

Herstellung von geprägten Polymer-Wellenleitern für die optische Nachrichtentechnik

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

an der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)
Vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Safwan Albatal

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2003

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. V. Saile
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. W. Freude

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und konzeptionelle Überlegungen	5
2.1	optische Lithographie	5
2.1.1	Herstellung von Chrommasken	6
2.1.2	Spincoaten/Belacken	6
2.1.3	Belichtung	7
2.1.4	Trocknen des Resists	8
2.1.5	Entwicklung	8
2.2	LIGA-Verfahren	8
2.2.1	Allgemeine Beschreibung	8
2.2.2	Modifikation des Verfahrens zur Herstellung gestufter Formeinsätze	10
2.2.3	Herstellung einer Röntgenzwischenmaske	12
2.2.4	Herstellung einer Röntgenarbeitsmaske	14
2.2.5	Röntgenlithographie	16
2.2.6	Formeinsatzherstellung	17
2.2.7	Heißprägetechnik	17
2.3	Konzept zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen	18
3	Simulation und Layout	23
3.1	Theorie der Wellenleiter	23
3.1.1	Beam Propagation Method (BPM)	23
3.1.2	Vektorielle BPM	24
3.1.3	Numerische Lösung und Randbedingung	25
3.2	Auswahl verschiedener Einkopplungsfelder, Wellenleiterformen, Monitortypen	25
3.3	Simulationsergebnisse	25
3.3.1	Zweidimensionale Simulationen für Wellenleiter	25
3.3.2	Dreidimensionale Simulationen für Wellenleiter	26
3.4	Einfluss des Wellenleiterversatzes auf die Koppelverluste	28
3.4.1	Glasfaser-Glasfaser-Kopplung	28
3.4.2	Glasfaser-Wellenleiter-Kopplung	29
3.5	Dämpfungsverluste bei gekrümmten Rippenwellenleitern	29
3.6	Simulation von tiefgeprägten Wellenleitern (Ridges)	32
3.6.1	Moden	33
3.6.2	Abstrahlverluste bei einer Krümmung	34
3.6.3	Dämpfung aufgrund von Rauigkeit	36
3.6.4	S-förmige Lichtleiterstrukturen	39
3.6.5	Schlussfolgerung	41
3.7	Simulationen von optischen Elementen	42
3.7.1	Taper	42
3.7.1.1	Ausbreitung eines optischen Feldes in einer verjüngten Glasfaser (Abwärts-Taper)	43
3.7.1.2	Ausbreitung eines optischen Feldes in einem abwärtsgetaperten geprägten PC/PMMA-Wellenleiter	45
3.7.1.3	Ausbreitung eines optischen Feldes in einem aufwärtsgetaperten geprägten PC/PMMA-Wellenleiter	47
3.7.1.4	Simulation von gekrümmten Wellenleitern mit Tapern	49
3.7.2	Koppler	50
3.8	Layout der Testmaske	51
4	Formeinsatzherstellung	53
4.1	Maskenherstellung	54
4.1.1	Zwischenmaske als Arbeitsmaske	55
4.1.2	Arbeitsmaske	59
4.2	Formeinsatzherstellung	66
4.2.1	Einstufiger Formeinsatz durch optische Lithographie auf der Basis von SU8	68

4.2.2 Einstufiger Formeinsatz durch Röntgenlithographie auf der Basis von SU8	70
4.2.3 Einstufiger Formeinsatz durch Röntgenlithographie auf der Basis von PMMA	72
4.2.4 Gestufter Formeinsatz auf der Basis von SU8	73
4.2.5 Gestufter Formeinsatz auf der Basis von PMMA	76
4.2.6 Bewertung der Ergebnisse zur Herstellung des Formeinsatzes	79
5 Abformprozess	81
5.1 Auswahl der Materialien	81
5.2 Abformung	85
5.2.1 Abformen mit Formeinsatz ohne Stufe.....	85
5.2.2 Abformung mit gestuftem Formeinsatz	87
5.2.3 Schlussfolgerungen	89
6 Charakterisierung der Wellenleiter.....	91
6.1 Bestimmung der gesamten Leistungsverluste.....	91
6.1.1 Intensitätsmethode	91
6.1.2 Resonatormethode	93
6.2 Analyse des Abstrahlprofils des Wellenleiters	95
6.3 Schlussfolgerungen.....	98
7 Zusammenfassung und Diskussion.....	100
Literaturverzeichnis	105
Anhang 1	107
Anhang 2.....	109
Anhang 3.....	111
Anhang 4.....	113
Anhang 5.....	115
Danksagung.....	117

1 Einleitung

Auf dem Weg in die Informationsgesellschaft wird der Bedarf an Modulen für die Übertragung und Verarbeitung von immer größer werdenden Datenströmen ständig zunehmen [1]. Zukünftig werden auch (Bild-) Telefon, Video, Kabelfernsehen und „Video on demand“ integriert werden [2]. Im Zuge der rasanten Vermehrung von Internetanschlüssen muss die Kapazität der Netze und die der Netzzugänge erhöht werden. Beim Aufbau des Telefonnetzes in den neuen Bundesländern sind im Rahmen des OpAL-94-Projektes erstmals Glasfaserkabel für interaktive Dienste mit Datenraten von bis zu 2 Mbit/s nach dem FTTH-Konzept (Fibre To The Home) bis zu einzelnen Teilnehmern gelegt worden. Im Vergleich dazu hat ein ISDN-Anschluß in Kupfer-2-Drahttechnik eine Übertragungsrate von 2x64 kbit/s [3]. Zur Übertragung hoher Datenraten über die herkömmliche Telefonleitung arbeitet die ADSL-Technik mit fortschrittlichen digitalen Modulationsverfahren. Für T-DSL mit T-ISDN sind die Geschwindigkeiten auf 1536 kbit/s in der Downstream-Richtung und 192 kbit/s in der Upstream-Richtung festgelegt.

Diese Entwicklung war nur möglich durch die Einführung von Quarzglasfasern in die Nachrichtentechnik in den 70 Jahren, nachdem es gelang, mit Hilfe von Plasmen aus höchstreinen, gasförmigen Siliziumverbindungen ausreichend transparente Quarzglasstangen herzustellen, und diese zu Fasern zu ziehen. In den Fasern lassen sich mit moduliertem Licht Daten übertragen. Die Übertragung wird durch elektromagnetische Felder nicht gestört und ist relativ abhörsicher [2]. Die Übertragung der Informationen mittels Glasfasern bietet hierbei nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, den derzeit und in Zukunft anfallenden Anforderungen hinsichtlich der Übertragungskapazität gerecht zu werden. So bietet eine einzige Glasfaser bereits eine Bandbreite von 50 THz, wobei die zwei Wellenlängenfenster bei 1300 nm und 1550 nm verwendet werden [1]. Die Datenrate konnte durch optische Multiplexverfahren, welche die Nutzung mehrerer Wellenlängen zur Signalübertragung in einer Faser erlauben, erhöht werden. Heute werden Übertragungssysteme mit 10 Gbit/s installiert [4]. Im Vergleich dazu ist mit einem Koaxialkabel eine elektrische Bandbreite von bis zu 1 GHz realisierbar [2]. Bis heute sind weltweit mehr als 50 Millionen km Glasfaserleitungen verlegt worden. Diese Netze haben die „Datenautobahnen“ für das Internet ermöglicht.

Die Glasfaser wird allerdings im großen Rahmen bis zu jedem einzelnen Teilnehmer nur dann verlegt werden, wenn der optische Anschluss preiswert ist. Für die Anbindung von Teilnehmern an ein optisches Netzwerk werden mikrooptische und monolithisch integrierte optische Schalter, optische Verstärker, Laserquellen, Empfänger, optische Isolatoren, Koppler und Wellenlängenfilter benötigt. [5]. Dies lässt sich mit relativ großen Baugruppen, die mechanische, optische und elektronische Bauelemente enthalten, oder mit integriert-optischen Komponenten (IOC) verwirklichen [2].

Die Forderung nach preiswerten optischen Anschlüssen lässt sich nur dann erfüllen, wenn Konzepte und Fertigungstechniken, die der Mikroelektronik zum Erfolg verholfen haben, wie Miniaturisierung und Integration der verschiedenen Bauelemente auf einem Substrat, auf optische Komponenten übertragen werden. Dies wird im Rahmen der integrierten Optik oder auch der hybrid aufgebauten Mikrooptik versucht. [6]. In der integrierten Optik findet

Lichtführung in Wellenleitern statt, die auf geeigneten Substraten in Form von entsprechend dünnen und strukturierten Schichten erzeugt werden. Neben den lichtführenden Elementen werden auch andere optische Bauteile (Strahlteiler, Linsen, Koppler, Spiegel) auf diesem Substrat integriert. Die verschiedenen Bauteile bilden dann ein optisches System, das man in Anlehnung an die integrierte Schaltung der Mikroelektronik auch als IOS oder IOC (integriert-optische Schaltung bzw. integrated optical circuit) bezeichnet. Verbindungen mit elektronischen oder auch mikromechanischen Elementen bilden komplexe Mikrosysteme. Die Verfahren zur Herstellung integriert-optischer Elemente entsprechen weitestgehend denen der Mikroelektronik.

Der Einsatz und die Verbreitung der integrierten Optik und der Mikrooptik werden dadurch bestimmt werden, dass die benutzten Herstellungsverfahren eine kostengünstige Anfertigung der benötigten optischen Module und Systeme ermöglichen [7]. Der Schlüssel dafür ist das Aufbau- und Packagingkonzept, das entweder auf einer aktiven Justage oder einer passiven Justage der Einzelkomponenten beruht. Hierbei wird für Monomode-Anwendungen für optische Nachrichtentechnik eine Justagegenauigkeit im Bereich von $\pm 1 \mu\text{m}$ und weniger benötigt [8]. Bei der aktiven Justage wird der optische Aufbau bei eingeschalteter Lichtquelle justiert und die optimale Position der Komponenten anschließend fixiert. Dies ist relativ zeit- und kostenaufwändig. Bei der passiven Justierung der optischen Komponenten werden neben den optischen Strukturen Halte- und Fügstrukturen mitstrukturiert, die eine Ausrichtung der hybrid montierten Komponenten sicherstellen. Diese Möglichkeit erfordert deutlich weniger Aufwand und ist damit auch deutlich kostengünstiger. Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Kosten sind preisgünstige Materialien. Hier stellen insbesondere für die Herstellung passiver optischer Elemente (Welleneiter, Koppler, Multiplexer, u.s.w.) Polymere eine interessante Alternative dar.

Derzeit gibt es zwei Konzepte für die Herstellung von mikrooptischen Modulen. Zum einen die monolithische Integration, bei der auf der Basis eines bestimmten Halbleitermaterials (etwa Galliumarsenid oder Indiumphosphid) ein komplettes Modul auf einem Substrat hergestellt wird und zum anderen die hybride Integration, bei der Komponenten aus verschiedenen Materialsystemen zu einem Modul kombiniert werden. Der wesentliche Vorteil einer monolithischen Integration besteht darin, dass bis auf die Ankopplung der Glasfasern keine Justage einzelner optischer Komponenten notwendig ist. Ein großer Nachteil hingegen ist, dass eine Designänderung innerhalb des Moduls unter Umständen zu weitreichenden Prozessänderungen führen kann und der Herstellungsprozess damit relativ unflexibel ist [8]. In der Anwendung müssen integriert-optische Elemente immer mit Lichterzeugern (Emittoren) und Lichtempfängern (Detektoren) bestückt werden. Abhängig von der Materialbasis ist dies monolithisch oder auch als Hybridlösung möglich, wobei die monolithische Lösung in der Regel immer einen Kompromiss hinsichtlich der optischen Eigenschaften darstellt und somit trotz der Vorteile bzgl. eines geringeren Montageaufwandes sich nicht realisieren lässt.

Wichtige IOCs sind Mischer (Multiplexer), Leistungsverteiler und optische Schalter (Wegelenkung). Die meisten der bisher in Testsystemen eingesetzten IOCs sind aus Glas oder Silizium hergestellt worden. Sie sind durch die aufwendige Fertigung relativ teuer. Ein Teil der Kosten wird durch die Ankoppelung der Glasfasern an die IOCs verursacht [9]. IOCs aus Polymeren bieten den Vorteil einer preisgünstigen Fertigung. Elektrische Komponenten

müssen allerdings hybrid integriert werden, optische Fasern können dagegen bei Herstellung geeigneter Faserführungsstrukturen ohne aktive Justierung (passive Kopplung) angekoppelt werden.

Die Entwicklung einer kostengünstigen Herstellungstechnologie für IOCs ist ein Ziel z.B. der SIGA-Technik (Silizium-Mikrostrukturierung-Galvanik-Abformung). Basis ist dabei die Anwendung von Massenproduktionstechniken wie z.B. Spritzguss und die Verwendung von preiswerten Polymeren. Weitere kostensenkende Faktoren sind die Integration einer Faserführungsstruktur, die eine Kopplung der Glasfasern an das Bauteil ohne aktive Justierung ermöglicht. Durch Einsatz der Abformtechnik, wird die kostspielige Präparation von Mikrostrukturen auf eine Vorform beschränkt [2].

Auch das LIGA-Verfahren bietet eine flexible Basis für die Herstellung hochpräziser mechanischer Justierhilfen und damit die Möglichkeit der kostengünstigen passiven Montage von aktiven und passiven optischen Komponenten aus verschiedenen Materialsystemen auf einer mikrooptischen Bank. Die Vorteile des LIGA-Verfahrens liegen in der beliebig wählbaren lateralen Geometrie der Haltestrukturen und in der geringen Seitenwandrauigkeit. Damit hat das LIGA-Verfahren hervorragende Voraussetzungen für die Herstellung von hybrid aufgebauten mikrooptischen Funktionsmodulen [10]. Mit der Heißprägetechnik ist mit dem LIGA-Verfahren auch eine kostengünstige Fertigung polymerer Strukturen möglich. Dabei ist eine breite Materialpalette an Polymeren zugänglich. Durch die Heißprägetechnik können Mikropräzisionsbauteile mit einer mittleren Rauigkeit R_a von besser 50 nm abgeformt werden. Das Aspektverhältnis (Verhältnis von Strukturhöhe zu Strukturbreite liegt bei über 10 für freistehende Strukturen bei minimalen Abmessungen im Mikrometerbereich [44]. Die minimalen laterale Abmessung von Strukturdetails beträgt sogar nur wenige zehntel Mikrometer. Damit eignet sich diese Methode theoretisch für die Herstellung von monomodigen Wellenleitern.

Entscheidend für den Einsatz der kostengünstigen Abformtechniken für die Herstellung von integriert optischen oder mikrooptischen Komponenten für die Nachrichtentechnik ist, dass die Verfahren einerseits die Formung von qualitativ hochwertigen Schichtsystemen mit unterschiedlichem Brechungsindex erlauben und andererseits die dazu benötigten Formeinsätze mit ausreichender Qualität hergestellt werden können. Ziel dieser Arbeit war es deshalb, zu analysieren, inwieweit es möglich ist, durch Prägetechnik in zweischichtigen Polymeraufbauten monomodige Wellenleiter mit integrierten Faserführungsstrukturen zur passiven Faserankopplung herzustellen. Hierzu war es notwendig, einerseits einen Prozess zur Herstellung von Formeinsätzen nach dem LIGA-Verfahren zu entwickeln und andererseits die Prägetechnik für das Formen von zweischichtigen Polymeraufbauten zu erarbeiten. In Kapitel 2 dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen der für die Herstellung der Formeinsätze benötigten Technologien beschrieben und das Konzept zur Herstellung der gewünschten Strukturen vorgestellt. Im Hinblick auf die Umsetzung des Konzeptes war es zunächst notwendig, durch Simulation die Größe der Wellenleiter und den optimalen Schichtaufbau zu ermitteln (Kap. 3). Außerdem musste der Prozess zur Herstellung geeigneter Formeinsätze erarbeitet werden (Kap. 4). Hierbei spielte die Maskentechnik eine entscheidende Rolle. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit bestand in der Auswahl der geeigneten Polymere zur Realisierung des Schichtaufbaus sowie in der Erarbeitung des Abformprozesses (Kap. 5). Die abgeformten Wellenleiter wurden im Hinblick auf ihre

wellenleitenden Eigenschaften charakterisiert, um daraus das Potential der erarbeiteten Technik ableiten zu können (Kap. 6).

2 Grundlagen und konzeptionelle Überlegungen

Im Rahmen dieser Arbeit werden Formeinsätze zur Herstellung der gewünschten Wellenleiterstrukturen mit Hilfe von optischer Lithographie und mit Hilfe des LIGA-Verfahrens hergestellt. Dabei ist im Falle des LIGA-Verfahrens insbesondere die Maskenherstellung, die Bestrahlung und der Weg der Formeinsatzherstellung für die Qualität der Strukturen bestimmend. Mit Hilfe der Formeinsätze werden durch Heißprägen die Wellenleiterstrukturen in Kunststoffschichten erzeugt. Es werden deshalb in diesem Kapitel die Grundlagen der optischen Lithographie, des LIGA-Verfahrens und der Prägetechnik beschrieben. Abschließend wird das Konzept zur Realisierung der Strukturen erläutert.

2.1 Optische Lithographie

Die wichtigsten Schritte in der UV-Lithographie sind in der Abbildung 2.1 dargestellt. Eine auf ein Substrat aufgebrachte Resistschicht wird durch eine Chrommaske mit UV-Licht belichtet. Dieser Resist wird durch die Bestrahlung in seinen Löslichkeitseigenschaften verändert. Im Falle eines Positiv-Resists erfolgt eine Erhöhung der Löslichkeit, so dass dieser Bereich selektiv gegen den unbelichteten Bereich gelöst werden kann. Im Falle eines Negativ-Resists vernetzt der Resist im bestrahlten Bereich und wird damit unlöslich. Er verbleibt deshalb nach der Entwicklung auf dem Substrat.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen der Negativ-Resist SU8 verwendet. SU8 ist ein Epoxidharzsystem, das bei der Bestrahlung vernetzt. Dieser Resist ist für die Herstellung von sehr dicken Schichten (bis zu 2 mm) geeignet, da die Absorption des SU8 Polymerharzsystems im UV-Bereich niedrig ist. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Löslichkeit dieses Resists bei einer bestimmten Dosis sprunghaft ändert, ist es möglich, fast vertikale Seitenwandprofile auch in einem dicken Polymerfilm herzustellen. Der Resist ist darüber hinaus widerstandsfähig gegen ätzende Lösungen (bis pH13) bei hohen Temperaturen und hat generell gute Adhäsionseigenschaften auf dem Substrat [11].

Für die Herstellung von Mikrostrukturen aus SU8 mit optischer Lithographie sind mehrere Technologieschritte notwendig.

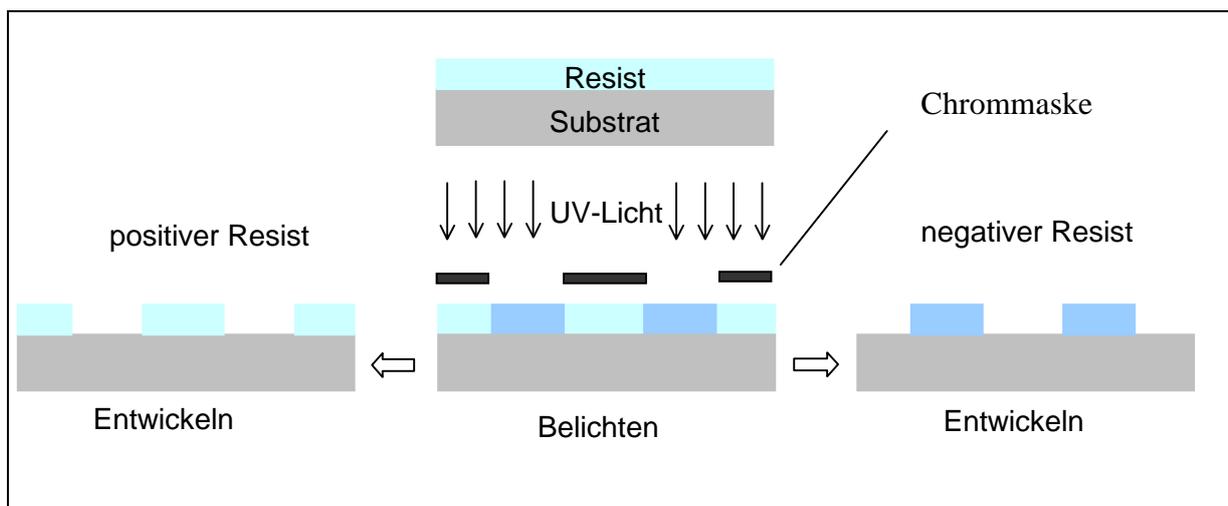


Abb. 2.1: Herstellung einer Mikrostruktur durch optische Lithographie mit negativempfindlichem (links) bzw. positivempfindlichem (rechts) Resist [11]

2.1.1 Herstellung von Chrommasken.

Die Herstellung von Chrommasken ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

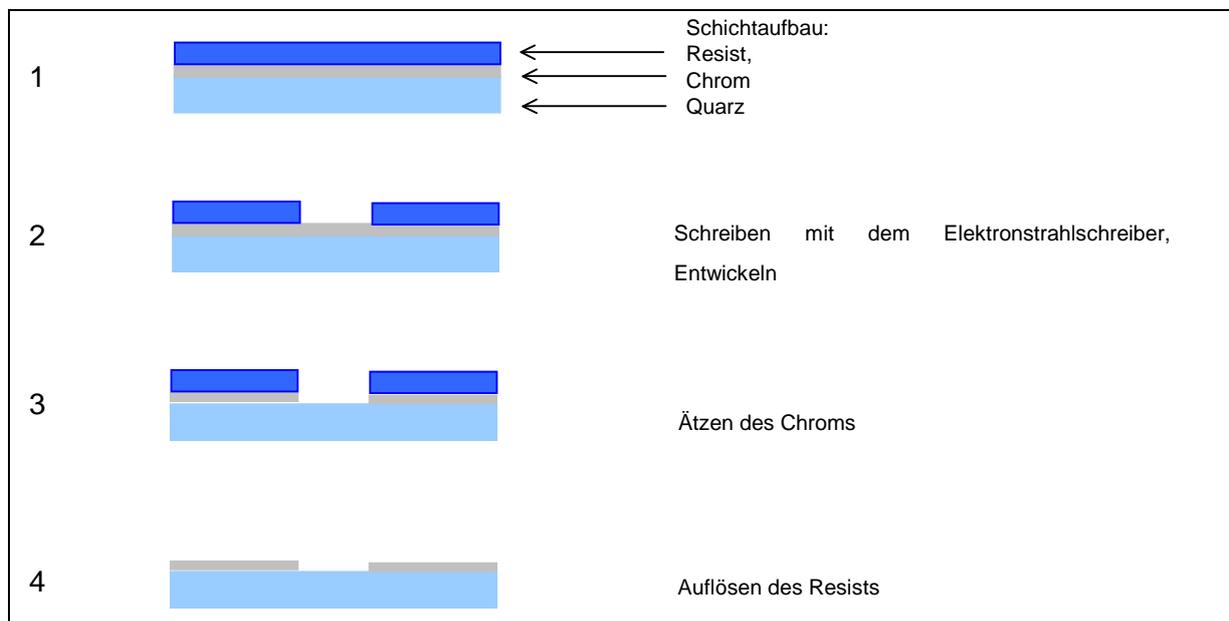


Abb. 2.2: Herstellung einer Chrommaske [12]

Ein mit ca. 20 nm Chrom beschichtendes Quarzsubstrat wird mit ca. 0,5 μm PMMA belackt (1). Der Resist wird präzise mit dem Elektronenstrahlschreiber nach Layoutvorgaben belichtet (2). Nach der Entwicklung des bestrahlten Resists wird die sich unter dem entwickelten Resist befindende Chromschicht geätzt (3). Der unbestrahlte Resist wird nachher gestrippt. Die übrig bleibende Chromschicht stellt das invertierte Bild des mit dem Elektronenstrahlschreiber geschriebenen Layouts dar (4).

2.1.2 Spincoaten/Belacken

Die Beschichtung des Substrats mit dem Resist erfolgt durch Spincoaten. Der Resist, der in einem Lösungsmittel gelöst ist, wird durch Sprühbeschichtung über Düsen oder manuell auf dem Träger aufgebracht. Die für die Belackung benutzte Resistmenge ist normalerweise ein Vielfaches der Lackmenge, die im Endeffekt auf dem Träger verbleibt. Dies soll verhindern, dass Lackfehler (Kometen) mit einer dünneren Resistschicht entstehen. Durch eine zunehmende Rotationsbewegung des Substrats erfolgt eine starke Flüssigkeitsentfernung auf der Substratoberfläche, indem die Flüssigkeit nach außen verdrängt wird, und nach einer bestimmten Schleuderzeit erreicht der Resist die gewünschte Dicke. Schleuderkurven für den SU8-Resist wurden am Institut im Rahmen anderer Arbeiten erarbeitet und in dieser Arbeit angewendet [11]. Häufig bilden sich am Rand des Substrates Resisttropfen. Das Lösungsmittel wird zwar gleichmäßig nach außen getrieben, muss aber in Folge der Oberflächenspannung an der Substratkante die energetisch kleinste Oberfläche als Flüssigkeitstropfen einnehmen [11]. Die Tröpfchengrößen hängen von der Oberflächenspannung, der Viskosität des Resists und der Umdrehungsgeschwindigkeit ab. Diese Tropfenbildung verhindert bei der Belichtung den Hard-Kontakt der Maske mit dem Resist und macht damit eine optimale Belichtung unmöglich. Um diese Tropfen zu entfernen, spritzt man nach dem Aufschleudern des Resists ganz vorsichtig Propylen-Glykol-Methyl-

Ethylacetat (PGMAE) am Rand des Substrates auf. Damit löst sich das am Rande des Substrates befindliche SU8.

2.1.3 Belichtung

Die in der optischen Lithographie verwendeten Resists haben eine gute Photoempfindlichkeit in bestimmten Wellenlängenbereichen. Diese ist besonders hoch bei den Spektrallinien einer Quecksilberdampfampe ($\lambda = 439 \text{ nm}$, $\lambda = 405 \text{ nm}$, $\lambda = 365 \text{ nm}$). Unter der Empfindlichkeit (mJ/cm^2) eines Resists versteht man die Energiemenge, die eine ausreichende Änderung des Resists in seiner chemischen Zusammensetzung oder Konsistenz verursacht. Die Abhängigkeit der Resistdicke gegen den Logarithmus der Strahlungsdosis ist ein Maß für die Empfindlichkeit. In Abbildung 2.3 ist diese Kurve für einen Negativ-Resist aufgetragen. Für negative Resiste definiert man die Auflösung (γ) bzw. den Kontrast als die Steigung des linearen Anteils der Empfindlichkeitskurve $\gamma = \log[D_g^{(0)} / D_g^{(1)}]^{-1}$. Hierbei ist $D_g^{(1)}$ der Anfangspunkt der Empfindlichkeitskurve (Start der Gelbildung im Resist).

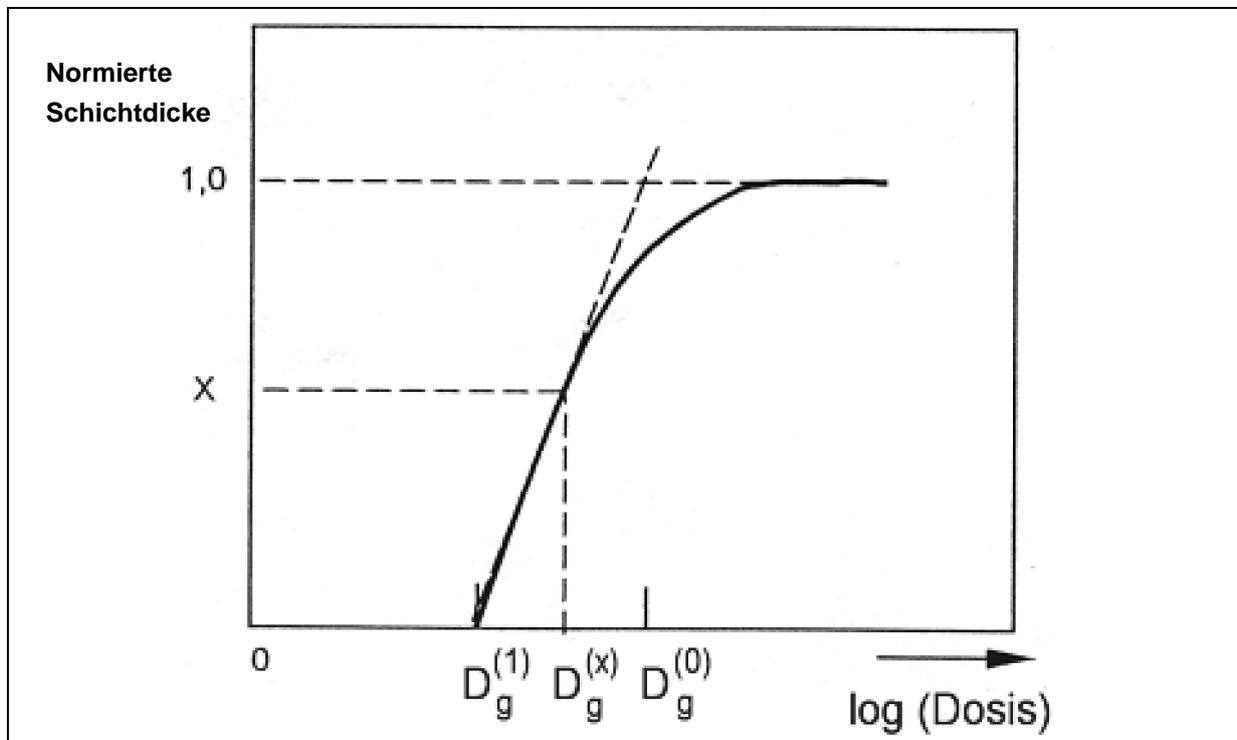


Abb. 2.3: Charakteristische Empfindlichkeitskurve für einen Negativ-Resist [11]. X ist die normierte Resistdicke, die der Grenze des linearen Anteils der Empfindlichkeitskurve entspricht.

Die Belichtung erfolgt durch eine Chrom-Maske (Abschnitt 2.1.1). Der Abstand zwischen der Maske und dem Resist hat einen starken Einfluss auf die sich nach der Entwicklung ergebenden Strukturen (Beugung). Wenn die Maske mit ihrem eigenen Gewicht auf den Resist gelegt wird, ergibt sich ein kleiner Spalt. Diese Situation wird als Soft-Kontakt bezeichnet. Wenn die Maske mittels Vakuum an den Resist gedrückt wird, verschwindet dieser Spalt praktisch vollständig (Hard-Kontakt). Da sich dadurch der Einfluss der Beugung vermindert, ergeben sich bei der Bestrahlung wesentlich bessere Ergebnisse.

2.1.4 Trocknen des Resists

Ein Photoresist besteht aus gelöstem Polymer, chemischen Initiatoren und Lösungsmittel. Nach dem Belichten muss der überwiegende Anteil des Lösungsmittels ausgetrieben werden. Hierzu wird der Resist in einem Ofen oder auf einer Hotplate bei höheren Temperaturen getrocknet. Bei diesem Trocknungsvorgang diffundiert das im Polymer enthaltene Lösungsmittel in Oberflächenrichtung und verflüchtigt sich in die Luft. Die Diffusion des Lösungsmittels im Polymer ist um so größer, je höher die Temperatur ist. Beim Trocknungsvorgang ist zu vermeiden, dass der Resist an der Oberfläche austrocknet und sich eine Diffusionsbarriere bildet. Aus diesem Grunde ist die Trocknung auf der Hotplate mit konstanter Temperatur günstiger als eine Trocknung im Ofen. In diesem Fall ergibt sich ein homogeneres Lösungsmittelprofil.

2.1.5 Entwicklung

Die Entwicklung des belichteten Resist erfolgt entweder im Sprühverfahren (bei dünnen Schichten) oder im Tauchverfahren mit einem ausgewählten Lösungsmittels, das den belichtenden und vernetzten Resist möglichst wenig angreift. Im Falle von SU8 benutzt man als Entwickler das selbe Lösungsmittel in dem das Polymer beim Beschichtungsprozess gelöst ist (γ -Butyrolacton). Daneben kann auch PGMEA verwendet werden. Die Entwicklungszeit muss so gewählt werden, dass die zu lösende Schicht vollständig entwickelt ist. Sie darf aber auch nicht übermäßig länger angesetzt werden, da eine lange Behandlung mit einem Lösungsmittel ein starkes Aufquellen des Resists ergibt. Zur Verkürzung der Entwicklungszeit wird bei der Tauchentwicklung der Träger im Entwicklerbad bzw. der Entwickler durch Rühren oder durch Schallanregung bewegt.

2.2 LIGA-Verfahren

2.2.1 allgemeine Beschreibung

Das Wort LIGA ist eine Abkürzung der Bezeichnungen von den wichtigsten Prozessschritten des Verfahrens, nämlich Röntgentiefenlithographie, Galvanik und Abformung (siehe Abbildung 2.4). Es dient der Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis mit Strukturhöhen von mehreren hundert Mikrometern bis über ein Millimeter [13].

Beim Lithographieschritt wird auf einen mechanisch stabilen Träger (z.B. Kupfergrundplatte) ein röntgensensibler Resist (z.B. Polymethylmethacrylat PMMA) von einer Dicke bis zu 1 mm aufgegossen oder aufgeklebt und über eine Maske mit Röntgenstrahlung partiell belichtet.

Das Molekulargewicht des PMMA wird in diesem Schritt durch die Röntgenstrahlung stark reduziert (Schritt 1). Bei der Röntgenstrahlung handelt es sich um Synchrotronstrahlung von einem Elektronenspeicherring, die eine hohe Parallität und eine hohe Intensität aufweist. Die Elektronenenergie ist relativ hoch (z.B. 1,3 1,8 oder 2,5 GeV an ANKA, Karlsruhe), so dass die Wellenlänge der Röntgenstrahlung im Bereich von 1 nm bis 0,3 nm liegt [14]. Um Mikrostrukturen zu erzeugen, erfolgt die Bestrahlung des Resists über eine sogenannte Arbeitsmaske (Abschnitt 2.2.4) worauf sich Mikrostrukturen aus Gold befinden, die die Strahlung weitgehend absorbieren und so den Resist abschatten. Die anderen Bereiche werden dagegen von der Strahlung getroffen. Bei der Verwendung bestimmter organischer

Entwickler werden die bestrahlten Bereiche selektiv gegen die unbestrahlten Bereiche aufgelöst (Schritt 2). Es entsteht dadurch das Abbild der Masken-Absorber in dem dicken Polymer mit nahezu vertikalen Seitenwänden.

Durch den folgenden Galvanik-Schritt (Schritt 3) werden die freien, entwickelten Bereiche mit Metall aufgefüllt. Um einen Formeinsatz (Abformwerkzeug) herzustellen wird die Galvanik über den Resist hinaus fortgesetzt, so dass ein mehrere Millimeter dicker Metallkörper entsteht. Nach der Trennung dieses Metallkörpers von der Grundplatte durch eine Kombination von Erodieren (Schritt 4) und Metallätzen und dem Auflösen des PMMA liegt die Komplementärstruktur des abgeschatteten PMMA aus Metall als Formeinsatzstruktur vor. Die Ränder des Metallkörpers werden durch Erodieren präzise bearbeitet, um den Formeinsatz in die Abformmaschine einbauen zu können (Schritt 5).

Dieser Formeinsatz wird eingesetzt, um durch Prägetechnik bzw. Spritzgusstechnik Mikrostrukturen aus thermoplastischen Polymeren herzustellen (Schritt 6). Diese abgeformten Polymerteile können das Endprodukt sein. Sie können aber auch wieder als Formen eingesetzt werden, um Mikrostrukturen aus Metall oder Keramik herzustellen [13].

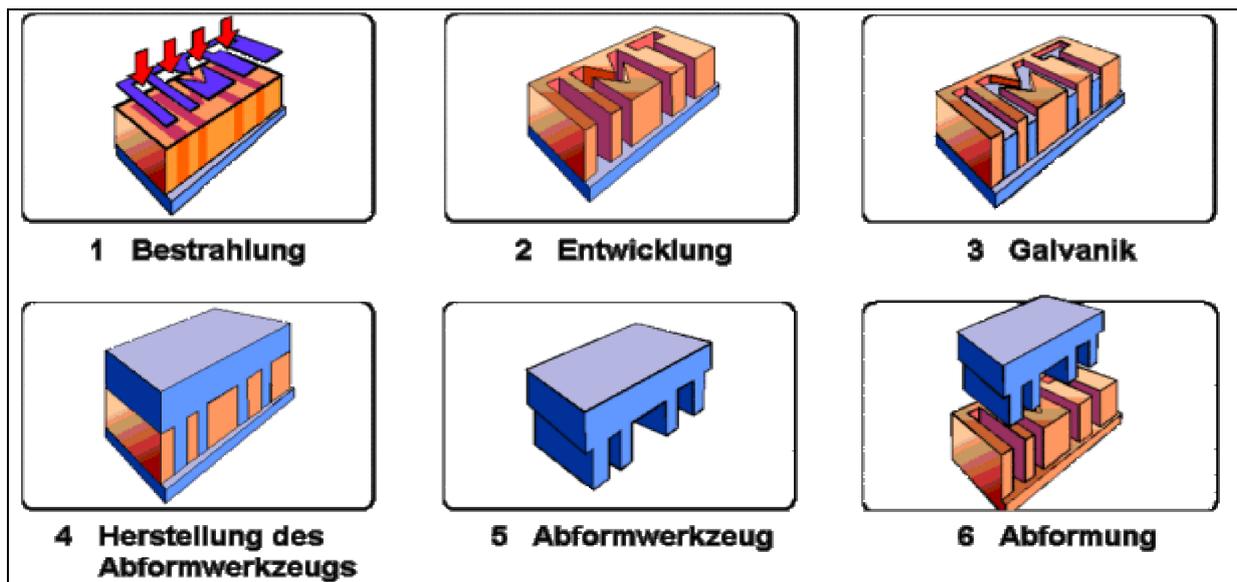


Abb. 2.4: Die Schritte des LIGA-Verfahrens [K0978]

Das LIGA-Verfahren erlaubt die Herstellung von Produkten mit folgenden Eigenschaften:

- Kleinste laterale Abmessungen bis zu 0,2 μm (siehe Abbildung 2.5)
- Freie laterale Geometrie der Strukturen (siehe Abbildung 2.6)
- Strukturhöhe über 1 mm (siehe Abbildung 2.7)
- Aspektverhältnisse von freistehenden Einzelstrukturen bzw. Detailstrukturen über 50 (siehe Abbildung 2.8) bzw. 500
- Oberflächenqualität im Submikrometerbereich mit Rauigkeiten R_a von besser 20 nm

- Einsatz verschiedener Materialien: Polymere (z. B. PMMA, Polycarbonat, etc), Metalle (z. B. Ni, Cu, Au), Legierungen (z. B. Permalloy)

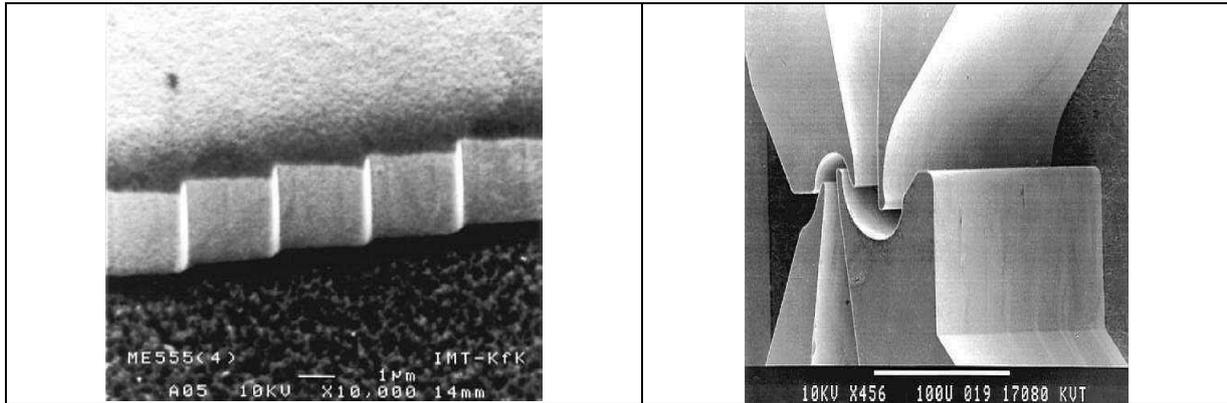


Abb. 2.5: Resiststruktur eines Reflexionsgitters, Stufenhöhe 0,25 μm , Strukturhöhe 125 μm

Abb. 2.6: Trenndüsenstrukturen in Galvanik als Beispiel für die freie laterale Formgebung, Schlitz (2 μm), Höhe (380 μm).

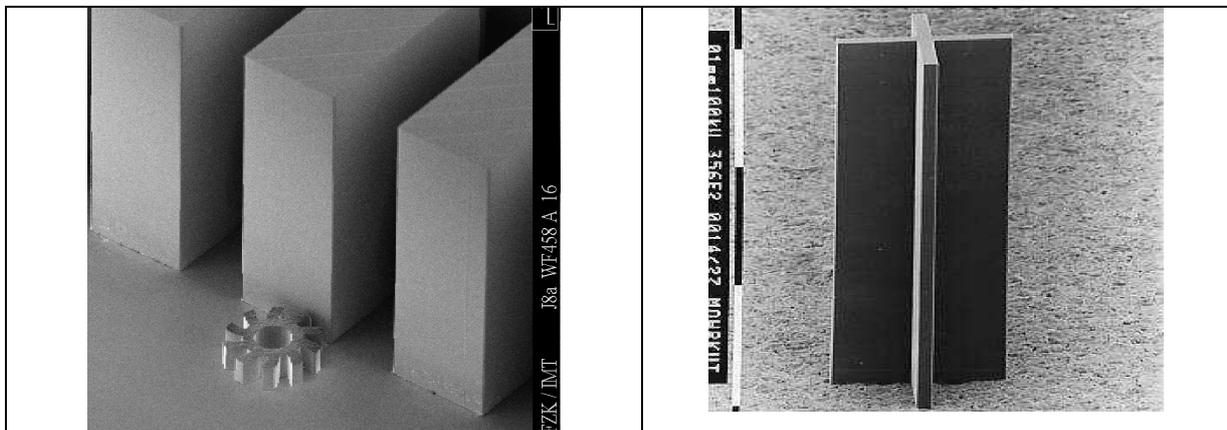


Abb. 2.7: 1,5 mm hohe Resiststruktur im Vergleich zu einem galvanisierten Zahnrad (Höhe: 150 μm)

Abb. 2.8: 400 μm hohe Balkenstruktur mit parallelen Seitenwänden (Breite: 8 μm) [19]

2.2.2 Modifikation des Verfahrens zur Herstellung gestufter Formeinsätze

Durch Prozessvariationen lassen sich neben den vertikalen Strukturen auch komplexere Geometrien herstellen.

Mittels einer Verkippung der Maske und des Substrats während des Bestrahlungsprozesses sind neben vertikalen auch definiert geneigte Seitenwände produzierbar [15].

