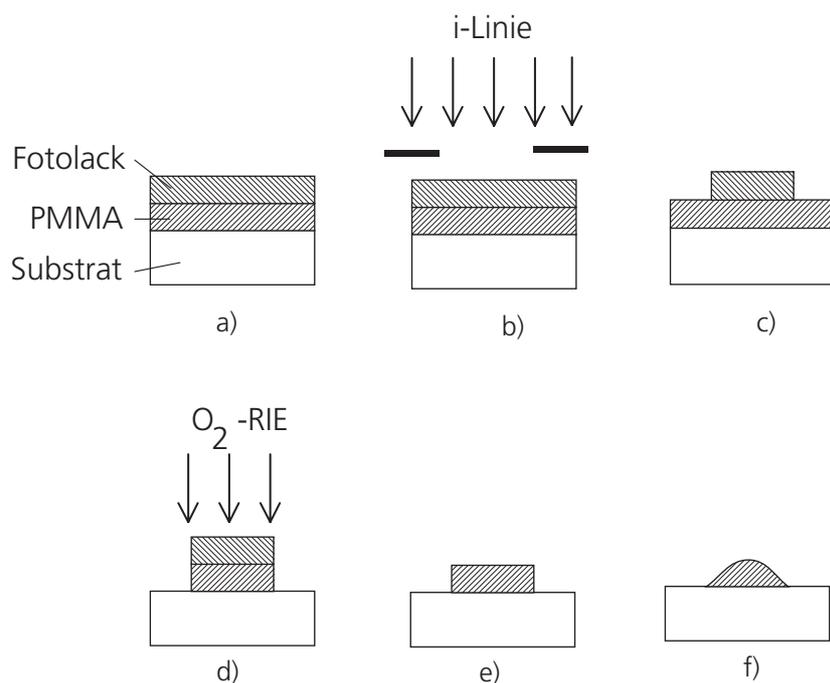
Belichtungsverfahren bei einer Wellenlänge von 365 nm belichtet werden konnte, mußte ein Strukturierungsverfahren entwickelt werden, mit dem ausreichend kleine Strukturen erstellt werden können.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Herstellung von Mikrolinsen wird im folgenden beschrieben. Die Deposition des PMMA erfolgte mit dem Aufschleuderverfahren. Das verwendete Material (AR-P 671.07, Allresist GmbH, Berlin) hat einen Feststoffgehalt von 7% bei einem Molekulargewicht von 950 K und ist in Chlorbenzen gelöst. In Abbildung 7.11 sind zum Vergleich die Transmissionen von PMMA, Glas und Fotolack dargestellt. Im sichtbaren Wellenlängenbereich ist die Transmission der PMMA-Probe mit der von Glas vergleichbar. Zur Abschätzung der benötigten PMMA-Schichtdicke wurde die Füllfaktorserhöhung für einen  $(10 \times 10) \mu\text{m}^2$ -Pixel mit einer Mikrolinse der Grundfläche  $(9 \times 9) \mu\text{m}^2$  berechnet. Bei einer Linsenhöhe von  $3 \mu\text{m}$  ergab sich eine Empfindlichkeitserhöhung von 100%. Mit den Formeln 7.1 bis 7.3 konnte dann das Polymervolumen und die PMMA-Schichtdicke berechnet werden. Es ergab sich ein Wert von  $2 \mu\text{m}$ . Daher wurden Schichten der Dicke  $2 \mu\text{m}$  deponiert und anschließend auf einer Heizplatte getrocknet. Das Strukturierungsverfahren ist in Abbildung 7.12 schematisch dargestellt. Nach der Erstellung einer Fotolackmaske auf der PMMA-Schicht kann diese mit einem Trockenätzprozeß strukturiert werden. Dafür stand eine Plasmaätzanlage T384 der Firma Lam Research zur Verfügung, die im RIE-Modus (Reaktive Ion Etching) betrieben wurde.



**Abbildung 7.11:** Transmission eines  $2,0 \mu\text{m}$  dicken PMMA-Films auf einem Glassubstrat, einem unbeschichteten Glassubstrat und einem  $2,7 \mu\text{m}$  Fotolack-Film (AZ7212, Clariant) auf einem Glassubstrat. Die Messung wurde mit einem Zweistrahl Spektrofotometer durchgeführt

Bei der Entwicklung des Ätzprozesses mußte darauf geachtet werden, daß die Maskierungsschicht weniger schnell abgetragen wird als das zu ätzende Material. Das Verhältnis der Ätzraten von Schicht und Maskierung wird durch die Selektivität angegeben. Um den Einfluß der Plasmaparameter auf die Selektivität und die Ätzrate zu untersuchen, wurden verschiedene Ätzbedingungen erprobt. Tabelle 7.1 zeigt die Parameter der verwendeten Ätzprogramme und die erzielten Ergebnisse. Die größere PMMA-Ätzrate, verglichen mit der des Fotolacks, kann durch die chemische Struktur erklärt werden [125]. Für die Umsetzung des Fotolacks in flüchtige Reaktionsprodukte wird mehr Sauerstoff benötigt, als es für PMMA der Fall ist. Daher ist

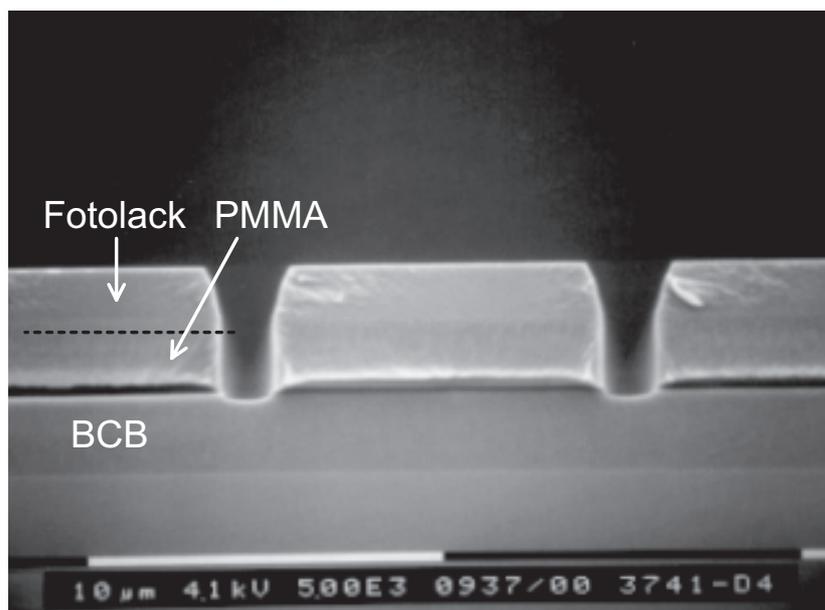


**Abbildung 7.12:** Prozessschrittfolge der PMMA-Mikrolinsenherstellung. a) Beschichtung eines Substrates mit PMMA und Fotolack; b) Belichten des Fotolacks; c) Entwickeln des Fotolacks; d) Trockenätzen des PMMA; e) Ablösen des Fotolacks; f) Aufschmelzen des PMMA

**Tabelle 7.1:** Ätzprogramme

Programm	Polymer1	Polymer2	Polymer3
Gase ; Fluß / sccm	$\text{CF}_4/\text{O}_2$ ; 80/16	$\text{O}_2$ ; 96	$\text{O}_2$ ; 96
Druck / Torr	500	500	250
Leistung / W	400	400	400
Ätzrate PMMA / (nm/min)	2,7	3,0	2,5
Selektivität Fotolack	1,9	1,7	1,7
Auflösung / $\mu\text{m}$	3	3	3
Kantenverschiebung / $\mu\text{m}$	0,5	0,5	0,6