Weist die Grundplatte mehrere Niveaus auf, entstehen gestufte Formeinsätze, was für bestimmte Anwendungen von Vorteil ist. Da mit dieser Methode die Formeinsätze im Rahmen dieser Arbeit hergestellt werden, wird diese im Folgenden näher beschrieben (siehe Abbildung 2.9) [16]:

Zuerst stellt man ein Substrat mit der gewünschten Stufe her. Die Strukturierung kann durch mechanische (z.B. mit einem Diamanten) oder chemische (Ätztechniken) Methoden erfolgen. Weist die Stufe eine komplexe, feine Struktur auf, dann kann diese mittels optischer Lithographie und Galvanik hergestellt werden. Im Lithographieschritt wird dazu das Negativ des Stufenmusters auf der massiven Kupfer-Grundplatten strukturiert. Diese Strukturen

werden anschließend über die Sollhöhe hinaus galvanisch aufgebaut und durch Diamantfräsen auf die exakte Niveauhöhe abgefräst. Das Fräsen sollte in zwei Schritten erfolgen, damit eine präzise Stufenhöhe erreicht werden kann. In einer weiteren Variante wird ein Siliziumsubstrat verwendet, in das die Stufe durch Siliziumätzverfahren eingebracht wird. Dabei ist man jedoch an bestimmte, durch die Ätztechnik vorgegebenen Geometrien gebunden [2].

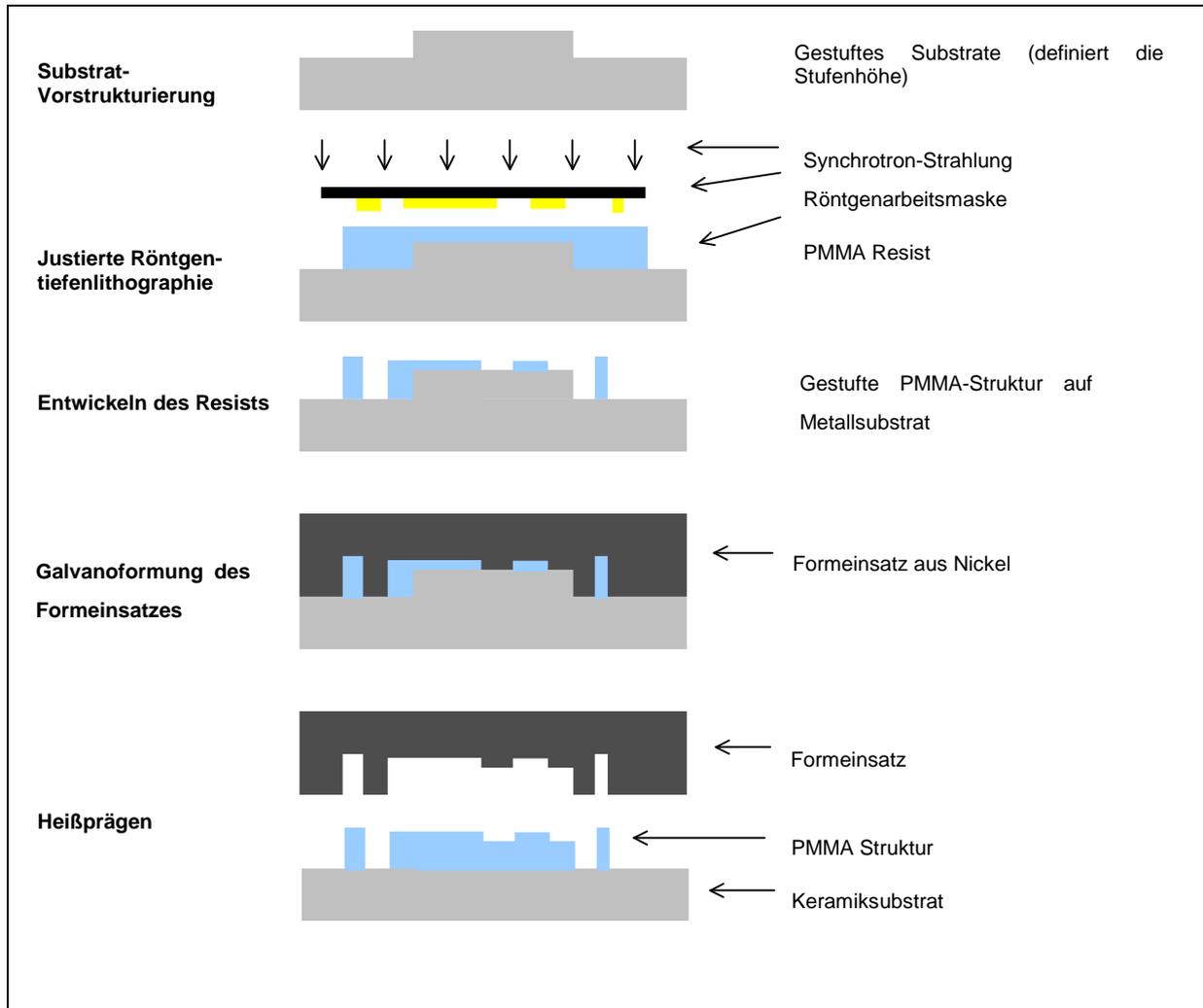


Abb. 2.9: Modifiziertes LIGA-Verfahren zur Herstellung von gestuften Strukturen durch Abformung unter Verwendung eines gestuften Formeinsatzes

Auf diesen gestuften Substraten wird der LIGA-Prozess durchgeführt. Die Substrate werden dazu vor der Resistbeschichtung mit einer Galvanikstartschicht aus Titan besputtert, die anschließend oxidiert wird, um die Resisthaftung zu verbessern. Zunächst wird das Muster der zweiten Ebene auf dem Substrat durch eine justiert zur Stufe erfolgenden Röntgenlithographiebestrahlung strukturiert. In die entstandene Struktur wird galvanisch Metall abgeschieden wobei zur Formeinsatzherstellung das Metall wieder über die Resiststruktur hinaus abgeschieden wird. Die weitere Bearbeitung des Formeinsatzes erfolgt analog zu Kapitel 2.2.1.

Der erzeugte Formeinsatz kann sowohl im Spritzguss als auch im Heißprägeprozess eingesetzt werden. In der Regel werden im Spritzguss Vollpolymerstrukturen hergestellt.

Durch Heißprägetechnik können auch Strukturen auf einem massiven Substrat erzeugt werden, was eine deutlich höhere thermische Stabilität der Strukturaufbauten mit sich bringt. Aus diesem Grunde ist die Heißprägetechnik für die Herstellung optischer Strukturen zu bevorzugen.

Bei der Herstellung von gestuften Strukturen für optische Anwendungen muss in vertikaler und lateraler Richtung eine Präzision von $\pm 1\mu\text{m}$ erzielt werden [17], da bei einer geringeren Präzision inakzeptable Ankopplungsverrußte auftreten (Kerndurchmesser: $9\mu\text{m}$). Die Präzision in lateraler Richtung wird beim Diamantfräsen erreicht. Die Justiergenauigkeit bei der Röntgenlithographie liegt dagegen nur bei $5\mu\text{m}$ bis $10\mu\text{m}$. Dies ist ausreichend, da die Röntgenmaske und die Stufenstrukturen so ausgelegt sind, dass die lateralen Abmessungen ausschließlich durch die Röntgentiefenlithographie bestimmt werden (siehe Kap. 2.4).

2.2.3 Herstellung einer Röntgenzwischenmaske

Einen entscheidenden Beitrag zur Qualität der Strukturen, insbesondere der im Rahmen dieser Arbeit zu realisierenden sehr schmalen Wellenleiterstrukturen ergibt sich bereits durch die Röntgenzwischenmaske, die im Rahmen dieser Arbeit auch als Röntgenarbeitsmaske eingesetzt werden kann (siehe Kap. 4.1.2). Im folgenden wird deshalb die Herstellung einer Röntgenzwischenmaske näher beschrieben.

Röntgenmasken bestehen vor allem aus einem Absorber und einem Trägermaterial. Der Absorber muss ein hohes Atomgewicht besitzen, um dem Strahl effizient zu absorbieren. Üblicherweise wird hierfür Gold verwendet. Für Röntgenzwischenmasken muss das Gold für die im Rahmen des LIGA-Verfahrens eingesetzten Wellenlängen eine Dicke von mindestens $1,8\mu\text{m}$ haben.

Zur Herstellung der Absorberstrukturen der Röntgenzwischenmaske muss das in einem CAD-System erzeugte Design der Strukturen in einen Resist übertragen werden. Die Strukturierung des Resists auf der Röntgenzwischenmaske erfolgt durch Elektronenstrahlolithographie wegen der hohen Genauigkeit, die man mit dieser Methode realisieren kann. Am IMT steht hierfür ein Elektronenstrahlschreiber mit Gaußschem Strahl zur Verfügung, der im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde.

Ein Elektronenstrahlschreiber mit Gaußschem Strahl besteht hauptsächlich aus einer Elektronenquelle, elektromagnetischen Linsen, einer Ablenkeinheit und einem hoch präzisen Positioniertisch.

Üblicherweise werden als Elektronenquellen LaB6-Kristalle oder Wolframkathoden benutzt. Normalerweise liegt dabei die Stromdichte bei 1 A/cm^2 . Dieser Wert kann mit Kathoden anderer Art erhöht werden. Die Elektronenintensität im Strahl hat eine Gaußsche Verteilung, was den Namen begründet. Auf dem Substrat wird der Elektronenstrahl zu einem Spot fokussiert [12].

Zur Bestrahlung des Resistes wird die Resistfläche in ca. $0,5\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$ große Felder aufgeteilt. Dabei wird die Feldgröße von den maximal erlaubten elektrooptischen Fehlern (z.B. Astigmatismus) definiert. Um den Elektronenstrahl abzulenken und ein solches Feld zu beschreiben, benutzt man magnetische Spulen. Beim Raster-Scan-Verfahren, nach dem der Schreiber am IMT arbeitet, wird der Strahl mäanderförmig über das Feld bewegt. An den

Punkten, die nicht beschrieben werden müssen, wird der Strahl ausgeblendet. Dieses Verfahren führt zu langen Schreibzeiten. Zur Beschreibung des nächsten Feldes wird der Positioniertisch, worauf das Substrat befestigt ist, weiterbewegt. Die Bewegung erfolgt mit einer hohen Präzision, wobei die Tischposition mit Hilfe eines Laser-Interferometers auf 10 nm genau kontrolliert werden kann.

Die Qualität der geschriebenen Strukturen hängt sowohl von den benutzten Elektronenstrahlschreiberparametern als auch von den benutzten Resisten, der Resistdicke und dem Substratmaterial ab. Eine sehr glatte Kante wird erzielt, wenn mit großer Spot-Size und kleiner Step-Size geschrieben wird. Dies führt allerdings zu verrundeten Ecken, so dass zur Erzielung scharfer Ecken auch die Spot-Size klein gewählt werden muss. Im Resist weitet sich der Elektronenstrahl aufgrund von Streuung (Vorwärtsstreuung) auf. Dieser Effekt hängt von der Beschleunigungsspannung des Elektronenstrahles und der Resistdicke ab. Aus diesem Grund werden die 2 bis 3 μm dicken Resistschichten der Zwischenmasken am IMT mit Elektronen bestrahlt, die mit einer Spannung von 100 keV beschleunigt wurden. Dadurch kann die durch die Vorwärtsstreuung entstehende Keulenform der Resiststruktur vermindert werden.

Nicht alle Elektronen werden im Resist absorbiert sondern dringen in das Substrat ein. Wegen der großen Atommasse des Substrats ist der Streuquerschnitt deutlich höher, so dass ein Teil der Elektronen zurück in den Resist gestreut werden (Rückstreuung) und insbesondere in der Grenzschicht zum Substrat auch in Resistgebieten, die nicht beschrieben werden sollen, absorbiert werden. Dies führt zu einer Schädigung des Resistes in diesen Bereichen, was sich im späteren Entwicklungsprozess in einer verminderten Haftung äußern kann.

Der Effekt, der durch die Summe der Streuprozesse entsteht, bezeichnet man als Proximity-Effekt. Dieser kann reduziert werden, wenn die Beschleunigungsspannung hoch ist. Dazu ist es vorteilhaft, das mittlere Atomgewicht des Resists und das Atomgewicht des Substrats so niedrig wie möglich auszuwählen. Zur Korrektur des Proximity-Effekts kann man z.B. die zu schreibende Struktur in mehrere Bereiche aufteilen und entsprechend der Untergrunddosis mit unterschiedlichen Parametern belichten, beispielsweise mit unterschiedlicher Elektronenstromstärke oder unterschiedlicher Belichtungszeit [12]. (siehe Abbildung 4.3)

Wie bereits dargestellt, wird wegen der hohen Anforderungen an die Präzision der Strukturen die Resiststruktur auf der Röntgenzwischenmaske mit dem Elektronenstrahlschreiber erzeugt. Die Prozessschritte für die Herstellung einer Röntgenzwischenmaske sind in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt.

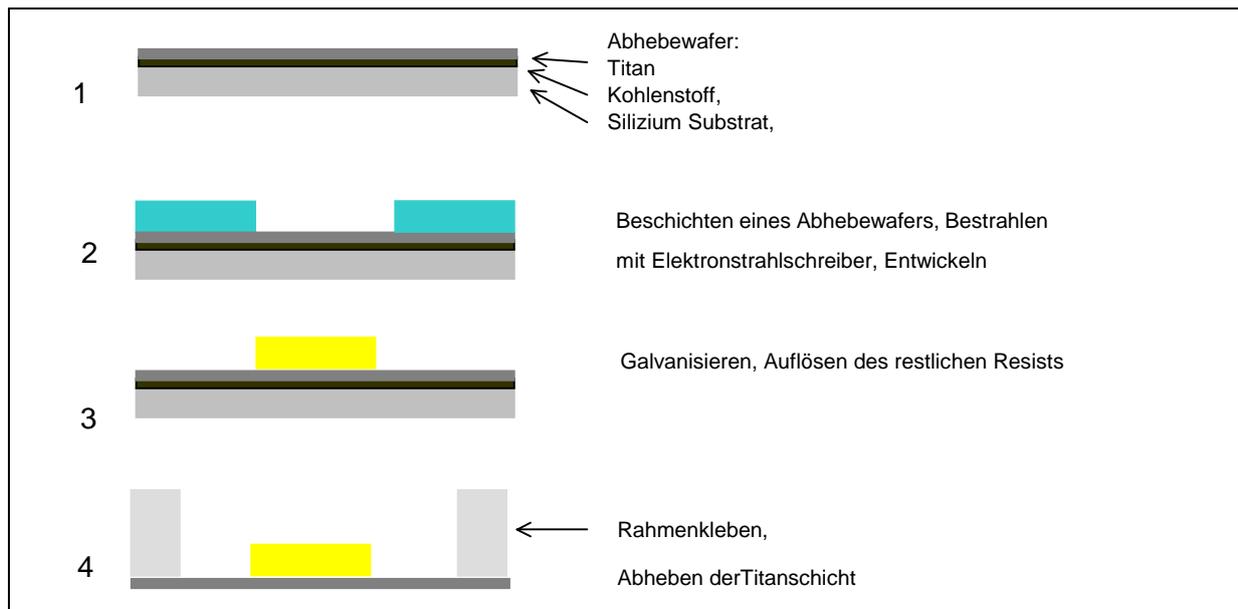


Abb. 2.10: Herstellung einer Röntgenzwischenmaske

Ausgangspunkt ist ein Si-Substrat, das mit einer 10 nm dicken Kohlenstoffschicht beschichtet ist (Abhebewafer), wobei ein schmaler Ring am Rand des Substrats frei bleibt. Dieses so vorbereitete Substrat wird mit einer 2,7 μm dicken Titanschicht, die als Trägermembran für die Absorber fungiert, besputtert. Um eine bessere Haftung des Kunststoffes auf der Titanschicht zu erzielen, wird diese in einer Wasserstoffperoxydlösung oxidiert. Es ergibt sich an den Stellen, wo das Titan direkt auf dem Substrat liegt, eine gute Haftfestigkeit, auf der Kohlenstoffschicht ist sie allerdings gering, jedoch für die weiteren Prozessschritte zunächst ausreichend. Als Galvanikstartschicht wird auf die oxidierte Titanschicht eine 20 nm dicke Goldschicht aufgedampft. Darauf wird ein Elektronenstrahlschreiberresist (in der Regel in Anisol gelöstes PMMA) mit einer Dicke von 3 μm aufgeschleudert und getrocknet. Dieser Resist wird mit dem Elektronenstrahlschreiber gemäß dem CAD-Design bestrahlt und entwickelt. Die sich ergebenden Strukturen werden anschließend bis zu einer Höhe von 1,5 μm bis 2 μm mit Gold aufgalvanisiert. Der nicht bestrahlte Resist wird sodann aufgelöst. Auf die Titanfolie wird ein Rahmen aus Invar geklebt. Aufgrund der geringen Haftfestigkeit der Ti-Folie auf dem mit Kohlenstoff beschichteten Substrat kann die Folie, auf der sich die Au-Mikrostrukturen befinden, mit dem Rahmen abgehoben werden. Die Folie ist dabei auf dem Rahmen gespannt. Bei diesem Vorgang muss darauf geachtet werden, dass keine Kerbspannungen auf die Titanfolie ausgeübt wird, da dies zum Reißen der Folie führen würde.

2.2.4 Herstellung einer Röntgenarbeitsmaske

Die Röntgenarbeitsmaske unterscheidet sich in der Dicke der Absorberstrukturen von der Röntgenzwischenmaske. Da bei der Erzeugung von mehreren hundert Mikrometer hohen Strukturen härtere Röntgenstrahlung verwendet wird, müssen die Absorber eine Dicke von ca. 20 μm aufweisen. Dies erfordert auch eine andere Technik zur Herstellung der Resistschicht, da solch dicke Resistschichten durch Spin-Coaten von PMMA nicht mehr hergestellt werden können. Die für die Herstellung einer Arbeitsmaske notwendigen Schritte sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

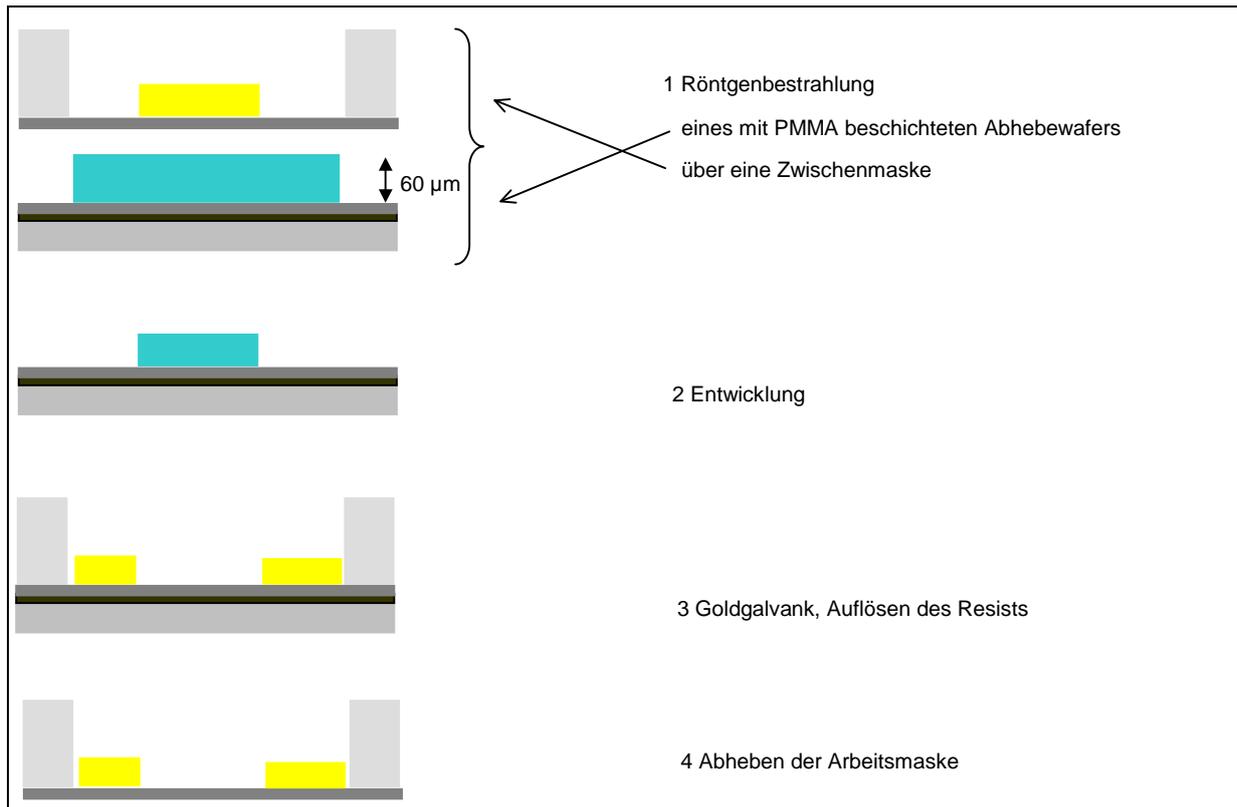


Abb. 2.11: Herstellung einer Röntgenarbeitsmaske

Auch für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Röntgenarbeitsmasken ist Ausgangspunkt ein Abhebewafer mit Kohlenstoffschicht und ca. $3\ \mu\text{m}$ dicker oxidierter Titanschicht. Auf dieses Substrat wird ein Gießharz aus in MMA gelöstem PMMA bis zu einer Höhe von $60\ \mu\text{m}$ aufgegossen. Das PMMA wird über eine Zwischenmaske mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Die übrigen Schritte der Arbeitsmaskenherstellung sind denen der Herstellung der Zwischenmaske ähnlich, nämlich Entwickeln, Galvanisieren, nicht bestrahltes PMMA Auflösen und schließlich Abheben.

Bei speziellen Anwendungen müssen die Arbeitsmasken bei der Bestrahlung relativ zum Substrat durch Markierungen (Justierkreuze) justiert werden. Hierzu werden auf der Maske an bestimmten Stellen kreuzförmige Absorberstrukturen erzeugt. Da die Titanmembran optisch nicht durchsichtig ist, wird das Titan unter diesen Kreuzen geätzt. Dabei belackt man die Rückseite der Membran mit einem Photolack (z.B., AZ Lack). Dieser wird belichtet und entwickelt und die Öffnungen unter den Kreuzen geätzt. Die Justierkreuze, die über die Öffnungen frei gespannt sind, werden mit den entsprechenden Kreuzen auf dem Substrat zur Deckung gebracht. Die Genauigkeit der Justierung liegt bei 5 bis zu $10\ \mu\text{m}$.

2.2.5 Röntgenlithographie

Bei der Röntgenlithographie wird meistens PMMA als Resist benutzt. Am IMT werden allerdings derzeit auch Untersuchungen zum Einsatz des Negativ-Resists SU8 in der Röntgenlithographie durchgeführt [18]. Die Herstellung der PMMA-Resistschicht erfolgt durch Polymerisation eines Gießharzes auf dem Substrat [19]. Beim Gießharz handelt es sich um in MMA (Monomer) gelöstes PMMA, in das zusätzlich ein Härter und ein Initiator

gerührt wird. Dadurch wird der Polymerisationsprozess des MMA ausgelöst. Die sich bei der Polymerisation ergebenden inneren Spannungen werden durch einen Temperprozess abgebaut. Vor der Bestrahlung muss das PMMA auf die gewünschte Höhe abgefräst werden, um eine gleichmäßige Schicht zu erhalten, die homogen bestrahlt werden kann.

Die durch den Polymerisationsprozess entstehenden Polymerketten werden durch die Bestrahlung gezielt gebrochen und dadurch das Molekulargewicht reduziert. Die sich ergebenden Bereiche mit niedrigerem Molekulargewicht werden mit einem geeigneten Entwickler (GG-Entwickler) [20] aufgelöst. Dabei dürfen die unbestrahlten Gebiete durch die Behandlung mit dem Entwickler nicht aufgelöst werden.

Um eine gute Auflösung des PMMA zu erreichen, muss in dem PMMA eine minimale Dosis von 4 KJ/cm^3 abgelagert werden. Bei einer Strahldosis unterhalb von 4 KJ/cm^3 werden PMMA-Reste zurück bleiben. Rühren des Entwicklers und Einsatz von Ultraschall kann begrenzt die minimale Dosis beeinflussen. Bei einer abgelagerten Dosis von mehr als 20 KJ/cm^3 bilden sich Blasen in dem PMMA und von daher stellt diese Dosis eine maximale Grenze der Bestrahlungsdosis für PMMA dar. Damit die durch die Maske abgeschatteten Gebiete durch den Entwickler nicht angegriffen werden, darf in diesen Gebieten eine maximale Dosis von 100 J/cm^3 abgelagert werden. Dies bestimmt die Absorberdicke auf der Maske, die so groß sein muss, dass eine Überdosierung verhindert wird. Für die im Rahmen dieser Arbeit zu bestrahlenden Resistdicken und bei Anwendungen des im Folgenden beschriebenen Röntgenspektrums ist eine Goldabsorberdicke von $1,7$ (siehe Kapitel 4.1.2) μm notwendig.

Die Bestrahlung im Rahmen dieser Arbeit erfolgt an den Strahlrohren an der Röntgenquelle ANKA bei einer Elektronenenergie von $1,3 \text{ GeV}$. Im Strahlrohr sind Röntgenfenster aus Beryllium und gegebenenfalls Zwischenabsorber eingebaut, mit denen sichergestellt wird, dass die oben genannten Grenzdosiswerte eingehalten werden. Mit diesen Filtern und unter Berücksichtigung der $2,7 \mu\text{m}$ dicken Titanmembran ergibt sich das in Abbildung 2. 12 dargestellte Röntgenspektrum [45].

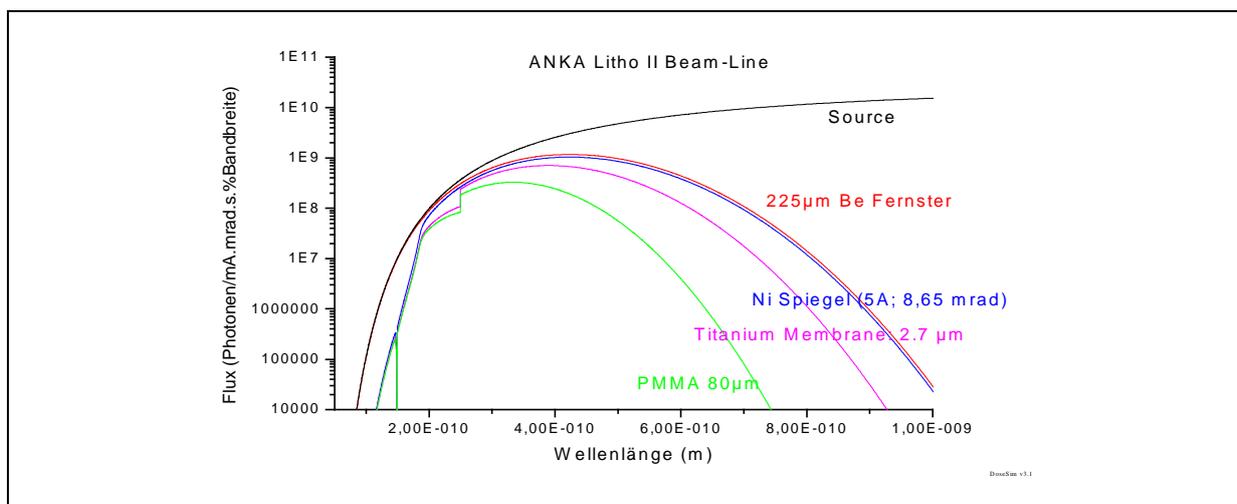


Abb. 2.12: Röntgenspektrum, das zur Bestrahlung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bestrahlungen eingesetzt wurde.

2.2.6 Formeinsatzherstellung

Zur Herstellung eines Formeinsatzes wird die entwickelte Resiststruktur galvanisch mit Nickel befüllt. Dabei wird ein Nickelsulfamatbad verwendet. Die Stromdichte beträgt 1 A/dm^2 , was nur minimale innere Spannungen in der Metallstruktur bewirkt. Die Abscheiderate beträgt dabei $12 \text{ } \mu\text{m/Stunde}$. Die Galvanik wird nach der Befüllung der Strukturen nicht gestoppt, sondern über diese hinaus fortgeführt, um einen massiven Formeinsatzrücken in einer Dicke von 3-4 mm zu erzeugen. Hierbei wurde die Stromdichte auf $1,8 \text{ A/dm}^2$ erhöht, so dass die Abscheiderate $21 \text{ } \mu\text{m/Stunde}$ beträgt. Dies führt zu einer langen Galvanisierungszeit (ca. 2-3 Wochen). Außerdem treten in dem massiven Rücken Spannungen auf, die zu einer Ablösung des Formeinsatzes vom Substrat führen können. Dies ist besonders dann kritisch, wenn die Resistschicht vor der Galvanik mit einer Goldschicht beschichtet wurde, da diese eine geringe Haftung auf anderen Materialien aufweist. Dies war im Rahmen dieser Arbeit bei der Herstellung von Formeinsätzen auf der Basis von SU8 der Fall (siehe Kap. 4.2.1). Nach Abschluss der Galvanik werden die Außenkonturen des Formeinsatzes mit genauen Abmessungen erodiert. Dabei erlaubt der dicke Metallrücken das Erodieren einer Lippe an der Außenkante des Formeinsatzes, über die eine einfache und sichere Halterung des Formeinsatzes in der Prägemaschine möglich ist. Diese Befestigung ermöglicht eine genaue Kontrolle über die Entformungskräfte und ihre Messung.

Um die langen Galvanikzeiten zu verkürzen, besteht gerade bei wenigen Mikrometer hohen Strukturen die Möglichkeit, den Formeinsatzrücken nur als eine bis zu 1 mm dicken Platte auszuführen (Formeinsatz-Shim). Diese Platte löst sich im Rahmen der in dieser Arbeit verwendeten Herstellungsmethode vom Substrat ab, wobei die Resiststrukturen teilweise auf dem Substrat verbleiben. Aus diesem Grunde muss die Nickelstruktur zum Schutz vor dem Erodieren mit einem Lack überschichtet werden (z.B. AZ-Lack). Da es bei diesen Shim-Formeinsätzen schwierig ist, die Stufe zu erodieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, die Aussenkante konisch zu erodieren und den Formeinsatz in eine entsprechende Platte zu drücken. Problematisch ist jedoch, dass sich die dünnen Formeinsätze beim wiederholten Prägen verformen können.

2.2.7 Heißprägetechnik

Bei der Heißprägetechnik werden Platten aus thermoplastischen Kunststoffen durch Erwärmung des Kunststoffs über die Glasübergangstemperatur und Aufbringen eines Drucks verformt. Der Prozess ist in Abbildung 2.13 schematisch dargestellt.

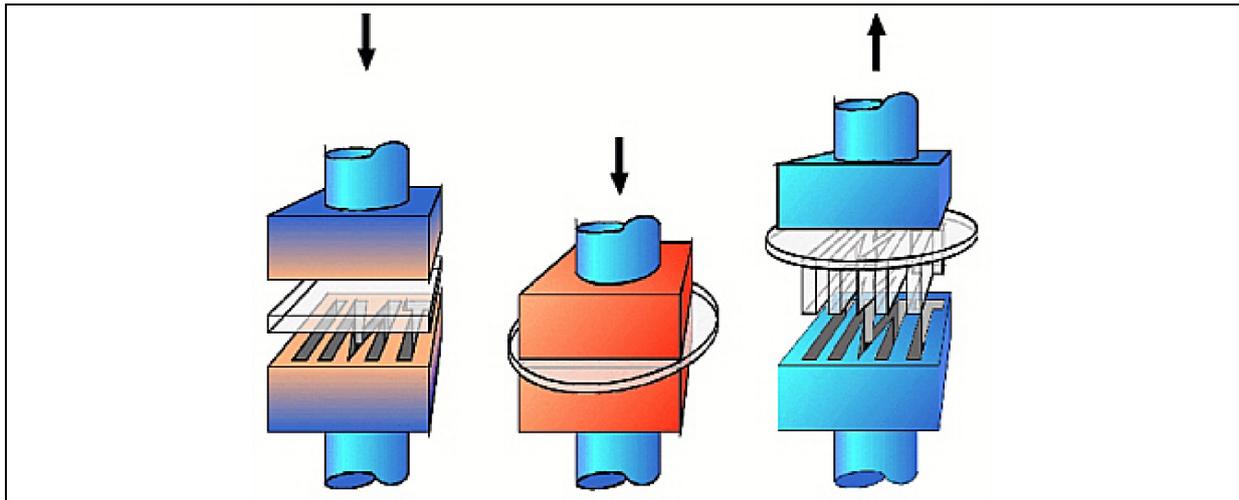


Abb. 2.13: Verfahrensablauf beim Heißprägeprozess für mikrostrukturierte Bauteile

Der Formeinsatz ist auf einer Seite der Prägemaschine befestigt (im Bild auf der Unterseite). Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich eine aufgeraute Metallplatte, mit der sich der Kunststoff während des Prägeprozesses verzahnt und über die die Entformung der Kunststoffstruktur erfolgt. Zum Prägen der Struktur werden die beiden Maschinenteile zusammengefahren, wobei gleichzeitig der Raum, in dem sich der Formeinsatz befindet, evakuiert wird, um Lunker in den Strukturen zu vermeiden. Außerdem wird die Temperatur des Formeinsatzes und der Kunststoffplatte über die Glasübergangtemperatur (T_g) des Kunststoffs (z.B. ca. 170 °C bei Polycarbonate bzw. 105 °C bei PMMA) erhöht. Dabei geht der Kunststoff in einen zähflüssigen Zustand über. Wenn die richtige Temperatur erreicht ist, wird der Formeinsatz typischerweise mit einem Prägekraft von maximal von 40 bis zu 80 kN (wobei die maximale Prägekraft der Anlage 250 kN beträgt) in den Kunststoff gepresst, so dass dieser die Hohlräume des Formeinsatzes ausfüllt. Nach der erfolgten Umformung wird die Temperatur wieder unter T_g abgesenkt, wobei der Kunststoff sich wieder verfestigt. Bei einer Temperatur von ca. 85 °C bei PMMA werden die Strukturen entformt, indem die beiden Maschinenhälften auseinander gefahren werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass keine Querbewegung erfolgt, da diese die Strukturen zerstören würde. Dies wird durch eine präzise Führung der Maschinenteile sichergestellt.

2.3 Konzept zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen

Basierend auf den geschilderten Möglichkeiten des LIGA-Verfahrens sollen im Rahmen dieser Arbeit Wellenleiterstrukturen in Polymer mit Führungsstrukturen zur passiven Ankopplung von Glasfasern hergestellt werden. Abbildung 2.14 zeigt prinzipiell die Vorgehensweise und in den Abbildungen 2.14/2 und 2.14/3 die Einzelschritte.

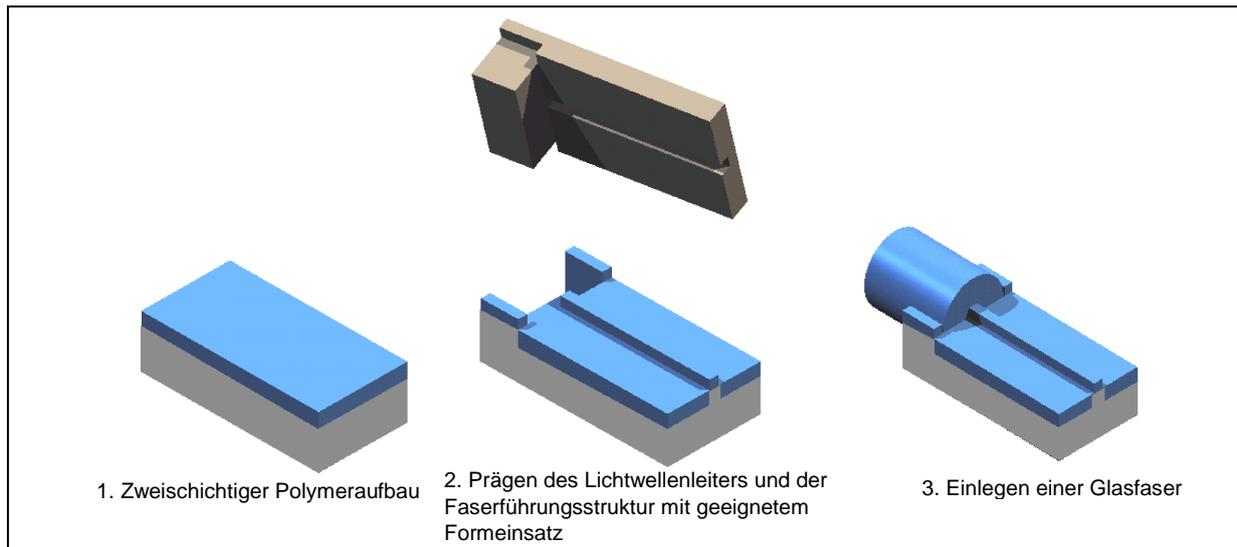


Abb. 2.14: Herstellung von Rippenwellenleiter durch Heißprägen mittels eines gestuften Formeinsatzes

Zur Herstellung dieser Strukturen werden in ein zweischichtiges Polymer Rippenwellenleiter und Faserführungsstrukturen eingepreßt. Dazu wird in einem ersten Schritt ein Polymersubstrat mit einer Polymerschicht beschichtet, die eine Dicke besitzt, die der Höhe der Wellenleiterstruktur entspricht, und einen höheren Brechungsindex aufweist als das Polymersubstrat (Abb. 2.14/1). Dieser Polymeraufbau wird mit einem gestuften Formeinsatz durch Heißprägen umgeformt (Abb. 2.14/2). Während dieses Umformungsprozesses wird der Wellenleiter je nach Tiefe der Wellenleiterstruktur ausschließlich in der wellenleitenden Schicht (siehe Abb. 2.15 a) oder als zweistufige Rippe aus wellenleitendem Material und darunterliegendem Substratmaterial geformt (siehe Abb. 2.15 b).

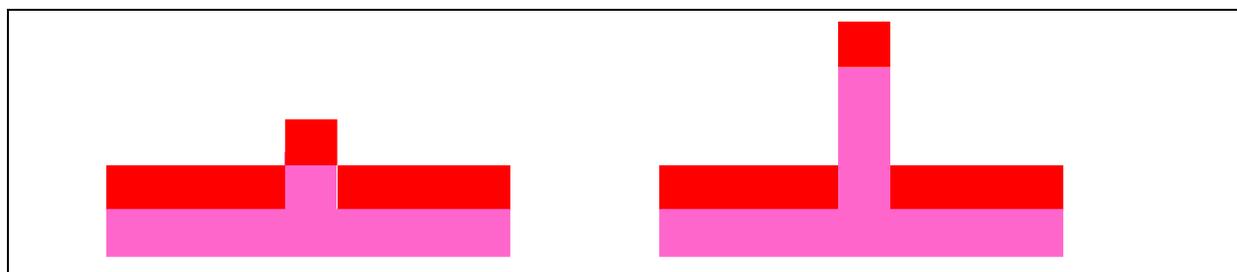


Abb. 2.15: Geprägte Rippe in Abhängigkeit der Tiefe der Grabenstruktur auf dem Formeinsatz (a: Grabentiefe ist der wellenleitenden Schicht angepasst, ca. 3 μm ; b: Grabentiefe ist größer als die wellenleitende Schicht ca. 10 μm)

Bezüglich des Wellenleiteraufbaus ist es wichtig, Polymermaterialien zu verwenden, die Thermoplaste sind und auf einander haften (siehe Kap. 5.1). Ein Vorteil dieser Herstellungsmethode ist es, dass, sofern der Graben des Formeinsatzes eine ausreichende Tiefe besitzt, die Dicke der nach dem Heißprägen entstehenden Wellenleiter nicht von der Tiefe des Grabens des Formeinsatzes sondern von der Dicke der vorher auf dem Polymer-Substrat aufgeschleuderten Wellenleiterschicht abhängt (siehe Abbildung 2.14b). Die Breiten der Wellenleiter aber auch die Dimensionen der Faserführungsstrukturen hängen von den Geometrien der Strukturen auf dem Formeinsatz ab.

Um eine passive Positionierung der Fasern mit einem Außendurchmesser von 125 μm vor den Wellenleiterstrukturen sicherzustellen, müssen Vertiefungen erzeugt werden, die zentrisch zu den Wellenleitern liegen, eine Breite von 125 μm aufweisen (Beides ist durch

das Layout auf der Maske gegeben.) und eine Tiefe gerechnet von der Oberseite der Wellenleiterstrukturen von

$$T [\mu\text{m}] = (125/2) [\mu\text{m}] + d_w/2 [\mu\text{m}]$$

mit d_w = notwendige Dicke des Wellenleiters

aufweisen. Für den Fall eines 3 μm dicken Wellenleiters muss die Tiefe 64 μm betragen. Diese Tiefe muss bei der Herstellung des gestuften Formeinsatzes sichergestellt werden.

Die zur Realisierung dieses Konzeptes notwendigen Formeinsätze werden durch das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Verfahren hergestellt. Abbildung 2.16 zeigt nochmals schematisch die Herstellung derartiger Formeinsätze. Ausgangspunkt ist ein gestuftes Substrat mit einer präzisen Stufe (Abb. 2.16 a), das vollständig mit Resist überschichtet ist (Abb. 2.16 b). Der Abstand T zwischen Resistoberfläche und untere Ebene des Substrates muss 64 $[\mu\text{m}]$ betragen. Nach der Belichtung und Entwicklung dieses Substrataufbaus entsteht die Form für die Wellenleiterstruktur in der Dicke der auf dem Plateau des Substrates verbliebenen Resistschicht und die Formen für die Faserführungsstrukturen mit der unteren Begrenzung durch das Substrat und der rechten und linken Begrenzung durch die lithographisch erzeugten Strukturen (Abb. 2.16 c) Abbildung 2.16 d zeigt den aus diesem Substrat erzeugten Formeinsatz mit den entsprechenden Negativ-Strukturen für Faserführungsstrukturen und Wellenleiter.

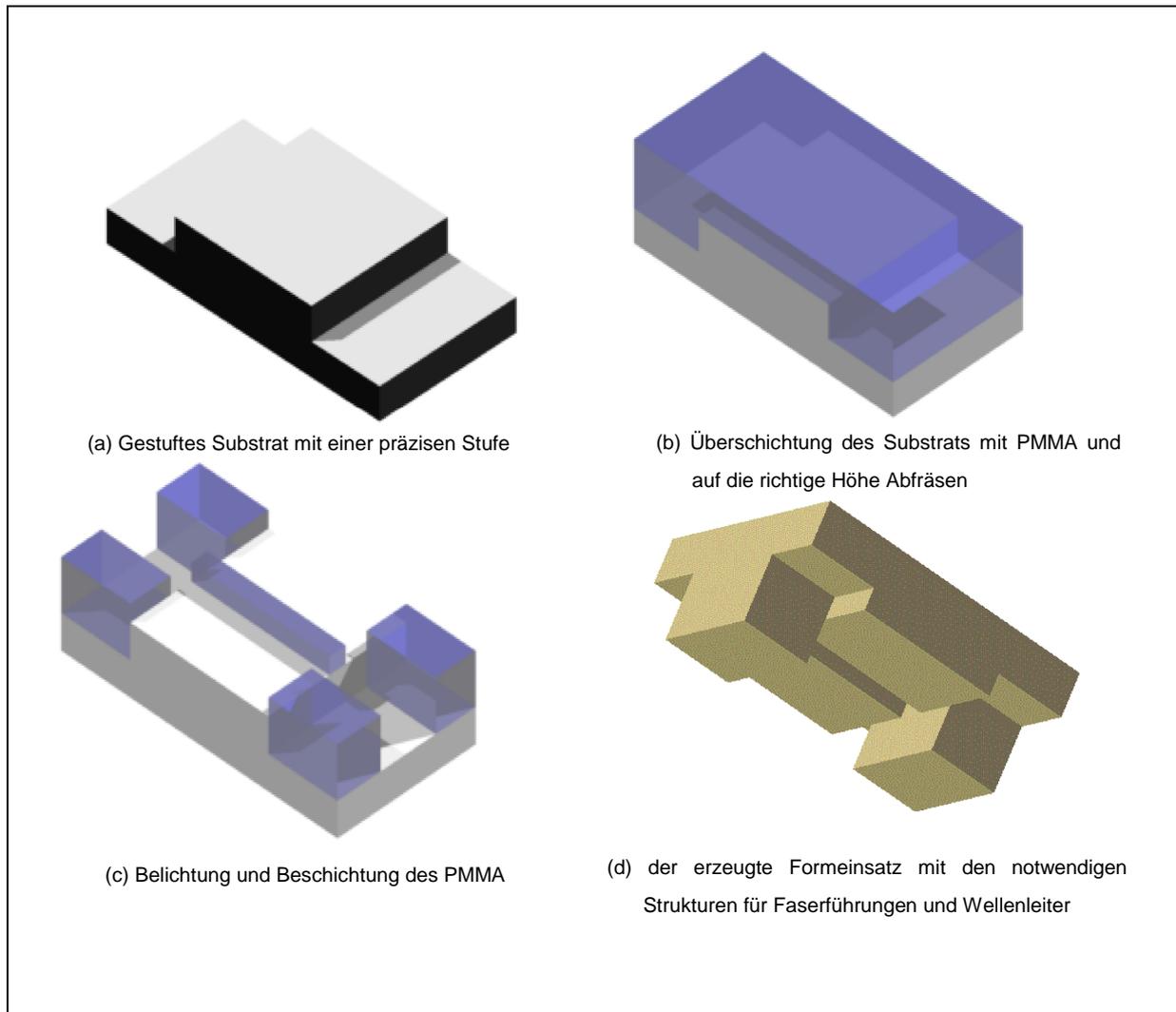


Abb. 2.16: Ein durch das modifizierte LIGA-Verfahren hergestellter gestufter Formeinsatz

Neben der Erzeugung der präzisen Stufe des Formeinsatzes ist es wichtig, dass die Wellenleiter richtig relativ zu der Stufenstruktur des Substrates liegen. Um dies sicherzustellen muss die Justierung der Röntgenmaske während der Bestrahlung ausreichend genau sein, außerdem müssen die Toleranzen der Justierung im Design abgefangen werden. Abbildung 2.17 zeigt zwei Möglichkeiten der Lage der Strukturen aufgrund der Toleranzen in der Justierung. In Abbildung 2.17 a wurde die Toleranz so gewählt, dass die Resiststruktur erst nach der Kante der Stufe beginnt. Dies hat den Vorteil, dass die Balkenstrukturen nur auf dem Plateau erzeugt werden müssen und damit stabiler sind. Nachteilig ist allerdings, dass die Faser nicht ganz an den Wellenleiter herangebracht werden kann, da deren Endposition von der Kante der Stufe bestimmt wird. Dies führt zu Einkoppelverlusten. In Abbildung 2.17 b wurde das Design so gestaltet, dass unabhängig von der Toleranz die Wellenleiterstruktur immer in die Faserführungsstruktur reicht. Damit kann die Faser direkt angekoppelt werden. Nachteilig ist, dass die schmale Wellenleiterstruktur über eine Länge von wenigen Mikrometern (in der Regel ca. $10\ \mu\text{m}$) über die gesamte Strukturhöhe verläuft und damit in diesem Bereich nicht mehr formstabil sein kann. Das Risiko ist allerdings gering und somit wurde diese Variante im Hinblick auf die bessere Einkopplung gewählt.

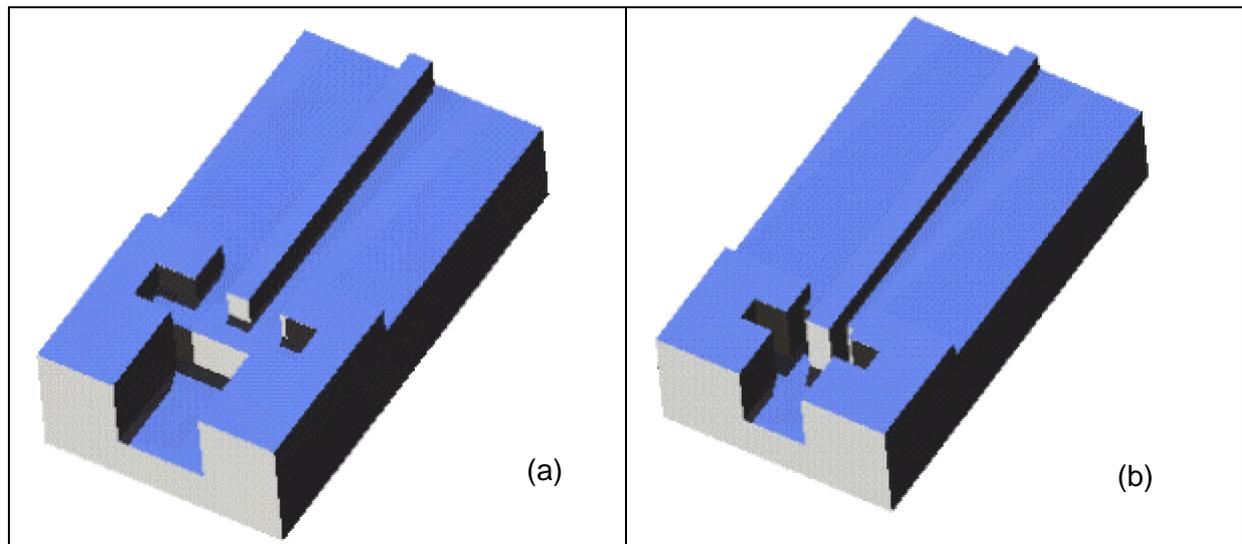


Abb. 2.17: Folgen von Justierfehler beim Bestrahlung von PMMA auf einem gestuften Substrat (Wellenleiter ist im Design kürzer und liegt auf der Stufe; b: Wellenleiter ist länger als die Stufe und reicht in den Graben)

3 Simulation und Layout

Im Rahmen dieser Arbeit sollen monomodige Wellenleiterstrukturen als Rippenwellenleiter in einem zweischichtigen Polymeraufbau durch Prägetechnik realisiert werden. Um entsprechende Strukturen für ein Testlayout zu entwerfen und Vorgaben für die Auslegung des Formeinsatzes zu erhalten, wurden Simulationen durchgeführt. Nach einer kurzen Einführung in die Wellenleitertheorie und einer Beschreibung des verwendeten Simulationsprogramms werden die Ergebnisse dargestellt und entsprechende Schlüsse für das Layout gezogen. Am Ende des Kapitels wird das Testlayout vorgestellt und beschrieben.

3.1 Theorie der Wellenleiter

3.1.1 Beam-Propagation-Method (BPM)

Die Simulationen für den Entwurf gezielter Wellenleiter wurden mit BeamPROP durchgeführt. BeamProp ist ein Programm, womit man die Propagation von Lichtwellen in üblichen Wellenleitern simulieren kann. Dazu kann das Programm als Mode-Solver benutzt werden [21]. Diese Simulationen erfolgen durch die Verwendung von Algorithmen [22] für die Lösung von Maxwell-Gleichungen. Diese Lösungen für die Lichtausbreitung können vereinfacht werden, wenn man die Effekte der Polarisation vernachlässigt. Durch diese Annahme ergibt sich die bekannte Helmholtz-Gleichung für skalare Felder [23].

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \bar{E} = 0 \quad (3.1)$$

Eine zweite wichtige Vereinfachung der Gleichung erfolgt durch die Annahme, dass die Ausbreitung des Lichtes nur entlang einer Achse erfolgt „Paraxiality condition“. Unter diesen Bedingung ergibt sich die Beam-Propagation-Methode (BPM), die man für die Approximation der Wellengleichungen für monochromatische Wellen benutzt. Durch diese Methode werden die Gleichung numerisch gelöst [24]. Die „paraxiality condition“ kann begrenzt dadurch umgegangen werden, dass man die „Pade-Approximation“ benutzt [25]. In diesem Fall verwendet man „Wide-Angle-Beam-Propagation-Method“ [26].

Die folgende Gleichung stellt die dreidimensionale BPM-Gleichung dar. Falls die Abhängigkeit von y vernachlässigt wird, ergibt sich die zweidimensionale BPM.

$$\frac{\partial \hat{E}}{\partial z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left[\frac{\partial^2 \hat{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{E}}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) \hat{E} \right] \quad (3.2)$$

wobei:

$$E(x, y, z, t) = \bar{E}(x, y, z) e^{-j\omega t} \quad (3.3)$$

$$\bar{E}(x, y, z) = \hat{E}(x, y, z) e^{j\bar{k}z} \quad (3.4)$$

E : ist das skalar elektrische Feld. \hat{E} : ein sich langsam veränderndes Feld (Slowly-Varying-Field)

$k = k_0 n$: ist die Ausbreitungskonstante des Lichts in dem Medium. $k_0 = 2\pi / \lambda$ die Ausbreitungskonstante in dem Vakuum, n : Der Brechungsindex des Mediums. \bar{k} : Die mittlere Variation der Phase des Feldes \bar{E} .

3.1.2 Vektorielle BPM

Die Beam-Propagation-Methode ist eine der wichtigsten Methoden für die Simulationen des Lichtstrahles in Wellenleitern (z.B. Glasfaser). Diese Methode ist aber nur verwendbar für skalare Wellengleichungen, d.h. die Polarisation des Lichtes wird vernachlässigt. Für die meisten praktischen Anwendungen ist der Brechzahlhub zwischen dem Mantel und dem Kern des Wellenleiters sehr klein, und daher können die vektoriellen Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen vernachlässigt werden. Diese Eigenschaften müssen aber in Betracht gezogen werden, wenn die Wellenleiter hohe Brechzahlen besitzen, oder wenn der Wellenleiter sehr lang im Vergleich zu der Wellenlänge ist [27].

Polarisationseffekte können berücksichtigt werden, wenn man die Tatsache in Betracht zieht, dass das elektrische Feld ein Vektor ist, und wenn die Ableitung von den vektoriellen Wellengleichungen ausgeht. Die transversale Feld-Komponenten \hat{E}_x, \hat{E}_y können für langsam verändernde Felder wie folgt beschrieben werden [27].

$$j \frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} = A_{xx} \hat{E}_x + A_{xy} \hat{E}_y \quad (3.5)$$

$$j \frac{\partial \hat{E}_y}{\partial z} = A_{yx} \hat{E}_x + A_{yy} \hat{E}_y \quad (3.6)$$

Wobei

$$A_{xx} \hat{E}_x = \frac{1}{2n_0 k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 \hat{E}_x) \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \hat{E}_x + (n^2 - \bar{n}_0^2) k^2 \hat{E}_x \right\} \quad (3.7)$$

$$A_{xx} \hat{E}_x = \frac{1}{2n_0 k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 \hat{E}_x) \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \hat{E}_x + (n^2 - \bar{n}_0^2) k^2 \hat{E}_x \right\} \quad (3.8)$$

$$A_{xy} \hat{E}_y = \frac{1}{2n_0 k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} (n^2 \hat{E}_y) \right] - \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \hat{E}_y \right\} \quad (3.9)$$

$$A_{yx} \hat{E}_x = \frac{1}{2n_0 k} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 \hat{E}_x) \right] - \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \hat{E}_x \right\} \quad (3.10)$$

Wobei \bar{n}_0 der Referenzbrechungsindex ist (meist Brechungsindex vom Vakuum = 1). Die Gleichungen beschreiben die volle vektorielle BPM (Full Vectorial BPM). Die Gleichungen 3.5 und 3.6 zeigen dass die transversalen elektrischen Feldkomponenten Polarisationsabhängig sind. A_{xy}, A_{yx} erklären die Polarisationskopplung und die Erscheinung von hybriden Moden wegen geometrischer Effekte. Der Einfluss dieser Operatoren ist sehr schwach bei üblichen Wellenleiter-Formen und ist nur von Bedeutung, wenn die Wellenleiter so ausgelegt sind, dass die Kopplung stark wird [27].

Für $A_{xy}=A_{yx}=0$ ergibt sich die halb vektorielle BMP. In diesem Fall wird die Kopplung zwischen den transversalen Feld-Komponenten nicht berücksichtigt, was die Rechnung erheblich vereinfacht.

3.1.3 Numerische Lösung und Randbedingung

Die Gleichungen 3.5, 3.6 sind partielle Differentialgleichungen, die in z-Richtung integriert werden können. Diese Integration erfolgt durch mehrere numerische Methoden. Eine wichtige Methode heißt Split-Step-Fourier Methode [28]. Eine andere wichtige Methode heißt Crank-Nicholson-Scheme [29]. Diese Methode basiert auf dem Finite-Difference-Ansatz, und ist zur Standardmethode geworden. Die gesamte Vorgehensweise nach dem Crank-Nicholson-Scheme wird in der Literatur FD-BPM bzw. BPM genannt [30].

Der Finite-Difference-Ansatz erlaubt die Beschreibung des Lichtfelds durch diskrete Werte auf einem Gitter in der transversalen Ebene (x,y). Durch mehrere dieser Ebenen, die sich in der Ausbreitungsrichtung befinden, wird das propagierte Feld vertreten. Wenn die Feldwerte, die sich am Gitter in einer transversalen Ebene befinden, bekannt sind, kann man durch abgeleitete numerische Gleichungen diese Werte an der nächsten transversalen Ebene ausrechnen [22].

Wegen der numerischen Rechnung kann das Feld nur in einer endlichen Domäne ausgerechnet werden. Wenn die Gleichungen an Grenzgebieten angewendet werden, erscheinen unbekannte Werte an Gitterpunkten, die nicht zum Rechnungsgebiet gehören. Diesen Werten müssen geeignete Werte zugewiesen werden, damit man vermeidet, dass künstliche Reflexionen des Lichtfeldes an Grenzgebieten stattfinden. Mehrere Methoden für das Minimieren der Lichtreflexionen wurden studiert.

Eine andere Methode ist die (TBC) (eng. Transparent Boundary Condition). Diese Methode erlaubt, dass das Licht aus der Domäne des Berechnungsgebietes gestrahlt wird [22].

3.2 Auswahl verschiedener Einkopplungsfelder, Wellenleiterformen, Monitortypen

Je nach Simulation wurde das entsprechende Feld und Wellenleiterform ausgewählt. Als Monitortyp wurde immer (Launch) verwendet. (Siehe Anhang 3)

3.3 Simulationsergebnisse

Für die Simulation von Wellenleitern erlaubt das Programm BeamPROP:

3.3.1 Zweidimensionale Simulationen für Wellenleiter

Entscheidend für die Funktionsweise eines Wellenleiters ist dessen Dispersionsdiagramm. Ein Dispersionsdiagramm beschreibt, bei welcher Kombination von Wellenlänge und Dicke des Wellenleiterkerns bestimmte Moden erscheinen. Darüber hinaus kann man aus solchen Charts den entsprechenden effektiven Brechungsindex und die daraus ermittelten ($n_{eff} = n_1 \sin \theta$) Reflexionswinkel ablesen, wobei n_1 der Brechungsindex des Wellenleiterkerns ist. Jede Materialkombination führt dabei zu einem eigenen Modenchart. Für den Fall eines sehr kleinen Brechzahlhubes (Differenz der beiden Brechzahlindizes) von

0,02 (schwache Wellenführung) und einem Brechungsindex von 1,5 wurde exemplarisch das entsprechende Modenchart erstellt. Da der Brechzahlhub relativ klein ist, kann man annehmen, dass die Kurven für TE (Wellen mit E -Polarisation parallel zur Grenzfläche) und TM (Wellen mit H -Polarisation parallel zur Grenzfläche) Moden auf einander liegen. Abbildung 3.1 zeigt diesen Modenchart. Man erkennt, dass die erste Mode dann auftritt, wenn die Breite des Wellenleiters etwa 2,5 mal so groß ist, wie die verwendete Wellenlänge ($1,55 \mu\text{m}$), für $1,55 \mu\text{m}$ muss also der Wellenleiter knapp $4 \mu\text{m}$ breit sein. Die zweite Mode beginnt bei etwa dem 4,5 fachen der Wellenlänge also bei knapp $7 \mu\text{m}$.

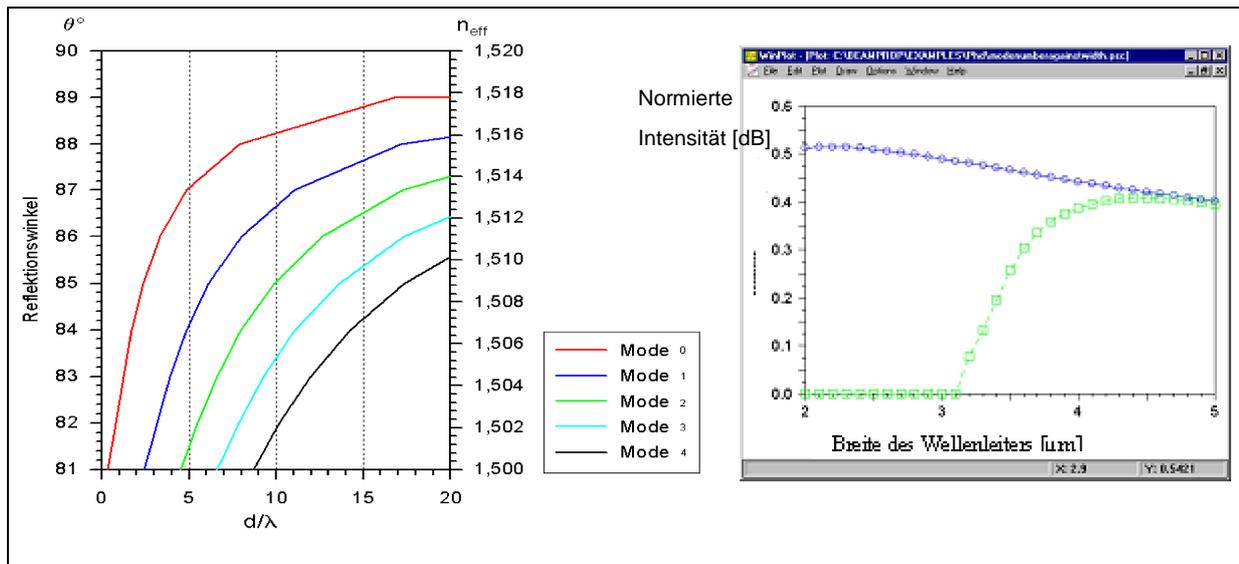


Abb. 3. 1: Analytisch berechneter Modenchart für einen zweidimensionalen Wellenleiter (Brechzahl: 1,5; Brechzahlhub: 0,02, d : Dicke des Wellenleiters, λ : Wellenlänge in Vakuum)

Abb. 3. 2: : Simulierte normierte Intensität der nullten (Blau) und ersten Mode (Grün) bei einem zweidimensionalen Wellenleiter (Brechzahl: 1,5; Brechzahlhub: 0,02)

Um festzustellen, ob die analytischen Ergebnisse mit der Simulation dieser Kombination übereinstimmen, wurde mit dem Programm BeamProp ein Wellenleiter dieser Kombination simuliert. Das Ziel der Simulation war es, auszurechnen, bei welcher Breite des Wellenleiters Leistung in der ersten Mode auftritt (siehe Abbildung 3.2). Die sich ergebende Kurve zeigt, dass bei einer Wellenleiterbreite von $3,1 \mu\text{m}$ die Leistung der ersten Mode anfängt zuzunehmen. Sie erreicht ihr Maximum bei einer Breite von ca. $4,5 \mu\text{m}$.

3.3.2 Dreidimensionale Simulationen für Wellenleiter

Die Wellenführung in integriert-optischen Schaltungen und in Halbleiterlasern erfordert neben der vertikalen Strukturierung wie beim Schichtwellenleiter zusätzlich eine laterale Begrenzung. Ein Kernbereich (Brechzahl n_1) der Höhe h wie beim Schichtwellenleiter ist in lateraler Richtung auf die Breite b beschränkt. Das umgebende Medium hat die Brechzahl ($n_2 < n_1$) [31]. Das Profil des Brechungsindex und die Geometrie des simulierten Wellenleiters ist in Abbildung 3.3 gezeigt. Auf dem Substrat (n_2) befindet sich eine Rippe mit dem Material mit dem höheren Brechungsindex (n_1), diese Rippe ist von Luft (Mantel, $n_3 = 1$) umgeben. Der Wellenleiter hat eine Breite und eine Höhe von $3 \mu\text{m}$.

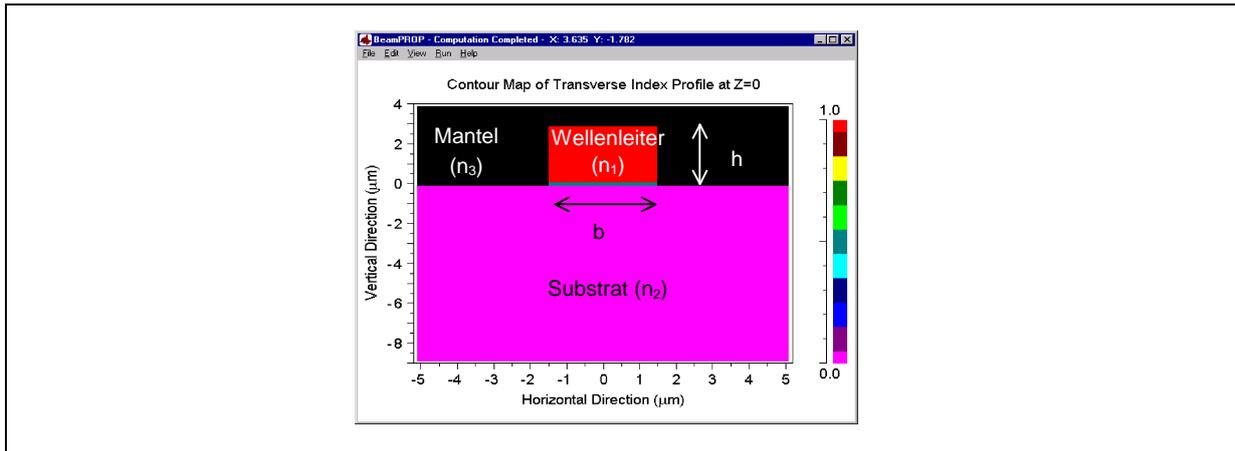


Abb. 3.3: Brechzahlprofil und Geometrie der simulierten Wellenleiter (Breite [b]: $3\mu\text{m}$, Höhe [h]: $3\mu\text{m}$)

Für die oben angegebene Brechzahl-Kombination wurden Rippenwellenleiter simuliert, wobei ihre Breite und Höhe nach und nach in kleinen Schritten vergrößert wurden. Dabei wurde betrachtet, bei welchen Dimensionen die Rippenwellenleiter anfangen zweimodig zu werden. Die Ergebnisse für $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ und $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ sind in Abbildung 3.4 und 3.5 gezeigt. Da mit dem im IMT vorhandenem Elektronenstrahlschreiber Schichten über $3\mu\text{m}$ Höhe schwer zu schreiben sind, wurde eine Höhe von $3\mu\text{m}$ für die Wellenleiter angenommen, um auch direkt mit dem Elektronenstrahlschreiber erzeugte Strukturen einsetzen zu können. Durch diese Simulation wurde festgestellt, dass ein $3\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ großer Rippenwellenleiter bei einer Wellenlänge von $1,55\mu\text{m}$ einmodig bleibt. Diese Dimensionen werden als Basis für die nachfolgenden Simulationen festgehalten.

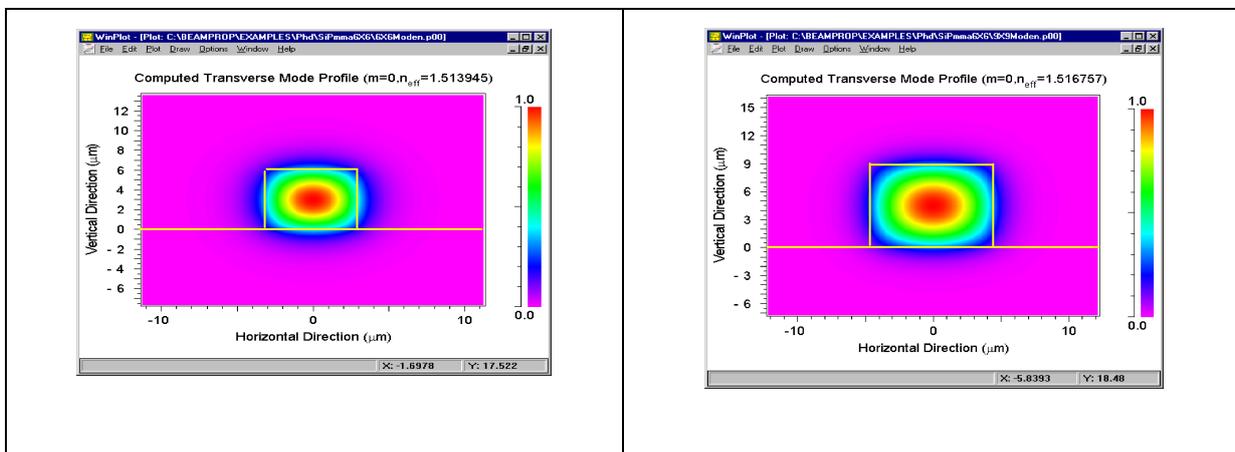


Abb. 3. 4: Grundmode eines Rippenwellenleiters mit einem Querschnitt von $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ($n_1=1.5$, $\Delta n=0.02$, $\lambda=1,55\mu\text{m}$)

Abb. 3. 5: (a) Grundmode eines Rippenwellenleiters mit einem Querschnitt von $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ ($n_1=1.5$, $\Delta n=0.02$, $\lambda=1,55\mu\text{m}$)

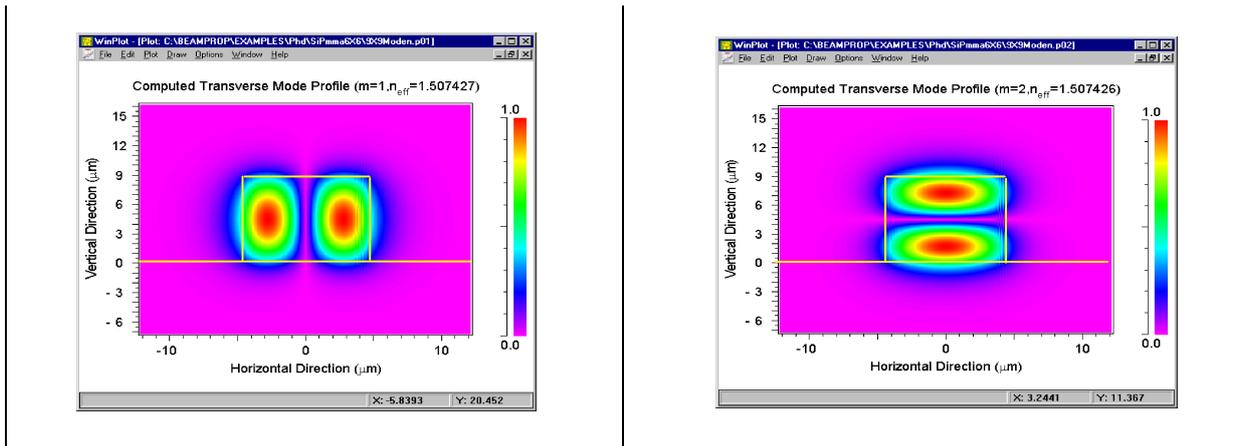


Abb.3.5: (b) Erste Mode eines 9 μm X 9 μm Rippenwellenleiters ($n_1=1.5$, $\Delta n=1.52$, $\lambda=1,55 \mu\text{m}$)

3.4 Einfluss des Wellenleiterversatzes auf die Koppelverluste

Bei der Herstellung von Wellenleiterstrukturen mit Faserführungsstrukturen sind die Einkoppelverluste aufgrund einer Fehlposition der Faser zum Wellenleiter wichtig, da diese die Toleranzen in den Strukturen festlegen. Aus diesem Grunde wurden diese Verluste simuliert, wobei als Test für das Programm und um ein Gefühl für die Verluste zu bekommen, zunächst die Koppelverluste bei einer Faser-Faser-Kopplung betrachtet wurden.

3.4.1 Glasfaser-Glasfaser-Kopplung

Bei der Simulation einer Glasfaser-Glasfaser-Kopplung wurden die Designparameter von einer einmodigen Glassfaser ($n_{\text{Mantel}}=1,446$, $n_{\text{Kern}}=1,465$, Glassfaserkerndurchmesser=9.3 μm , Firma Lucent) [32] verwendet. Die Glasfaserstirflächen wurden zentriert gegen einander positioniert. Um die Dämpfung als Funktion der Verschiebung zu ermitteln, wurde eine Faser in Bezug zur anderen in kleinen Schritten lateral verschoben. Dabei wurde die abgestrahlte Energie vom Ausgang der verschobenen Glassfaser im Bezug zur Lichtenergie der Eingangsfaser ausgerechnet. Die Verluste in dB sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Dämpfung nimmt mit zunehmender Verschiebung parabelförmig zu; sie beträgt z.B. bei einer Verschiebung von ca. 2.5 μm etwa 1 dB. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit Werten aus der Literatur und zeigen, dass das Programm richtig arbeitet.

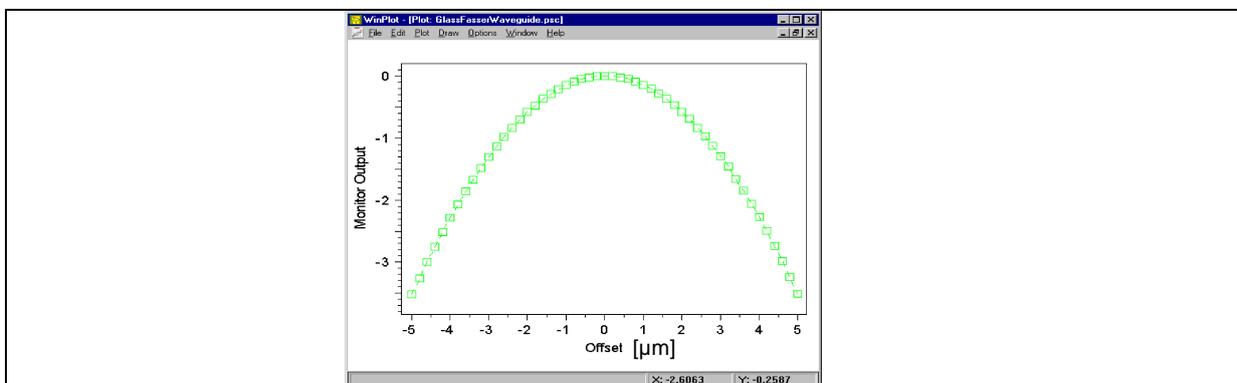


Abb. 3. 6: Einkoppelverluste bei Glasfaser-Glasfaser-Kopplung bei 1.55 μm als Funktion des Versatzes der beiden Fasern.

3.4.2 Glasfaser-Wellenleiter-Kopplung

Um die Einkoppelverluste abzuschätzen, die durch eine Dejustage der Glasfaser zu einer Wellenleiterstruktur entstehen, wurde die Einkopplung eines Gaußförmigen Feldes in den oben charakterisierten Wellenleiter (Querschnitt: $5\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$, Brechungsindex Substrat: 1,5, $\Delta n=0,02$, Wellenleiterlänge= $1000\ \mu\text{m}$) simuliert. Das Maximum des Feldes wurde in kleinen Schritten in Bezug zu dem Zentrum der Wellenleiterstirnfläche verschoben. Dabei wurde jeweils das Verhältnis der Leistung des Gaußförmigen Feldes am Eingang des Wellenleiters zur Leistung des sich am Ausgang des Wellenleiters ausbreitenden Feldes berechnet. Der Einfluss einer vertikalen Dejustage ist in Abbildung 3.7, die Wirkung des lateralen Versatzes ist in Abbildung 3.8 gezeigt.

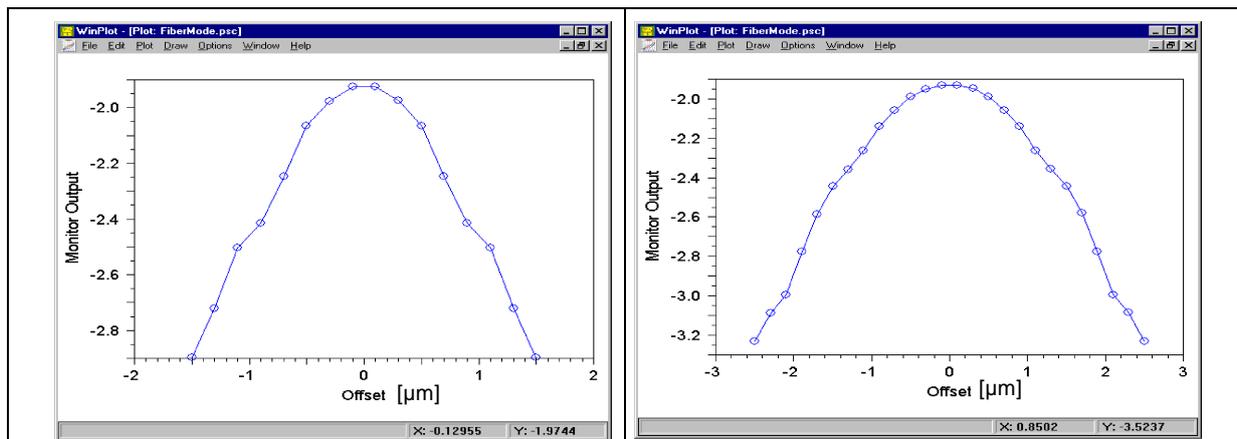


Abb. 3. 7: Einkoppeleffektivität einer Glasfaser-Wellenleiter-Schnittstelle mit zunehmendem vertikalen Versatz

Abb.3.8: Einkoppeleffektivität einer Glasfaser-Wellenleiter-Schnittstelle mit zunehmendem lateralen Versatz

Wie aus den Abbildungen zu erkennen beträgt die Dämpfung bereits bei einer nicht vorhandenen Dejustierung ca. 1,8 dB, was auf eine Modenfeldfehlانpassung aufgrund der unterschiedlichen Querschnittsgeometrie zurückzuführen ist. Die Dämpfung nimmt im Falle eines vertikalen Versatzes von ca. $1,4\ \mu\text{m}$ um 1 dB zu, im Falle des lateralen Versatzes liegt dieser Wert bei ca. $2,2\ \mu\text{m}$. Das bedeutet, dass die Fehlpositionierung der Faser zum Wellenleiter nicht größer als $1\ \mu\text{m}$ sein sollte, um die Dämpfungswerte des Gesamtaufbaus in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

3.5 Dämpfungsverluste bei gekrümmten Rippenwellenleitern

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Rippenwellenleiter mit Faserführungsstrukturen hergestellt werden, die nicht nur in gerader Richtung sondern auch gekrümmt verlaufen. Um festzustellen, welche Krümmungen sinnvollerweise realisiert werden können, wurden für zwei Wellenleitervarianten (schwach führender Wellenleiter mit kleinem Brechzahlhub zum Substratmaterial von 0,03; stark führender Wellenleiter mit relativ großem Brechzahlhub von 0,0646) simuliert. Der Wellenleiter mit einem größeren Brechzahlhub entspricht der Materialkombination PC(Polycarbonat)/PMMA, die im Rahmen dieser Arbeit als Schichtaufbau ausgewählt wurde (siehe Kapitel 5.1). Die Form des Wellenleiters ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

3 Simulation und layout

Der Brechungsindex des Substrats wurde im Fall der schwachen Führung als 1,47 und der Brechzahlhub als 0,03 angenommen. Die Simulationen zeigen (Abbildung 3.9), dass, falls eine Gaußsche Mode in den einmodigen Wellenleiter eingekoppelt wird, ca. 25% der eingekoppelten Leistung in dem Wellenleiter nach 1000 μm bei einem Krümmungsradius von 300 μm erhalten bleiben. Der Rest geht bei der Einkopplung aufgrund von Modenfeldfehlanspassung verloren bzw. wird nach und nach auf dem Weg abgestrahlt. Je kleiner die Krümmungsradien sind, desto mehr Abstrahlverluste treten auf. Bei Einkopplung einer Grundmode eines identischen, geraden Wellenleiters, so dass keine Verluste aufgrund von Modenfeldfehlanspassung auftreten, erhöht sich die Lichtleistung am Ende des Wellenleiters auf 30 % (siehe Abbildung 3.10).

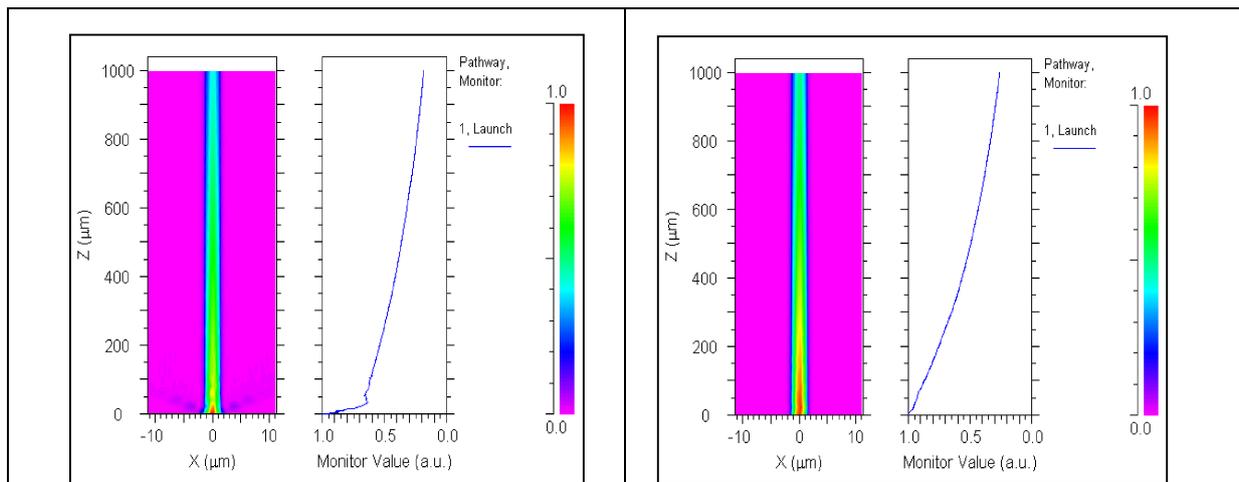


Abb. 3.9: Abstrahlverluste in einem gekrümmten einmodigen Rippenwellenleiter falls eine Gaußsche Mode eingekoppelt wird (schwache Führung). Links: Querschnitt der Leistungsverteilung über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abb. 3.10: Abstrahlverluste in einem einmodigen gekrümmten Rippenwellenleiter falls die Grundmode eines identischen, geraden Wellenleiter eingekoppelt wird

Wird ein identischer gekrümmter Wellenleiter simuliert, der mit einem Brechzahlhub von $\Delta n=0,0646$ eine stärkere Führung aufweist und bei dem der Brechungsindex des Substrates mit $n_{\text{Substrat}}=1,474$ dem Wert von PMMA angepasst wurde, treten bei Einkopplung der Grundmode eines identischen geraden Wellenleiters in dem gekrümmten Wellenleiter praktisch keine Abstrahlverluste auf (siehe Abbildung 3.11). Die Intensität am Ende des Wellenleiters ist nur auf 99,5 % abgefallen.

Abbildung 3.12 zeigt die Abstrahlverluste für diesen Fall in Abhängigkeit des Krümmungsradius. Es ist zu erkennen, dass sogar ein Krümmungsradius von 100 μm nur 0,5 dB Abstrahlverluste verursachen wird. Man kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Erhöhung des Brechzahlhubs erforderlich ist, um die Abstrahlverluste zu reduzieren.

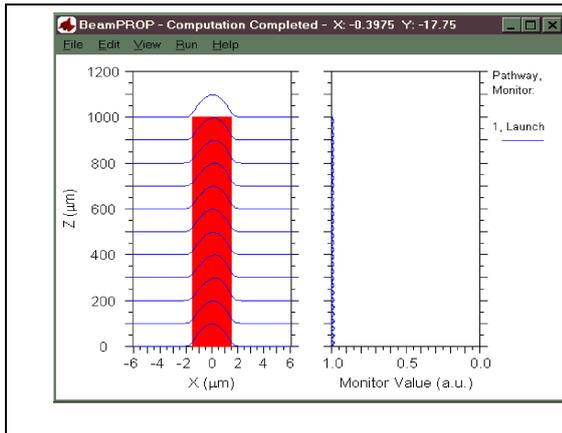


Abb. 3.11: Abstrahlverluste in einem gekrümmten einmodigen Rippenwellenleiter falls eine Gaußsche Mode eingekoppelt wird (starke Führung). Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

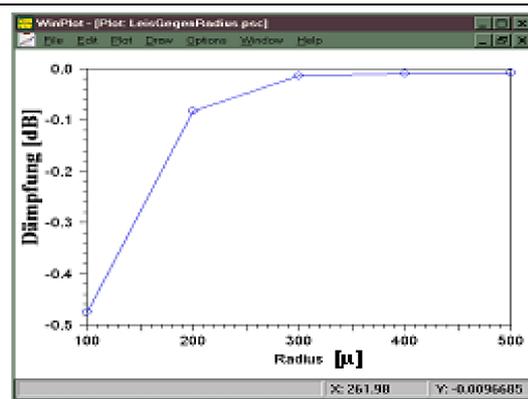


Abb. 3.12: Dämpfungsverhalten in Abhängigkeit der Krümmungsradien der Wellenleiter

Will man die Ursache, die für diese Unterschiede verantwortlich sind, erkennen, muss man die Grundmode der geraden und gekrümmten Wellenleiter sowohl für den Fall des kleinen und des großen Brechzahlhub betrachten.

In Abbildung 3.13 ist die Grundmode des geraden Wellenleiters mit kleinem Brechzahlhub dargestellt. Das Feld ist weit in das Substrat ausgedehnt, die Ausdehnung in den Luftbereich (Umgebung) ist gering. Wenn dieser Wellenleiter gekrümmt wird, verformt sich das ins Substrat weit ausgedehnte Feld und es treten Abstrahlverluste im Substrat auf (Abbildung 3.14). Der Verformungsgrad hängt von dem Krümmungsradius ab.