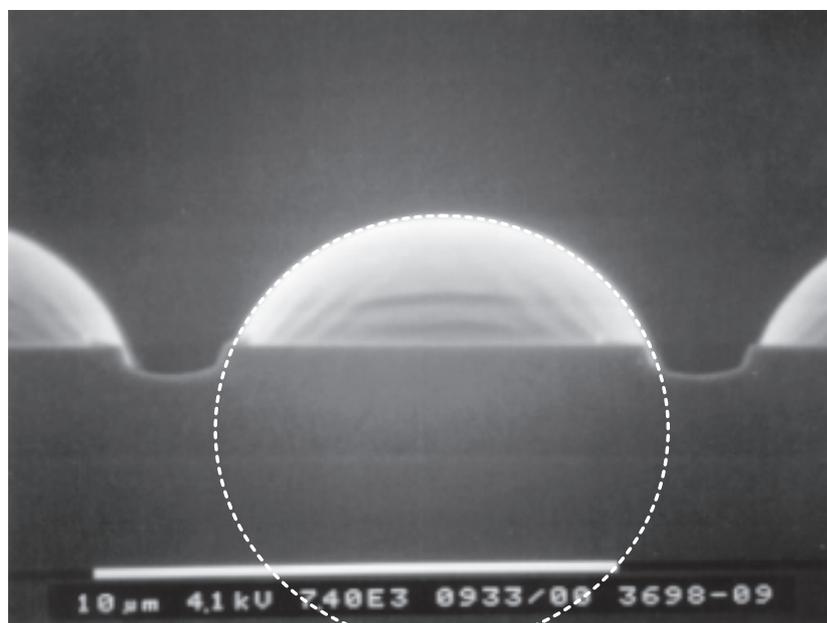
die Ätzrate des PMMA bei gleichen Bedingungen höher. Zur Charakterisierung der Ätzprozesse wurden die in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Teststrukturen verwendet. Es wurden Kantenverschiebungen von  $0,5\ \mu\text{m}$  und Auflösungen von  $3\ \mu\text{m}$  erreicht. Abbildung 7.13 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer strukturierten PMMA-Schicht bevor der Fotolack entfernt wurde. Man erkennt, dass die Strukturen nahezu senkrechte Kanten haben. Nach der Strukturierung wurde der Fotolack mit Aceton und Isopropanol entfernt. Aceton hat die Funktion den Fotolack abzulösen, Isopropanol gewährleistet, daß keine Rückstände des Acetons verbleiben. Zur Erstellung der Linsen wurden die PMMA-Strukturen auf einer Heizplatte aufgeschmolzen. Es waren Temperaturen von über  $230\ \text{°C}$  nötig, um einen stabilen Zustand zu erreichen. Abbildung 7.14 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer aufgeschmolzenen PMMA-Struktur. Es bildet sich ein kreisförmiges Oberflächenprofil. Da die Oberflächeneigenschaften des Substrates eine Wirkung auf das Fließverhalten hat, sind zwei Materialien untersucht worden: Silizium-Oxid und Benzocyclobuten (BCB). Für eine Füllfaktorhöhung einer Schwarz/Weiß-Kamera ist eine Oxidoberfläche, bzw. eine BCB-Oberfläche realistisch, da diese Materialien zur Planarisierung angewendet werden. Erste Aufschmelzversuche von PMMA-Strukturen auf Silizium haben gezeigt, daß die Grundfläche nicht beibehalten wird und sich ein Minimalflächenprofil in Form einer Kugelkalotte bildet (siehe Abbildung 7.15b). Als Vergleich sei erwähnt, daß beim Aufschmelzen vieler Fotolacke die Benetzungseigenschaften eine geringe Rolle spielen, da durch die Haftung des Materials am Untergrund die Grundfläche erhalten bleibt. In der Literatur wird von verschiedenen Verfahren berichtet, die dies gewährleisten. Eine Oberflächenbehandlung zur Erhöhung der Oberflächenenergie [141] und die Podestmethode [106] werden in diesem Zusammenhang erwähnt. Die Podestmethode wurde im



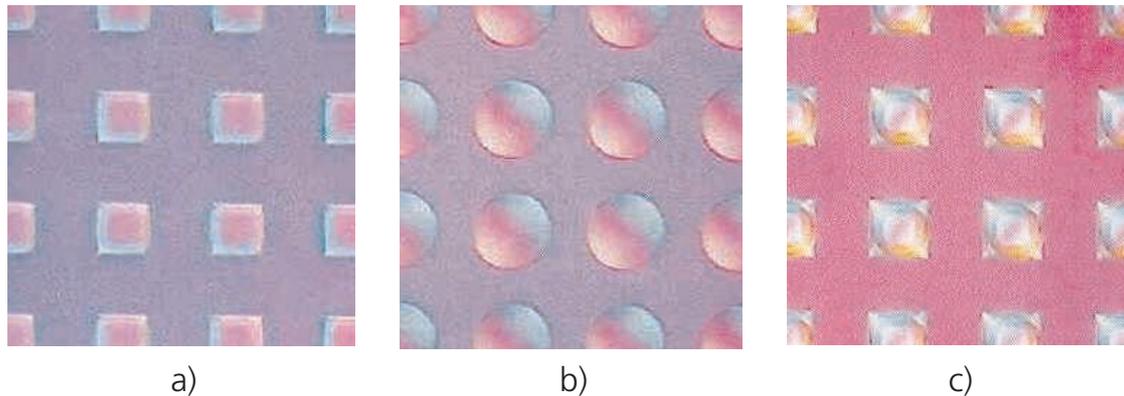
**Abbildung 7.13:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Waferbruchkante mit PMMA-Strukturen auf einer BCB-Schicht bevor der Fotolack entfernt wurde

Rahmen dieser Arbeit näher untersucht, da durch die Strukturierung einer PMMA-Schicht auf einer BCB-Schicht automatisch Podeste entstehen. Zum Vergleich wurden Versuche mit Oxid- und BCB-Podesten angefertigt. Der physikalische Effekt, der mit der Podestmethode verbunden ist, wird in [142] beschrieben. Oxidpodeste mußten in einem zusätzlichen Lithografieschritt hergestellt werden. Der Prozeßablauf ist in Abbildung 7.16 dargestellt. Die Strukturierung der  $300\text{ nm}$  hohen Oxidpodeste erfolgte mit einem Standard-Oxidätzverfahren. Anschließend wurden die PMMA-Strukturen mit dem oben beschriebenen Verfahren erzeugt und aufgeschmolzen. Die BCB-Variante gestaltet sich etwas einfacher, da nur ein Trockenätzschritt nötig ist (siehe Abbildung 7.17). Wird dafür eine Ätzgaszusammensetzung von  $\text{CF}_4$  und  $\text{O}_2$  gewählt (Programm Polymer1 aus Tabelle 7.1), kann die aus PMMA und BCB bestehende Doppelschicht in einem einzigen Prozeßschritt geätzt werden. Die Ätzzeit wurde so eingestellt, daß ca.  $300\text{ nm}$  hohe BCB-Podeste entstanden. Beide Podestarten zeigen die gleiche Wirkung auf das Fließverhalten des PMMA.

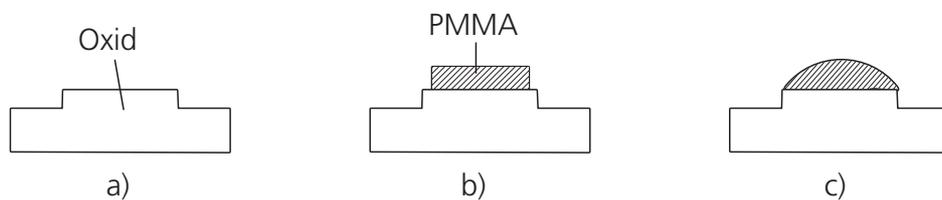
In Abbildung 7.15 ist der Einfluß der Podeste auf das Fließverhalten anhand der Oxidvariante dargestellt. Da PMMA mit einer Kantenverschiebung  $KV$  von  $0,5\mu\text{m}$  strukturiert wurde, entstanden Strukturen mit der Seitenlänge von  $(9 - 2 \cdot 0,5)\mu\text{m} = 8\mu\text{m}$  (Abb. 7.15 a)). Durch das Verfließen auf dem Siliziumsubstrat entstehen sphärische Oberflächen mit einem Durchmesser von  $12\mu\text{m}$  (Abb. 7.15b)). Beim Aufschmelzen breitet sich das PMMA nur auf dem Podest aus (Abb. 7.15c)). Die mit dem Profilometer gemessene Scheitelpunkthöhe beträgt  $3,0\mu\text{m}$ .