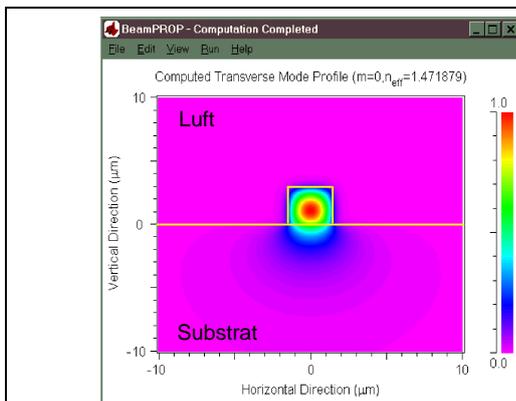


Abb. 3.13: Grundmode des geraden Wellenleiters mit kleinem Brechzahlhub

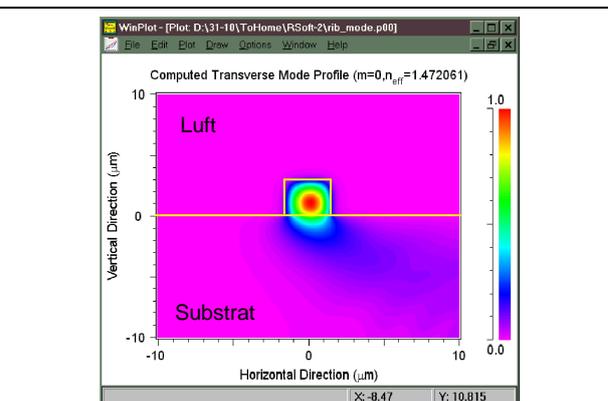


Abb. 3.14: Grundmode des nach links gekrümmten Wellenleiters mit kleinem Brechzahlhub. Krümmungsradius: 300 μm

Abbildung 3.15 zeigt die Grundmode des geraden Wellenleiters, dessen Brechzahlhub gegen das Substrat 0,0646 beträgt. Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen ist das Feld nicht weit ins Substrat ausgedehnt, aber trotzdem mehr als im Luftbereich. Wenn dieser Wellenleiter gekrümmt wird, verformt sich das im Substrat ausgedehnte Feld. Die Verformung in diesem Fall ist sehr gering (siehe Abbildung 3.16). Deswegen treten keine großen Abstrahlverluste bei 300 μm Krümmungsradius ins Substrat auf.

3 Simulation und layout

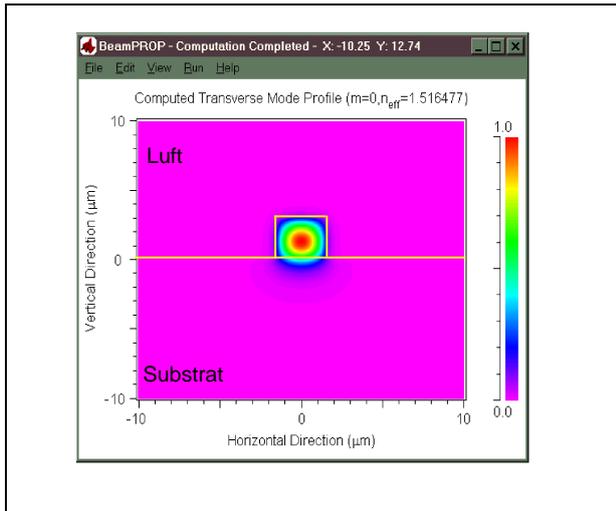


Abb. 3.15: Grundmode des geraden Wellenleiters mit großem Brechzahlhub

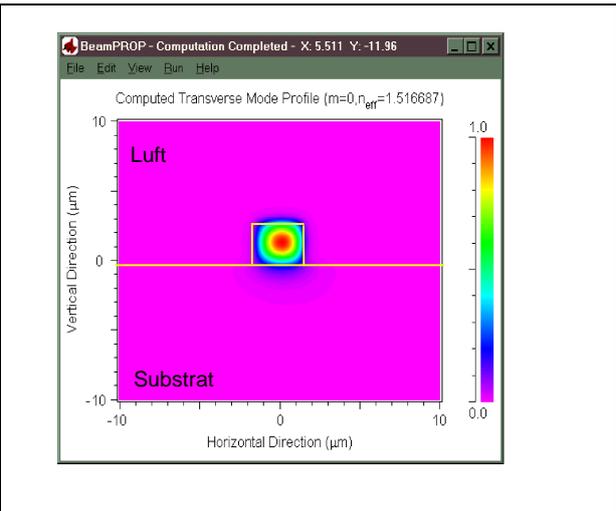


Abb. 3.16: Grundmode des nach links gekrümmten Wellenleiters mit großem Brechzahlhub. Krümmungsradius: 300 µm

3.6 Simulation von tiefgeprägten Wellenleitern (Ridges)

Um die Verluste im Substrat weiter zu vermindern wurden tiefgeprägte Wellenleiter (Ridges) simuliert. Unter einem tiefgeprägten Wellenleiter versteht man einen Wellenleiter dessen Rippenstruktur höher ist als die wellenleitende Schicht, d.h. die wellenleitende Schicht befindet sich auf einem Sockel, aus dem Substratmaterial oder einem weiteren beim Schichtaufbau einzufügenden oder sich ergebenden Material. Der Brechungsindex des Wellenleiters muss natürlich höher als der Brechungsindex des Substrats und der Umgebung sein, so dass er das Licht führen kann.

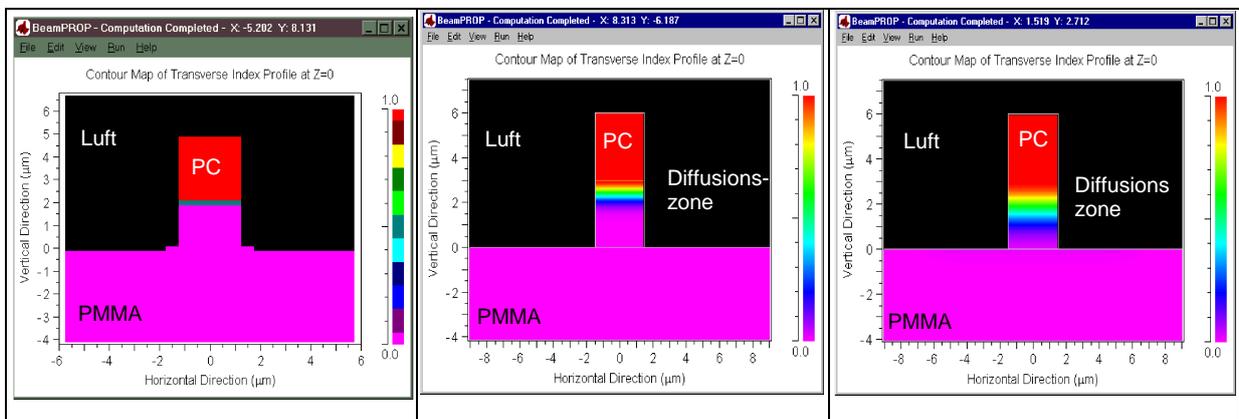


Abb. 3.17: Brechzahlprofil und Geometrie der simulierten Wellenleiter (Breite: 3 µm, Höhe: 3 µm, Step Index)

Brechzahlprofil und Geometrie der simulierten Wellenleiter (Breite: 3 µm, Höhe: 3 µm, Diffusionshöhe 0,75 µm)

Brechzahlprofil und Geometrie der simulierten Wellenleiter (Breite: 3 µm, Höhe: 3 µm, Diffusionshöhe 1,5 µm)

Abbildung 3.17 stellt 3 solcher Ridges dar. In dem ersten Ridge besteht der Wellenleiter aus PC (rot), das Substrat und der Sockel aus PMMA und die Umgebung (schwarz) aus Luft. In den beiden anderen dargestellten Ridges wird zwischen dem PC und dem PMMA eine Diffusionsschicht angenommen, die sich bei der Herstellung des Schichtaufbaus ergeben hat. Die Dicke der Diffusionsschicht beträgt 0,75 bzw. 1,5 µm.

3.6.1 Moden

Um die Größe der Wellenleiterstrukturen zu ermitteln wurde simuliert, welche Moden sich bei einer vorgegebenen Größe des Wellenleiters ausbilden können. Dabei wurde die Breite und die Höhe des Wellenleiters in $0,5 \mu\text{m}$ Schritten variiert.

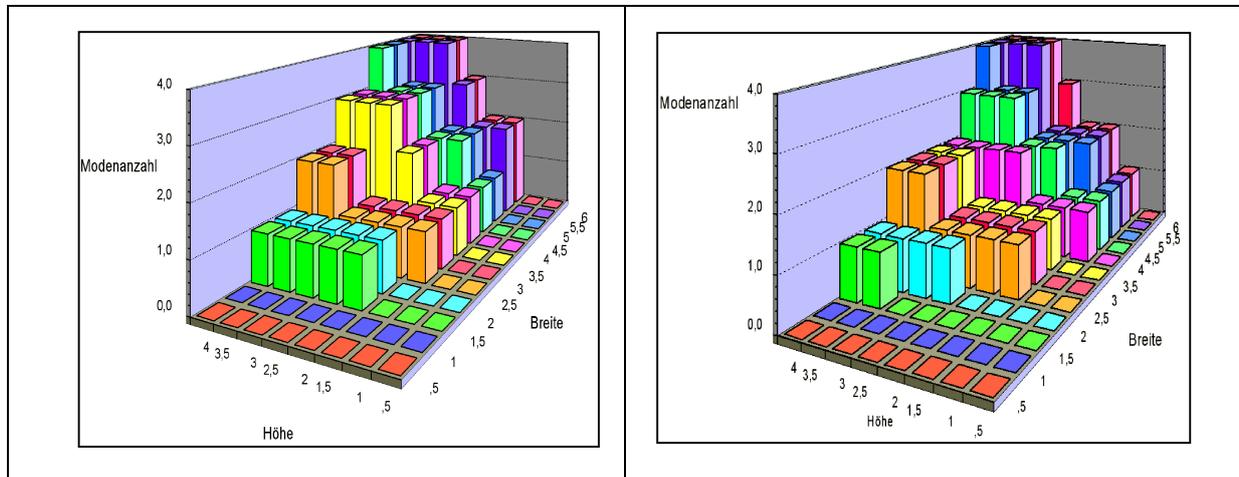


Abb 3.18: Anzahl der Moden durch eine TM-Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$, Stepindex)

Abb 3.19: Anzahl der Moden durch eine TE-Anregung (Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$, Stepindex)

Für den zweischichtigen Aufbau (Fall1 in Abbildung 3.17) zeigt Abbildung 3.18 das Ergebnis dieser Simulation für eine TM-Anregung. Es ist ersichtlich, dass für bestimmte Dimensionskombinationen keine Moden aufgrund der Asymmetrie der Wellenleiter entstehen können. Die Grundmode kann in Wellenleitern angeregt werden, deren Breite mindestens $1,5 \mu\text{m}$ und deren Höhe mindestens $2 \mu\text{m}$ beträgt. Die Wellenleiter dürfen bei einer Höhe von $3 \mu\text{m}$ maximal $3 \mu\text{m}$ breit sein, damit die erste Mode noch nicht angeregt wird.

Abbildung 3.19 zeigt das Ergebnis für eine TE-Anregung. In diesem Fall darf der Wellenleiter $3,5 \mu\text{m}$ breit und $3 \mu\text{m}$ hoch sein, um einmodig zu bleiben.

Damit ein Wellenleiter einmodig ist, muss er für beide, die TE und TM Anregung einmodig bleiben. Insofern ist die maximale Höhe und Breite $3 \mu\text{m}$, was die Dimensionen für die zu realisierenden Wellenleiter festlegt.

Abbildung 3.20 und 3.21 zeigt die Anzahl der Moden, die sich in den Wellenleiter durch eine TE und TM Anregung für die Diffusionshöhe von $0,75$ (Fall 2 in Abbildung 3.17) formen können. In diesem Fall bleiben die Wellenleiter bis $4,5 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ einmodig. Die Verhältnisse sind praktisch die gleichen für eine Diffusionshöhe von $1,5 \mu\text{m}$ (Abbildung 3.22, 3.23)

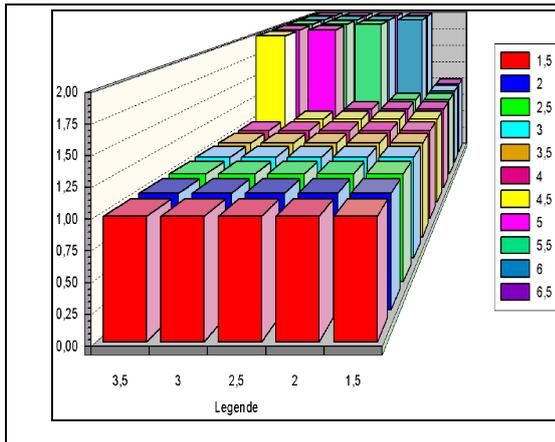


Abb 3.20: Anzahl der Moden durch eine TM-Anregung
Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$,
Diffusionslänge $0,75 \mu\text{m}$)

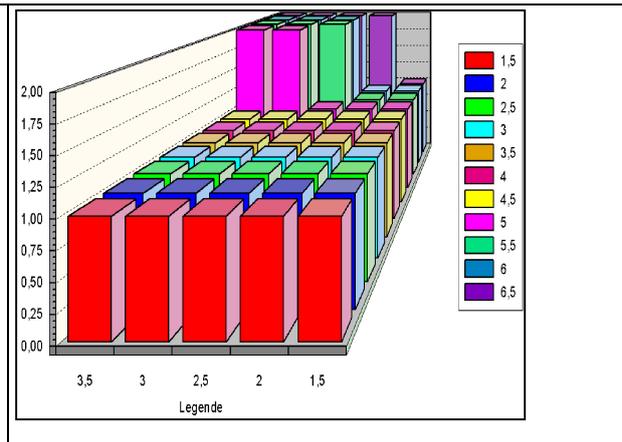


Abb 3.21: Anzahl der Moden durch eine TE-Anregung
Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$,
Diffusionslänge $0,75 \mu\text{m}$)

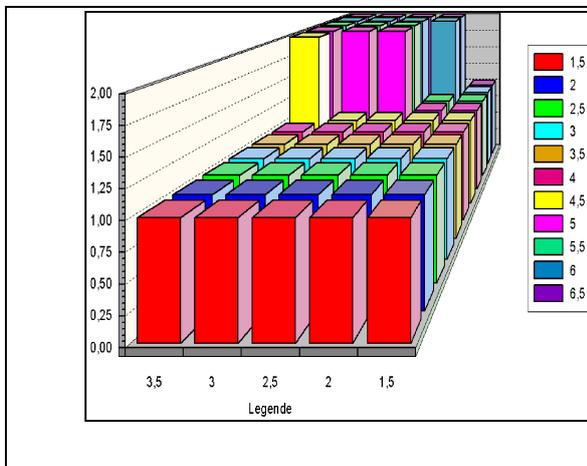


Abb 3.22 Anzahl der Moden durch eine TM-Anregung
Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$,
Diffusionslänge $1,5 \mu\text{m}$)

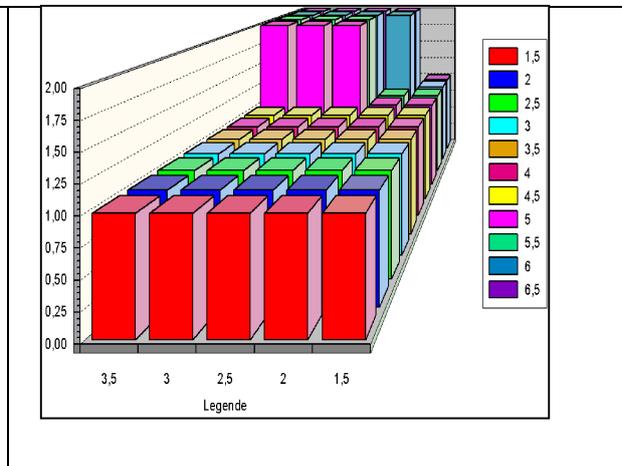


Abb 3.23: Anzahl der Moden durch eine TE-Anregung
Anregung ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, Luft/PC/PMMA, $\lambda=1,55$,
Diffusionslänge $1,5 \mu\text{m}$)

3.6.2 Abstrahlverluste bei einer Krümmung

Zur Analyse der Abstrahlverluste wurden gerade und gekrümmte tiefgeprägte Wellenleiter mit großem und kleinem Brechzahlhub simuliert. Bei der Simulation betrug die Höhe des Wellenleiters $3 \mu\text{m}$ und die Höhe des Plateaus (Abstand Substratoberfläche zu Grenzfläche des Wellenleiters) $2 \mu\text{m}$. Grundlagen der Simulation gekrümmter Wellenleiter ist der in Literatur [22] und [31] angegebenen Formalismus. Es ist zu beachten dass diese Methode nur dann präzise angewendet werden kann, wenn der Krümmungsradius viel größer als die Breite des Wellenleiters ist.

In den Wellenleiter wurde die Grundmode einer kommerziell erhältlichen Glasfaser eingekoppelt und die Grundmode des gekrümmten Wellenleiters bei einem Krümmungsradius von $300 \mu\text{m}$ wurde berechnet (siehe Abbildung 3.24). Es ist zu bemerken, dass sich das Feld nicht weit ins Substrat ausdehnt. Die Verformung des Feldes ist begrenzt, da sich die Feldausdehnung im Bereich des Sockels abspielt und damit aufgrund des hohen Brechzahlhubes zur umgebenden Luft das Feld im Polymer gehalten wird. Die

Abstrahlverluste verringern sich im Vergleich zu den stark geführten Rippenwellenleitern weiter.

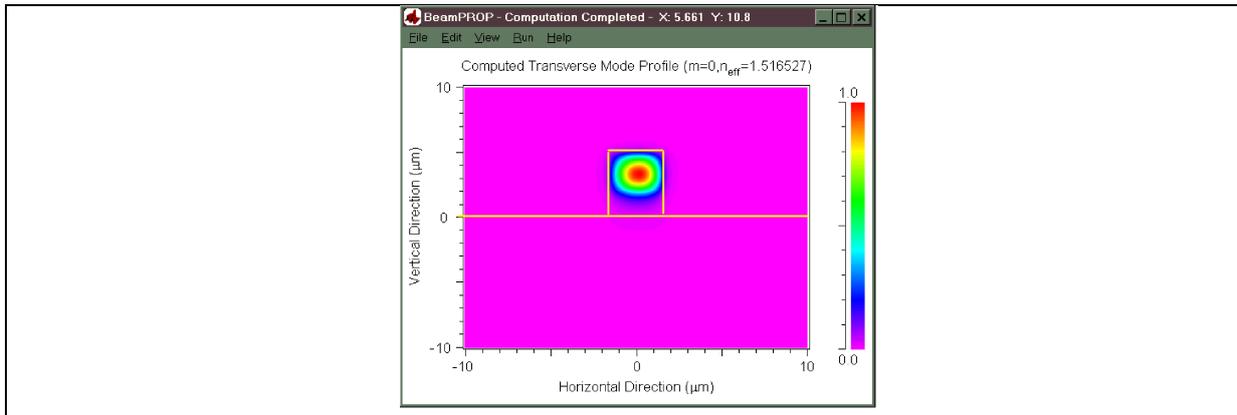


Abb. 3.24: Grundmode eines tief geprägt nach links gekrümmten Wellenleiters in PC/PMMA-Schichtaufbau

In Abbildung 3.25 ist die Leistung als Funktion des Krümmungsradius dargestellt. Man erkennt, dass im Vergleich zu den reinen Rippenwellenleitern in (siehe Abbildung 3.12) PC/PMMA die Verluste für gleichen Krümmungsradius deutlich kleiner sind. Beispielsweise beträgt die Dämpfung bei einem Krümmungsradius von 50 μm nur 0,4 dB.

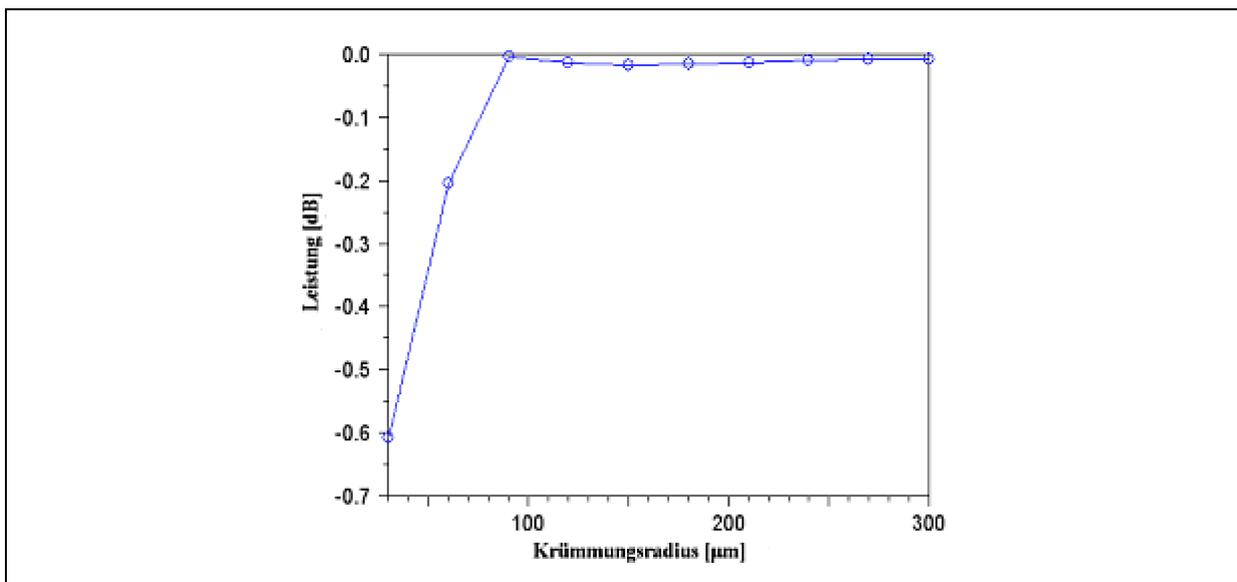


Abb. 3.25: Leistung als Funktion des Krümmungsradius für einen tiefgeprägten Wellenleiter mit großem Brechzahlhub aus PC/PMMA

Um zu analysieren wie sich die Verluste bei einem tiefgeprägten Wellenleiter mit kleinem Brechzahlhub ($\Delta n = 0,02$) ändern, wurde eine derartige Struktur, die die gleichen Geometrien aufwies, simuliert. In Abbildung 3.26 ist die Grundmode des geraden Wellenleiters dargestellt. Im Vergleich zu Bild 3.13 ist die Ausdehnung des Feldes in das Substrat deutlich geringer. Dies gilt auch für den gekrümmten Wellenleiter (Abbildung 3.27). Damit sind die Verluste gegenüber reinen Rippenwellenleitern kleiner. Die Leistung als Funktion des Krümmungsradius ist in Abb. 3.28 dargestellt. Auch in diesem Fall sind die Verluste kleiner als bei reinen Rippenwellenleitern, z.B. betragen die Verluste bei einem Krümmungsradius von 100 μm $-0,75$ dB.

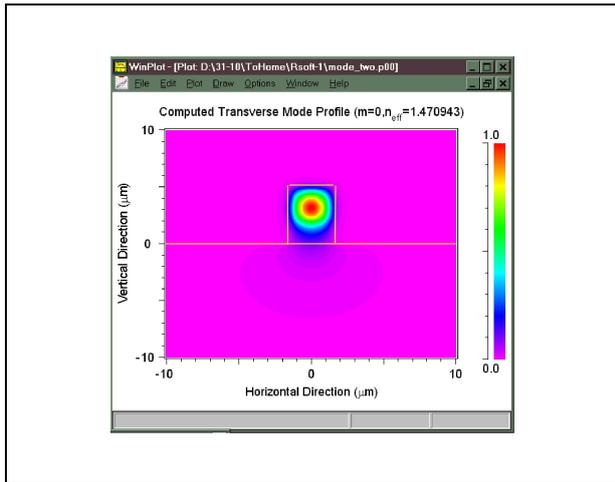


Abb. 3.26: Grundmode des geraden tiefgeprägten Wellenleiters mit kleinem Brechzahlhub ($\Delta n = 0,02$)

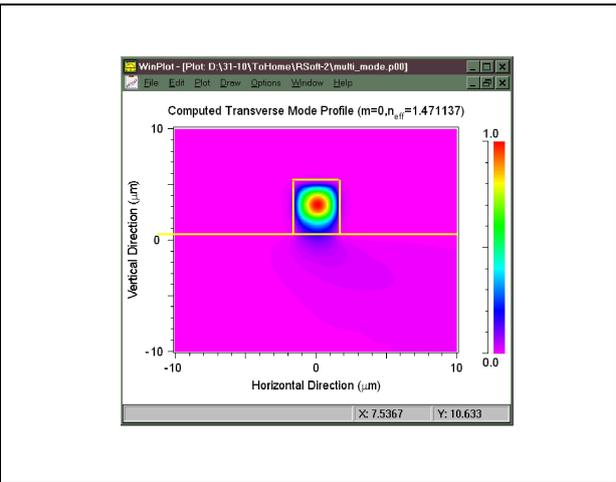


Abb. 3.27: Grundmode des gekrümmten tiefgeprägten Wellenleiters mit kleinem Brechzahlhub ($\Delta n = 0,02$)

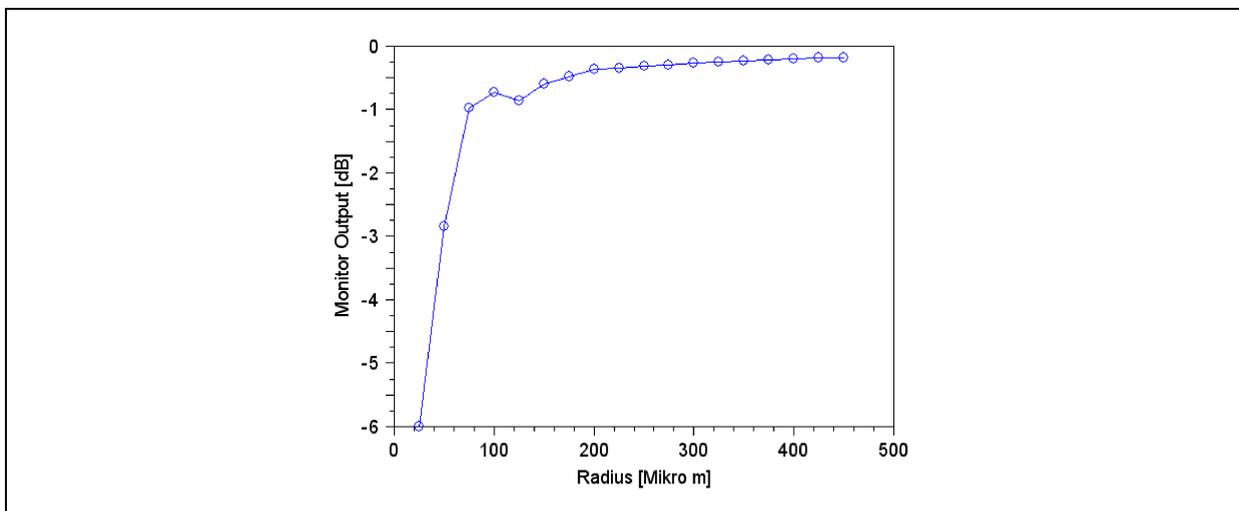


Abb. 3.28: Leistung als Funktion des Krümmungsradius für einen Ridge-Wellenleiter mit kleinem Brechzahlhub ($\Delta n = 0,02$)

3.6.3 Dämpfung aufgrund von Rauigkeit

Mit dem Programm BeamProp kann man die Auswirkung der Rauigkeit eines Wellenleiters auf die Dämpfung simulieren. Bei der Herstellung der Wellenleiter im Rahmen dieser Arbeit wird die ihre Rauigkeit durch die Maske (Step- and Spotsizes, Scanfeldgrenzen, siehe Kapitel 2.2.3) und durch die Lithographie- und Galvanikprozesse verursacht und wird lithographische Rauigkeit genannt.

Die Autokorrelationsfunktion $R(u)$ ist ein Maß der Korrelationseigenschaften einer Flächenrauigkeit. Sie ist das Produkt von zwei Kopien eines Schnittprofils der zu studierenden Oberfläche $h(z)$, während die eine relativ zu der anderen um einen Wert u verschoben wird [33].

$$R(u) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{1}{z} \int_{-\infty}^{+\infty} h(z)h(z-u)dz \quad (3.11)$$

$R(u)$ hat einen maximalen Wert, wenn $u=0$ ist. Wenn der Wert von u zunimmt, nimmt $R(u)$ ab. Für größere u -Werte beträgt der Wert von $R(u) = 0$. Dies geschieht, weil es keine Korrelation zwischen der Rauigkeitskurve und ihrer verschobenen Kopie gibt.

- Wenn $u=0$ ist, dann ist $R(0) = \bar{\sigma}^2$, wobei $\bar{\sigma} = R_{rms}$ ist und in dem Programm als Litho-Roughness benannt ist.
- Wenn die Autokorrelationsfunktion einen Wert von $1/e$ seines maximalen Wertes beträgt, bezeichnet man den entsprechenden u -Wert als Correlation-Length.

Bei der Angabe dieser Parameter (Litho-Roughness, Correlation-Length) in dem Programm erfolgt eine Simulation der Rauigkeit des Wellenleiters durch einen statistischen Zufallsprozess, und zwar so, dass die lokale Breite $W(z)$ und lokale X-Position $X(z)$ des simulierten Wellenleiters entlang seiner z-Achse wie folgt geändert werden [34]:

$$X(z) = X_0(z) + \Delta X(z) \quad (3.12)$$

$$W(z) = W_0(z) + \Delta W(z) \quad (3.13)$$

$X_0(z)$ und $W_0(z)$ sind die jeweiligen Nominalwerte der X-Position und der Breite. $\Delta W(z)$ gibt die Abweichung der Wellenleiterbreite von ihrem nominalen Wert $W_0(z)$ an der Position z und $\Delta X(z)$ die lokale Abweichung der Wellenleiterachse von ihrer idealen Achse an.

Abbildung 3.29 zeigt als Ergebnis der Simulation die ausgekoppelte Leistung aus einem 1000 μm langen Wellenleiter bei einer Rauigkeit (R_{rms}) von 50 nm und einer Korrelationslänge von 50 nm. Die Leistungsverluste betragen ca. 2 dB.

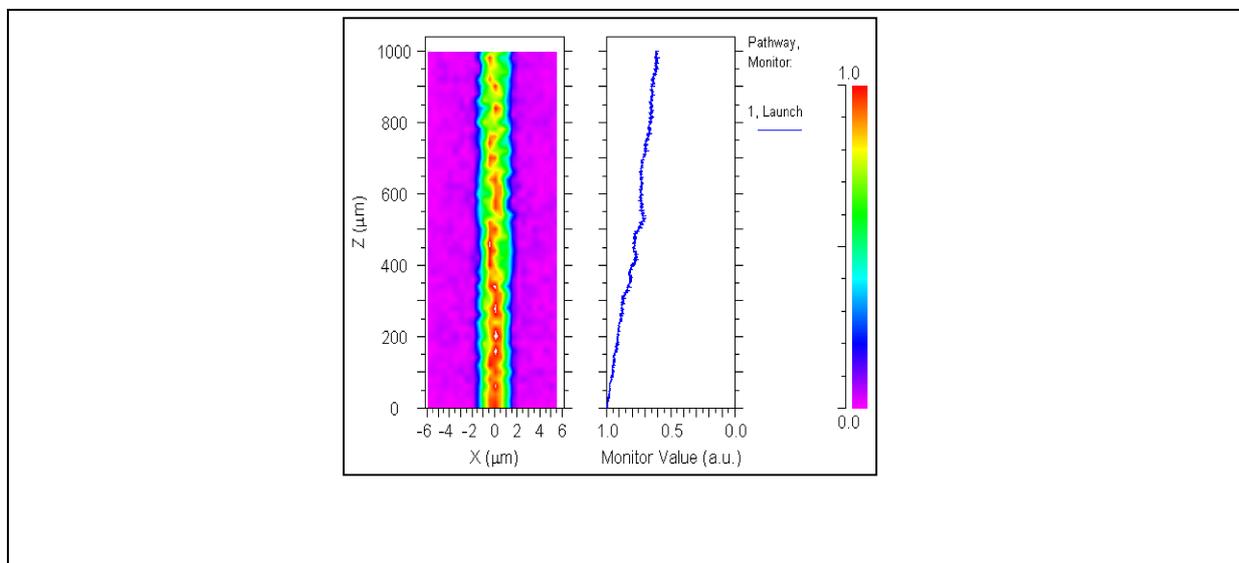


Abb. 3.29: Intensitätsverluste bei 1 mm langen geraden Wellenleiter mit einer Rauigkeit (R_{rms}) von 50 nm (Korrelationslänge = 50 nm). Links: Querschnitt der Modeleistung über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

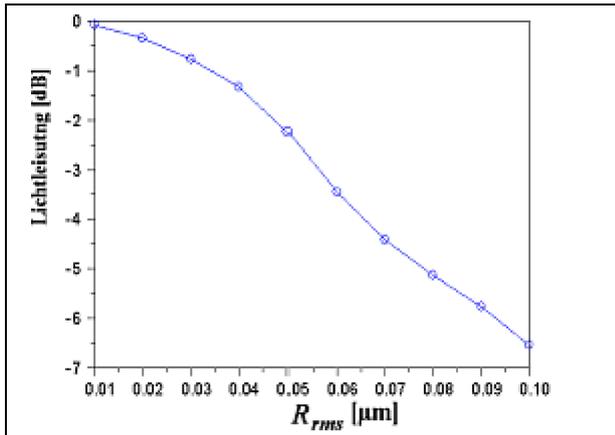


Abb. 3.30: Einfluss der Rauigkeit (R_{rms}) auf die Lichtleistung am Ausgang des Wellenleiters, Korrelationslänge = 50 nm

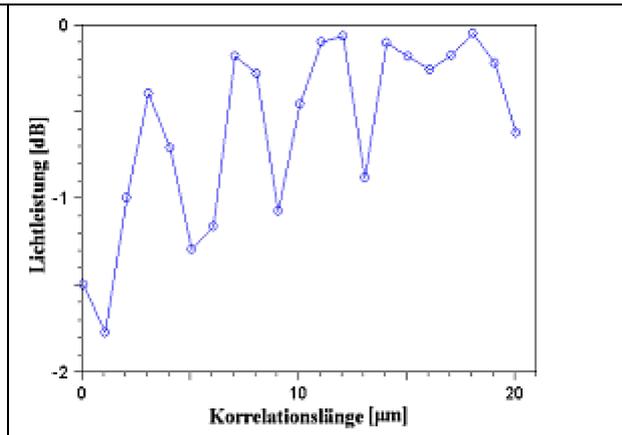


Abb. 3.31: Einfluss der Korrelationslänge in μm auf die Lichtleistung am Ausgang des Wellenleiters, Rauigkeit (R_{rms}) = 50 nm

Abbildung 3.30 zeigt die Dämpfung des 1 mm langen Wellenleiters als Funktion der Rauigkeit bei einer Korrelationslänge von 50 nm. Die Dämpfung nimmt mit zunehmender Rauigkeit stetig zu, sie beträgt z.B. bei einer Rauigkeit R_{rms} von 100 nm etwa 6,5 dB. Abbildung 3.31 zeigt den Einfluss der Korrelationslänge auf die Dämpfung des Wellenleiters bei einer festen Rauigkeit von $R_{rms}=50$ nm. Die Dämpfung oszilliert entlang einer mit der Korrelationslänge stetig ansteigenden Kurve, wobei sich die Änderungen über eine Korrelationslänge von 0 bis 20 μm im Bereich von etwas mehr als 1 dB bewegen.

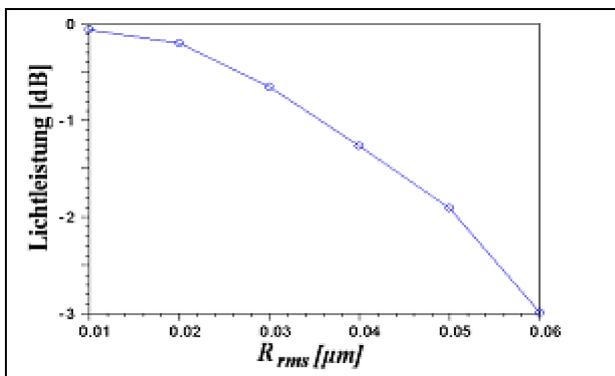


Abb. 3.32: TE Anregung, Korrelationslänge = 50 nm

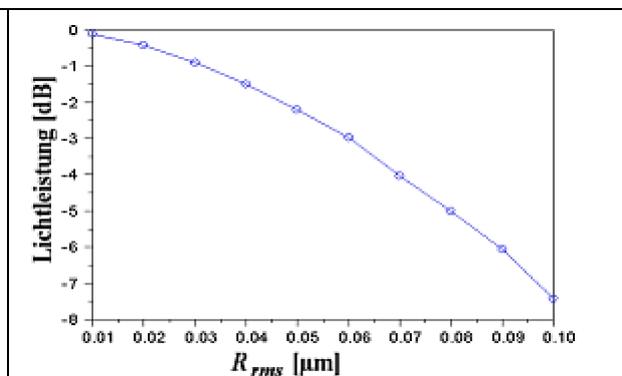


Abb. 3.33: TM Anregung, Korrelationslänge = 50 nm

Die Simulation für Abbildung 3.30 wurde bei einer skalaren Anregung durchgeführt. Um die Aussage genauer zu überprüfen, wurde die selbe Simulation mit semi-vektorieller Anregung wiederholt. Abbildung 3.32 zeigt den Einfluss der Rauigkeit bei einer TE-Anregung. Abbildung 3.33 zeigt den Einfluss der Rauigkeit bei einer TM-Anregung. Beide Simulationen wurden bei einer Korrelationslänge von 50 nm durchgeführt. Wie man sieht, sind die Ergebnisse für die skalare Anregung und semi-vektorielle Anregung für die Verhältnisse, die für diese Arbeit eine Rolle spielen, mehr oder weniger gleich, so dass die skalare Anregung für die Berechnung der Rauigkeitsverluste ausreichend ist.

3.6.4 S-förmige Lichtleiterstrukturen

Im Hinblick auf funktionale Lichtleiterstrukturen wie z.B. Koppler (siehe Kap. 3.6.2) oder z.B. Ringresonatorstrukturen ist es notwendig bei Ankopplung von Glasfasern die im Falle der funktionalen Struktur eng beieinander liegenden Wellenleiter auf die Breite des Pitches der Fasern zu vergrößern. Dies erfolgt in der Regel mit S-förmigen Strukturen (siehe Abbildung 3.34). Diese lichtführenden Strukturen bestehen jeweils aus einer Eingangsgeraden, einer Ausgangsgeraden und zwei Krümmungen, deren Radien einmal positiv und einmal negativ sind.

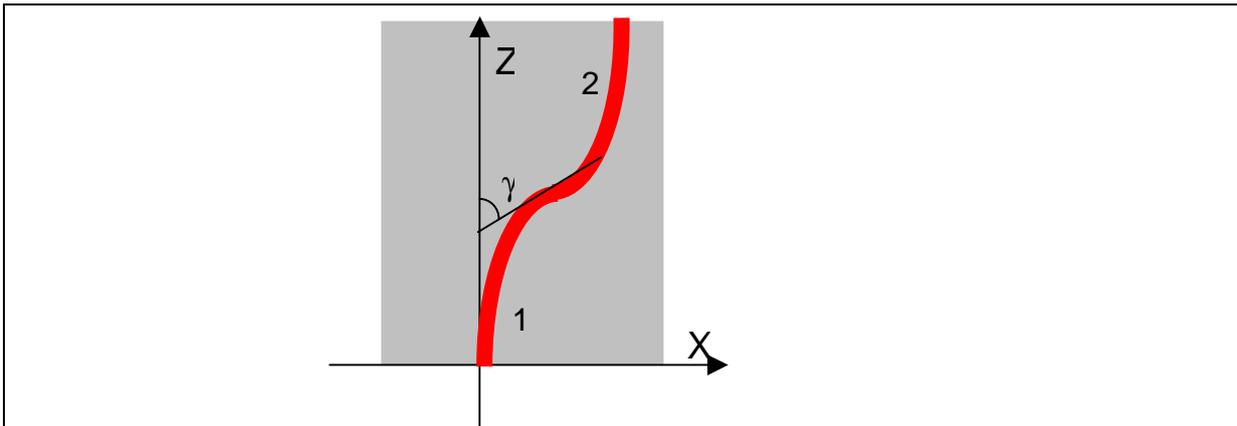


Abb. 3.34: S-förmigen Wellenleiter (Rot): (γ) ist der Endwinkel Für Teil Eins, Startwinkel für Teil Zwei. Startwinkel für Teil 1, Endwinkel für Teil 2 sind null

Wie bereits in den vorhergehenden Ausführungen dargestellt, verursachen diese Krümmungen Dämpfung durch Lichtabstrahlung, außerdem ergibt sich eine Verformung des durchgelassenen Feldes. Typische Moden-Amplituden-Formen der laufenden Moden der verschiedenen Teile der lichtführenden Strukturen sind in Abbildung 3.35 gezeigt. Eine optimale Überlappung der Eigenmoden der nacheinander folgenden lichtführenden Teile zwingt dazu, diese Teile in X-Richtung in Bezug zu einander zu versetzen. Die optimalen Versatzweiten ergeben eine optimale Überkopplung der Lichtleistung von einem Teil zum anderen.

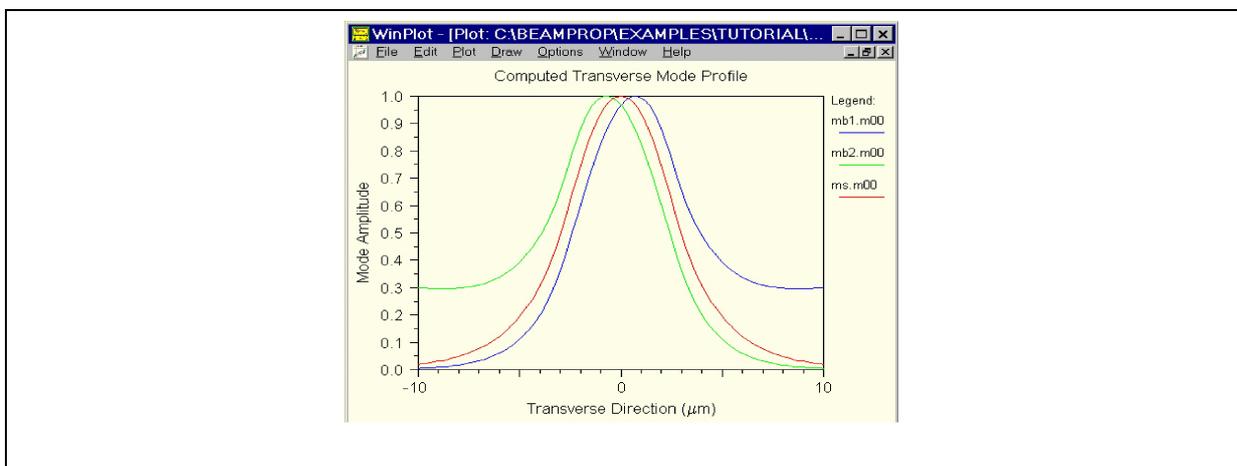


Abb. 3.35: Typische Amplituden-Formen der Grundmode in geraden und gekrümmten Wellenleitern (grün: Krümmung nach rechts, rot: gerade Strecke, blau: Krümmung nach links)

3 Simulation und layout

Die Verluste dieser Strukturen wurden zweimal unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen simuliert. Um die Simulationszeit zu verkürzen wurde die dreidimensionalen Strukturen zu zweidimensionalen Strukturen umgewandelt.