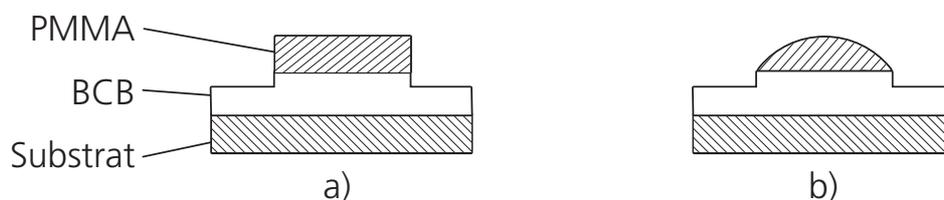
**Abbildung 7.14:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Waferbruchkante mit PMMA-Mikrolinsen. Der eingezeichnete Kreis zeigt, das sich ein kreisförmiges Profil mit dem Radius  $(4,2 \pm 0,5)\mu\text{m}$  bildet. Die Linse befindet sich auf einem BCB-Podest. Einzelheiten dazu werden im Text beschrieben



**Abbildung 7.15:** Lichtmikroskopaufnahmen von PMMA-Teststrukturen. Maskenmaße der Quadrate:  $9\ \mu\text{m}$ . a) PMMA-Strukturen auf Silizium vor dem Aufschmelzen, Seitenlänge der Quadrate:  $(8 \pm 0,5)\ \mu\text{m}$ ; b) Bei  $250\ ^\circ\text{C}$  aufgeschmolzene PMMA-Strukturen auf Silizium, Durchmesser der Kalotten:  $(12 \pm 0,5)\ \mu\text{m}$ ; c) Bei  $250\ ^\circ\text{C}$  aufgeschmolzene PMMA-Strukturen auf Oxidpodesten, Seitenlänge der quadratischen Grundfläche:  $(9 \pm 0,5)\ \mu\text{m}$

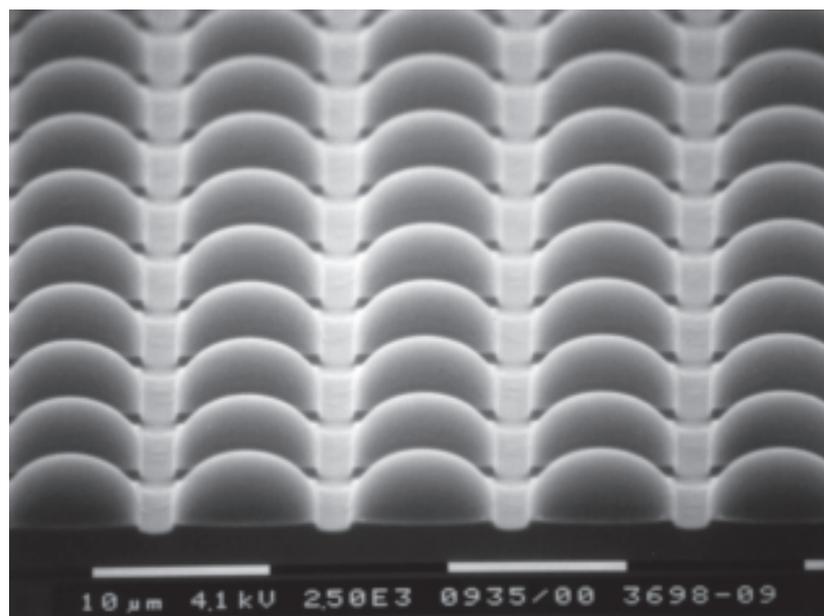


**Abbildung 7.16:** Prozessschrittfolge der PMMA-Schmelzlinse mit Oxid-Podesten. a) Strukturieren des Oxidpodestes; b) Erzeugung der PMMA-Struktur; c) Aufschmelzen des PMMA



**Abbildung 7.17:** Prozessschrittfolge der PMMA-Schmelzlinse mit BCB-Podesten. a) Erzeugung der PMMA-Strukturen und der BCB-Podeste in einem Ätzschritt; b) Aufschmelzen der PMMA-Strukturen

Bei dem beschriebenen Strukturierungsprozeß traten Kantenverschiebungen von  $0,5\mu\text{m}$  auf. Damit konnten minimale Abstände zwischen den Mikrolinsen von  $1,5 \pm 0,2\mu\text{m}$  (gemessen mit dem Rasterelektronenmikroskop) realisiert werden. Dies setzt voraus, daß die Abstände der Fotolackstrukturen nicht mehr als  $0,5\mu\text{m}$  betragen. Bei größeren Schichtdicken wird auch die Kantenverschiebung  $KV$  entsprechend größer. Stark gekrümmte, bzw. größere Linsen können dann nur mit einem Abstand der größer als  $1,5\mu\text{m}$  ist, hergestellt werden.



**Abbildung 7.18:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines PMMA-Mikrolinsenarrays auf BCB-Podesten

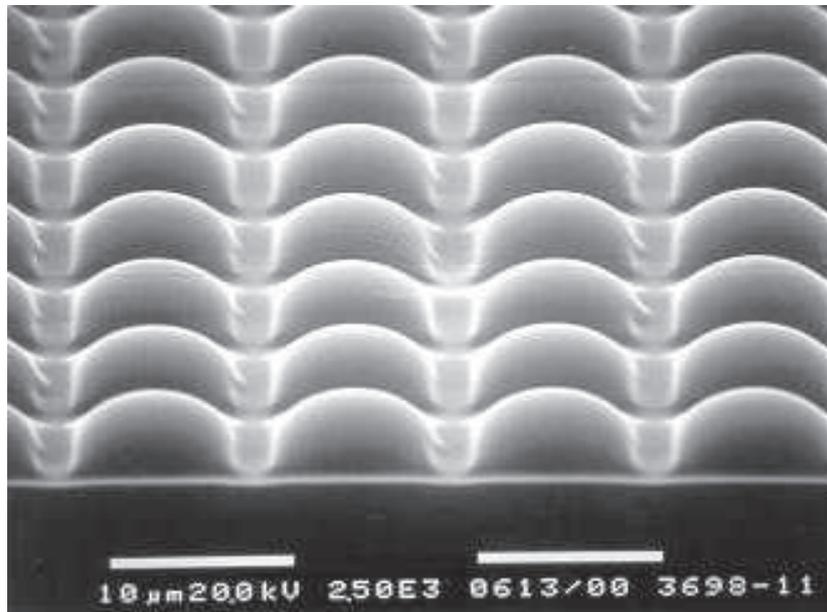
### 7.3.2 Charakterisierung von abgeformten Mikrolinsen

Die optischen Eigenschaften der PMMA-Mikrolinsen sind durch die Oberflächenrauigkeit und das Oberflächenprofil definiert. Rasterkraftmikroskopische Untersuchungen ergaben eine mittlere quadratische Oberflächenrauigkeit von  $0,4\text{ nm}$ , womit das  $\lambda/20$ -Kriterium für eine hochwertige optische Oberfläche deutlich erfüllt ist. Um die Fokussiereigenschaften der präparierten PMMA-Mikrolinsen zu untersuchen, wurden diese auf Glassubstrate mit dem in Kapitel 7.2.3 beschriebenen Verfahren abgeformt. Diese Proben konnten dann mit parallelem Licht beleuchtet werden, um die Intensitätsverteilung des fokussierten Strahls zu messen. Eine direkte Erstellung der PMMA-Mikrolinsen auf Glassubstraten ist nicht möglich gewesen, da die Prozeßanlagen mit Positionerkennungssystemen ausgerüstet sind, die sich nicht für transparente Wafer eignen. Abgeformt wurden Mikrolinsen auf BCB-Podesten. Abbildung 7.19 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der abgeformten Probe. Deutlich ist das linsenförmige Profil und die quadratische Grundfläche zu erkennen.

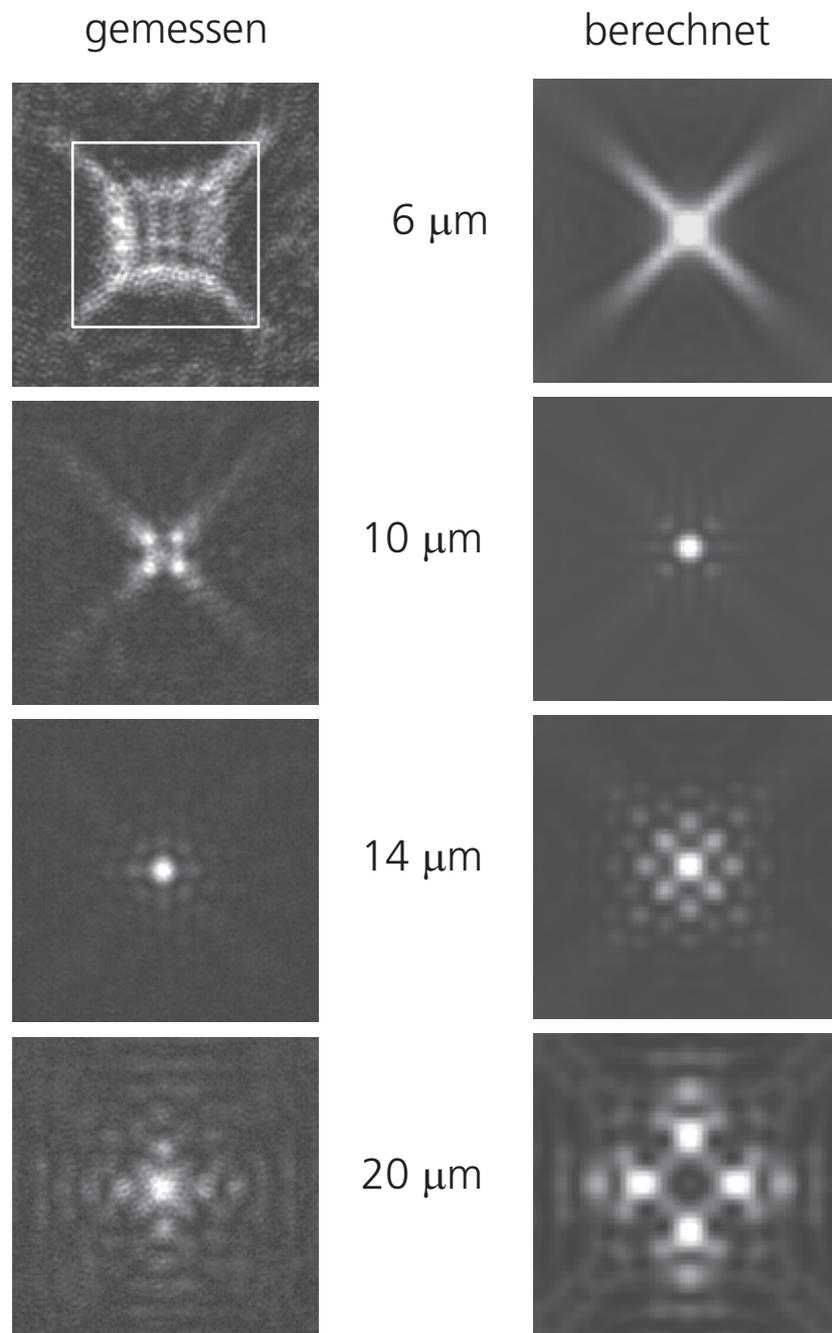
In Abbildung 7.20 sind die gemessenen und die wellenoptisch berechneten Intensitätsverteilungen, welche bei verschiedenen Abständen ermittelt wurden, gegenübergestellt. Für die Berechnung wurde ein Minimalflächenprofil mit einer quadratischen

Grundfläche der Seitenlänge  $9\ \mu\text{m}$  und einer Höhe von  $3\ \mu\text{m}$  zugrundegelegt. Aus den Messungen kann eine Brennweite von  $14 \pm 2\ \mu\text{m}$  abgelesen werden, womit die fokussierende Eigenschaft der PMMA-Linsenprofilen nachgewiesen ist.

Der Unterschied zu den berechneten Spotdiagrammen läßt sich auf zwei Effekte zurückführen. Zum einen ist das abgeformte Profil um wenige Prozent flacher als das der PMMA-Probe, womit eine geringere Krümmung verbunden ist. Zum anderen kann man von einer Abweichung vom Minimalflächenprofil ausgehen. Die berechnete Brennweite beträgt ca.  $10\ \mu\text{m}$ , und weist auf eine stärker gekrümmte Oberfläche als die der abgeformten Linse hin. Im gemessenen Spotdiagramm in Abbildung 7.20 für den Abstand  $6\ \mu\text{m}$  ist ein weißes Quadrat eingezeichnet, welches der lichtempfindlichen Fläche bei einem Füllfaktor von 40 % entspricht. Man erkennt, daß die Krümmung der Linse ausreicht, um nahezu das gesamte gebündelte Licht auf die Sensorfläche zu fokussieren. Die Ergebnisse in Kapitel 7.2.2 haben jedoch gezeigt, daß eine Berechnung des Empfindlichkeitsgewinns nur anhand eines gegebenen Pixelschichtaufbaus sinnvoll ist. Summiert man die Intensität bei senkrechtem Einfall des berechneten Spotdiagramms bei  $LS = 6\ \mu\text{m}$  im Bereich der lichtempfindlichen Fläche auf, so ergibt sich ein Wert von 0,59. Die Strahlverfolgungsrechnung ergibt einen Wert von 0,61. Die Differenz von 3,4 % ist mit den unterschiedlichen Berechnungsmethoden erklärbar und zeigt, daß Beugungseffekte die Fokussierungseigenschaften der  $10\ \mu\text{m}$ -Linsen nicht beeinträchtigen.



**Abbildung 7.19:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Abformprobe eines PMMA-Mikrolinsenarrays



**Abbildung 7.20:** Intensitätsverteilung des von einer PMMA-Linsenform gebündelten Lichtstrahls bei senkrechtem Lichteinfall und  $LS = 6\ \mu\text{m}$



## 8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit sind zwei Methoden zur Herstellung von optischen Elementen zur monolithischen Integration für CMOS-Bildsensoren beschrieben, welche deren Funktionalität erweitern, bzw. verbessern. Dabei handelt es sich zum einen um Mikrofarbfilter aus dünnen, absorbierenden Polyimidschichten und zum anderen um refraktive, hochtransparente Mikrolinsen. Es kamen ausschließlich Dünnschichtprozesse zur Anwendung, die für die Fertigung von integrierten Schaltkreisen gebräuchlich sind.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die Farbfiltertechnologie eingegangen. Die Funktionsweise von Mikrofarbfiltern beruht auf zwei unterschiedlichen physikalischen Prinzipien. Die Filterwirkung wird dabei zum einen durch die Interferenz und zum anderen durch die Absorption von Licht hervorgerufen. Die Voraussetzungen für eine monolithische Integration werden von den Verfahren, die für die Herstellung der Interferenzfilter geeignet sind, nicht erfüllt. Das einfachste Filtersystem kann mit den Farbschichten Cyan und Gelb realisiert werden. Optional kann die Farbe Magenta hinzugenommen werden. Man spricht dann vom komplementären Farbsystem. Die Filtertransmissionen zeichnen sich durch einen großen transparenten Anteil aus, wodurch Sensoren mit diesen Filtern bei geringer Umgebungsbeleuchtung empfindlicher sind als z. B. Sensoren mit Rot-, Grün und Blau-Filtern. Bei der Entwicklung des Dünnschichtprozesses zur Filtererzeugung wurde darauf geachtet, daß nur kommerziell erhältliche Materialien verwendet wurden. Es konnte nur ein Hersteller ausfindig gemacht werden, der Farbfiltermaterialien der Farben Cyan, Gelb und Magenta anbietet.