Die erste Simulation hatte die folgenden Anfangswerte: Wellenlänge: $1.55\mu\text{m}$, Breite des Wellenleiters: $5\mu\text{m}$, Radius: $\pm 3000\mu\text{m}$, Startwinkel: 0° , Endwinkel: 15° , $n_{\text{Substrat}}: 1.5$, $\Delta n = 0,007$ (Der Wert wurde so klein gewählt, um den Effekt deutlich zu machen), Länge der Eingangsgeraden = $300\mu\text{m}$, Länge der Ausgangsgeraden = $300\mu\text{m}$. Die durch Lichtabstrahlung und durch das Versetzen der Teile entstehenden Verluste, betragen ca. 20% der Eingangsenergie (siehe Abbildung 3.36). Die Versätze sind jeweils $1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ und $1\mu\text{m}$ (siehe Abbildung 3.37).

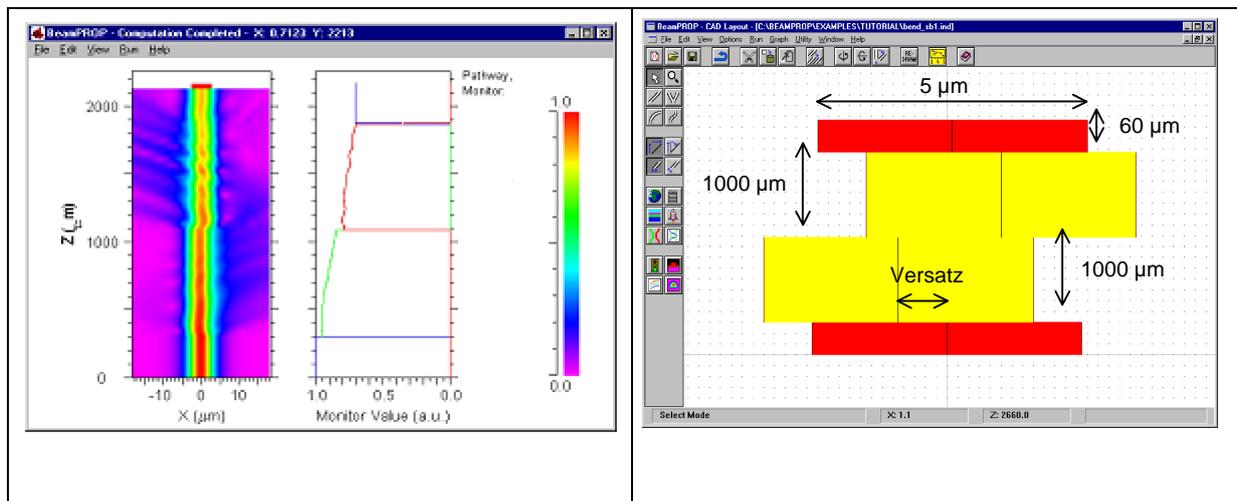


Abb. 3.36: Simulierter Leistungsabfall bei S-förmigen Wellenleitern ($\Delta n = 0,007$, Breite: $5\mu\text{m}$). Links: Querschnitt der Leistungsverteilung über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abb. 3.37: Relative Versätze der verschiedenen lichtführenden Strukturen, die für eine optimale Einkopplung des Lichts in den jeweiligen Wellenleitern notwendig sind. Die Breite ist im Verhältnis zur Länge stark überhöht dargestellt

Die zweite Simulation hat die folgenden Anfangswerte: Wellenlänge: $1.55\mu\text{m}$, Breite: $5\mu\text{m}$, Radius: $3000\mu\text{m}$, Startwinkel: 0° , Endwinkel: 15° , Substrate: 1.5 , $\Delta n = 0,02$, $L_{\text{in}} = 300\mu\text{m}$, $L_{\text{out}} = 300\mu\text{m}$. Die durch Lichtabstrahlung und durch das Versetzen der Teile entstehenden Verluste betragen in diesem Fall ca. 5% der Eingangsenergie (siehe Abbildung 3.38). Die Versätze zwischen den einzelnen Teilen der Krümmungen, die die effektivste Einkopplung der Moden ermöglichen, sind jeweils $0.1\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$.

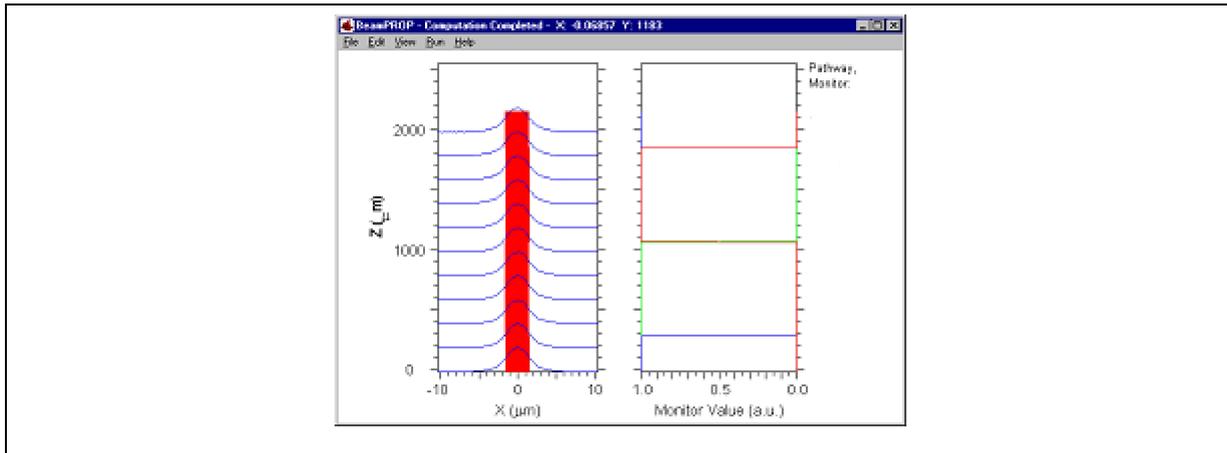


Abb.3.38: Simulierte Leistungsabfall bei S-förmigen Wellenleitern ($\Delta n=0,02$, Breite: $5 \mu\text{m}$). Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Moden über die Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Durch die Simulation stellt man fest, dass eine Zunahme des Brechzahlhubes eine Verringerung der Abstrahlverluste aber auch eine Verkleinerung der Versätze der verschiedenen Wellenleiterteile zu einander verursacht. Bereits bei einem Brechzahlhub von $0,02$ beträgt die dadurch bedingte Dämpfung maximal $0,25 \text{ dB}$. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten PC/PMMA-Kombination mit einem höheren Brechzahlhub von $\Delta n=0,0646$ spielt dieser Effekt erst in 2. Ordnung eine Rolle.

3.6.5 Schlussfolgerung

Aus den Ergebnissen der Simulationen lassen sich vier wesentliche Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Abstrahlverluste können allgemein durch die Erhöhung des Brechzahlhub zwischen dem Wellenleiter und der Umgebung verringert werden. Bei Rippen, die mit Luft umgeben sind ist der Brechzahlhub zwischen der Rippe und dem Substrat entscheidend für die Verluste. Zur Minimierung der Abstrahlverluste muss dieser Hub erhöht werden. Bei einem Rippenwellenleiter aus einer PC/PMMA-Kombination liegen die Verluste bei Krümmungen mit Krümmungsradien größer $500 \mu\text{m}$ unter $0,5 \text{ dB}$
- Die Abstrahlverluste können weiter verringert werden wenn man die Rippenwellenleiter als tiefgeprägte Wellenleiter herstellt, die mit einem Medium umgeben sind, dessen Brechungsindex besonders klein ist (z.B. Luft). Die Gestaltung dieses Wellenleiters dient in diesem Fall dazu, dass das Feld in dem Wellenleiter gefangen bleibt.
- Die Dimensionen der Wellenleiter liegen für die im Rahmen dieser Arbeit in Frage kommenden Materialkombinationen (siehe Kapitel 5.1) im Bereich um $3 \times 3 \mu\text{m}$. Größere Wellenleiterstrukturen können mehr als die Grundmode führen und sind deshalb nicht einmodig.
- Rauigkeiten von 50 nm bei einer Korrelationslänge von 50 nm , wie sie bei den Herstellungsverfahren, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurden, zu erwarten sind, führen zu einer Dämpfung von ca. 3 dB/mm .

3.7 Simulationen von optischen Elementen

Im folgenden werden Taperstrukturen und Koppелеlemente als Beispiele optischer Elemente simuliert. Diese wurden für experimentelle Untersuchungen auch auf im Layout realisiert (siehe Kapitel 3.8)

3.7.1 Taper

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Wellenleiterstrukturen hergestellt werden, in die das Licht einer Glasfaser eingekoppelt wird. Die Wellenleiter sitzen auf einem Plateau, das als Mantel wirkt und einen Brechungsindex von 1,474 besitzt. Der Brechzahlhub zwischen dem Substrat und dem Kern beträgt $\Delta n = 0,0646$, der Brechungsindex der Umgebung ist 1. Die Dimension des Wellenleiters ist $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, der Kern der Glasfaser dagegen hat einen Durchmesser von $9 \mu\text{m}$. Wie die bisherigen Analysen zeigen, treten durch die Einkopplung große Verluste auf. Dies wird durch folgende Betrachtung untermauert.

Wird in einen $1000 \mu\text{m}$ langen, einmodigen, geraden Wellenleiter aus PC/PMMA seine Grundmode eingekoppelt, treten wie erwartet keine Einkopplungsverluste auf (siehe Abbildung 3.39).

Bei Einkopplung eines Gaußschen Feldes in den Wellenleiter, wobei die Halbwertsbreite ($1/e^2$ -Breite) des eingekoppelten Feldes der Höhe und Breite des Wellenleiters entspricht, zeigen die Simulationen, dass ca. 15 % Einkopplungsverluste auftreten (siehe Abbildung 3.40).

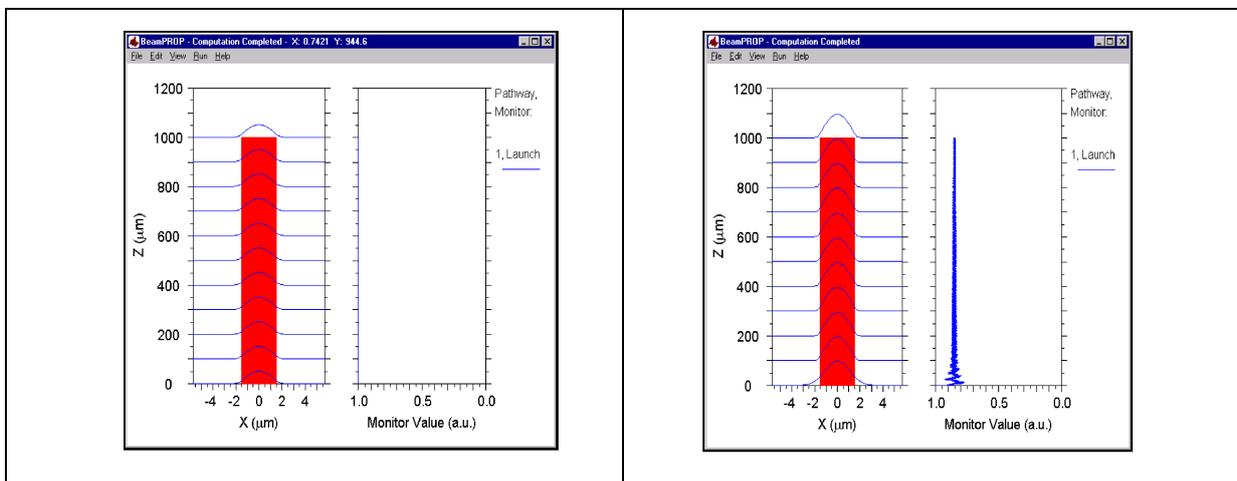


Abb. 3.39: Intensität entlang des Wellenleiters bei Einkopplung seiner Grundmode. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abb. 3.40: Intensität entlang des Wellenleiters bei Einkopplung eines Gaußschen Feldes (Halbwertsbreite des eingekoppelten Feldes entspricht der Höhe und Breite des Wellenleiters). Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Für den Fall, dass die Eigenmode einer kommerziellen, einmodigen Glasfaser (Fa. Lucent) eingekoppelt wird, ist das Ergebnis in Abbildung 3.41 gezeigt. Man sieht, dass die Verluste ca. 93% der eingekoppelten Intensität betragen. Diese Verluste ergeben sich sowohl durch die Unterschiede der Querschnitte der Stirnflächen als auch durch die Modenanpassung.

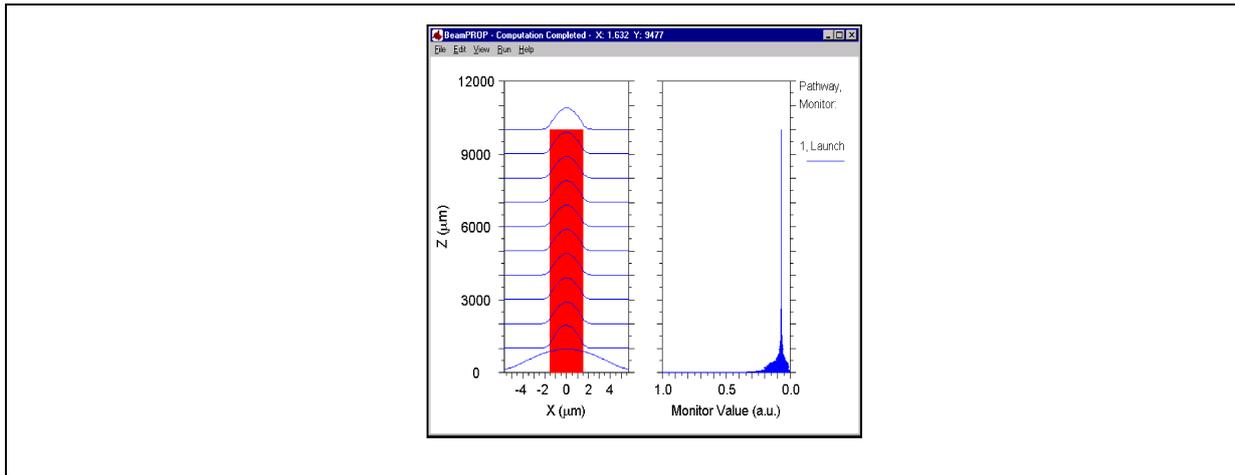


Abb. 3.41: Intensität entlang des Wellenleiters bei Einkopplung der Mode einer einmodigen Glasfaser. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Zur Verminderung der Einkoppelverluste werden Taper eingesetzt, mit denen die Geometrie der beiden zu koppelnden Elemente (z.B. Glasfaser, Wellenleiter) besser aneinander angepasst werden. Prinzipiell kann man sich zwei Arten von Tapern vorstellen: ein sogenannter Abwärtstaper, bei dem sich die Geometrie des wellenleitenden Mediums verjüngt. Bei einem Aufwärtstaper vergrößert man die Anfangsbreite des Wellenleiters, wobei die Breite des Wellenleiters nach und nach in Wellenleiterrichtung abnimmt, bis seine Breite der Breite des einmodigen Wellenleiters entspricht. Im Folgenden wird der Abwärtstaper anhand einer Glasfaser beschrieben, um Probleme bzgl. eines komplizierten Modenfeldes zu umgehen; in diesem Fall kann mit einer einfachen Gaußmode gerechnet werden. Die Ergebnisse sind auf andere Modenfelder übertragbar. Der Aufwärtstaper wird am Beispiel der Wellenleiterstruktur beschrieben und simuliert.

3.7.1.1 Ausbreitung eines optischen Feldes in einer verjüngten Glasfaser (Abwärts-Taper)

Die Grundmode einer Standard-Stufenprofilfaser mit Kernradius a_2 hat die signifikante Radialausdehnung $a_2 + r_w / 2$ (r_w ist der Mantelfeldradius. Mit abnehmendem Kernradius $a < a_2$ wächst der Mantelfeldradius r_w an und bestimmt für hinreichend kleine $a = a_1 < a_2$ die transversale Breite des Feldes, das sich dann weiter in den Mantel ausdehnt als beim Kernradius $a = a_2$; für $a \rightarrow 0$ geht $r_w \rightarrow \infty$. Folglich ist die Feldweite des Abwärts-Tapers auf der Einkopplenseite (beim verjüngten Faserende) größer als im Bereich des Standard-Kernradius [31].

- Glasfaser mit kleinem Brechzahlhub

Die Parameter für die Simulation einer abwärtsgetaperten Glasfaser wurden von einer kommerziell erhältlichen Step-Index-Glasfaser (Kerndurchmesser: 9 μm) übernommen. Die Brechzahl des Kerns beträgt 1,4513 und die Brechzahl des Mantels 1,4468. Der niedrige Brechzahlhub (0,0045) führt (bei einer $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) zu einer schwachen Führung des Lichtes.

Die betrachtete Glasfaser besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil hat einen konstanten Durchmesser von $9\ \mu\text{m}$, beim zweiten Teil nimmt der Durchmesser allmählich ab, bis er null erreicht (siehe Abbildung 3.42). Die Eigenmode der Glasfaser wurde berechnet und dann in die Glasfaser eingekoppelt. Wie erwartet zeigt die Simulation, dass das normalisierte Überlappungsintegral zwischen dem eingekoppelten Feld und dem Feld im ersten Teil der Glasfaser eins beträgt, d. h., die Verluste in dem eingekoppelten Feld sind null. In diesem Fall nimmt man an, dass das Material der Glasfaser verlustfrei ist. Das Überlappungsintegral nimmt aber im zweiten Teil der Glasfaser (siehe Abbildung 3.46) allmählich ab. Abbildung 3.43 zeigt, wie die Amplitude des Feldes in der Glasfaser in Ausbreitungsrichtung des Lichtes aussieht. Im ersten Teil behält das Feld seine Form, die dem eingekoppelten Feld entspricht. Wenn das Feld den verengten Teil erreicht, konzentriert es sich über eine relativ kurze Strecke, das Maximum hat einen geringfügig höheren Werte als bei Einkopplung. Im weiteren Verlauf breitet sich das Feld allmählich im Mantel aus. Die Amplitude des Feldes nimmt dabei kontinuierlich ab.

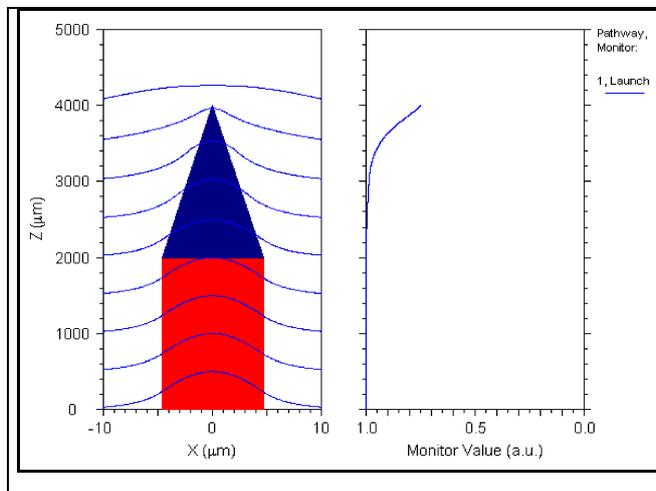


Abb. 3.42: Wert des Überlappungsintegrals in Ausbreitungsrichtung des Lichtes für einer abwärtsgetaperter Wellenleiter, wenn ein Gaußsche Mode eingekoppelt wird. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

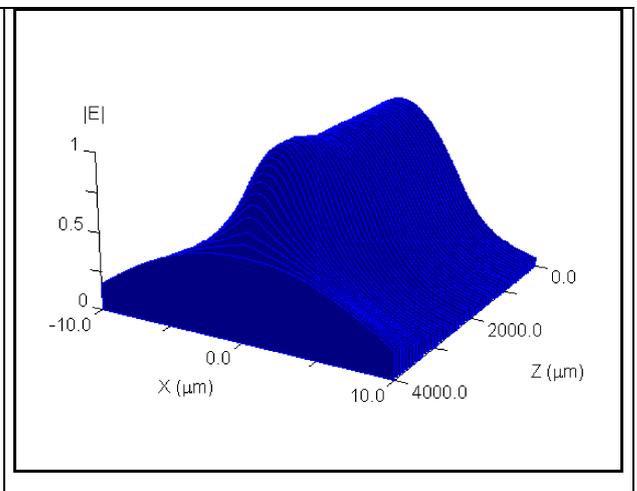


Abb. 3.43: Amplitude des Feldes im Ausbreitungsrichtung des Lichtes in eine Faser mit kleinem Brechzahlhub falls eine Gaußsche Mode eingekoppelt wird

- **Glassfaser mit großem Brechzahlhub**

Im Folgenden wird der Fall „großer Brechzahlhub“ simuliert. Dabei wird angenommen, dass die Brechzahl des Kerns der Glasfaser 1,547 und die Brechzahl des Mantels 1 beträgt. Dies soll die Verhältnisse eines von Luft umgebenen PC-Wellenleiters widerspiegeln und damit eine ungefähre Vorstellung für die Verhältnisse bei dem zu realisierenden Schichtwellenleiter liefern. Der relativ große Brechzahlhub (0,547) führt zu einer starken Lichtführung. Die Geometrie der Glasfaser war die gleiche wie im vorherigen Abschnitt. Wenn die Eigenmode in dem ersten Teil (nicht verengter Teil) eingekoppelt wird, sind die Verluste wieder Null. Im Zweiten Teil nimmt die Breite des Feldes in Ausbreitungsrichtung zunächst ab. (siehe Abbildung 3.44), wobei Abbildung 3.45 zeigt, dass die Amplitude des Feldes in Ausbreitungsrichtung des Feldes im zweiten Teil stark zunimmt. Das Feld bleibt aber stark geführt und die Ausdehnung des Feldes in den Mantel bleibt gering.

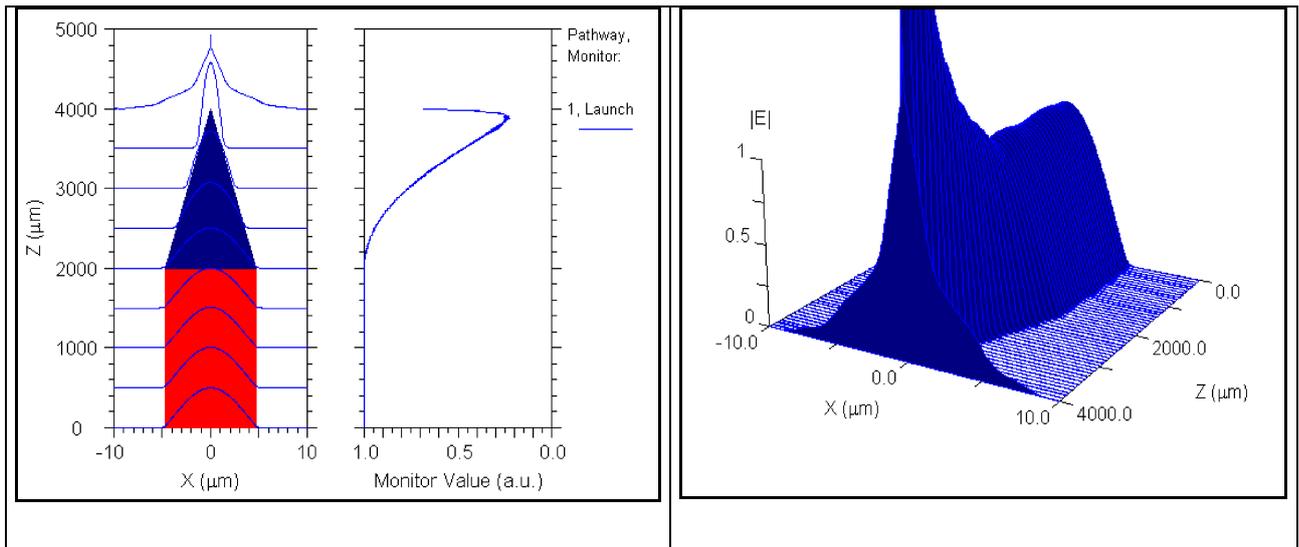


Abb. 3.44: Der Wert des Überlappungsintegrals in Ausbreitungsrichtung des Lichtes. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abb. 3.45: Amplitude des Feldes im Ausbreitungsrichtung des Lichtes in eine Faser mit großem Brechzahlhub falls eine Gaußsche Mode eingekoppelt wird

3.7.1.2 Ausbreitung eines optischen Feldes in einem abwärtsgetaperten geprägten PC/PMMA-Wellenleiter

In den vorhergehenden Abschnitten wurde eine Glasfaser betrachtet; in diesem Abschnitt soll nun ein getaperter geprägter PC/PMMA-Wellenleiter betrachtet werden. Der Wellenleiter ist in Abb. 3.46 skizziert. Das PC (rot in der Zeichnung) hat eine Brechzahl von 1,547, eine Breite von 3 μm und eine Höhe von 3 μm. Es ist oben und an den Seiten mit Luft umgeben (Brechzahl von 1); Bei dem Material für das Plateau handelt es sich um PMMA mit einer Brechzahl von 1,4784. Die Führung ist in diesem Fall relativ stark.

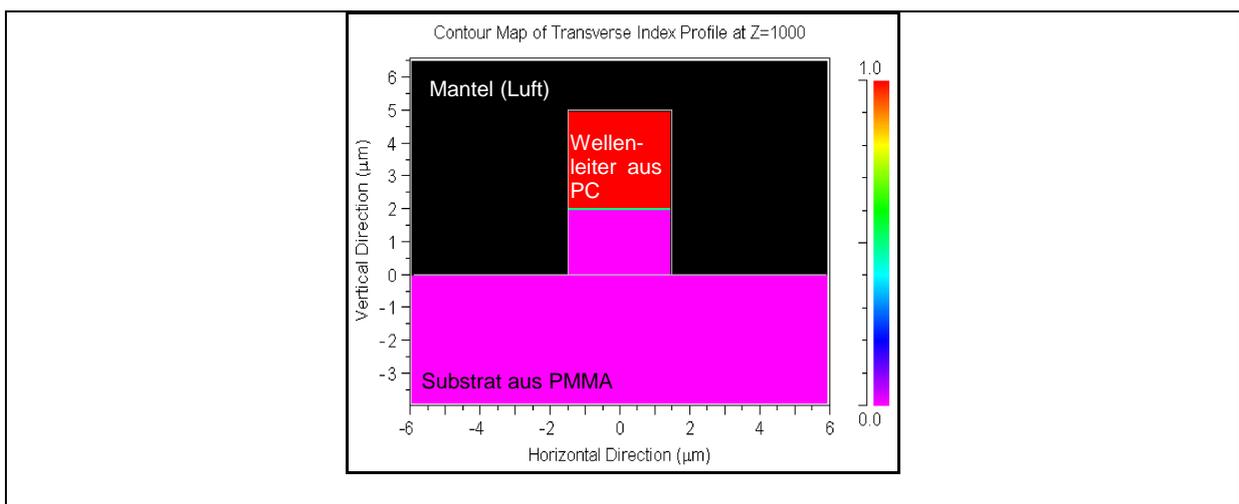


Abb. 3.46: Brechzahlprofil und Geometrie der simulierten Wellenleiter (Breite: 3 μm, Höhe: 3 μm)

Der Wellenleiter besteht aus zwei Teilen: einem geraden und einem getaperten Teil (siehe Abbildung 3.47). Wenn die Eigenmode des geraden Wellenleiters in den Wellenleiter

3 Simulation und layout

eingekoppelt wird, ergibt sich ein Fall, der ähnlich ist zu der Situation der in Abschnitt 3.6.1.1 beschrieben wurde: Im geraden Wellenleiter betragen die Verluste null, und erst im verengten nimmt das Überlappungsintegral in Ausbreitungsrichtung des Lichtes ab (Abbildung 3.47). Abbildung 3.48 zeigt, dass die Amplitude des Feldes im verengten Teil stark zunimmt, wobei die Ausdehnung des Feldes in die Luft sehr begrenzt bleibt. Eine Ausdehnung des Feldes in Luft findet erst ab einer sehr engen Wellenleiterbreite von $0.7 \mu\text{m}$ statt, das sich ausbreitende Feld bleibt jedoch in der PC-Schicht zentriert.

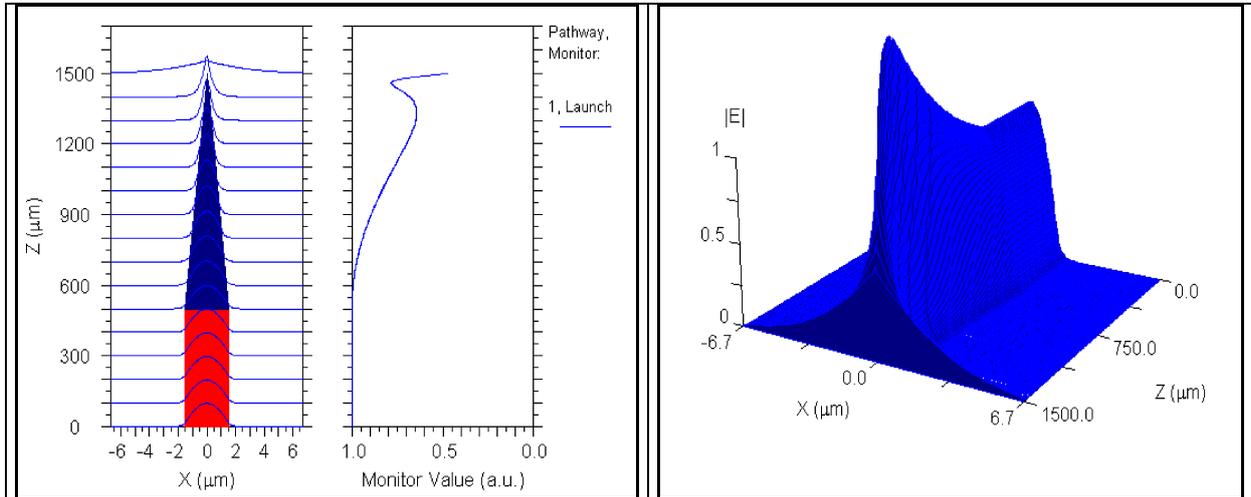


Abb. 3.47: Der Wert des Überlappungsintegrals in Ausbreitungsrichtung des Lichtes. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abb. 3.48: Die Amplitude des Feldes im Ausbreitungsrichtung des Lichts

In Abbildung 3.49 ist die Lichtleistung entlang des Wellenleiters bei Einkopplung über einen Abwärtstaper dargestellt. Wie man erkennt, treten im Bereich des Tapers sehr große Verluste auf, so dass am Ende des Wellenleiters nur sehr geringe Intensitäten gemessen werden.

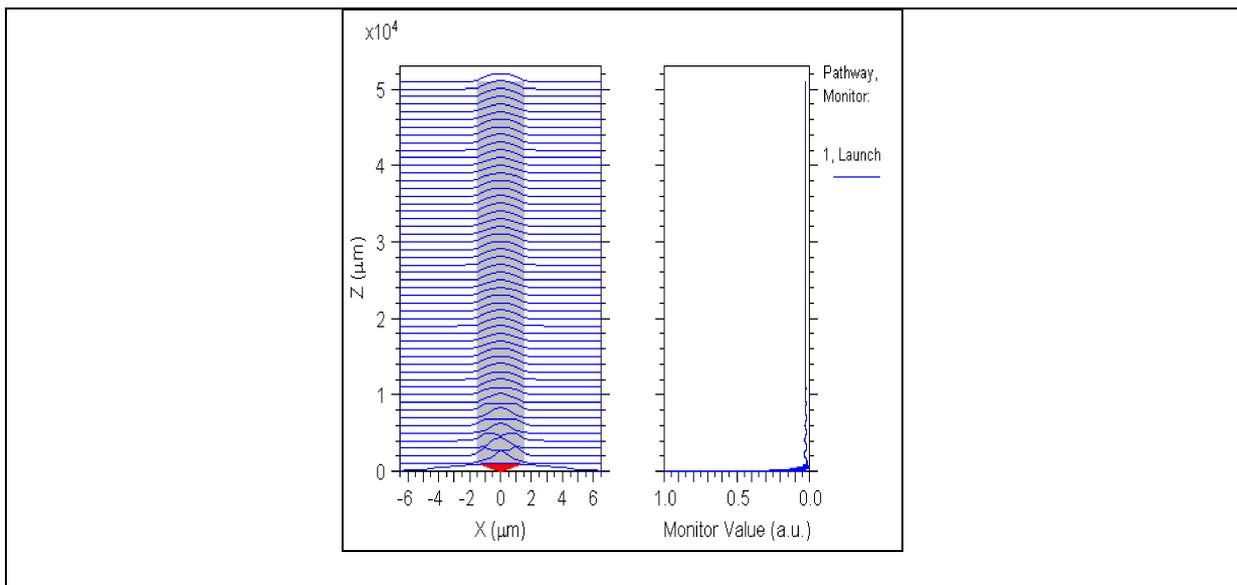


Abb. 3.49: Der Wert des Überlappungsintegrals in Ausbreitungsrichtung des Lichtes in einen abwärtsgetaperten Wellenleitern. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung

Abbildung 3.50 zeigt die Lichtleistung am Ausgang des Wellenleiters in Abhängigkeit von der Änderung der Anfangsbreite des Wellenleiters im Bereich von 0 bis 3 μm . Man sieht ein Maximum bei einer Anfangsbreite von 0 [ca. -10 dB]. Die Anfangsbreite von 0.7 μm ergibt die schlechteste Einkoppeleffizienz mit knapp 16 dB Verlusten. Bei einer Breite des Einkoppelelementes von 3 μm , was der Breite des Wellenleiters entspricht, beträgt die Leistung am Ausgang des Wellenleiters ca. -12 dB. d. h., es ist effektiver, die Eigenmode der Glasfaser in den Wellenleiter ohne verjüngten Taper einzukoppeln.

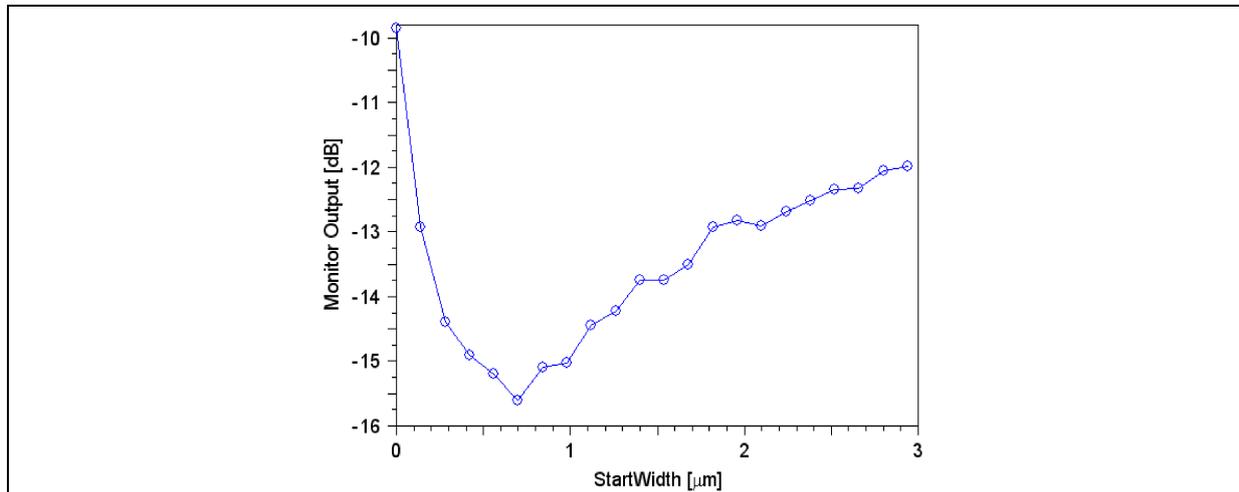


Abb. 3.50: Lichtleistung am Ausgang des Wellenleiters in Abhängigkeit von der Änderung der Anfangsbreite des Einkoppelement

3.7.1.3 Ausbreitung eines optischen Feldes in einem aufwärtsgetaperten geprägten PC/PMMA-Wellenleiter

Im folgenden wird analysiert, inwieweit die Einkoppeleffizienz für den PC/PMMA-Wellenleiter durch einen Aufwärtstaper verbessert werden kann. Dazu wird die Grundmode einer einmodigen kommerziell erhältlichen Glasfaser (Lucent) in den tiefgeprägten PC/PMMA Wellenleiter (Abbildung 3.46) eingekoppelt. Der Wellenleiter besteht in diesem Fall aus einem getaperten Einkoppelement und dem geraden Wellenleiter (siehe Abbildung 3.51)

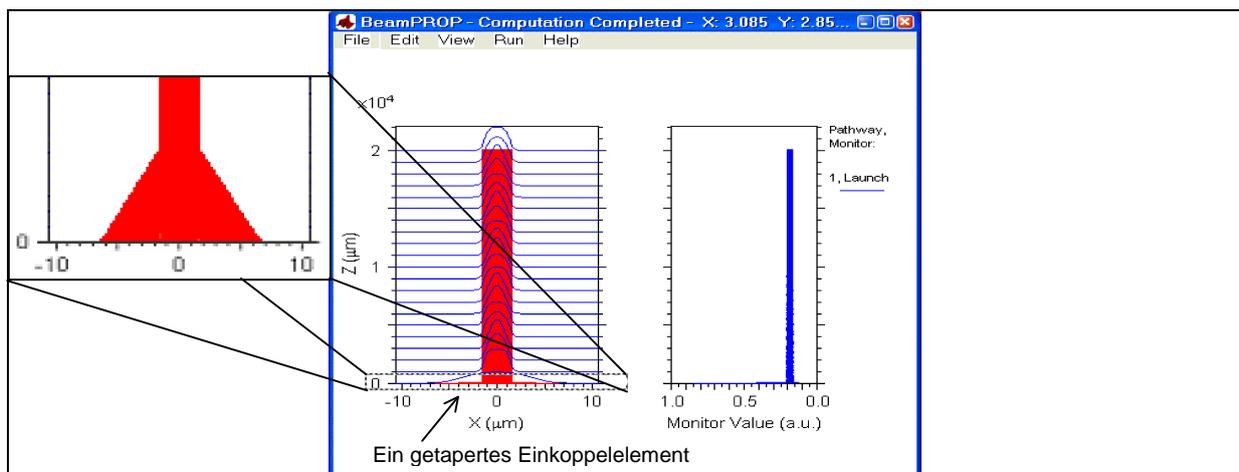


Abb. 3.51: Einkoppeleffizienz für den PC/PMMA-Wellenleiter durch einen Aufwärtstaper. Links: Der Wellenleiter, Querschnitt der Mode über den Wellenleiter. Rechts: Die Modenleistung. Die rote Linie entlang der X-Achse kennzeichnet den Bereich des Tapers, dessen Form in dieser Darstellung nicht erkennbar ist.

Im Rahmen der Simulation wurde die Anfangsbreite des Wellenleiters variiert und die Lichtleistung am Ausgang des Wellenleiters betrachtet. Der Zweck dieser Simulationen ist es, herauszufinden, bei welcher Breite des Wellenleiteranfangs man die maximale Leistung am Ende des Wellenleiters erhält.

Abbildung 3.52 zeigt die Variation der erhaltenen Lichtleistung am Ende des Wellenleiters bei Änderung der Anfangsbreite des Einkoppelelementes von 0 bis 40 μm . Man sieht, dass es eine minimale Dämpfung von ca. 7,1 dB im Bereich von 12 μm gibt. Anschließend nimmt die Einkoppeleffektivität mehr oder weniger linear mit 0,01 dB / μm ab. Die Oszillationen auf der Kurve sind Artefakte der Simulation und Anregung von höheren Moden im Taper. Insofern können bei Einkopplung der Grundmode einer einmodigen Glasfaser in den tiefgeprägten, 3 μm breiten Wellenleiter durch einen Aufwärtstaper bei einer Anfangsbreite von $12 \pm 1 \mu\text{m}$ die Einkoppelverluste von ca. 12 dB auf 8,5 dB reduziert werden können.

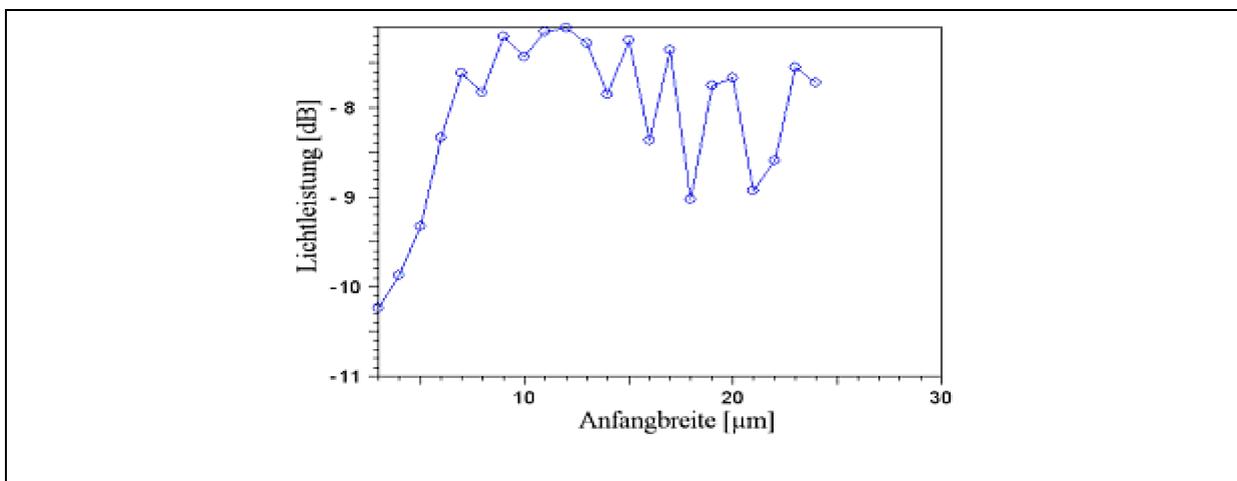


Abb. 3.52: Variation der erhaltenen Lichtleistung am Ende des Wellenleiters bei Änderung der Anfangsbreite des Einkoppelelementes

Die Verminderung der Einkoppeldämpfung durch einen Taper hängt nicht nur von dessen Breite sondern auch von seiner Länge ab. Die Simulationen zeigen, dass eine minimale Länge des Tapers von 50 μm notwendig ist, um den gerade ermittelten Gewinn zu erzielen (siehe Abbildung 3.53). Bei größeren Längen ändert sich die Einkoppeleffektivität nicht mehr wesentlich.