Für diese Materialien wurde ein Farbfilterprozeß entwickelt, der es ermöglichte  $(9 \times 9) \mu\text{m}^2$  große Farbfilterelemente mit einem Abstand von  $1,0 \mu\text{m}$  zu benachbarten Elementen zu realisieren. Da die Filterschichten mit dem Aufschleuderverfahren hergestellt wurden, war es notwendig, die CMOS-Schaltkreissubstrate zuvor zu planarisieren. Das Chemisch-Mechanische-Polieren (CMP) und eine Polymerplanarisierung wurden zu diesem Zweck getestet. Beide Varianten konnten die Voraussetzungen an die Planarität erfüllen. Nachteilig wirkten sich jedoch die Eigenschaften des Oxidabscheideverfahrens bei der CMP-Methode aus. Es entstanden Hohlräume, welche die Eigenschaften des Fotosensors beeinträchtigen können. Die Polymerplanarisierung bot in diesem Punkt einen Vorteil, da sie mit dem kostengünstigen Aufschleuderverfahren erstellt werden kann.

Die physikalischen Eigenschaften der Filter werden durch die optischen Konstanten beschrieben. Diese konnten mit Hilfe der Spektralellipsometrie unter Variation des Einfallwinkels gemessen werden. Da bekannt ist, daß die Farbstoffe aus Polymeren in Schichtsystemen diffundieren und es so zu einer Degradation der Filtertransmissionen kommen kann, wurde untersucht, inwiefern das für die verwendeten Materialien zutrifft. Ellipsometrische Untersuchungen ergaben, daß vor allem die Farbschicht Magenta bei

einem bestimmten Prozeßschritt das Material des Gelb-Filters einfärbte.

Die Temperatur- und Lichtstabilität der Farbfilter sind wichtige Kenngrößen für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Es konnte gezeigt werden, daß eine Temperaturbelastung von 16 Stunden bei 150 °C unter Luftatmosphäre keine Änderung der Transmission zur Folge hat. In einem Beleuchtungstest zeigte sich bei einer Bestrahlung von  $3,5 \cdot 10^6$  lux · h, daß nur die Gelb-Schicht vernachlässigbar ausbleicht, was für eine Farbsensoranwendung unerheblich ist.

Für die Funktion eines Farbsensors sind die spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Farb-Sensorelemente entscheidend. Anhand von Teststrukturen konnten entsprechende Messungen durchgeführt werden. Die Berechnungen haben ergeben, daß mit den experimentell bestimmten optischen Konstanten der Polymermaterialien im Rahmen eines einfachen Modells das Dünnschichtsystem aus CMOS-Sensor und Farbfiltern sehr genau beschrieben werden kann. Daraus wurde geschlossen, daß der Strukturierungsprozeß keine degradierende Wirkung auf die optischen Eigenschaften der Farbfilter hatte.

Es ist jedoch nur begrenzt möglich, anhand der spektralen Empfindlichkeiten der Sensorelemente die Farbproduzierbarkeit eines Kamerasystems zu bewerten, da im allgemeinen ein Farbkorrekturverfahren eingesetzt wird. Es konnte aber mit einem einfachen Experiment gezeigt werden, daß mit den untersuchten Farbfiltermaterialien eine prinzipielle Berechnung eines Farbbildes möglich ist, ohne ein Korrekturverfahren anzuwenden.

Zusammenfassend soll bemerkt werden, daß es gelungen ist, einen Farbfilterprozeß zu entwickeln, der als Erweiterung von Standard-CMOS-Prozessen im Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Dresden zur Verfügung steht. Die Erstellung von Entwurfsregeln gewährleistet, daß kundenspezifische Anwendungen zuverlässig erfüllt werden können.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Mikrolinsen untersucht, die zur Erhöhung der Empfindlichkeit eines Bildsensors angewandt werden. Speziell bei CMOS-Bildsensoren hat der Schichtaufbau des Fertigungsprozesses einen Einfluß auf die Effizienz der Lichtbündelung durch die Mikrolinsen. Dies konnte rechnerisch mit Standard-Strahlverfolgungsverfahren gezeigt werden. Es wurden Minimalflächen mit quadratischer Grundfläche für die Linsenform angenommen. Verglichen wurden die Berechnungen mit den Ergebnissen von wellenoptischen Simulationen, die zeigten, daß aufgrund der starken Aberrationen der Mikrolinsen Beugungseffekte keinen Einfluß auf die fokussierende Wirkung hatten.

Im experimentellen Teil wurde die Herstellung von hochtransparenten Mikrolinsen aus Polymethyl-Methacrylat (PMMA) beschrieben. Dabei wurden PMMA-Schichten über eine Fotolackmaske mit einem Trockenätzprozeß strukturiert und anschließend aufgeschmolzen. Anhand von Durchleuchtungsversuchen an abgeformten Mikrolinsenarrays konnte die Lichtfokussierung nachgewiesen werden. Es stellte sich heraus, daß die Brechkraft der Linsen kleiner ist, als sie durch die Berechnung mit einer Minimalfläche vorhergesagt wurde. Daraus wurde geschlossen, daß sich durch das Aufschmelzen des PMMA kein Minimalflächenprofil einstellt. Eine Abschätzung hat ergeben, daß mit einer solchen Mikrolinse eine Empfindlichkeitserhöhung von ca. 100 % realisierbar ist, ohne den Pixelschichtaufbau zu berücksichtigen. Mit Berücksichtigung des Pixelschicht-

aufbaus kann ein Füllfaktorgewinn von mehr als 30 % mit den PMMA-Mikrolinsen vermutet werden. Der vorgestellte Mikrolinsenprozeß ist für eine Pixelgröße von ca.  $(10 \times 10) \mu\text{m}^2$  optimiert, da kleinere Pixelabmessungen nicht mit dem  $0,5\text{-}\mu\text{m}$ -CMOS-Prozeß herstellbar sind.

Weitere Untersuchungen werden sich zukünftig auf eine Integration der PMMA-Mikrolinsen mit CMOS-Bildsensoren konzentrieren. Desweiteren wird eine Kombination von Farbfiltern und Mikrolinsen angestrebt. Dazu muß eine weitere Polymerschicht eingesetzt werden, um die Farbfilterstrukturen zu planarisieren. Bei einem solch komplexen Polymerschichtsystem gewinnen Parameter wie Zuverlässigkeit und Lebensdauer an Bedeutung, die durch weitere Experimente sicherlich optimiert werden können.