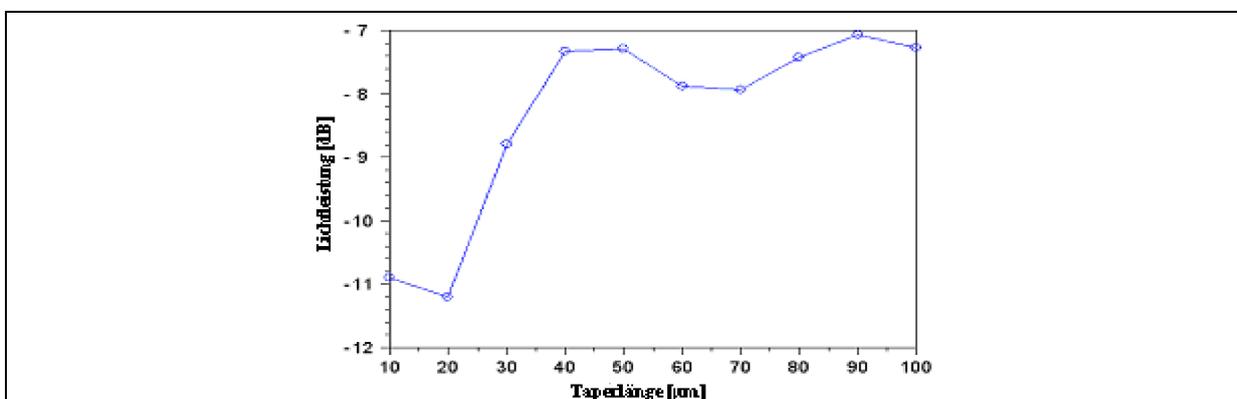


Abb. 3.53: Erhaltene Lichtleistung am Ende des Wellenleiters als Funktion der Länge des Taperbereiches

3.7.1.4 Simulation von gekrümmten Wellenleitern mit Tapern

Im Rahmen dieser Arbeit sollen gekrümmte Wellenleiterstrukturen hergestellt werden, an die durch passive Justage Glasfasern angekoppelt werden. Dabei sollen die Verluste so klein wie möglich sein. Um ein Gefühl für die auftretenden Verluste zu erhalten, wurden abschließend gekrümmte Wellenleiterstrukturen mit 12 μm breiten Aufwärtstapern simuliert, in die das Licht über eine Standardglasfaser eingekoppelt wird. In Abbildung. 3.54 ist die Dämpfung für eine 1 mm lange Struktur als Funktion der Krümmung aufgetragen. Die Verluste sind ab einer Krümmung von 300 μm praktisch konstant und betragen -7 dB. In diesem Bereich werden die Verluste durch die Einkopplung dominiert. Für kleinere Krümmungen nehmen die Verluste zu, weil in diesem Bereich die Verluste durch Krümmung größer werden, während die Einkoppelverluste konstant bleiben.

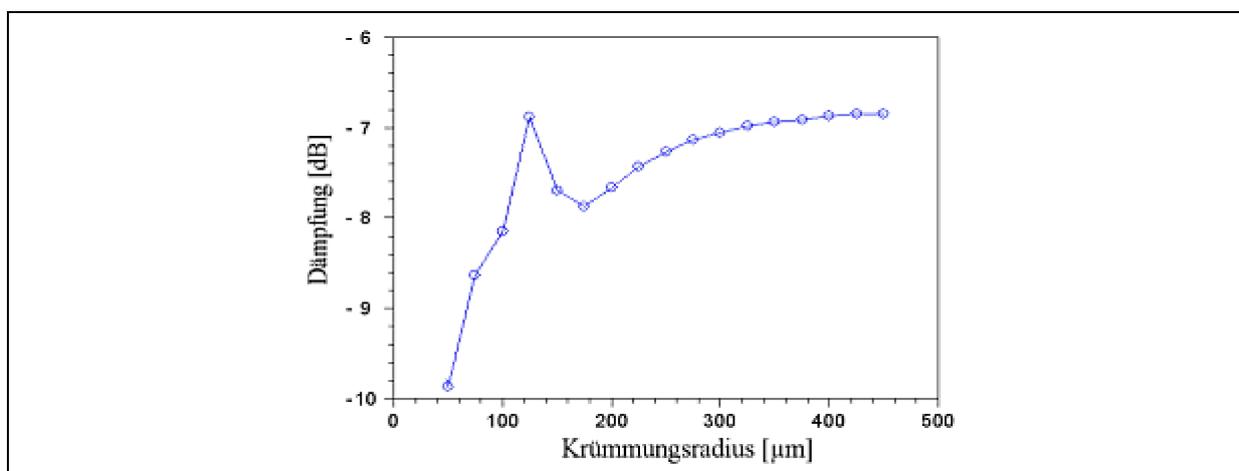


Abb. 3.54: Dämpfung als Funktion der Krümmung für einen tiefgeprägten PC/PMMA-Wellenleiter mit 12 μm breitem Aufwärtstaper

3.7.2 Koppler

Ein optischer (50:50) Koppler wurde mit tiefgeprägten Wellenleiter aus PC/PMMA simuliert. Die Wellenleiter sind mit Luft umgeben (siehe Abbildung 3.55). Die Simulationen zeigen, dass bei einer Spaltbreite von $1\ \mu\text{m}$ die Koppellänge $3000\ \mu\text{m}$ sein muss, damit die Hälfte der Leistung in den anderen Wellenleiter überkoppelt (siehe Abbildung 3.56). Je breiter der Spalt ist, desto länger muss der Einkoppelbereich sein.

Durch die Erhöhung des Umgebungsbrechungsindex (z.B. bei Ausfüllen des Spaltes mit PMMA) kann man sogar bei relativ breiten Spalten relativ kurze Einkopplungsbereiche benutzen, um eine 50:50 Lichtleistungsverteilung zu erreichen.

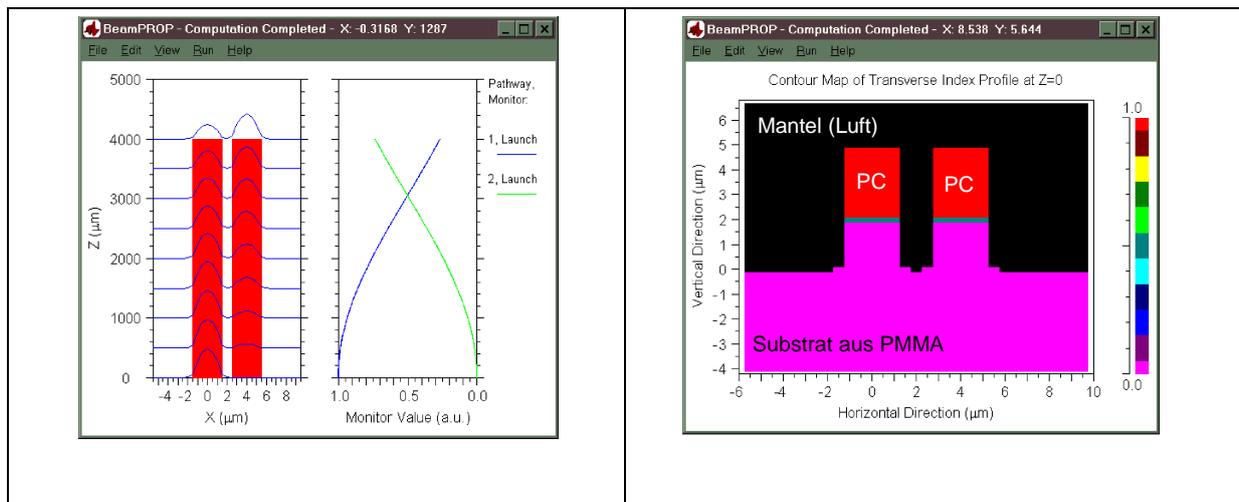


Abb. 3.55: Koppellänge: ca. $3000\ \mu\text{m}$

Abb. 3.56: Brechzahlprofil des Kopplers aus der Simulation

3.8 Layout der Testmaske

Aufgrund der Ergebnisse der Simulation wurde das in Abbildung 3.57 dargestellte Layout einer Testmaske erarbeitet. Mit den verschiedenen Teststrukturen sollten die Grenzen der Herstellung eines Formeinsatzes (siehe Kapitel 4) aufgezeigt und die Möglichkeiten der Herstellung von geprägten Wellenleiterstrukturen (siehe Kapitel 5) erarbeitet werden. Durch Messung an den Strukturen (Kapitel 6) soll analysiert werden, wie die Qualität der Strukturen ist, um damit die Grenzen des Prozesses und die Optimierungsmöglichkeiten angeben zu können.

- Die erste Gruppe besteht aus langen Geraden solcher Stege unterschiedlicher Längen (maximal $56000\ \mu\text{m}$). Diese sollen der Messung optischer Dämpfungen in PC-Lichtwellenleitern dienen.
- Die zweite Gruppe besteht aus Stegen, die relativ kurz sind ($800\ \mu\text{m}$) aber einen getaperten Anfang haben. Diese Gruppe sollte es ermöglichen, den Einfluss des Tapers auf die übertragene Lichtleistung zu ermitteln.
- Die Elemente der zweiten Gruppe tauchen in anderen Gebieten der geprägten Polymerplatte auf und zwar so, dass jedes dieser Elemente zusätzliche gekrümmte

Stege mit unterschiedlichen Krümmungsradien besitzt (1000 bis zu 100 μm). Diese Elemente formen die dritte Gruppe. Diese Gruppe ist für das Messen der Leistungsverluste bei der Lichtübertragung in gekrümmten Wellenleitern gedacht.

- Die vierte Gruppe besteht aus paarweise angeordneten Stegen ohne Taper. Jedes Element dieser Gruppe besteht aus zwei Stegen, deren Anfangsgebiete weit voneinander liegen. Diese nähern sich allmählich, bis der Abstand zwischen ihnen 2 μm groß ist. Der Abstand bleibt so für 3000 μm dann fangen die Stege an, sich wieder voneinander zu entfernen. Diese Elemente formen optische Koppler, und dienen für das Studieren der Lichtankopplung durch das evanescente Feld.

Direkt am Anfang jedes Stegs kann ein Faserschacht geprägt werden, der präzises Anlegen einer Glasfaser an den Lichtwellenleiter ermöglicht. Das Prägen solche Stufen ist mit gestuften Formeinsätze möglich (Abschnitt 5.2.2).

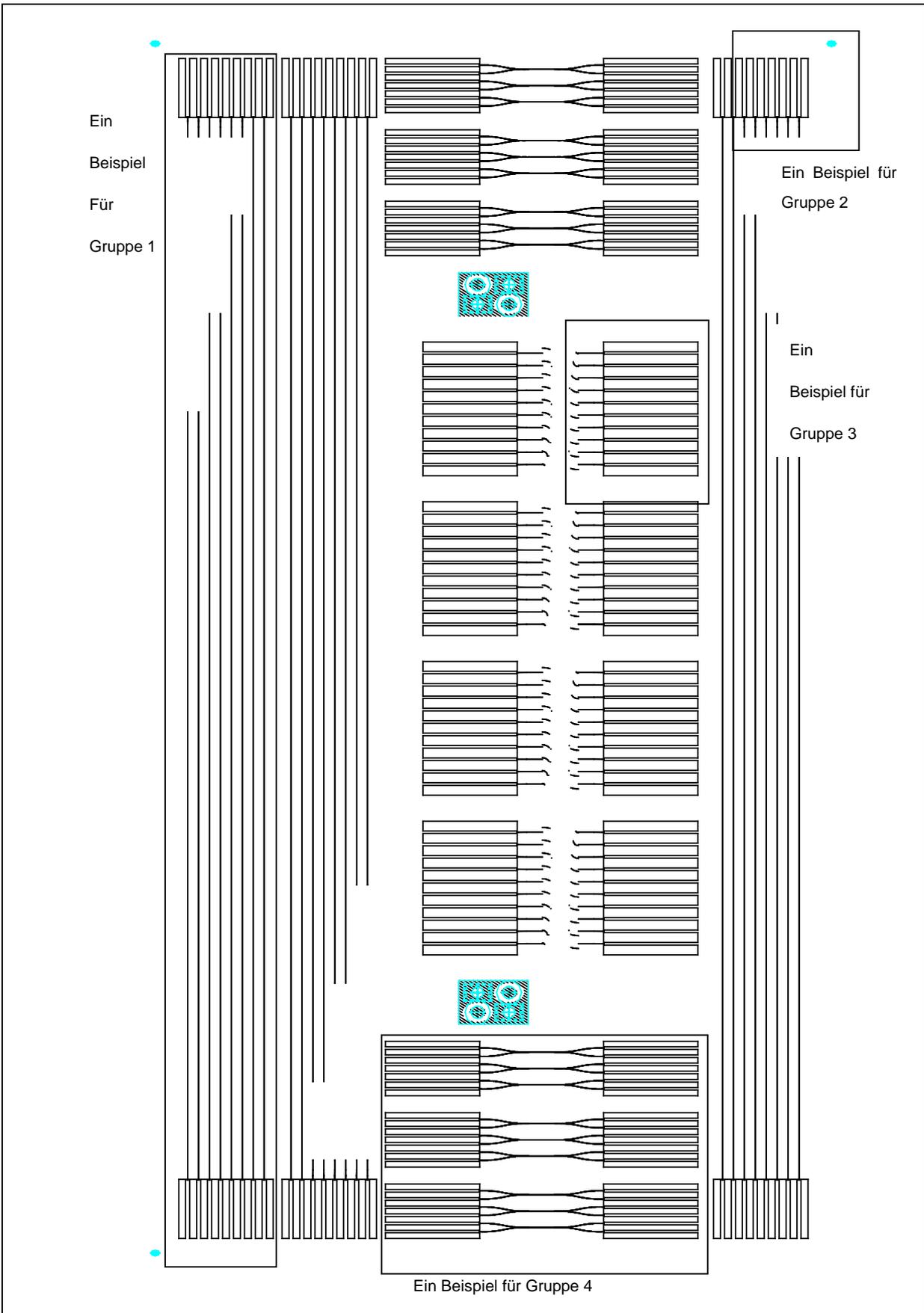


Abb. 3.57: Das Design

4 Formeinsatzherstellung

Wie die Ergebnisse der Simulationen zeigen, ist es notwendig, Formeinsätze herzustellen, mit denen Wellenleiterstrukturen mit einer Breite von $2\mu\text{m} - 4\mu\text{m}$ und einer Höhe von ca. $10\mu\text{m}$ erzeugt werden können. Parallel dazu müssen mit dem Formeinsatz Faserführungsgruben hergestellt werden, die von der Unterkante der wellenleitenden Schicht gerechnet eine Tiefe von ca. $61\mu\text{m}$ besitzen. Abbildung 4.1 (1) bis (4) zeigen in einer 3D-Ansicht einen Ausschnitt des Formeinsatzes an der Stelle eines Faserführungsschacht Ausschnitt des Formeinsatzes zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse.

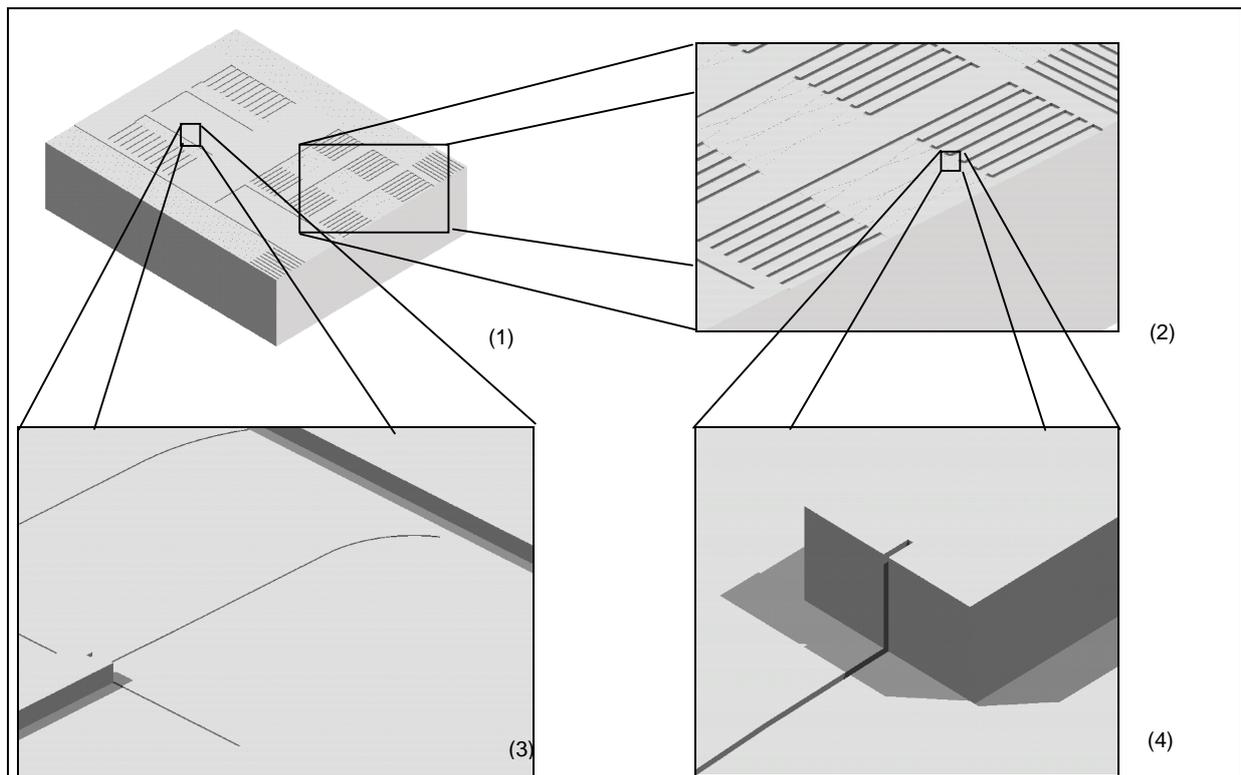


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Strukturen auf dem Formeinsatz. In den Detailbildern 3 und 4 sind der Block der Faserführungsgräben sowie der Graben zur Herstellung der Rippenwellenleiter zu erkennen. Dass der Graben in Bild 4 in den Block des Faserführungsgraben hineinreicht ist eine Folge der in Kap. 2.3 diskutierten Justiertoleranz)

Die Herstellung derartiger Formeinsätze ist prinzipiell auf zwei Wegen möglich:

- ∅ Verwendung eines Kupfersubstrates, das an den Stellen durch Präzisionsfräsen vertieft wurde, an denen später die Strukturen für die Faserführungsgruben liegen sollen und Anwenden des LIGA-Verfahrens auf dieses gestufte Substrat.
- ∅ Verwendung eines SU8-Resistes zur Herstellung der Stufe und der Strukturen

Beide Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet bzw. analysiert.

Die wellenleitenden Strukturen mit einer Breite von $2\mu\text{m} - 4\mu\text{m}$ erfordern eine Optimierung der Maskentechnik, da derartige Strukturen mit der am IMT verfügbaren Maskentechnik bisher nicht hergestellt wurden.

Zum besseren Verständnis der auf den verschiedenen Masken und in den weiteren Prozessschritten zu erzeugenden Strukturen ist in Tabelle 4.1 für die verschiedenen Prozessschritte zusammengestellt, welches Bild die Strukturen aufweisen. Sofern in jeweiligen Prozessschritt die Wellenleiter darstellende Struktur im jeweiligen Material Erhaben ist, bezeichnet man das Bild als Positiv (+), ansonsten als negativ (-).

Art des Erzeugnisses	Bild	Struktur	Verwendung
Wellenleiterstruktur in Polymer	+	Rippenwellenleiter(RPW) Glasfaserführungen (GFF)	Endanwendung
Formeinsatz Nickel	-	Grabenstruktur für RPW Metallblock für GFF	Prägen von Wellenleitern mit Glasfaserführungen
Resiststruktur für Formeinsatz	+	PMMA-Balken für RPW Aussparung im Resist für GFF	Galvanikform für Formeinsatz
Röntgenarbeitsmaske	+	Goldbalken für RPW Absorberfreier Bereich für GFF mit Absorbern für Berandung	Herstellung Resiststruktur für Formeinsatzgalvanik
Resiststruktur auf Arbeitsmaske	-	Graben im Resist für RPW Resistblock für GFF	Form für Absorbergalvanik auf Maskenmembran
Zwischenmaske zur Arbeitsmaskenherstellung	-	Absorberfreie Linie für RPW Absorberblock für GFF	Maske zur Herstellung der Arbeitsmaske
			Herstellung Resiststruktur für Formeinsatzgalvanik in SU8
Resiststruktur zur Herstellung der Zwischenmaske	+	Resistlinie für RPW Frei entwickelter Resistbereich für GFF	Form für Absorbergalvanik
Zwischenmaske als Arbeitsmaske	+	Goldbalken für RPW Absorberfreier Bereich für GFF mit Absorbern für Berandung	Herstellung Resiststruktur für Formeinsatzgalvanik in PMMA
Resiststruktur auf Zwischenmaske	-	Graben im Resist für RPW Resistblock für GFF	Form für Absorbergalvanik auf Maskenmembran

Tab. 4.1: Auflistung der in den verschiedenen Prozessschritten zu realisierenden Strukturen. RPW: Rippenwellenleiter, GFF: Glasfaserführungen

4.1 Maskenherstellung

In der Röntgentiefenlithographie werden für die Strukturierung von mehreren hundert Mikrometer dicken Resistschichten Röntgenarbeitsmasken verwendet, die eine Goldabsorberhöhe von ca. 20 µm aufweisen und durch Kopie einer Zwischenmaske mit weicher Röntgenstrahlung hergestellt werden (siehe Kap. 2.2.3). Aufgrund der bei den wellenleitenden Strukturen mit integriertem Faserführungsschacht notwendigen Resisthöhe

von maximal ca. 75 μm ist es prinzipiell möglich die mit dem Elektronenstrahlschreiber hergestellte Zwischenmaske, die eine Goldabsorberhöhe von 2,2 μm aufweist, direkt als Arbeitsmaske einzusetzen. Auf der anderen Seite bietet die Arbeitsmaske einerseits den Vorteil eines deutlich höheren Kontrastes zwischen bestrahltem und unbestrahltem Bereich aufgrund des ca. 20 μm hohen Goldabsorbers; dies kann sich bei der Strukturgenauigkeit und bei der Haftung der Strukturen auf dem Substrat positiv auswirken. Andere seits bietet die größere Absorberhöhe eine bessere Stabilität des Goldringes, der das freigeätzte Fenster begrenzt, in dem die Justierkreuze angeordnet sind. Aus diesem Grunde wurden beide Varianten der Maskenherstellung untersucht und analysiert.

4.1.2 Zwischenmaske als Arbeitsmaske

Wird als Maske für die Herstellung der PMMA-Strukturen eine Zwischenmaske verwendet, so muss sichergestellt werden, dass die Dicke des Goldabsorbers ausreichend ist, so dass unterhalb des Absorbers eine Dosis von weniger als 100 J/cm^3 abgelagert wird. Um die minimale Goldabsorberdicke einer Zwischenmaske zu ermitteln, wurde für verschiedene Bestrahlungsbedingungen die an der Resistoberfläche abgelagerte Dosis ermittelt. Wie die in Abbildung 4.2 dargestellten Ergebnisse der Berechnungen zeigen, macht eine Bestrahlung am Strahlrohr LITHO III an ANKA bei 1,8 GeV keinen Sinn, da in diesem Fall auch bei einer Goldabsorberdicke von 2,2 μm die abgelagerte Dosis deutlich größer als 100 J/cm^3 ist. Bei einer Elektronenenergie von 1,3 GeV reicht bei einer angestrebten Resistdicke eine Goldabsorberdicke von 1,8 μm aus; bei einer Resistdicke von 80 μm muss die Goldabsorberdicke mindestens 1,96 μm betragen. Goldabsorber mit einer Dicke von 1,8 μm lassen sich prinzipiell mit der Standardtechnik für die Herstellung von Zwischenmasken (Elektronenstrahlolithographie) erreichen.

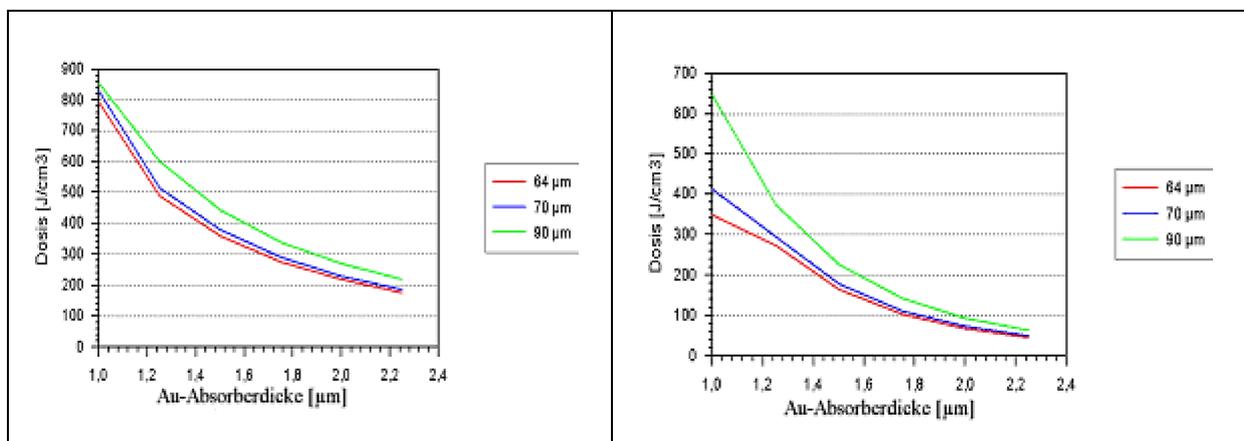


Abb. 4.2: Oberflächendosis hinter dem Goldabsorber für verschiedene Strahlenergie gegen die Goldabsorberdicke. Strahlrohr: Litho III (1,8 GeV Links 1,3 GeV Rechts), Dicke der Titanmembran 2,7 μm , Kein Filter, Grenzdosis 3,1 KJ/cm^3

In Abbildung. 4.3 ist eine schematische Darstellung der Strukturen der Zwischenmaske als Arbeitsmaske dargestellt.

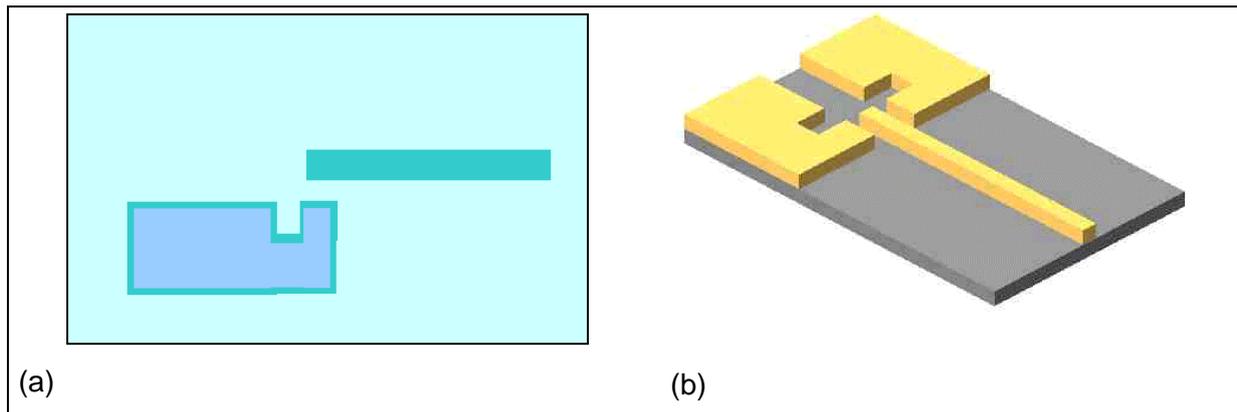


Abb. 4.3: (a) Aufteilung der zu schreibenden Layoutfläche in Fein- und Groblayer für den Fall einer Röntgenzwischenmaske, die als Arbeitsmaske eingesetzt wird. (b) Absorberstruktur.

■ Grobgeschriebener Bereich ■ Feingeschriebener Bereich ■ Verbleibendes PMMA ■ Titanmembran ■ Gold

Zur Herstellung der Zwischenmaske als Arbeitsmaske mussten die in Abbildung 4.3 dargestellten Strukturen hergestellt werden, d.h. der Rippenwellenleiter stellt im Resist dieser Maske ein Graben dar, der von breiten Resistbereichen umgeben wird. Bei nicht ausreichender Haftung zwischen Resist und Maskenmembran, kann sich diese Resistfläche im Bereich der Kante aufgrund von Spannungen ablösen, so dass sich im Kantenbereich der Struktur ein Spalt zwischen Resist und Trägermembran ergibt. Dies führt bei dem nachfolgenden Galvanikschritt zu einem Eindringen des Goldelektrolyten in diesen Spalt und zu einer sogenannten Unterplattierung. Zur Lösung dieser Probleme war es notwendig, die zur Strukturierung der Resistschicht verwendeten Standarddosiswerte für die Elektronschreiber-Lithographie zu optimieren. Darüber hinaus musste für diese Maskenvariante sichergestellt werden, dass die zur justierten Bestrahlung notwendigen Justierkreuze auf einer Röntgenzwischenmaske (RZM) hergestellt werden konnten. Dieser Prozess wurde bisher im IMT nicht realisiert.

Die Haftung konnte verbessert werden, indem die 3,2 μm PMMA-Schicht nach dem Aufschleudern auf den Abhebewafer anstatt bei der Standardtemperatur von 170 C° für 30 min bei 190 C° für 60 min getempert wurde. Die damit verbundene Reduzierung des Restlösemittelgehalts verbessert die Formstabilität der PMMA Strukturen. Gleichzeitig können diese aber zu einer stärkeren Versprödung neigen, was je nach Strukturgeometrie eine stärkere Rissbildung zur Folge haben kann. Bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Strukturen stellt dies allerdings kein Problem dar. Mit zur Verbesserung der Haftung trug auch die Optimierung der Schreibstrategie bei.

Um die Verluste in den wellenleitenden Strukturen so gering wie möglich zu halten, müssen die Seitenwände eine möglichst geringe Rauigkeit aufweisen (siehe Kap. 3.5.3). Dies ist nur möglich, wenn bereits die Absorberstrukturen ohne nennenswerte Rauigkeit erzeugt werden. Insofern ist es notwendig die Schreibparameter bei der Erzeugung der Maske so auszuwählen, dass bereits in diesem Schritt keine raue Polymerseitenwand erzeugt wird. Rauigkeiten in der Polymerseitenwand der Maske würden zu einem Formeinsatz mit entsprechend rauen Seitenwänden führen. Das Prägen mit solchen Formeinsätzen ergibt LWL, die wiederum raue Seitenwände haben. Um eine minimale Rauigkeit der sich beim Bestrahlen ergebenden Strukturen zu erzielen, werden die Strukturen mit zwei Layern, einem Feinlayer und einem Groblayer geschrieben. Mit dem Feinlayer wird der

Kantenbereich der Struktur geschrieben; hierzu wird eine kleine Beam-Step-Size, eine kleine Beam-Spot-Size und ein vergleichsweise geringer Strom verwendet. Um die Schreibzeit zu minimieren wird das Strukturinnere mit dem Groblayer ausgefüllt; hierzu wird eine große Beam-Spot-Size, eine große Beam-Step-Size und ein starker Strom verwendet. Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Aufteilung der Strukturen in die verschiedenen Layer. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Breite des Feinlayers auf 3 μm gesetzt, was bedeutet, dass die Wellenleiterstrukturen nur mit dem Feinlayer geschrieben werden. Damit wird der Einfluss des Proximity-Effektes vermindert.

Des Weiteren war es notwendig, die Elektronenstrahlschreiber-Dosis den besonderen Strukturen anzupassen, weil die Standarddosiswerte für die feinen Strukturen wegen massiver Unterschnitte der Strukturen, aufgrund einer zu hohen Dosisablagerung nicht verwendet werden konnten. Nach umfangreichen Dosisvariationen erwies sich eine Dosis von 1250 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ für den Feinlayer und 660 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ für den Groblayer als die optimale Elektronenstrahlschreiber-Dosis.

Auch bei den Entwicklungsparametern wurde von den Standardbedingungen abgewichen. So wurde die Entwicklungszeit zwar bei 150 sec belassen, wegen der Sonderform der Strukturen wurde die Schleuderdrehzahl auf 1000 UpM festgesetzt und die Rampe nach dem Spülende auf 250 / 100 UPM optimiert. Mit diesem Prozess wurden die Strukturen gut und frei entwickelt, Haftungsprobleme konnten vermieden werden. Der folgende Descum erfolgte unter Standardbedingungen mit Sauerstoffplasma für 120 s, um mögliche PMMA-Reste am Boden des Substrats zu entfernen. Die Prozessparameter bei der Elektronenstrahlolithographie sind in Tab. 4.2 zusammengefasst.

Schichtaufbau der Maskenmembran		Titan oxidiert: 2,7 μm ; Kohlenstoffschicht 10 nm; Gold: 20 nm
Tempern der Titanschicht auf dem Si-Substrat		400 C°/ 30 min
verwendeter Resist		PMMA in Anisole
Resistdicke		3 μm (standard)
Bestrahlungsparameter	Beschleunigung der Elektronen	100 keV
	Temperparameter	190C°, 60 min
	Dosis (Feinlayer: 3 μm breit)	1250 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
	Dosis (Groblayer)	660 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
Entwicklungsparameter	Entwicklungszeit	150 s
	Schleuderdrehzahl	1000 UpM
	Rampe nach dem Spülende	250/100 UpM
	Descum	120 s

Tab. 4.2: Prozessparameter bei der Elektronenstrahlolithographie zur Herstellung einer Zwischenmaske als Arbeitsmaske

Unter Verwendung derart hergestellter Resiststrukturen konnten alle Strukturen einschließlich der schmalen langen Stege durch die Galvanik in Gold hergestellt werden. Die Raster-Elektron-Mikroskop-Aufnahme zeigt, dass an manchen Stellen bei einer Maske die Stege teilweise übergalvanisiert sind (Abb. 4.4).

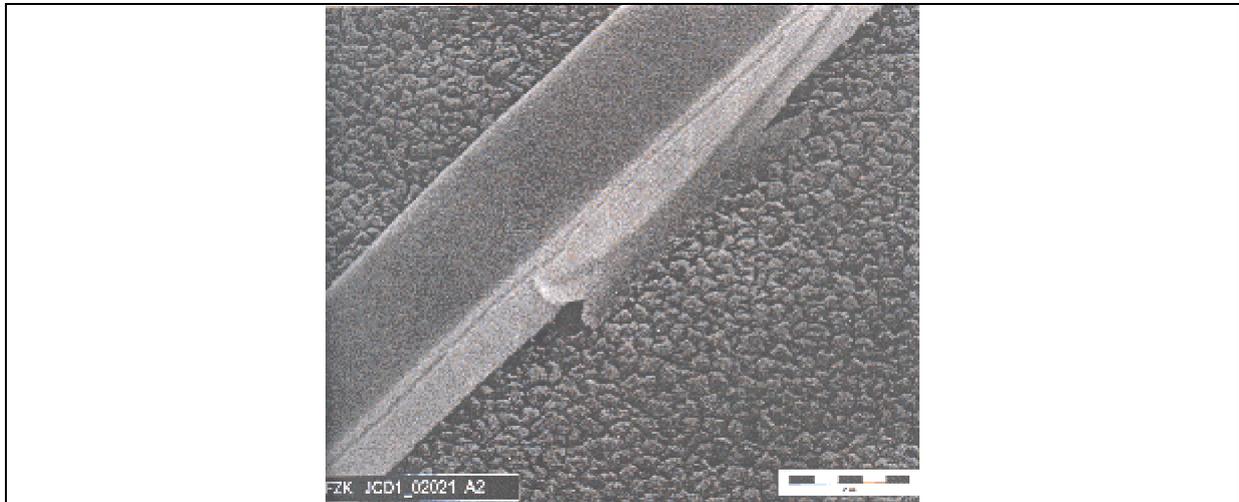


Abb. 4.4: Übergalvanisierte Au-Stege auf der Röntgenzwischenmaske

Die minimale gemessene Höhe der schmalen galvanisierten Stege war größer als $2,5\ \mu\text{m}$. Diese realisierte Goldabsorberdicke garantiert beim Bestrahlen mit $1,3\ \text{GeV}$ eine Oberflächendosis, die weit unter der Schädigungsdosis liegt, was die Qualität der sich nach der Entwicklung ergebenden Feinen-PMMA-Strukturen verbessert. An den übergalvanisierten Stellen ist allerdings eine deutlich größere Rauigkeit zu erwarten, als bei normal befüllten Strukturen, bei denen die Rauigkeit von den Schreibparametern des Elektronenstrahlschreibers (Step-Size, Spot-Size) bestimmt wird. Dies kann im Rahmen der Arbeit insofern akzeptiert werden, als dass nur einzelne Strukturen auf einer Maske betroffen waren. Die Dicke der großen Absorberblöcke auf der Röntgenzwischenmaske, die die Glasfaserführungen hergestellt werden, war maximal $1,3\ \mu\text{m}$. Dieser Dickenunterschied wird durch die hohe Goldabscheiderate in schmalen Strukturen, was eine Folge der Konzentration von Feldlinien ist, im Verhältnis zu der Abscheiderate in großen Blöcken, verursacht. Da die Goldabsorberdicke unterhalb der minimalen Goldabsorberdicke liegt, ist in diesem Bereich mit einem Angriff auch unbestrahlter Resiststrukturen zu rechnen. Dies verursacht eine ziemlich raue Oberfläche und raue Seitenwände der sich nach der Entwicklung ergebenden Strukturen. Da die entsprechenden zu entformenden Strukturen als Halteelemente und nicht als optisch funktionierende Elemente gedacht sind, ist diese Rauigkeit nicht entscheidend, solange die Entformungskräfte beim Heißprägen wegen der in den Formeinsatz übertragenen Rauigkeit nicht zu hoch sind.

Das nicht beschriebene PMMA wurde nach der Galvanik mit Ethylacetat in einer Ultraschallanlage (2 min/100W) aufgelöst. Die Waferfolie wurde anschließend wie bei einer Standardmaske abgehoben und auf einen Titanrahmen übertragen.

Die Versuche zur Herstellung von Justierkreuzen und Justierfenstern in Röntgenzwischenmasken waren bei Verwendung von Waferfolien, die unter

Standardbedingungen hergestellt wurden (siehe Kap. 2.2.4), nicht erfolgreich. Die Folie war ausgehend von dem Ätzfenster gerissen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Titanfolien unter Zugspannungen stehen und die dünnen Goldabsorberstrukturen im Gegensatz zu Arbeitsmasken diesen Zugspannungen nicht standhalten. Aufgrund dieser Hypothese wurden die Temperbedingungen nach dem Sputtern der Titanschichten auf den Si-Wafern von 450 C°/30 min auf 400 C°/30 min erniedrigt. Diese Erniedrigung bewirkt eine Reduzierung der Zugspannung der gesputterten Titanfolie. Zusätzlich dazu wurde das Layout der Justierkreuze modifiziert (siehe Abbildungen 4.5, 4.6), in dem einerseits die Justierkreuze in ein stabilisierendes großes Goldfeld eingebunden wurden und andererseits die Kanten der freientwickelten Resistbereiche stark verrundet wurden. Da durch diese Modifikation hohe Kerbspannungen in den Absorberecken vermieden werden, konnte die Rissanfälligkeit an den Justierkreuzen beim Freiätzen des Justierfensters verringert werden und die Ätzfenster konnten ohne Reißen der Titanfolie in Zwischenmasken eingebracht werden.

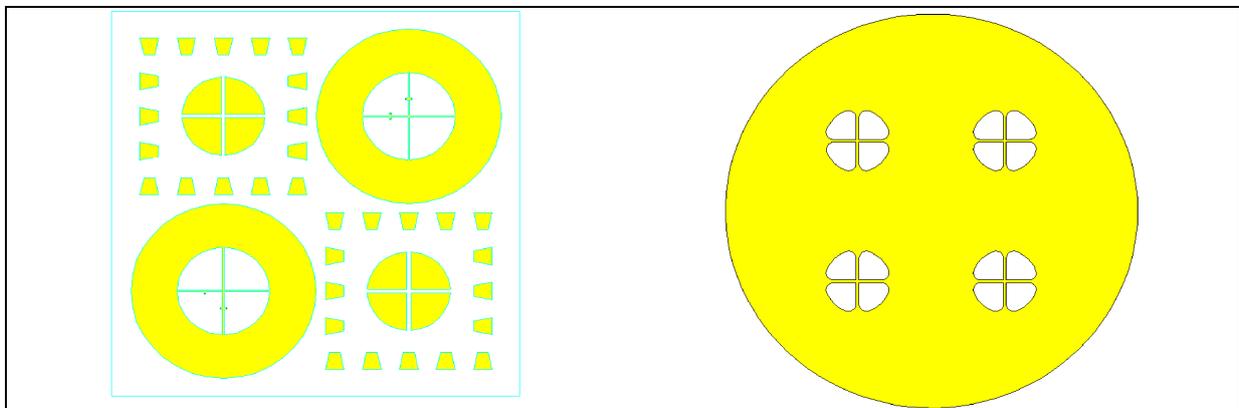


Abb. 4.5: : Standard-Justierkreuze wie sie üblicherweise am IMT auf einer Arbeitsmaske verwendet werden.

Abb. 4.6: Modifizierte Justierkreuze zur Anwendung auf der als Arbeitsmaske eingesetzten Röntgenzwischenmaske

Somit stand nach den umfangreichen Optimierungsarbeiten eine Zwischenmaske mit Justieröffnungen mit positivem Bild zur Verfügung, die als Arbeitsmaske eingesetzt werden konnte.

4.1.2 Arbeitsmaske

Wie bereits in Kapitel 2.2.4 erläutert, werden die im LIGA-Prozess benötigten Röntgenarbeitsmasken mit Goldabsorberdicken $> 20 \mu\text{m}$ durch Kopie einer Röntgenzwischenmaske mit weicher Röntgenstrahlung in eine bis zu $60 \mu\text{m}$ dicke Resistschicht hergestellt. Es ist deshalb für die Herstellung der Arbeitsmaske zuerst notwendig, eine Zwischenmaske herzustellen. Diese ist im Vergleich zur Zwischenmaske als Arbeitsmaske im Bild invertiert, d.h. die die Wellenleiterstrukturen darstellenden schmalen Stege mit einer Breite von 2, 3 oder $4 \mu\text{m}$ und einer Länge bis zu 60mm müssen im Resist erzeugt werden. Dies stellt bzgl. der Haftung eine noch größere Anforderung dar als im Falle der Zwischenmaske als Arbeitsmaske. In Abbildung 4.7 ist eine schematische Darstellung der Strukturen der Zwischenmaske zur Herstellung einer Arbeitsmaske dargestellt.

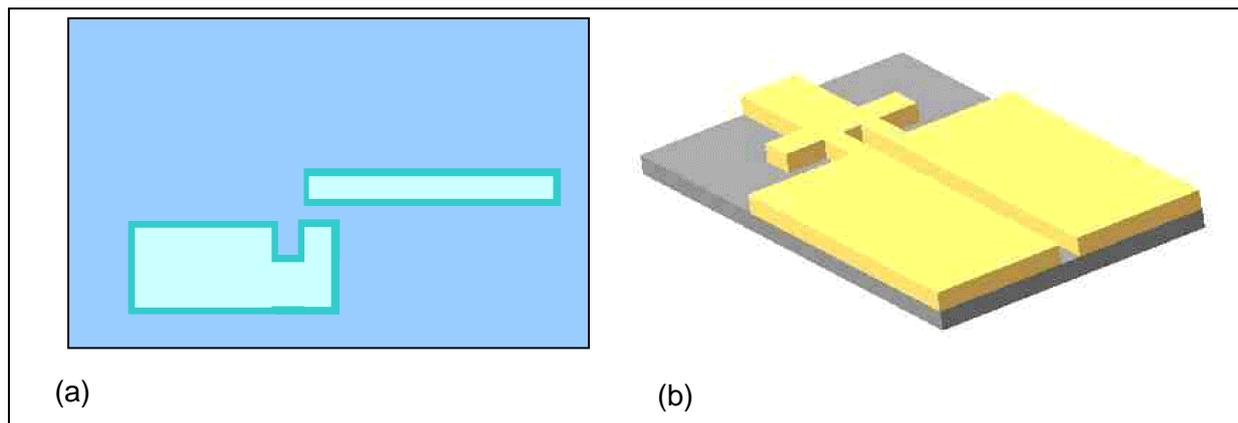


Abb. 4.7: : (a) Aufteilung der zu schreibenden Layoutfläche in Fein- und Groblayer für den Fall einer Röntgenzwischenmaske, mit der eine Arbeitsmaske hergestellt wird. (b) Absorberstruktur

■ Grobgeschriebener Bereich ■ Feingeschriebener Bereich ■ Verbleibendes PMMA ■ Titanmembran ■ Gold

Genau wie bei der Zwischenmaske als Arbeitsmaske besteht auch in diesem Fall die Anforderung die Rauigkeit der Seitenwände so gering wie möglich zu halten, da die Rauigkeit auf die Au-Strukturen übertragen wird und bei der Herstellung der Arbeitsmaske mit umkopiert würde. Insofern wurde auch in diesem Fall das Layout in zwei Layer unterteilt (siehe Abbildung 4.7)

Im Hinblick auf eine optimale Strukturqualität und eine möglichst gute Haftung der Strukturen auf dem Substrat wurden die Belichtungsparameter für beide Layer abweichend von den Standardbedingungen optimiert. Diese Optimierung unterscheidet sich aufgrund der Tatsache, dass andere Strukturen zu erzeugen waren, von der Optimierung für die Zwischenmaske als Arbeitsmaske.