## Literatur

- [1] A. J. P. Theuwissen: Die leise Revolution der sehenden Chips, Bulletin des Schweizerischen Elektronischen Vereins des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke, 85 (1994) 21, S. 19-23
- [2] F. L. J. Sangster, K. Teer, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 4 (1969) 131
- [3] A. Asano: Solid state sensors continue to improve their image, Journal of electronic engineering, 25 (1988) 263, S. 64-67
- [4] L. Strüder, C. Zanthier: Elektronische Bildwandlung, Physikalische Blätter, 54 (1998) 6, S. 519-524
- [5] C. Meyer: Eimerweise Pixel, Magazin für Computertechnik, 14 (1998), S. 82
- [6] J. Wouters: CMOS-Bildaufnehmer mit CCD-Qualität, Elektronik Industrie, 1 (1998), S. 66
- [7] D. Taeymans: CMOS oder CCD, Feinwerk & Meßtechnik, 106 (1998) 4, S. 251-255
- [8] H. Hogan: Image is everything, Photonics Spectra, Dec. (1998), S. 82
- [9] M. Schanz, C. Nitta, T. Eckart, B. J. Hosticka, R. Wertheimer: 256x256 pixel CMOS imager with linear readout and 120dB dynamic, In: Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, 7, 1999, Karuizawa
- [10] O. Schrey, R. Hauschild, B. J. Hosticka, U. Iurgel, M. Schwarz: A locally adaptive CMOS image sensor with 90dB dynamic range, International Solid-State Circuits Conference, 46, 1999, San Francisco
- [11] M. Schanz: Eindimensionale CMOS Bildsensorik mit integrierter Signalverarbeitung, Dissertation, Universität Duisburg, 1999
- [12] J. Angerstein: UV-visible and near IR semiconductor sensors; in: W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel: Sensors, Vol. 6, Weinheim [u.a.] : VCH, 1992
- [13] H. Schaumburg: Sensoren, Stuttgart, Teubner, 1992
- [14] S. M. Sze: Physics of Semiconductor Devices, New York : Wiley, 1981
- [15] D. Widmann, D. Mader, H. Friedrich: Technologie hochintegrierter Schaltungen, Berlin : Springer, 1996
- [16] Bergmann, Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik, Berlin : Walter de Gruyter, 1987
- [17] F. A. Jenkins, H. E. White: Fundamentals of optics, McGraw-Hill, 1981

- [18] Werner Schultze: *Farbenlehre und Farbenmessung, eine kurze Einführung*, Berlin : Springer, 1975
- [19] M. Richter: *Einführung in die Farbmeterik*, Berlin : de Gruyter, 1981
- [20] G. Wyszecki, W. S. Stiles: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, New : York, Wiley, 1982
- [21] Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings, Cambridge, Cambridge University Press, 1931
- [22] Bronstein: *Taschenbuch der Mathematik*, Frankfurt/Main : Harri Deutsch, 1989
- [23] G. Meynants: *A single-chip color camera in CMOS technology*, Dissertation, Universität Leuven, Belgien, 1998
- [24] R. F. Wolffenbuttel, G. de Graaf: *Performance of an integrated silicon colour sensor with a digital output in terms of response to colours in the colour triangle*, *Transducers '89*, S. 574-580
- [25] D. Cormier: *Solid-state optical sensors improve their image*, *ESD: The Electronic System Design Magazine*, 19 (1989) 1, S. 32
- [26] M. Frank, N. Kaiser, W. Buss et al.: *High-speed industrial color and position sensor*, *SPIE Proc.* ; 3649, 1999, S. 50-57
- [27] A. R. Robertson, J. F. Fisher: *Color Vision, Representation, and Reproduction*, in: K. B. Benson [Hrsg.]: *Television Engineering Handbook*, Chapter 2, New York [u.a.] : McGraw-Hill, 1986
- [28] Y. Takemura, K. Ooi, M. Kimura, K. Sanda, A. Kuboto, M. Amano: *New field integration frequency interleaving color television pickup system for single-chip camera*, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 32 (1985) 8, S. 1402
- [29] K. A. Parulski et al.: *High-performance digital color video camera*, *SPIE proc.* ; 1448, 1991, S. 45-58
- [30] J. E. D. Hurwitz, P. B. Denyer, D. J. Baxter, G. Townsend: *An 800K-pixel color CMOS sensor for consumer still cameras*, *SPIE proc.* ; 3019, 1997, S. 115-124
- [31] K. A. Parulski, L. J. D'Luna, R. H. Hibbard: *A digital color CCD imaging system using custom VLSI circuits*, *IEEE Trans. on Con. Electr.*, 35 (1989) 3, 382-389
- [32] C. J. Dalton: *The measurement of the colorimetric fidelity of television cameras*, *Third International Conference on Television Measurements*, 1987, Montreaux, S. 43-49
- [33] C. J. Dalton: *The measurement of the colorimetric fidelity of television cameras*, *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, 58 (1988) 4, S. 181

- [34] N. J. C. Strachan, P. Nesvadba, A. R. Allen: Calibration of a video camera digitising system in the CIE  $L^*u^*v^*$  color space, Pattern Recognition Letters, 11 (1990), S. 771
- [35] M. A. Hunt, J. S. Goddard, K. W. Hylton et al.: Imaging tristimulus colorimeter for the evaluation of color in printed textiles, SPIE Proc. ; 3652, 1999, S. 118-128
- [36] P. - C. Hung: Colorimetric calibration for scanners and media, SPIE proc. ; 1448, 1991, S 164-174
- [37] Y. Ohno, J. E. Hardis: Four-color matrix method for correction of tristimulus colorimeters, Color Imaging Conference, Scottsdale, Nov. 16-20, 1997, S. 301-305
- [38] H. Arnold: CMOS-Bildsensoren verdrängen CCDs, Feinwerk und Meßtechnik, 107 (1999) 5, S. 19
- [39] W. G. Driscoll: Handbook of optics, New York [u.a.] : McGraw Hill, 1978
- [40] D. P. Poenar, P. J. French, R. F. Wolffenbuttel: Active interference filters using silicon-compatible materials, SPIE proc. ; 2641, 1995, S. 32-40
- [41] W. Demtröder: Laserspektroskopie, Berlin [u.a.] : Springer, 1991
- [42] J. H. Correia, M. Bartek, R. F. Wolffenbuttel: High-selectivity single-chip spectrometer for operation at visible wavelengths, IEDM, 1998, 467-470
- [43] M. Frank, U. B. Schallenberg, N. Kaiser, W. Buß: Dielectric micro-filter arrays for local resolving color sensors, SPIE proc. ; 3289, 1998, S. 193 ff.
- [44] W. Buß: persönliche Mitteilung, Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik, 2000
- [45] Sequin, Tompsett: Charge Transfer Devices, New York : Academic Press, 1975, S. 169-171
- [46] P. L. P. Dillon, A. T. Brault, J. R. Horak, E. Garcia, T. W. Martin, W. A. Light: Fabrication and performance of color filter arrays for solid-state imagers, IEEE Trans. on Electron Devices, 25 (1978) 2, S. 97
- [47] W. C. McColgin, T. W. Martin, A. K. Weiss, M. A. Sandhu: Integral color filter arrays for solid-state imagers by thermal transfer of Dyes, IEEE Trans. on Electron Devices, 26 (1979) 11, S. 1855
- [48] D. Manabe, T. Ohta, Y. Shimidzu: Color filter array for IC image sensor, Proc. of IEEE Cust. Integr. Circ. Conf., 1983, S. 451
- [49] M. Aoki, H. Ando, S. Ohba, I. Takemoto, S. Nagahara, T. Nakano, M. Kubo, T. Fujita: 2/3-inch format MOS single-chip color imager, IEEE Transaction on Electron Devices, 29 (1982) 4, S. 745

- [50] N. Koike, T. Nakano, A. Sasano, Y. Taniguchi, T. Fujita: Heat and light-resistance characteristics of an MOS image device with monolithically integrated color filter, *IEEE Trans. On Electron Devices*, 32 (1985) 8, S. 1475
- [51] N. Koike, I. Takemoto, K. Satoh, S. Hanamura, S. Nagahara, M. Kubo: MOS area sensor: Part I- Design consideration and performance of an n-p-n structure 484x384 element color MOS imager, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 27 (1980) 8, S. 1676
- [52] S. Suzuki, H. Saeki: Determination of chromium atom density on deep UV exposed Ammonium-Dichromated gelatin films with ultraviolet absorption spectra, *J. Electrochem. Soc.*, 135 (1988) 10, S. 2615
- [53] S. Suzuki, H. Kawashima, M. Ikeno, H. Saeki, N. Tsubouchi: Properties of ammonium-dichromated casein and its application to color filter for high-resolution solid-state imagers, *J. Electrochem. Soc.*, 138 (1991) 1, S. 304
- [54] T. Koseki, T. Fukunaga, H. Yamanaka, T. Ueki: Color filter for 10.4-in-diagonal 4096-color thin-film-transistor liquid crystal displays, *IBM J. Res. Develop.*, 36 (1992), S. 43-50
- [55] A. Endo, E. Hirose, T. Sato, S. Otera, N. Chiba: Reliability Improvements of dichromated gelatin color filter for TFT-LCDs, *J. Electrochem. Soc.*, 138 (1991) 2, S. 517
- [56] S. Sanada, M. Miyamura: New deep UV dyable negative resist for CCD micro color filters, *SPIE proc.* ; 631, 1986, S. 187
- [57] K. Shimomura, T. Otagaki, Y. Tamagawa et al.: Novel synthetic aqueous photoresist for CCD micro color filter, *SPIE proc.* ; 2195, 1994, S. 823-833
- [58] H. Miller: Improved color filter process for CCD and CMOS Imagers, *IEEE/SEMI 1996, Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, S. 192-195
- [59] W. J. Latham, D. W. Hawley: Color filters from dyed polyimides, *Solid State Technology*, May (1988), S.223
- [60] L. F. Bacchetti, R. L. Brainard, G. S. Calabrese, M. doCanto, M. E. Perkins: Pigmented photoresist for LCD color filters, *International Display Research Conference and International Workshops on Active-matrix LCD and Display Materials*, Monterey, Calif., 1994, S.165
- [61] H. Aoki, K. Yokozawa, N. Waga et al.: Advances complementary color filter technology without dyeing process for CCD image sensors, *SPIE proc.* ; 3333, 1998, S. 1232-1240
- [62] S. J. Hood, S. G. Chamberlain: Color-filter arrays for silicon solid-state image array sensors, *Can. J. Phys.*, 69 (1991), S. 543

- [63] H. Böttcher, T. Fritz, P. Süptitz: Preparation of color filter arrays for solid state devices, Proceedings of the International Congress of Photographic Science, Köln, 1986
- [64] T. Fritz, H. Böttcher, P. Kreisig, J. Hahn: Untersuchungen zur indirekten Strukturierung von Farbstoffaufdampfschichten J. Inf. Rec. Mater, 16(1988)1, S. 43
- [65] T. Fritz: Untersuchungen zum Einsatz farbstoffhaltiger Aufdampfschichten als optische Filter, Dissertation, Technische Universität Dresden, 1989
- [66] A. J. P. Theuwissen: Solid-state imaging with charge-coupled devices, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [67] A. Heuberger [Hrsg]: Mikromechanik, Berlin [u.a.] : Springer, 1991
- [68] S. Büttgenbach: Mikromechanik, Stuttgart : Teubner, 1991
- [69] Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Band 17 Halbleiter, Teilband c, Berlin [u.a.] : Springer, 1984
- [70] R. Swanepoel: Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, Journal of Physics E, 16 (1983), S. 1214
- [71] L. De Caro, M. C. Ferrara: Simple method for the determination of optical parameters of inhomogeneous thin films, Thin Solid Films, 342 (1999), S. 153
- [72] D. V. Tsu: Obtaining optical constants of thin GeSbTez films from measurements of reflection and transmission, Journal of Vacuum Science and Technology, A 17, jul./Aug. (1999), S. 1854
- [73] J. N. Hilfiker, R. A. Synowicki: Spectroscopic ellipsometry for process applications, Solid State Technology, Oct. (1996), S. 157
- [74] J. N. Hilfiker, R. A. Synowicki, C. L. Bungay: Spectroscopic ellipsometry for polymer thin films, Solid State Technology, Oct. (1998), S. 101
- [75] E. A. Irene: Applications of spectroscopic ellipsometry to microelectronics, Thin Solid Films, 233 (1993) 1-2, S. 96-111
- [76] W. N. Hansen: Optical characterization of thin films: Theory, Journal of the optical society of America, 63 (1973) 7, S. 793
- [77] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara: Ellipsometry and polarized light, Amsterdam [u.a.], Elsevier Science Publishers B. V., 1992
- [78] M. M. Ibrahim, N. M. Bashara: Parameter-Correlation and Computational Considerations in Multiple-Angle Ellipsometry, Journal of the optical society of America, 61 (1971) 12, S. 1622

- [79] W. A. McGahan, B. J. Woolam, J. A. Woollam: Techniques for ellipsometric measurements of the thickness and optical constants of thin absorbing films, *Thin Solid Films*, 234 (1993) 1-2, S. 443-446
- [80] B. Schoeneich: unveröffentlichte Ergebnisse von Arbeiten am Fraunhofer IWS in Dresden, 2000
- [81] E. D. Palik: Handbook of optical constants of solids, Orlando [u.a.] : Academic Press, 19
- [82] N. Daemen, H. L. Peek: Microlenses for image sensors, *Philips J. Res.*, 48 (1994), S. 281-297
- [83] K. Wijekoon, R. Lin, B. Fishkin, S. Yang, F. Redeker: Tungsten CMP process developed, *Solid State Technology*, April (1998), S. 53
- [84] P. van Cleemput, H. W. Fry, B. van Schravendijk, W. van den Hoek: HDPCVD films enabling shallow trench isolation, *Semiconductor International*, July (1997), S. 179
- [85] P. Singer: Making the move to dual damascene processing, *Semiconductor International*, Aug. (1997), S. 79
- [86] M. E. Gross, C. Lingk, W. L. Brown, R. Drese: Implications of damascene topography for electroplated copper interconnects, *Solid State Technology*, Aug. (1999), S. 47
- [87] T. Nakano, T. Ohat: Relationship between chemical composition and film properties of organic spin-on glass, *J. Electrochem. Soc.*, 142 (1995) 3, S. 918
- [88] X. W. Lin, D. Pramanik: Future interconnect technologies and copper metallization, *Solid State Technology*, Oct. (1998), S. 63
- [89] K. Seunarine, D. W. Calton, I. Underwood, J. T. M. Stevenson, A. M. Gundlach, M. Begbie: Techniques to improve the flatness of reflective micro-optical arrays, *Sensors and Actuators*, 78 (1999), S. 19
- [90] I. Morey, A. Asthana: Etch challenges of low-k dielectrics, *Solid State Technology*, June (1999), S. 71
- [91] <http://www.cyclotene.com> und <http://www.dow.com>
- [92] M. Andradi: Etched profile control in photolithographic pattern etching, *Thin solid Films*, 67 (1980) 2, S. 229-232
- [93] P. Ruther, B. Gerlach, J. Göttert et al.: Fabrication and characterization of microlenses realized by a modified LIGA process, *Journal of the European Optical Society, Part A: Pure and Applied Optics*, 6 (1997) 6, 643-653
- [94] *Opto & Laser Europe*, Dec. 1998, S. 27