Für das Grobschreiben wurde eine Versuchsreihe mit Dosisvariationen (660 bis $810 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die optimale Dosis $660 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ beträgt. Diese optimale Dosis gewährleistet, dass trotz der mit Feinlayer geschriebenen Pufferzone die nach der Entwicklung verbleibenden Strukturen durch den Proximity-Effekt nicht negativ beeinflusst werden.

Die Optimierung der Parameter für den Feinlayer waren darauf ausgerichtet, die Haftung der schmalen Resiststrukturen bestmöglich zu gewährleisten. Es wurde eine Versuchsreihe mit Dosisvariationen von 660 bis $810 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die optimale Dosis $800 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ beträgt.

Neben diesen Optimierungen musste zur Sicherstellung einer ausreichenden Haftung auch der Schichtaufbau der Maskenmembran optimiert werden. Wurde der Standardaufbau mit einer Goldgalvanikstarschicht auf dem Titanoxid verwendet, löste sich ein Großteil der schmalen Strukturen wegen eines zu geringen Haftvermögens der Goldschicht auf dem Titanoxid ab.

Um die Haftung der PMMA Strukturen zu erhöhen, wurden die Trocknungsparameter des geschleuderten Resist variiert. So wurde durch Erhöhung der Trocknungstemperatur der Restlösemittelgehalt vermindert. Mit einer Erhöhung der Trocknungstemperatur bis zu 200 C° und der Verlängerung der Trocknungsdauer bis 60 C° Minuten wurde der Resist spröder.

Obwohl dies einen positiven Effekt auf die Haftung hatte, hat es das Haftungsproblem nicht endgültig gelöst.

Bei Verzicht auf die Goldschicht konnte die Haftung der PMMA Strukturen auf dem Träger deutlich verbessert werden. In diesem Fall standen die Strukturen direkt auf den TiO_x . Obwohl die Haftung in diesem Fall ausreichend war, hat dies zu Galvanikproblemen wegen den Isolationsseingeschafften des TiO_x geführt. Es wurde versucht dieses Problem durch Implusabscheidung zu lösen. Durch diese Methode erhöht man die Stromdichte beim Starten des Galvanikprozesses. Damit nimmt aber die Anzahl nicht galvanisierter Stellen und deren Größe im Goldabsorber zu, was nicht akzeptiert werden kann.

Das Haftungsproblem konnte gelöst werden, in dem man als Haft- und Goldstartschicht einen Schichtaufbau aus 5 nm dickem Chrom und 10 nm dickem Gold auf dem oxidierten Titan aufbrachte. Diese Schichtfolge ergab ein ausreichendes Haftungsvermögen für alle Mikrostrukturen; gleichzeitig hat sie sich als eine gute Galvanikstartschicht erwiesen.

In Tab. 4.3 sind die Parameter für die Herstellung einer Zwischenmaske zur Erzeugung einer Arbeitsmaske zusammengestellt.

Schichtaufbau der Maskenmembran		Titan oxidiert: 2,7 μm ; Kohlenstoffschicht 10 nm, 10 Chrom: ?? nm; Gold: 20 nm
Tempern der Titanschicht auf dem Si-Substrat		400 C°/ 30 min
verwendeter Resist		PMMA in Anisole
Resistdicke		3 μm (standard)
Bestrahlungsparameter	Beschleunigung der Elektronen	100 keV
	Temperparameter	190C°, 60 min
	Dosis (Feinlayer: 3 μm breit)	800 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
	Dosis (Groblayer)	660 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
Entwicklungsparameter	Entwicklungszeit	150 s
	Schleuderdrehzahl	1000 UpM
	Rampe nach dem Spülende	250/100 UpM
	Descum	120 s

Tab. 4.3: Prozessparameter bei der Elektronenstrahlolithographie zur Herstellung einer Zwischenmaske mit der eine Arbeitsmaske erzeugt wird

In Abbildung 4.8 sind die nach den Optimierungsarbeiten mit Erfolg hergestellten Resiststrukturen der Wellenleiter auf der Zwischenmaske dargestellt.

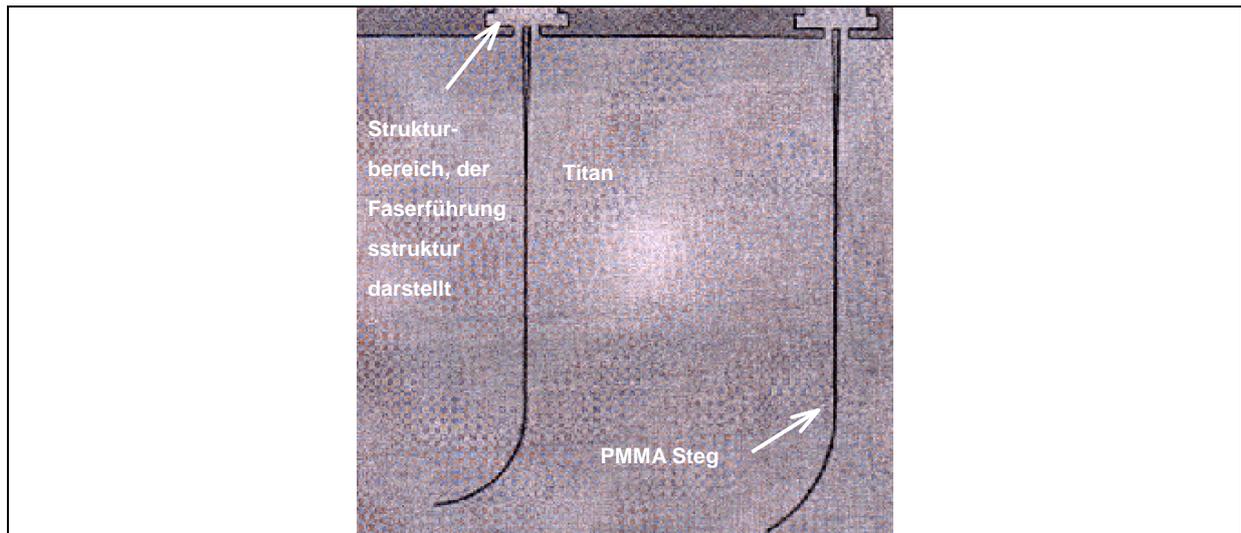


Abb. 4.8: Mit dem Elektronenstrahlschreiber geschriebene Resiststrukturen auf der Zwischenmaske nach der Entwicklung

Hinsichtlich der Justierstrukturen bestand zwar für die Realisierung der Zwischenmaske kein Handlungsbedarf. Um jedoch Probleme bei der Arbeitsmaskenherstellung von vornherein zu minimieren wurde das im Rahmen der Zwischenmaske als Arbeitsmaske erarbeitete, weniger rissanfällige Layout auch in diesem Fall verwendet (siehe Abbildung 4.6).

Nach der erfolgreichen Herstellung der Zwischenmaske zeigte die optische Inspektion, dass es Verengungen in den die Wellenleiter darstellenden Gräben im Goldabsorber gibt. Diese Verengungen sind von jeder Seite eines Fensters bis zu 250 nm breit. Dies wiederholt sich alle 500 μm in vertikaler aber auch in horizontaler Richtung. Dieser Fehler wurde in die Arbeitsmasken umkopiert (siehe Abbildung 4.9) und tritt zwangsweise auch im Formeinsatz auf, und zwar so, dass die schmalen Vertiefungen alle 500 μm solche Engpässe aufweisen.

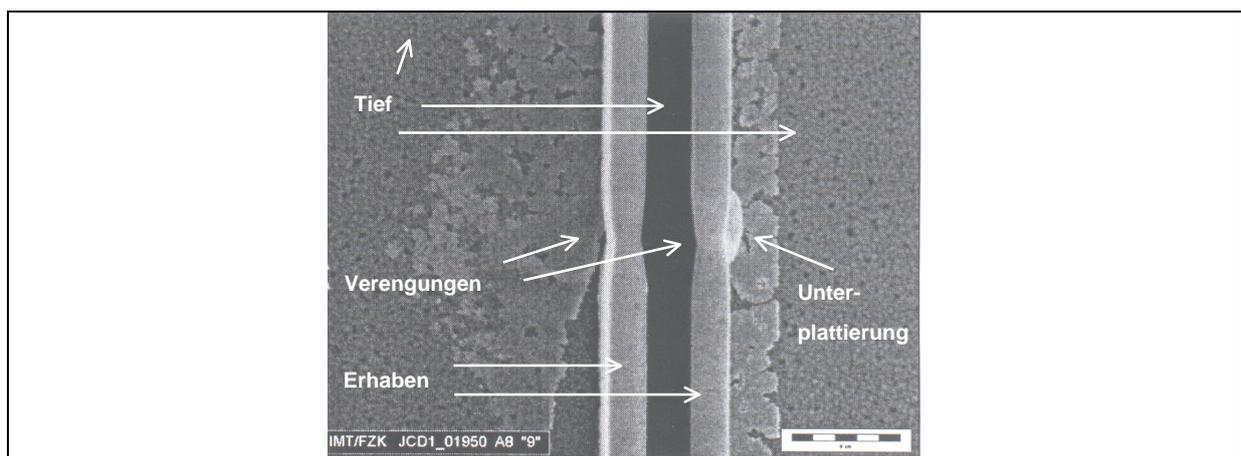


Abb. 4.9: Verengungen bei den Absorber-Stegen der Arbeitsmaske

Abgesehen von diesen Fehlern lag nach den Optimierungsarbeiten zur Haftung und zu den Schreibparametern eine verwendbare Zwischenmaske vor. Mit dieser Zwischenmaske wurden mehrere Versuche zur Herstellung der in dieser Arbeit benötigten Arbeitsmaske durchgeführt, die allerdings aufgrund unterschiedlicher Effekte nicht erfolgreich waren (siehe

Tabelle Anhang 2). Dabei konnten während des Prozessierens der Arbeitsmasken die in den Raster-Elektronen-Mikroskopie-Aufnahmen dokumentierten Fehler festgestellt werden:

- Goldreste am Boden und an den Stegen. Teilweise sind die Fehler in gesamten Stegbereich festzustellen (siehe Abbildung 4.9). Die Ursache hierfür ist eine nicht ausreichende Haftung der Resiststrukturen, die dazu führt, dass der Elektrolyt in geringem Maße unter die Resiststruktur eindringen kann und sich dort punktuell abscheidet.
- Fadenförmige Goldreste an der Stirnseite der Stege (siehe Abbildung 4.10). Die Ursache hierfür sind Spannungsrisse in den Seitenwände der Grabenstrukturen, in die sich während der Galvanik Gold abscheidet.

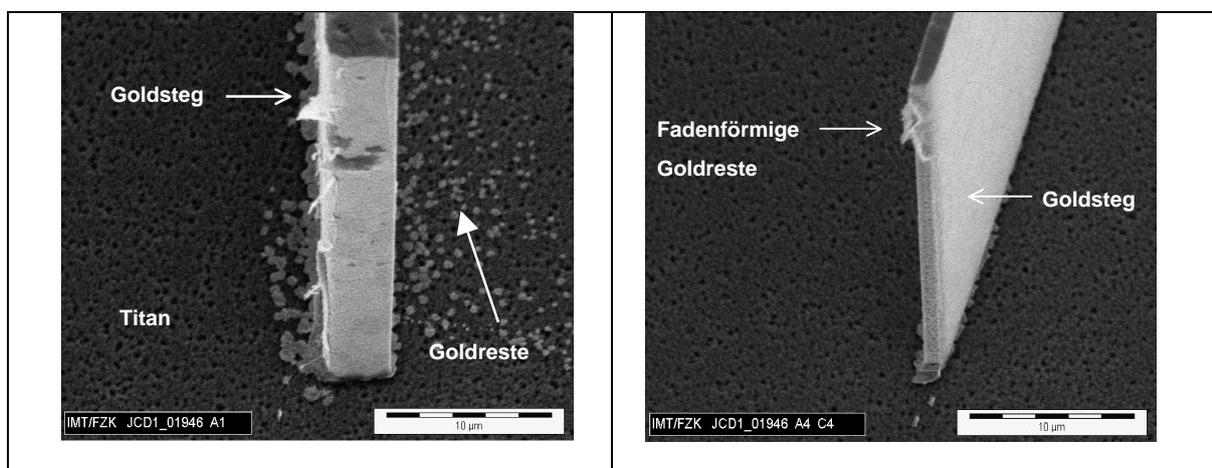


Abb. 4.9: Goldreste auf der Maskenmembran (Unterplattierung)

Abb. 4.10: Fadenförmige Goldreste an der Stirnseite der die Wellenleiter darstellenden Absorberstrukturen

Abbildung 4.12 zeigt die beschriebenen Fehler sehr deutlich am Anfang der gekrümmten Stege. Dort sind die Spannungen auf den Resist besonders hoch, so dass dort sowohl die Wahrscheinlichkeit für Spannungsrisse als auch die für mangelnde Haftung der Resiststrukturen besonders hoch ist.

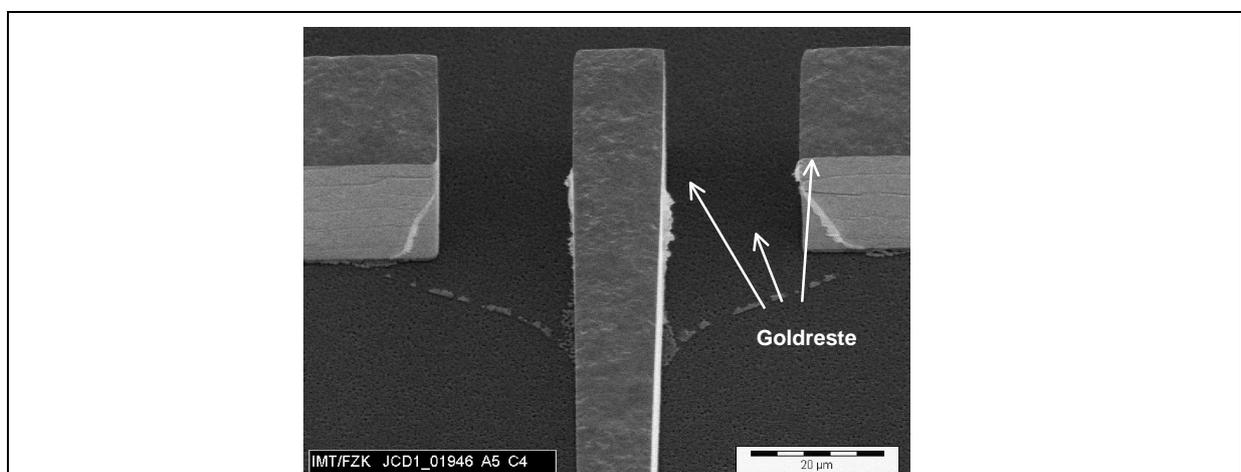


Abb. 4.12: Goldreste am Anfang der Goldabsorberstrukturen eines gekrümmten Wellenleiters mit Taper

- Reste von PMMA nach dem Strippen (siehe Abbildung 4.13). Diese Fehler sind häufig auf der Maske zu sehen. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der Lage solcher Reste und der Lage bestimmter Stege festgestellt. Sie sind allerdings unkritisch, da sie die zur Strukturierung verwendete Röntgenstrahlung nur wenig absorbieren.
- Fehlen eines Steges bei den Kopplerstrukturen (siehe Abbildung 4.14) Überwiegend treten solche Fehler bei Kopplerstrukturen auf, deren Stegbreite $2\mu\text{m}$ beträgt

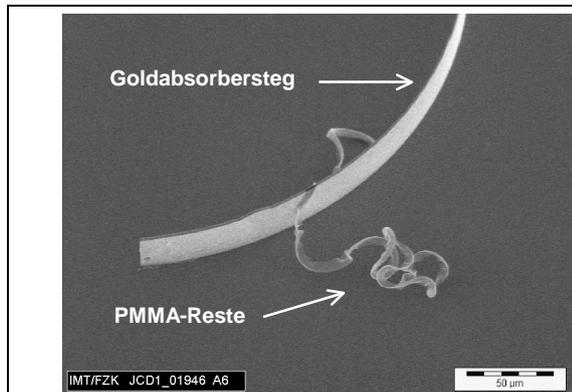


Abb. 4.13: Reste von PMMA an einem gekrümmten Goldabsorbersteg auf der Arbeitsmaske

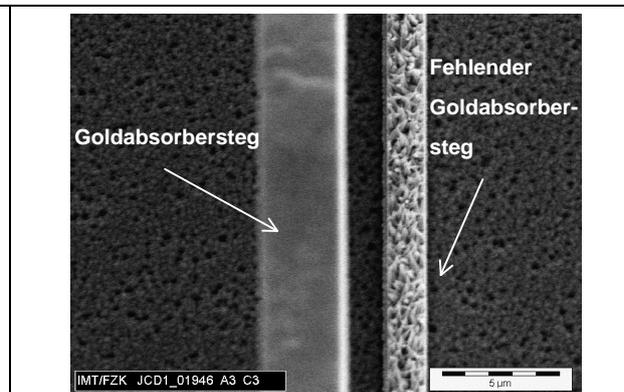


Abb. 4.14: Fehlender Goldabsorbersteg bei Kopplerstrukturen auf der Arbeitsmaske

- Unterbrechungen der Stegstrukturen (siehe Abbildungen 4.15). Die Ursache für diesen Fehler liegt, darin, dass die Galvanik an dieser Stelle nicht gestartet ist. Grund hierfür kann sein, dass der Steg im PMMA nicht vollständig durchentwickelt war. Leider lässt sich dies vor der Galvanik nicht eindeutig feststellen. Ein starkes Überentwickeln der Resiststruktur, um diesen Fehler zu vermeiden ist auch nicht möglich, da dies die Haftung der restlichen Strukturen vermindern würde.

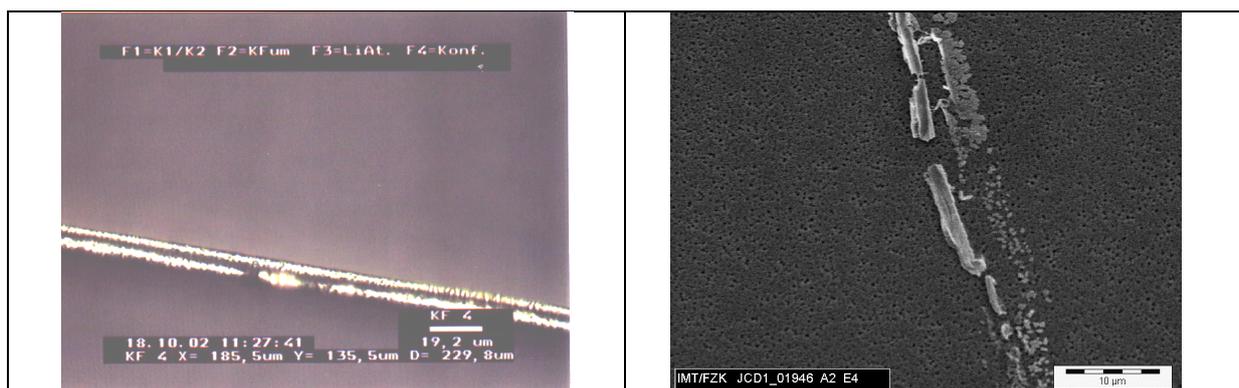


Abb. 4.15: Unterbrechungen der Stegstrukturen aufgrund eines nicht oder unzureichend erfolgten Galvanikstarts

Neben diesen Problemen, Handhabungsproblemen und eine nicht rechtzeitig erkannte Übersättigung des Entwicklerbades, die dazu führten, dass die mehrfach hergestellten Masken unbrauchbar waren, konnte eine für die Strukturen typische Schadensursache fest gemacht werden.

Bei Verwendung der Standardbedingungen lösten sich insbesondere die 2 μm und 3 μm breiten Strukturen vollständig vom Substrat. Bei den 4 μm breiten Strukturen kam es nur vereinzelt zu einer Ablösung. Im Falle der Kopplerstrukturen sollen im Resist auf der Arbeitsmaske zwei Gräben (Breite 2, 3 oder 4 μm) durch einen 2 μm breiten PMMA-Steg getrennt sein. Auf den REM-Aufnahmen (Abb. 4.16) sieht man, dass die aus den Gräben resultierenden Goldstege auf der Arbeitsmaske ihre nominale Breite nicht beibehalten. Weiterhin sieht man, dass die Stege im Abstand zu einander variieren. Die Ursache liegt darin, dass der PMMA-Steg während der Galvanik verbogen wurde und sich je nach Position unterschiedlich stark der Wand des rechten oder des linken Grabens näherte. Ursache für diese Fehler ist die mangelnde Stabilität der Resiststrukturen, die durch die Aufnahme von Feuchtigkeit während des Entwicklungs- und Galvanikprozesses noch weiter herabgesetzt wird. Eine genaue Analyse der Fehler und deren Zuordnung zum Design findet sich für die Maske Los-Nr. 01946 im Anhang 2.

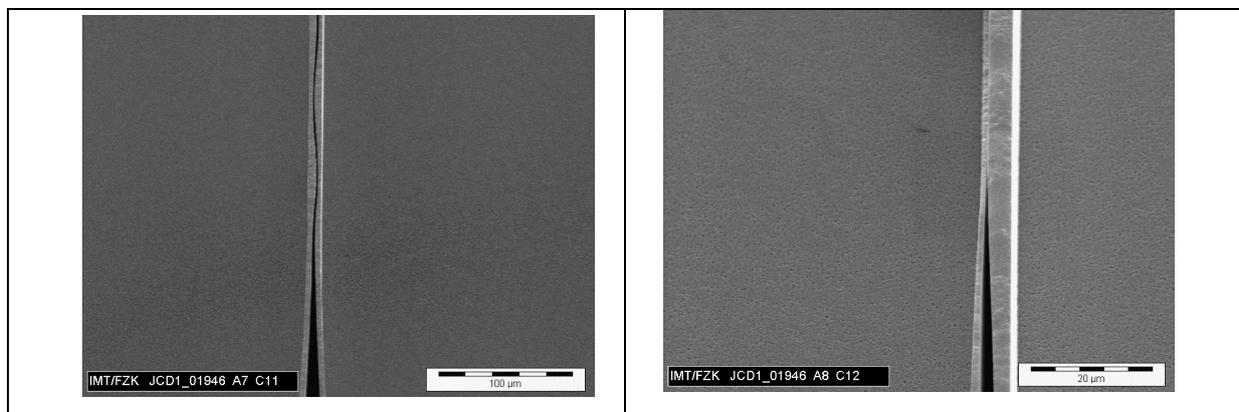


Abb. 4.16: Abbild der Kopplerstrukturen im Absorber der Maske. Der Abstand zwischen den beiden Absorberstegen variiert sich bzw. ist teilweise nicht vorhanden, was darauf hindeutet, dass sich der PMMA-Steg vor oder während der Galvanik verbogen bzw. sich vollständig an eine der Seitenwände angelegt hat.

Zur Verminderung der Fehlerrate wurde die Dicke der Resistschicht auf 40 μm herabgesetzt und damit das Aspektverhältnis verringert. Dadurch erhöht sich die mechanische Stabilität der Strukturen gegen Querkräfte, die im Entwicklungs- und Galvanikprozess auftreten. Mit dieser Maßnahme konnte eine Maske hergestellt werden, bei der bis auf die Kopplerstrukturen mit 2 μm breiten Stegen die Strukturen die geschilderten Effekte nicht aufwiesen. Die Maske konnte leider für die Herstellung eines Formeinsatzes nicht eingesetzt werden, da die Titanmembran einige Tage nach dem Abheben ohne äußere Einwirkungen gerissen ist.

Aus diesem Grunde konnte der Weg der Herstellung eines Formeinsatzes über eine Arbeitsmaske im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt werden.

4.2 Formeinsatzherstellung

Wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt, lagen für die Herstellung von Formeinsatzten folgende Masken vor:

- Chrommasken
- Zwischenmaske mit negativem Bild (für SU8) ohne Justierkreuze (siehe Abschnitt 4.1.1)

- Zwischenmaske als Arbeitsmaske mit positivem Bild (für PMMA) mit Justierkreuzen (siehe Abschnitt 4.1.2)

Für die Herstellung des Formeinsatzes wurden verschiedene Möglichkeiten analysiert. Dabei sollte insbesondere auch die Frage beantwortet werden, ob die optische Lithographie auf der Basis von SU8 zur Herstellung von Formeinsätzen eingesetzt werden kann und wo die qualitativen Unterschiede zu Formeinsätzen liegen, die mit Röntgentiefenlithographie hergestellt werden. Optische Lithographie mit SU8 kann prinzipiell zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen aber auch nur zur Herstellung einer Stufe auf einem ebenen Substrat eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund ergeben sich somit 5 unterschiedliche Herangehensweisen zur Realisierung eines Formeinsatzes

Herstellung eines nicht gestuften Formeinsatzes zum Test der Wellenleiterqualität

- durch optische Lithographie über eine Chrommaske auf der Basis von SU8
- durch Röntgenlithographie über eine Zwischenmaske mit negativem Bild auf der Basis von SU8
- durch Röntgenlithographie über eine Zwischenmaske als Arbeitsmaske mit positivem Bild auf der Basis von PMMA

Herstellung eines gestuften Formeinsatzes

- durch optische Lithographie über zwei Chrommasken wobei beide Schichten aus SU8 bestehen
- durch Röntgenlithographie über eine Zwischenmaske als Arbeitsmaske mit positivem Bild auf einem vorgefrästen Kupfersubstrat.

Die verschiedenen Varianten sind in Tabelle 4.4 mit ihren Vor- und Nachteilen sowie den mit den Formeinsätzen erfolgten Aktionen zusammengestellt.

		Formeinsatz auf SU8-Basis				Formeinsatz auf PMMA-Basis		
		1	2	3	4	5		
Sorte								
Maximale Dicke der Formeinsatzvertiefungen		10 µm tiefen Strukturen	64 µm tiefen Strukturen	10 µm tiefen Strukturen	10 µm tiefen Strukturen	64 µm tiefen Strukturen		
Anzahl der Stufen		Einstufig	Zweistufig	Einstufig	Einstufig	Zweistufig		
Technologie		UV Lithographie	UV Lithographie	RTL über eine ZM	RTL über eine ZM	<ul style="list-style-type: none"> Gefräste Kupferplatte Bestrahlung mit RTL 		
Vorteile		<ul style="list-style-type: none"> Entschichten am IMT Prozess steht Schnell herzustellen 	<ul style="list-style-type: none"> Schnell herzustellen Mit Faserhaltestrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Entschichten am IMT Scharfe Strukturkanten 	<ul style="list-style-type: none"> Prozess steht 	<ul style="list-style-type: none"> Prozess steht Mit Faserhaltestrukturen 		
Nachteile		Beugung an Strukturenden	<ul style="list-style-type: none"> Entschichten (Dienstleistung bei fremder Firma) Beugung an Strukturen 	Grosse Rauigkeit	Nicht gestuft			
Ergebnisse		<ul style="list-style-type: none"> FE hergestellt PC/PMMA damit geprägt 	<ul style="list-style-type: none"> FE hergestellt PC/PMMA damit geprägt 	<ul style="list-style-type: none"> FE hergestellt, Wegen hoher Seitenwandrauhigkeit zum Prägen nicht eingesetzt 	Nicht hergestellt	<ul style="list-style-type: none"> FE hergestellt PC,PMMA damit geprägt 		

Tab. 4.4: Varianten zur der Herstellung von Formeinsätzen für die Herstellung von Wellenleiterstrukturen mit Glasfaserführungen. FE: Formeinsatz, ZM: Zwischenmaske, RTL: Röntgenlithographie

4.2.1 Einstufiger Formeinsatz durch optische Lithographie auf der Basis von SU8

Zur Herstellung eines Formeinsatzes durch optische Lithographie auf der Basis von SU8 wird ein ca. 500 µm dickes Silizium-Substrat, mit 10 µm dickem SU8 beschichtet und durch die schon im Abschnitt 4.1.2 beschriebene Zwischenmaske belichtet. Zur besseren Haftung war die Siliziumoberfläche oxidiert. Die nicht belichteten Gebiete werden nach der Belichtung mit dem geeigneten Entwickler aufgelöst. Für die Prozessierung des SU8, dessen Belichtung und Entwicklung wurden die am IMT erarbeiteten Parameter angewendet [11]. Sie sind in Tab. 4. 5 zusammengestellt.

Schleuderparameter SU8 (Sorte 5)	(Drehzahl/Rampe/Zeit) 1100 [rpm]/1500 [rpm/s]/ 40 [s]
Pre-Exposure-Bake (Hotplatte)	95C°, 5 min
Belichtungszeit	Dosis[mJ/cm ²]/Lampenintensität[mW/cm ²]=1020 / 23,2 = 44 s
Post-Exposure-bake (Hotplatte)	Im Temperofen, Temperaturprofil: (Aufheizen von Raumtemperatur (22 °C) bis zu 60 °C Rate 5 °C/min, 60 konstant 20 min, von 60 °C bis zu 95 °C Rate 5 °C/ min, 95 °C konstant 15 min, 95 °C bis zu 22 °C Rate 1°C/min)
Auflösen von nicht belichtetes SU8 in PGMAE	5 min
Benutzung von sauberem PGMAE (zweites Mal)	5 min
Waschen mit Isopropanol	3 min

Tab. 4.5: Prozessparameter für die Herstellung von 10 µm hohen Stegen aus SU8 [36]

Die Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen belichtete Strukturen für zwei unterschiedliche Belichtungsarten, Soft-Kontakt zwischen Maske und Resistoberfläche (Abb. 4.17) und Hard-Kontakt (Abb. 4.18). Beim Soft-Kontakt wird die Maske bei der Belichtung praktisch nur auf den Resist aufgelegt. Dadurch ergibt sich ein Spalt zwischen Maske und Resist aufgrund der Unebenheit des Resistes und durch eine unvermeidliche Verbiegung von Maske und Substrat. Dies führt dazu, dass sich die Beugung an den Absorberkanten in den Strukturen stärker auswirkt und somit insbesondere die Ecken an den Enden der Strukturen verrundet sind. Beim Hard-Kontakt wird die Maske durch Vakuum an die Resistoberseite angesaugt, so dass dieser Spalt vermieden werden kann und sich damit der Beugungseffekt minimiert. Die Strukturecken sind besser ausgebildet. Obwohl die Abbildungen 4.17 und 4.18 den Qualitätsunterschied aufgrund des Beugungseffektes zwischen Hard-Kontakt und

Softkontakt bei zweistufigen Strukturen aus SU8 zeigen, ist dieser Effekt bei einstufigen Strukturen identisch. Trotz eines anderen Bildausschnittes erkennt man, dass die Verrundung beim Hard-Kontakt (siehe Abbildung 4.18) kleiner als die beim Soft-Kontakt (siehe Abbildung 4.17) sind.

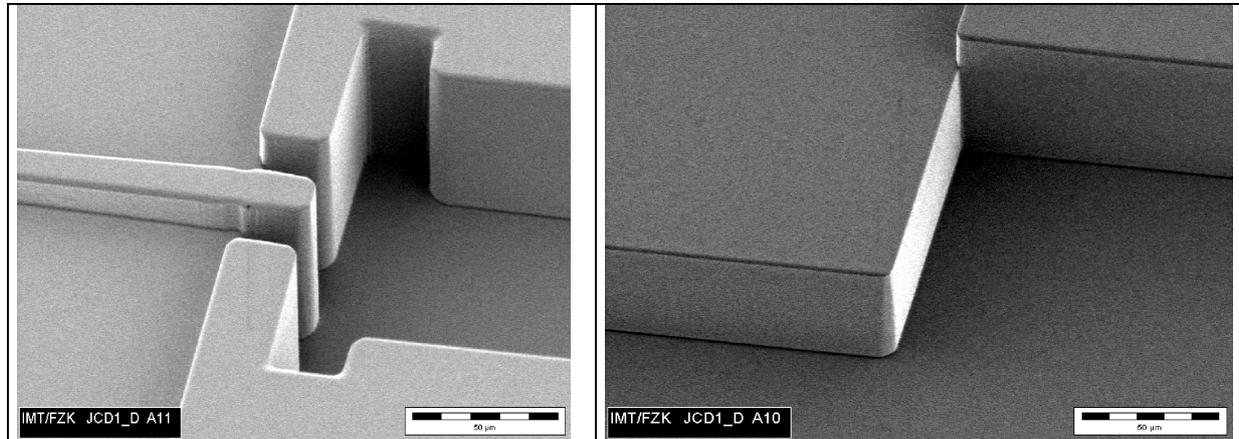


Abb. 4.17: Belichtungsergebnis bei Herstellung einer 2-stufigen Struktur in SU8 bei Soft-Kontakt zwischen Maske und Substrat (An den Enden der Wellenleiter sind starke Verrundungen zu erkennen)

Abb. 4.18: Belichtungsergebnisse bei Herstellung einer 2-stufigen Struktur in SU8 bei Hard-Kontakt zwischen Maske und Substrat (Die Verrundung an den Strukturecken ist weniger stark ausgeprägt als in Abb. 4.17)

Auf die sich ergebenden Resiststrukturen wird eine 100 nm dicke Goldschicht aufgedampft, die als Galvanikstartschicht dient und sicherstellt, dass die Galvanik an allen Stellen auf dem Siliziumsubstrat startet. Damit auch die Strukturseitenwände mit Gold bedampft werden, wird das Substrat während des Bedampfungsprozesses um 30° gekippt und rotiert. Die Tatsache, dass damit die Galvanik auch von der Seitenwand aus startet, kann bei dem relativ kleinen Aspektverhältnis (< 4) akzeptiert werden.

Nach der Galvanik wurde der Formeinsatz wie in Kap 2.2.4 beschrieben erodiert. Um den vernetzten SU8-Resist aus den Formeinsatzvertiefungen zu entfernen, wurde er mit Sauerstoffplasma bei einer Leistung von 100 Watt behandelt. Die Ätzrate im Sauerstoffplasma beträgt ca. 25 nm/min für frei zugängliche Resistflächen. Die Benutzung einer höheren Leistung ergibt eine höhere Ätzrate, verursacht aber eine Zunahme der Formeinsatztemperatur, was die Oxidation an der Oberfläche stark erhöht. Für die Entfernung des SU8 musste der FE für ca. 10 Stunden in die Anlage gelegt werden. Diese Zeit ist höher als aufgrund der Ätzzeit zu erwarten, was damit zusammenhängt, dass die Ätzrate in den Vertiefungen geringer ist.

Abbildung 4.19 zeigt den Formeinsatz nach dem Strippen des SU8-Resistes. Man kann feststellen, dass die Rauigkeit des Formeinsatzes nach der Behandlung relativ hoch ist. Dies wurde vermutlich durch die Behandlung im Sauerstoffplasma verursacht. Es ist aber auch nicht auszuschließen, dass sich das Gold beim Galvanisieren teilweise aufgrund einer schlechten Haftung zum SU8 abgelöst hat. Die erkennbaren Unregelmäßigkeiten auf den Formeinsatz sind vermutlich Goldrückstände, die sich beim Reinigen nicht entfernen lassen.

Ein weiterer Formeinsatz wurde mit einem Excimerlaser durch Laser-Ablation gereinigt. Die nach dieser Behandlung mit einer Atomic-Force-Microscopy-Messgerät (AFM) gemessene Rauigkeit an einer breiten Vertiefung beträgt ca. 20 nm.

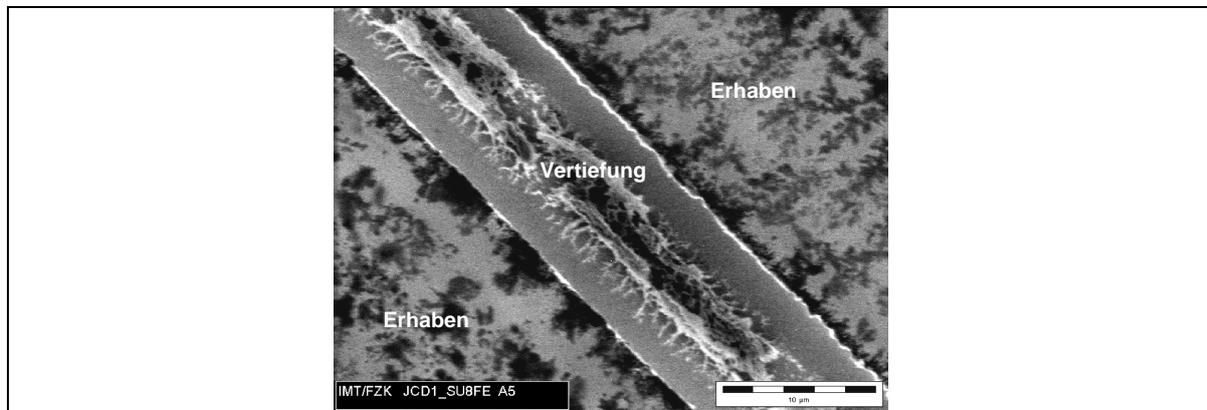


Abb. 4.19: Formeinsatz nach der Galvanik und nach dem Strippen des SU8-Resistes (erkennbar sind deutliche Goldrückstände)

Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert enthält die Absorberstruktur auf der Maske Einkerbungen entlang der Lichtwellenleiterstrukturen, was zur Verengung der Wellenleiters von ca. $0,4 \mu\text{m}$ führt. Es wird vermutet, dass sich beim Beschreiben des PMMA für die Herstellung der Chrommaske an der Anschlussstelle zweier Haupttablenfelder Bereiche ergaben, in der die Dosis höher war als im Innern des Haupttablenfeldes. Dies führte dazu, dass dort der Resist wegentwickelt und die Chromschicht weggeätzt wurde. Der Abstand dieser Gebiete, der ca. $500 \mu\text{m}$ beträgt, korreliert mit der Länge der Haupttablenfelder des Elektronenstrahlschreibers. Dieser Fehler wird durch den Lithographieprozess bis in den Formeinsatz übertragen.

4.2.2 Einstufiger Formeinsatz durch Röntgenlithographie auf der Basis von SU8

Zur Herstellung eines Formeinsatzes durch Röntgenlithographie auf der Basis von SU8 wurde ebenfalls eine $10 \mu\text{m}$ dicke SU8-Schicht auf einen Siliziumwafer aufgebracht. Die Herstellung der Schicht erfolgte wie im Falle des durch optische Lithographie hergestellten Formeinsatzes. Die Bestrahlung erfolgte mit Synchrotronstrahlung an ANKA mit der in Kap 4.1.1 beschriebenen Röntgenzwischenmaske.

Die Motivation für die Herstellung des Formeinsatzes auf diesem Wege war die relativ kurze Zeit, die für die Bestrahlung notwendig ist. Außerdem sollte die Qualität des Formeinsatzes mit dem durch optische Lithographie hergestelltem verglichen werden, um die Grenzen der optischen Lithographie besser einschätzen zu können.

Der für die Bestrahlung notwendige Aufwand von $85,5 \text{ mA min/cm}$ (Elektronenstrom im Speicherring multipliziert mit der Bestrahlungsdauer normiert auf 1 cm Scanlänge) ist im Vergleich zu dem für die Bestrahlung einer gleichwertigen PMMA-Dicke notwendigen Bestrahlungsaufwand viel geringer. Die Bestrahlung erfolgte am Strahlrohr Litho2 an ANKA

bei einer Elektronenenergie von 1,3 GeV. Die Parameter für die Prozess wurden im Rahmen anderer Untersuchungen erarbeitet und sind identisch mit den in Tab. 4.5 angegeben [37]. Auf die entwickelten Strukturen wurden eine 20 nm dicke Chrom-Schicht und anschließend eine 50 nm dicke Au-Schicht aufgedampft. Die Goldschicht dient dabei als Galvanikstartschicht, das Chrom als Haftvermittler zwischen dem Kunststoff und der Goldschicht. Durch galvanische Abscheidung wurde Nickel in den Strukturen abgeschieden. Um einen massiven Formeinsatz zu erhalten, wurde das Nickel bis zu einer Höhe von 5 mm auf die SU8-Strukturen galvanisiert. Nach der Galvanik wurde der Formeinsatz durch mehrere Temperaturschocks von dem Substrat getrennt. Dabei wurde das Substrat mit dem Formeinsatz abwechselnd in kochendes Wasser und dann umgehend in flüssigen Stickstoff getaucht. Aufgrund des Unterschiedes des Ausdehnungskoeffizienten von Nickel und Silizium konnte das Substrat nach kurzer Zeit relativ leicht vom Formeinsatz getrennt werden. Das SU8 in den Strukturen des Formeinsatzes wurde mit Sauerstoffplasma entfernt.

Die REM-Aufnahmen der sich nach der Entwicklung ergebenden Stege aus SU8 (siehe Abbildung 4.20) zeigen, dass die Seitenwände dieser Strukturen besonders rau sind. Diese Rauigkeit wird natürlich auf den galvanisierten Nickel-Formeinsatz übertragen (siehe Abbildung 4.21).

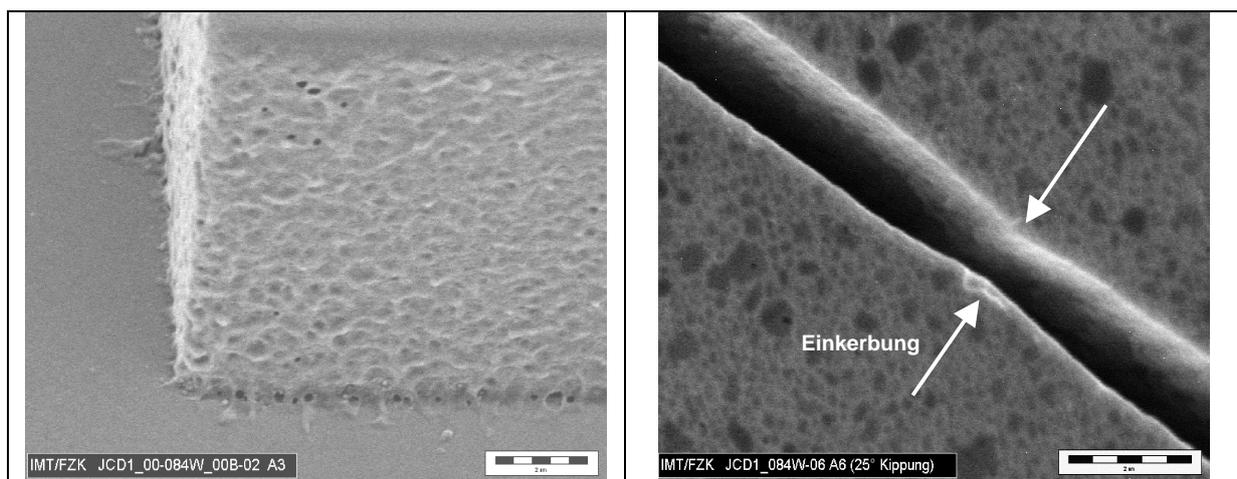


Abb. 4.20: Resiststeg in SU8 nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlung und Entwicklung

Abb. 4.21: Rauigkeit und Einkerbung bei einem galvanisierten mit Röntgenstrahlung bestrahlten Steg aus SU8.