- [95] F. Gex et al.: Optimisation of the manufacturing technique of long focal length microlens arrays. Structure of the focal plane point image obtained through this method, Third Meeting Microlens Arrays, 1995, Teddington, S. 6
- [96] H.-J. Kahlert, U. Sarbach, B. Burghardt, B. Klimt: Eximer laser illumination and imaging optics for controlled microstructure generation, SPIE proc., Boston, 1992
- [97] P. J. M. Parmiter et al.: Direct fabrication of microlenses on arrays of optoelectronic semiconductor devices, Third Meeting Microlens Arrays, 1995, Teddington, S. 77-78
- [98] D. R. Purdy: Fabrication of complex micro-optic components using halftone transmission masks to photosculpt positive resist, Meeting Microlens Arrays, 1993, Teddington, S. 20-27
- [99] C. van Berkel et al.: Microlens arrays for 2D large area image sensors, Meeting Microlens Arrays, 1993, Teddington, S. 81-85
- [100] M. Oikawa, E. Okuda: Planar microlens arrays and its application, Optical Computing in Japan, edited by S. Ishihara, Nova Science Publishers, Inc. New York, 1990
- [101] M. Oikawa, H. Nemoto, K. Hamanaka et al.: High numerical aperture planar microlens with swelled structure, Applied Optics, 29 (1990) 28, S. 4077-4080
- [102] K. Nishizawa, M. Oikawa: Planar microlens by ion-exchange, Meeting Microlens Arrays, 1991, Teddington, S. 17-21
- [103] H. Batzer: Polymere Werkstoffe, New York, Thieme, 1985
- [104] J. Göttert, M. Fischer, A. Müller: High-aperture surface relief microlenses fabricated by x-ray lithography and melting, Third Meeting Microlens Arrays, 1995, Teddington, S. 21-25
- [105] Ph. Nussbaum, R. Völkel, H. P. Herzig et al.: Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems, Journal of the European Optical Society, Part A: Pure and applied optics, 6 (1997) 6, S. 617-636
- [106] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. Neville Connell: Technique for monolithic fabrication of microlens arrays, Applied Optics, 27 (1988) 7, S. 1281
- [107] M. C. Hutley: Optical techniques for the generation of microlens arrays, Journal of Modern Optics, 37 (1990) 2, S. 253
- [108] L. Erdmann: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Herstellung und Charakterisierung refraktiver Mikrolinsen, Dissertation, Universität Jena, 1998

- [109] M. Kufner, S. Kufner, S. Lazareet al.: Microlenses in PMMA fabricated by particle or electromagnetic irradiation and monomer diffusion, Third Meeting Mirolens Arrays, 1995, Teddington, S. 26-28
- [110] M. Eisner, S. Haselbeck, H. Schreiberet al.: Reactive ion etching of microlens arrays into fused silica, Meeting Microlens Arrays, 1993, Teddington, S. 17-19
- [111] X. Yi et al.: Microlens arrays formed by melting photoresist and ion beam milling SPIE proc. ; 3276, S. 249-253
- [112] Y. Ishihara, K. Tanigaki: A high photosensitivity IL-CCD image sensor with monolithic resin lens array, International Electron Device Meeting, IEDM 83, 29 (1983), S. 497
- [113] T. Kuriyama et al.: A 1/3-in 270 000 pixel CCD image sensor, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-38, No. 5 (1991), S. 949
- [114] J. Hojo et al.: A 1/3-in 510(H) x 492(V) CCD image sensor with mirror image function, IEEE Trans. on Electron Devices, 38 (1991) 5, S. 954
- [115] Y. Sano et al.: Submicron spaced lens array process technologie for a high photo-sensitive CCD image sensor, Optoelectronics, devices and technologies, 6 (1991) 2, S. 219
- [116] M. Deguchi, T. Maruyama, F. Yamasaki, T. Hamamoto, A. Izumi: Microlens design using simulation program for CCD image sensor, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 38 (1992) 3, S. 583
- [117] L. D. Landau, E. M. Lifschitz: Lehrbuch der theoretischen Physik, Band VI, S. 266-274 Berlin, Akademie-Verlag, 1966
- [118] U. Streppel: unveröffentlichte Ergebnisse von Arbeiten am Fraunhofer IOF in Jena, 2000
- [119] A. v. Pfeil: unveröffentlichte Ergebnisse von Arbeiten am Fraunhofer IOF in Jena, 2000
- [120] Harald Aagedal: Simulation und Design paraxialer diffraktiver Systeme, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998
- [121] A. Olkhovets, H. G. Craighead: Low voltage electron beam lithography in PMMA, J. Vac. Sci. Technol. B, 17 (1999) 4, S. 1366
- [122] H. Schaumburg: Einführung in die Werkstoffe der Elektrotechnik, Stuttgart, Teubner, 1993
- [123] M. Hatzakis: Electron resist for microcircuit and mask production, J. of the Electrochem. Soc., 116 (1969) 7, S. 1033-1037
- [124] Si-Hong Ahn, Yong-Kweon Kim, Ho-Seong Kim: Fabrication of PMMA refractive microlens array using transparent acrylic resin, MOEMS, 1999, Mainz, S. 190-193

- [125] W. M. Moreau: Semiconductor lithography, New York [u.a.] : Plenum Press, 1988
- [126] A. Szekeres, S. Alexabdrova: Plasma photoresist stripping in a planar reactor, *Physica Status Solidi (A)*, 63 (1981) 1, S. 371-374
- [127] H. Akiya, K. Saito, K. Kobayashi: Sodium contamination in sio2 films induced by plasma ashing, *Japanes Journal of Applied Physics*, 20 (1981) 3, 647-655
- [128] E. Bassous, L. M. Ephrath, G. Pepper, D. J. Mikalsen: A three-layer resist system for deep UV and RIE microlithography on nonplanar surfaces, *J. Electrochem. Soc.: Solid-state science and technology*, 130 (1983) 2, S. 478-484
- [129] W. Pilz, T. Sponholz, S. Pongratz, H. Mader: Submicron patterns formed by reactive ion etching, *Microelectronic Engeneering* 3 (1985), S. 467-473
- [130] S. P. Lyman et al.: Lift-Off of thick metal layers using multilayer resist, *J. Vac. Sci. Technol.*, 19 (1981) 4, S. 1325-1328
- [131] G. Turban, M. Rapeaux: Dry etching of polyimide in O<sub>2</sub>-CF<sub>4</sub> and O<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub> plasmas, *J. of the Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology*, 130 (1983) 11, S. 2231-2236
- [132] M. Schier: Reactive ion etching of benzocyclobutene using a silicon nitride dielectric etch mask, *J. of the Electrochem. Soc.*, 142 (1995) 9, S. 3238-3240
- [133] A. Chen et al.: Optimized Oxygen Plasma Etching of Polyurethane-Based Electro-optic Polymer for Low Loss Optical Waveguide Farbrication, *J. Electrochem. Soc.*, 143 (1996) 11, S. 3648-3651
- [134] N. G. Einspruch, D. M. Brown: VLSI Electronics Microstructure Science, Vol. 8, Plasma Processing for VLSI, San Diego [u.a.] : Academic Press, 1984
- [135] M. A. Hartney, D. W. Hess, D. S. Soane: Oxygen plasma etching for resist stripping and multilayer lithography, *Journal of vacuum Science technologie B*, 7 (1989) 1, S. 1-13
- [136] K. Harada: Dry Etching Durability of Positive Electron Resists, *Journal of Applied Polymer Science*, 26 (1981), S. 3395-3408
- [137] K. Harada: Plasma etching durability of poly(methyl methacrylate), *J. of Appl. Polymer Sc.*, 26 (1981), S. 1961-1973
- [138] M. Kushida et al.: Dry-Etching Durability of Copolymers and Polymer blends of Vinylnaphthalene or a-Methylstyrene with Methyl Metacrylate, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34 (1995), S. 4234-4238
- [139] B. J. Wu, D. W. Hess, D. S. Soong, A. T. Bell: Degradation of poly(methyl methacrylate) in CF<sub>4</sub> and CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> plasmas, *Journal of applied Physics*, 54 (1983) 4, S. 1725-1729

- [140] L. A. Hughes, J .J Licari: Handboookk of polymer coatings for electronics, 2. Ausgabe, Park Ridge, N. J. : Noyes, 1990
- [141] A. K. Weiss: Light sensing devices with lenticular pixels, US-Patent, Nr.: 4,694,185, 15. Sept. 1987
- [142] J. F. Oliver, C. Huh, S. G. Mason: Resistance to spreading of liquids by sharp edges, Journal of colloid and interface science, 59 (1977) 3, S. 568-581