Die Rauigkeit ist ein für SU8 bekanntes typisches Phänomen und hängt mit dem Vernetzungsmechanismus zusammen. Im Gegensatz zu PMMA gibt es in den teilbestrahlten Bereichen der Absorberkanten kein gleichmäßiges Anentwickeln und ein Quellen des Resistes, was zu einer Glättung der Oberfläche führt. Vielmehr werden die nicht vernetzten Moleküle zwischen den vernetzten Molekülen herausgelöst und es bilden sich somit Nanokavernen und Nanorisse, was zu einem undefinierten Schrumpfen des Resistes entlang der Strukturkante führt. Diese Rauigkeit kann somit durch Optimieren der Bestrahlungsparameter nur in einem begrenzten Bereich optimiert werden. Eine genaue Analyse der Gräben im Formeinsatz zeigt, dass deren Breite schmaler ist, als in dem Layout. Das bedeutet wiederum, dass die stehen gebliebenen Stege aus SU8 auch schmaler sind, als sie sein müssten. Diese Beobachtung korreliert mit Ergebnissen, die im Rahmen anderer

Arbeiten am IMT erzielt wurden. Dort wurde eine Abweichung der Strukturbreite im Vergleich zur Maske bei schmalen Strukturen festgestellt [35].

Dieser Formeinsatz wurde wegen der sehr hohen Rauigkeit nicht zum Prägen eingesetzt.

4.2.3 Einstufiger Formeinsatz durch Röntgenlithographie auf der Basis von PMMA

Um die Qualität der Resiststrukturen und der Formeinsatzstrukturen unabhängig von den für die Herstellung gestufter Formeinsätze notwendigen zusätzlichen Prozessschritten untersuchen und auch mit den SU8-Strukturen vergleichen zu können, sollte ein einstufiger Formeinsatz durch Röntgenlithographie auf der Basis von PMMA hergestellt werden. Die Vertiefungen für die Wellenleiterstrukturen sollte maximal 10 μm sein. Aufgrund der einfachen Gestaltung dieses Formeinsatzes erfolgt die Bestrahlung ohne Justierung.

Für die Herstellung eines derartigen Formeinsatzes muss eine Kupferplatte mit hoher Planparallelität und sehr großem Krümmungsradius ausgewählt werden, so dass die Abweichung der Oberfläche von einer idealen Ebene kleiner als 3 μm ist. Nur so ist es möglich eine dünne PMMA-Schicht auf dem Substrat herzustellen. Auf dieses Substrat wird PMMA aufgegossen und auf eine Höhe von 10 μm abgefräst. Die Bestrahlung erfolgt nach dem in Kap. 2.2.5 beschriebenen Prozess. Nach Bestrahlung und Entwicklung werden die PMMA-Strukturen mit einer 20 nm dicken Cr-Schicht und anschließend mit einer 50 nm Au-Schicht bedampft. Die Goldschicht dient wieder als Galvanikstartschicht und das Chrom als Haftschrift für das Gold zum Kunststoff. Anschließend wird die Struktur galvanisch mit Nickel befüllt, um den Formeinsatz zu erzeugen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Herstellung eines derartigen Formeinsatzes insgesamt drei Substrate bearbeitet. Beim ersten Substrat wurde die Kupferplatte beim Fräsen des PMMA angegriffen, das Weiterprozessieren des Substrates wurde daraufhin gestoppt. Bei den restlichen beiden Substraten wurde der Resist erfolgreich auf eine Höhe von $7,5 \pm 2,5 \mu\text{m}$ abgefräst. Diese wurden anschließend mit den in Tab. 4.6 angegebenen Parametern bestrahlt und entwickelt. Dabei wird die Bestrahlung in zwei Schritten durchgeführt. Die erste Bestrahlung (Randbestrahlung) dient dazu den außerhalb des Maskenfenster liegenden Resist vom Substrat zu entfernen, um einen ordentlichen Galvanikstart sicherstellen zu können. Dabei wird die Strukturfläche mit einer Blende abgedeckt. Die zweite Bestrahlung dient der eigentlichen Strukturierung mit der Maske

Randbestrahlung	Bestrahlung	An Litho 2; 2,5 GeV.: 98 mAmin/cm
	Entwicklungsparameter	<ul style="list-style-type: none"> • GG 40 min bei Raumtemperatur, 0% Schalleistung • BDG 20 min • H₂O 10 min in der Anlage • Abblasen mit N₂ zum Trocknen
Bestrahlung	Dosis	An Litho 3, 1,3 GeV, 3380 mAmin/cm

	Entwicklungsparameter	<ul style="list-style-type: none"> • GG 50 min bei Raumtemperatur, 0% Schalleistung • BDG 20 min • H₂O 10 min in der Anlage • an Luft trockenen lassen
--	-----------------------	---

Tab. 4.6: Bestrahlung und Entwicklungsparameter für 7,5±2,5 µm dickes PMMA auf einem Kupfersubstrat zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen ohne Stufe (verwendete Maske Los-Nr. 2020)

Aus ungeklärten Gründen konnte das randbestrahlte PMMA bei der Anwendung der berechneten Entwicklungszeit nach der Randbestrahlung nicht entwickelt werden, so dass in diesem Bereich weiterhin nicht zusammenhängende Resistfelder auf der Kupferoberfläche vorhanden sind, was bei der Galvanik des Formeinsatzes zu einer unkontrollierten Oberfläche führen würde. Eine Verlängerung der Entwicklungszeit führte zu Rissen im PMMA im Strukturbereich, was eine Weiterprozessierung dieser Substrate nicht sinnvoll machte (siehe Abbildung 4.22). Aufgrund dieser Problematik konnte der im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Vergleich der in SU8 und PMMA erzeugten Strukturen bei einstufigen Formeinsätzen leider nicht durchgeführt werden.

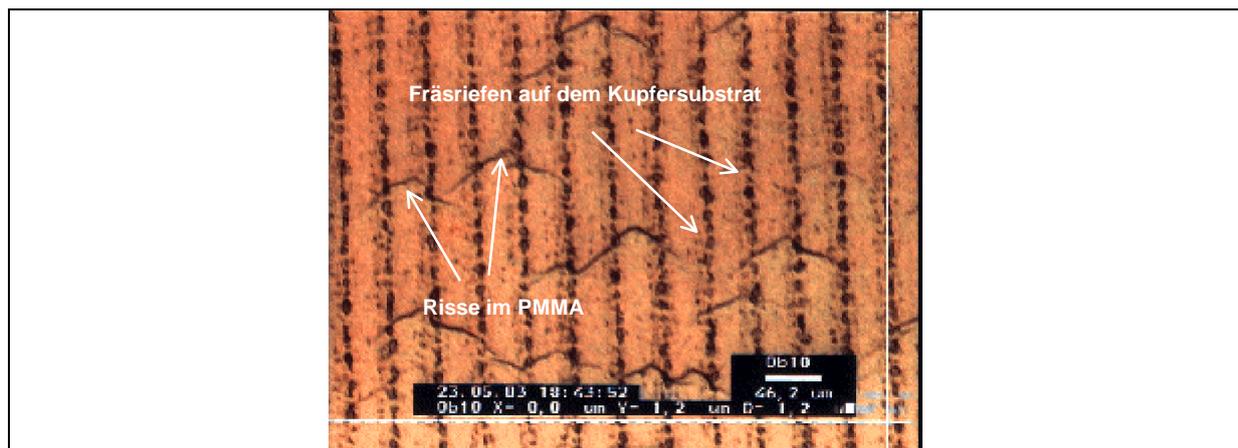


Abb. 4.22: Risse im Strukturfeld des abgefrästen PMMAs nach Überentwicklung des Resists in den Randbereichen

4.2.4 Gestufter Formeinsatz auf der Basis von SU8

Ziel der Arbeit war die Herstellung gestufter Formeinsätze mit Wellenleiterstrukturen und Faserführungsstrukturen. Um relativ schnell einen Formeinsatz zur Verfügung zu haben wurde trotz der in Kapitel 4.1.1 geschilderten Problematik der Kantenverrundung versucht diesen durch optische Lithographie in SU8 herzustellen. Dabei werden sowohl die Strukturen, die das Plateau darstellen als auch die eigentlichen Wellenleiterstrukturen und die Faserführungsstrukturen in SU8 erzeugt. Dies ist nur möglich, da es sich bei SU8, um einen Negativ-Resist handelt. Abbildung 4.23 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei dieser Methode.

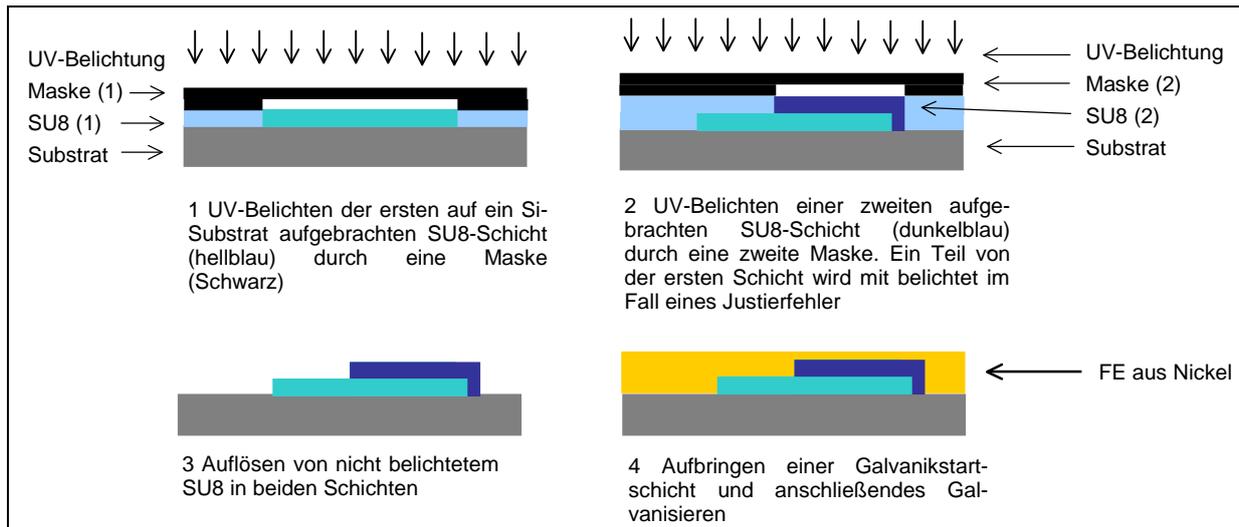


Abb. 4.23: Schritte zur Herstellung eines gestuften Formeinsatzes auf der Basis von SU8

Auf ein Siliziumwafer mit oxidierte Oberfläche wird zunächst eine $54 \pm 1 \mu\text{m}$ dicke SU8-Schicht (Sorte 25) an einem Spin-Coater aufgeschleudert. Bei der Beschichtung von relativ dünnen Substraten (z.B. Standard-Si-Substrate) verbiegen sich die Substrate proportional zur beschichteten Resistdicke. Das Galvanisieren von gebogenen Substraten ergibt ebenso verbogene Formeinsätze. Bei der zweischichtigen Belackung mit einer SU8-Schicht mit der Solldicke von $64 \mu\text{m}$ ergibt sich eine ca. 15 bis $20 \mu\text{m}$ starke Substratverbiegung. Aus diesem Grunde wurden für die Herstellung der Formeinsätze nach dieser Methode Substrate ausgewählt, die eine ca. $15 \mu\text{m}$ starke Verbiegung in die andere Richtung aufwies, um diesen Effekt zu kompensieren. Dies gilt aber nur für dünne Ni-Formeinsätze (ca. $500 \mu\text{m}$). Beim Galvanisieren von dickeren Formeinsätzen wächst allmählich die innere Spannung in dem Nickel, was zwangsweise zu einer Verbiegung des dünnen Si-Substrats und des darauf galvanisierten Formeinsatzes führt. Die Verbiegung des ca. 5 mm dicken Formeinsatzes lag in der Größenordnung von $150 \mu\text{m}$. Diese Verbiegung musste beim Einsatz des Abformwerkzeugs berücksichtigt werden.

Die aufgeschleuderte Schicht wird in einem Pre-Exposure-Bake-Schritt auf einer Hotplate getrocknet. Danach erfolgt die Belichtung dieser Schicht über eine Chrommaske, mit der die Stufenstrukturen erzeugt werden (Abb. 4.23, Schritt 1). Für die Herstellung von gestuften Mikrostrukturen benötigt man Justierstrukturen für die Maskenjustierung. In der Arbeit von Herrn Celtikce [11] wurde diese Markierung in das Si-Substrat vor dem Aufschleudern des SU8 geätzt. Dabei hängt der Positionierungsfehler von mehreren Faktoren ab. Einer davon ist die Absorption des von Justierkreuzen in die SU8-Schicht reflektierenden Lichts. Je dicker die SU8-Schicht ist, desto höher ist die Lichtabsorption. Beim UV-Belichten verfärbt sich das SU8. Die belichteten Gebiete sehen bräunlich aus. Bei der Mitbelichtung der sich auf der ersten Maske befindenden Justierkreuze entstehen somit bräunliche Spiegelbilder der Kreuze. Die sich ergebene Markierung kann man als Justierkreuze für das Belichten der zweiten SU8-Schicht durch die zweite Maske benutzen. Mit dieser Methode wird außerdem die Toleranz, die in der Justierung der ersten Ebene zu den Justierkreuzen bestehen würde, eliminiert. Die justierte Bestrahlung wurde an der Belichtungsanlage (MA6) mit einer lateralen Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ durchgeführt.

Ohne die belichtete Schicht zu entwickeln wird hierauf eine zweite SU8-Schicht (Sorte 5) in einer Dicke von $11 \pm 1 \mu\text{m}$ aufgeschleudert. Auch diese Schicht wird in einem Pre-Exposure-Bake-Schritt auf der Hotplate getrocknet. Die zweite Maske mit den Wellenleiter und Faserführungsstrukturen wird gegen die in der ersten SU8-Schicht vorhandenen Justierkreuze justiert, bevor die zweite Belichtung durchgeführt wird (Abb. 4.23, Schritt 2). Das nun vollständig bestrahlte Substrat wird einem Post-Exposure-Bake unterzogen, um die Vernetzung wirksam werden zu lassen und anschließend entwickelt (Abb. 4.23, Schritt 3). Die Prozessparameter für die Schritte zur Herstellung der SU8-Strukturen sind in Tabelle 4.7 aufgelistet

Erste Schicht (Sorte 25)	Aufschleudern	820 [RpM]/1500 [RpM/S] /10 [S]
		820 [RpM]/00 [RpM/S] /30 [S]
	Pre-Exposure-Bake	95 °C, 25 min
	Belichten	2,94 J/cm ²
Zweite Schicht (Sorte 5)	Aufschleudern	1100 [rpm]/1500 [rpm/s]/ 40 [s]
	Pre-Exposure-Bake	95 °C, 5 min
	Belichten	1020 [mJ/cm ²]
	Post-Exposure-Bake	Im Temperofen, Temperaturprofil: (Aufheizen von Raumtemperatur (22 °C) bis zu 60 °C Rate 5 °C/min, 60 Konstant 20 min, von 60 °C bis zu 95 °C Rate 5 °C/ min, 95 °C konstant 15 min, 95 °C bis zu 22 °C Rate 1°C/min)
Entwicklung	PGMAE	5 min
	PGMAE	5 min
	Isopropanol	3 min

Tab. 4.7: Prozessparameter für die Herstellung zweischichtiger Formeinsätze auf der Basis von SU8 [37]

Abbildung 4.24 zeigt die sich nach der Entwicklung ergebenden Resiststrukturen in SU8. Nach der Entwicklung wird auf das Substrat und die gestufte SU8-Struktur eine 50 nm dicke Goldschicht als Galvanikstartschicht aufgedampft. Anschließend erfolgt der Galvanikprozess, um den Formeinsatz herzustellen (Abb. 4.23 Schritt 4).

Der Nickelformeinsatz wurde nach der Galvanik durch die bereits beschriebene Schockbehandlung vom Siliziumsubstrat getrennt. Für die Reinigung der sich ergebenden Formeinsätze wurde die Laser-Ablation benutzt. Dieser Prozess wurde in Auftrag von Fraunhofer Gesellschaft in Aachen durchgeführt. Auf die bei dünnen Formeinsätzen durchgeführte Behandlung mit Sauerstoffplasma wurde bei den dicken Formeinsätzen verzichtet. Die aufgrund der dicken SU8-Schicht ($64 \mu\text{m}$) lange Behandlung im

Sauerstoffplasma würde den Ni-Formeinsatz stark erhitzen, was eine erhebliche Oxidation der Oberfläche verursachen würde. Dies ergäbe wieder eine unerwünschte Rauigkeit des Formeinsatzes. In Abbildung 4.25 ist ein 2 stufiger Formeinsatz auf der Basis von SU8 nach der Entschichtung mit Eximer-Laser dargestellt.

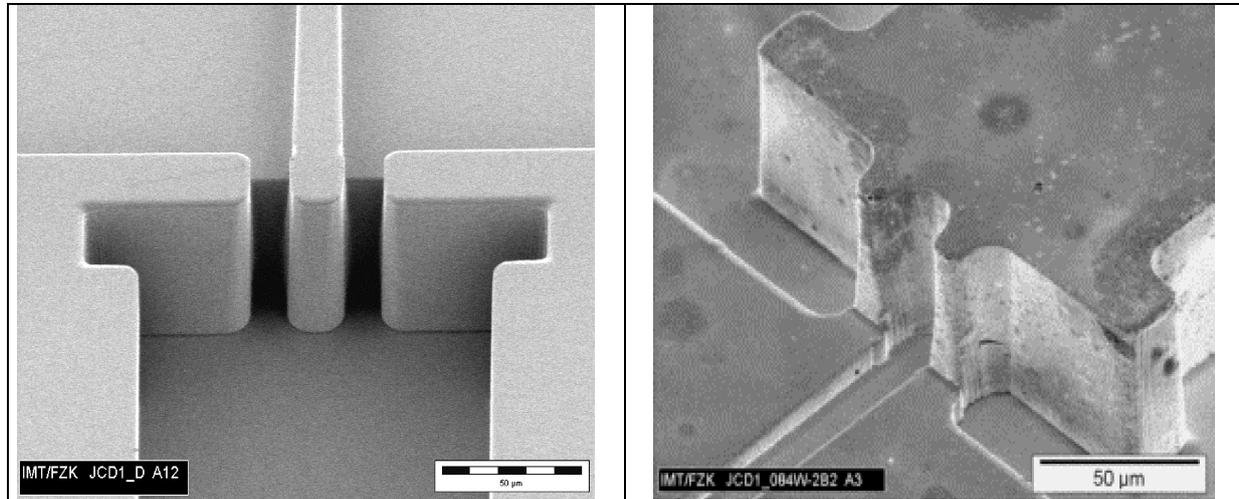
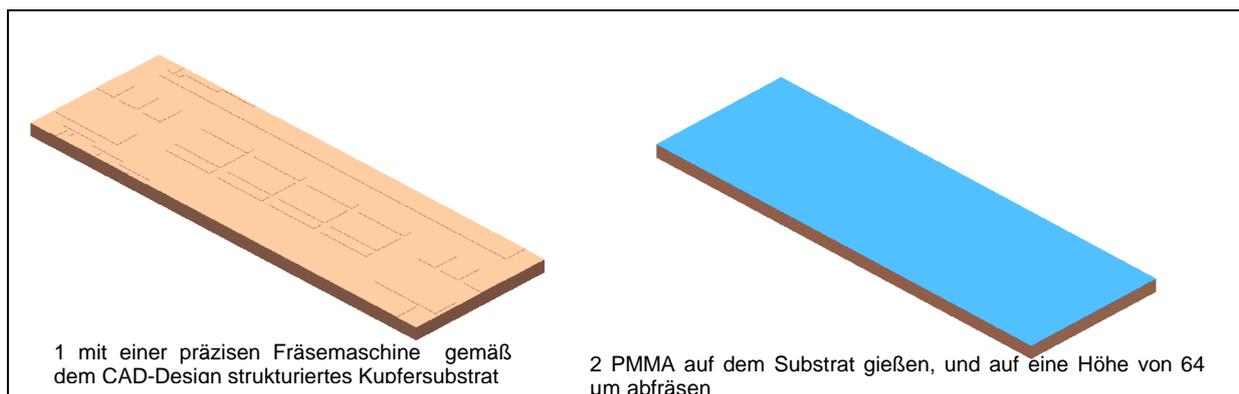


Abb. 4.24: Zweischichtige SU8-Strukturen hergestellt durch optische Lithographie

Abb. 4.25: Galvanisierter Formeinsatz hergestellt mit den Strukturen aus Abb. 4.24

4.2.5 Gestufter Formeinsatz auf der Basis von PMMA

Zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen mit integrierten Faserstrukturen müssen Formeinsätze mit einer Stufe nach dem in Kap. 2.3 beschriebenen Verfahren hergestellt werden. Hierzu werden Kupferplatten mit einer präzise gefrästen Stufe verwendet. Die Prozessabfolge ist in Abb. 4.26 in einer 3D-Darstellung nochmals schematisch dargestellt.



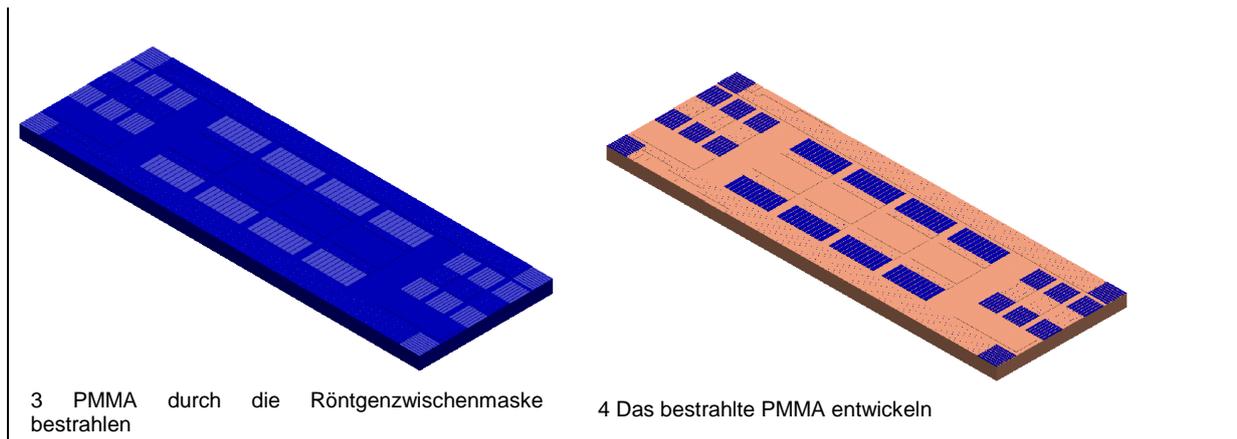


Abb. 4.26: Prozessabfolge des zur Herstellung der Wellenleiterstrukturen mit integrierten Faserstrukturen notwendigen Formeinsatzes mit einer Stufe

Da die präzise Herstellung der Stufe sehr aufwendig und teuer ist, konnten im Rahmen dieser Arbeit nur 4 Substrate bearbeitet werden. Leider war der Höhenunterschied bei den ersten zwei Substraten zu hoch. Hätte man mit diesen Substraten Formeinsätze hergestellt, wären die Faserführungsstrukturen zu tief gelegen und die Faser wäre unterhalb der wellenleitenden Schicht im abgeformten Wellenleiter zu liegen gekommen. Aus diesem Grunde wurden diese Substrate nicht weiterbearbeitet.

Auch die beiden anderen Substrate, die bei der Firma ISYS GmbH gefräst wurden, hatten bei der Bearbeitung einen Fehler. In diesem Fall wurde vor dem Fräsen der Flächen für die Faserführungsstrukturen die gesamte Strukturfläche um $20\ \mu\text{m}$ abgesenkt. Ausgehend von diesem tieferen Plateau wurden die Flächen für die Faserführungsstrukturen gefräst. Zwar können mit diesem Substrat Formeinsätze mit dem richtigen Abstand zwischen Wellenleiter und Grund der Faserführungsstruktur erzeugt werden. Bei der Herstellung der Resistschicht ist es aber aufgrund des hochstehenden Randes nicht möglich, $10\ \mu\text{m}$ dicke Resistschichten zu erzeugen. Diese haben im relevanten Bereich eine Dicke von $30\ \mu\text{m}$. Das Weiterprozessieren dieser Substrate ergab zwangsweise Formeinsatzvertiefungen für die Wellenleiter, die zwar $2\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$ und $4\ \mu\text{m}$ breit, aber ca. $30\ \mu\text{m}$ tief sind. Aus zeitbedingten Gründen mussten diese Substrate weiterprozessiert werden.

Diese Substrate wurden mit einer $3\ \mu\text{m}$ dicken Titanschicht bedampft, die anschließend oxidiert wurde, um eine gute Haftung der Resiststrukturen nach der Strukturierung gewährleisten zu können. Das so vorbereitete Substrat wurde mit PMMA begossen, welches dann auf eine Dicke von $81 \pm 3\ \mu\text{m}$ bezogen auf die tiefste Kupferebene abgefräst wurde. Die zusätzliche, unnötige PMMA-Dicke ergab sich durch den oben beschriebenen Kupferrahmen. Nach dem Fräsen wurde die Oberfläche des PMMA poliert um die Kratzer, die beim Fräsen verursacht werden, glatter zu machen und damit die Rauigkeit der Stirnfläche des darauf zu galvanisierten FE zu minimieren. Beide Substrate wurden mit der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Röntgenzwischenmaske justiert am Strahlrohr LITHO2 an ANKA mit den in Tabelle 4.8 angegebenen Bedingungen bestrahlt.

Da die Goldabsorberhöhe auf der Zwischenmaske mit $1,3\ \mu\text{m}$ relativ gering war, bestand die Befürchtung, dass bei einer zu hohen Dosis die Strukturen auf den Platten sich von der

Oberfläche ablösen. Aus diesem Grund wurde der Bestrahlungsaufwand so gewählt, dass in den Faserführungsgräben eine abgelagerte Dosis zwischen 3,2 kJ und 3,5 kJ auftritt.

Bei der ersten Probe ergaben sich nach der Entwicklung an vereinzelt Stellen in den tiefen Gräben einige Mikrometer dicke Resistrückstände. Da es in der Nachbarschaft der mit Rückständen behafteten Bereiche auch Bereiche gibt, die bei vergleichbarer Tiefe frei entwickelt wurden, kann eine falsche Angaben des Bestrahlungsaufwands bzw. falsch gewählte Entwicklungsbedingungen ausgeschlossen werden. Eine mögliche Ursache könnte ein lokal unterschiedlicher Vernetzungsgrad sein, der sich bei einer Bestrahlungsdosis, bei der es gerade noch möglich ist, den bestrahlten Resist zu entwickeln, relativ stark bemerkbar macht.

Bei der zweiten Probe war die Qualität der sich ergebenden PMMA-Strukturen gut, es konnten keine Rückstände festgestellt werden. Die Parameter, mit der diese Probe prozessiert wurde, sind in Tabelle 4.8 zusammengestellt.

Bestrahlung	Strahlrohr Elektronenenergie Bestrahlungsaufwand Röntgenspiegel im Strahlrohr Dicke der Maskenmembran Tiefendosis Dosis unter dem Absorber (Wellenleiterstrukturen)	Litho 2, justiert, 1,3 GeV, 9256 mAmin/cm, Ni, eingestellter Winkel: 0,00865 rad, 2,7 µm bei 79 µm: 3,5 KJ/cm ³ , (bei 85 µm: 3,26 kJ/cm ³) Resistoberfläche: 0,32 KJ/ cm ³ , an der Grenzfläche Resist/Substrat: 0,15 kJ/ cm ³
Entwicklung		<ul style="list-style-type: none"> • GG 300 min bei Raumtemperatur, 0% Schalleistung • BDG 20 min • H₂O 10 min in der Anlage • Im Luft trockenen lassen

Tab. 4. 8: Bestrahlung und Entwicklungsparameter für ein gestuftes Substrat mit 79 mm bis 85 µm dickem PMMA (verwendete Maske Los-Nr. 2020)

Beide Substrate wurden mit einer Schicht aus 20 nm Cr und 50 nm Au bedampft. Die Galvanik des Formeinsatzes erfolgte gemäß den Standardbedingungen, wobei ein 5 mm dicker Formeinsatz hergestellt wurde. Nach dem Erodieren des Formeinsatzes und dem Ätzen der verbliebenen Kupferschicht wurde der Formeinsatz mit Flusssäure behandelt, um die 3 µm dicke Titanschicht aufzulösen. Das Titanoxid wurde manuell und durch mehrfache Spülprozesse entfernt. Zur Entfernung des verbliebenen Resists wurde dieser bei einer Teilchenenergie von 2,5 GeV flutbelichtet und anschließend gelöst.

Die sich ergebenden Formeinsätze weisen Strukturen auf, deren Abmessungen in horizontaler Richtung Abmessungen haben, die den Designvorgaben entsprechen. Die vertikalen Abmessungen dagegen sind aufgrund des oben diskutierten Problems um ca. 20

μm zu groß. Die Gräben sind ca. $30\ \mu\text{m}$ tief statt $10\ \mu\text{m}$ und die Klötze, die die Faserschächte prägen sollen, sind ca. $80\ \mu\text{m}$ statt $64\ \mu\text{m}$ hoch. Abbildung 4.27 zeigt die Resiststruktur der Faserführungsstruktur mit Wellenleiter zur Herstellung eines gestuften Formeinsatzes. Wie man erkennt, ist die Strukturqualität besonders gut. Negativ fällt allerdings die Qualität der gefrästen Stufe auf. In Abb. 4.28 ist der Formeinsatz dargestellt. Man erkennt die raue Nickelwand, die Zwischen dieser Stufe und dem strukturierten PMMA gewachsen ist.

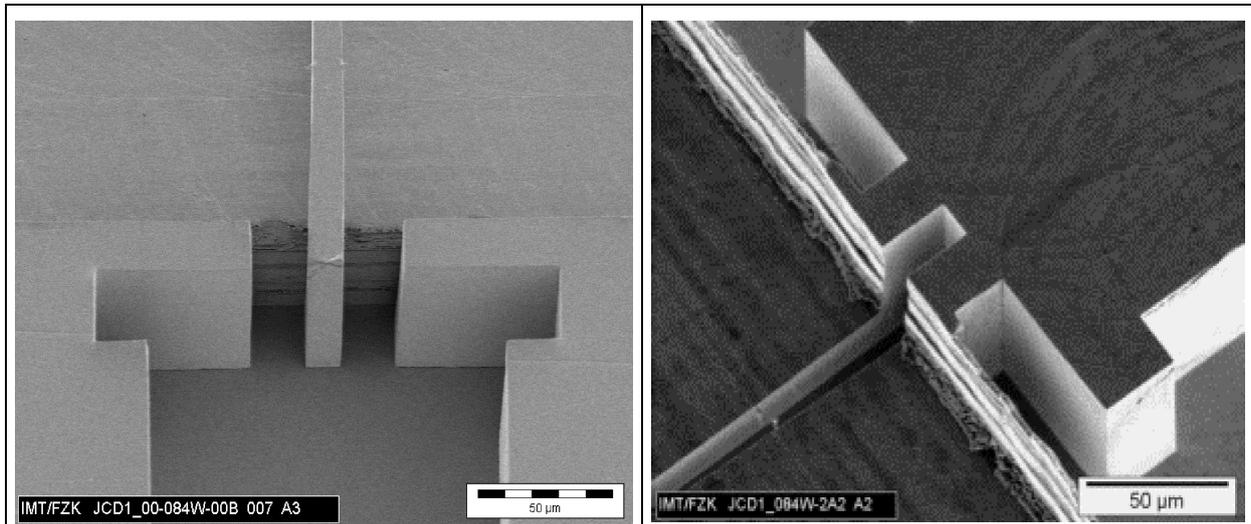


Abb. 4.27: Mit Röntgenstrahlung bestrahlte PMMA-Struktur auf einem gestuften Kupfersubstrat

Abb. 4.28: Gestufter LiGA-Formeinsatz für das Prägen von Wellenleitern mit integrierten Faserführungsstrukturen hergestellt mit den Strukturen von Abb. 4.27

4.2.6 Bewertung der Ergebnisse zur Herstellung des Formeinsatzes

Die Untersuchungen zur Herstellung eines gestuften Formeinsatzes für die Erzeugung von Wellenleitern mit integrierten Faserführungsstrukturen zeigen, dass es sich bei dieser Aufgabe um ein komplexes Problem handelt, bei der sowohl die Maskentechnik als auch die Formeinsatzherstellung optimiert werden musste.

Wenn es möglich ist, eine Zwischenmaske mit den spezifizierten Strukturen und den notwendigen Justierkreuzen herzustellen, kann diese für die Strukturierung ohne Probleme eingesetzt werden.

Die von der Wellenleiterstruktur her qualitativ besten Formeinsätze konnten mit der Zwischenmaske als Arbeitsmaske auf einem gestuften Kupfersubstrat hergestellt werden. Störend ist allerdings in diesem Fall die schlechte Qualität der gefrästen Kante, die möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Qualität der Strukturen bei der Abformung hat. Problematisch ist ebenso die genaue Einstellung der Stufenhöhe. Mit den vorliegenden Formeinsätzen konnte nicht nachgewiesen werden, ob eine Toleranz von $\pm 1\ \mu\text{m}$ erreicht werden kann.

Prinzipiell können die Formeinsätze auch mit optischer Lithographie unter Verwendung des Negativresists SU8 hergestellt werden. Dabei ergibt sich allerdings eine Einbuße an den Strukturkanten aufgrund von Beugungseffekten, die sich insbesondere in den Ecken der Wellenleiter besonders bemerkbar machen. Sofern diese Verundung akzeptiert werden kann bzw. durch ein geeignetes Layout kompensiert werden kann, stellt diese Vorgehensweise eine interessante Variante dar, zumal die Herstellung der Resistschicht wesentlich einfacher ist, und die Toleranz in der Dicke besser eingestellt werden sollte.

Die Herstellung der Formeinsätze durch Röntgenlithographie unter Verwendung von SU8 als zweite Schicht ist mit den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnissen nicht möglich. Die Rauigkeit der Seitenwände erscheint zu groß, so dass bei den abgeformten Wellenleitern zu große Verluste auftreten. Ob diese Rauigkeit durch eine Optimierung des Prozesses vermindert werden kann, kann heute nicht gesagt werden.

Für die Untersuchungen zur Abformung der Wellenleiter wurden einstufige Formeinsätze eingesetzt, die durch optische Lithographie unter Verwendung von SU8 und Röntgenlithographie unter Verwendung von PMMA hergestellt wurden.

5 Abformprozess

Mit dem aus den Arbeiten in Kapitel 4 (siehe Tab. 4.1) resultierenden Formeinsätzen

- Formeinsatz ohne Stufe hergestellt aus SU8 durch optische Lithographie (Sorte 1)
- Formeinsatz mit Stufe hergestellt aus SU8 durch optische Lithographie (Sorte 2)
- Formeinsatz mit Stufe hergestellt aus PMMA durch Röntgenlithographie (Sorte 5)

sollen durch Heißprägen in einen zweischichtigen Polymeraufbau Wellenleiterstrukturen hergestellt werden. Neben der Entwicklung einer geeigneten Prägetechnik war es zunächst notwendig, eine geeignete Materialkombination, die sowohl die Anforderungen von der Prägetechnik als auch die optischen Anforderungen erfüllt, zu erarbeiten.

5.1 Auswahl der Materialien

Im IMT verwendet man bei der Prägetechnik eine Vielzahl thermoplastischer Polymere, die sich unter Verwendung relativ hoher Temperaturen und einem hohen Druck verformen lassen. Diese Polymere sind: Cycloolefin-Copolymer (COC), Liquid-Crystal-Polymer (LCP), Polycarbonat (PC), Polyethylen (PE), Polyetheretherkelen (PEEK), Perfluoralkoxy-copolymer (PFA), Polymethylmetacrylat (PMMA), Polyoximethylen, Polyformaldehyd (Polyacetal) (POM), Polypropylen (PP), Polyphenylensulfid (PPS), Polystyrol (PS), Polysulfon (PSU), Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyvinylidenfluorid (PVDF), Polyacrylat (PA).

Optische Wellenleiter aus Polymeren können aus verschiedenen Kombination dieser Polymere hergestellt werden. Dabei besteht der Polymeraufbau aus zwei Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex (Abb. 5.1). Die obere Schicht dient als ein optisches Kernschichtmaterial. Die zweite Schicht dient als Trägersubstrat, in das die Faserführungsgruben für die später einzulegende Glasfaser zur Ankopplung an die Wellenleiter eingebracht wird. Da Polymere unterschiedliche Eigenschaften besitzen, können für den Einsatz nur die Polymere in Frage kommen, die geeignete optische Eigenschaften haben, d.h.: im Wellenlängenbereich zwischen 1300 nm und 1600 nm transparent sind.



Abb. 5.1: Aufbau der zu prägenden Schicht

Neben den optischen Parametern ist es zwingend notwendig, dass die ausgewählten Kombinationen eine gute Haftung zueinander aufweisen. Dazu müssen die ausgewählten Polymere durch Druck und Temperatur verformbar (d.h. thermoplastisch) sein. Deswegen wurde als ein erstes Kriterium für die Eignung einer Polymerkombination die Haftung zwischen den beiden Bestandteilen analysiert. Die Haftung eines jeden thermoplastischen Polymers wurde mit allen anderen im IMT benutzten Polymeren getestet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle (Tab. 5.1) aufgelistet.

	PC	PP	PS	PSU	Peek	LCP	POM	COC	PTFE	PFA	PVDF	PA	PE	PPS
PMMA		X	H		X	H		X	X	X			H	X
PC			H		H	H	H		H	X	X	H	X	H
PP			H	X	X	X	H		H ⁺	X	X	X	H	X
PS				H	H	H	X	H	X	X	X	H	H	H
PSU					H	H		X	X	X	X	H	X	H
Peek							X	H	X	X	X	X	X	X
LCP							X	H	X	X	X	X	X	X
POM								X	H	X	X	X		X
COC									X	X	X	X	X	H
PTFE										X	H	X	X	X
PFA											X	X	X	X
PVDF												H	X	X
PA													H	X
PE														H
PPS														

Tab. 5.1: Analyse der Haftung verschiedener Polymerkombinationen. (Zeichenbedeutungen: Sehr gute Haftung; H⁺ gute Haftung; H Haftung; X Keine Haftung)

Die geeigneten Kombinationen hinsichtlich der Haftungseigenschaften sind: PC/PMMA, PSU/PMMA, POM/PMMA, PVDF/PMMA, Polyacrylat/PMMA, PC/PP, PC/PSU, PC/COC, PP/COC, PSU/POM, POM/ PE.

Für das Kernmaterial benötigt man eine Polymerschicht, deren Dicke gemäß der Simulation in der Größenordnung von 3 μm liegt, um einen einmodigen Betrieb der Lichtwellenleiter zu gewährleisten. Diese Schicht muss mit einem anderen Polymersubstrat verbunden werden, dessen Dicke größer als 61,5 μm sein muss. Die genaue Kernschichtdicke ist abhängig von seinem Brechungsindex und dem Brechungsindex des Substrates und der Umgebung, wobei der Brechungsindex des Kernmaterials größer als der vom Substrat sein muss.

Beim Prägen muss die obere Schicht (in diesem Fall die Kernschicht) weicher als die untere Schicht (in diesem Fall das Polymersubstrat) sein. Sonst schwimmt beim Prägen die feste, dünne Kernschicht auf dem flüssigen, weichen Polymersubstrat ab, was keine gute Ausprägung der Kernschicht erlaubt.

Als eine besonders interessante Kombination wurde PC/PMMA erkannt. Diese beiden Polymere sind für den Einsatz in der optischen Nachrichtentechnik geeignet. Der Brechungsindex von PMMA bei 1,55 μm wurde mit der Ellipsometrie an der TU Berlin gemessen. Die Brechungsindizes betragen $TE = 1,4784$ und $TM = 1,4789$, wobei nicht geklärt werden konnte warum der TM-Wert größer ist als der TE-Wert. Der Einfluss dieser Fehler auf die Dimensionierung der entworfenen Wellenleiter ist jedoch zu vernachlässigen. Der Brechungsindex von PC bei 1,55 μm wurde bei der Fa. Sentech gemessen. Er beträgt 1,547. Diese Ergebnisse bedeuten, dass PC einen höheren Brechungsindex als PMMA hat, was die Benutzung von PC als Kernmaterial erlaubt. Darüber hinaus wird PC auch in anderen optischen Anwendungen mit guten Eigenschaften eingesetzt. In der Literatur wird für die Materialdämpfung von PC ein Wert von ca. $3 \times 10^5 \text{ dB/km @ } 1,55 \mu\text{m}$ [39].

Das Auftragen von PC auf das PMMA-Substrat mittels Schleudertechnik ist nicht geeignet, weil die meisten Lösemittel, die das Polycarbonat lösen, auch das PMMA lösen. Das Verschweißen von einem 3 μm dicken PC-Film mit einem PMMA Substrat ist eine bessere Alternative, um diese Kombination herzustellen.

Auf eine besonders große Schwierigkeit stößt man bei der Herstellung von dünnen Folien, die unter 10 μm dick sind. Relativ große Schwankungen in der Dicke treten auf, wenn eine dicke Folie (ca. 150 μm) durch Prägen bis auf 10 μm runtergedrückt wird. Besonders dünne PC-Folien (bis zu 2 μm) mit einer akzeptablen Toleranz (20 % der Dicke) sind kommerziell (F. Goodfellow) [40] erhältlich. Deswegen kann man auf Prägen in diesem Zusammenhang verzichten.

In Vorversuchen wurde der Prozess der Verschweißung untersucht und die Qualität analysiert. Vor dem Verschweißen auf dem PMMA-Substrat wird die Folie manuell gespannt und auf das Substrat aufgelegt. Dieses relativ einfache Vorgehen führte manchmal zu einer Faltung der Folie und damit bei der Verschweißung zu einer Verdopplung der PC-Schicht. Die lokale Verdopplung der PC-Dicke wurde in den Prägeversuchen toleriert, da es zunächst das Ziel war, die optimalen Verschweißparameter festzustellen, die für das Prägen dieser Kombination geeignet sind. Optisch sind aber solche Verdopplungen nicht erwünscht, da in diesen Bereichen höhere Moden anregen werden können. Und wenn die Dicke des Kerns in der Lichtausbreitungsrichtung wieder stimmt, verursachen diese Lichtleistungsverluste. Eine bessere Methode für das Aufbringen der PC-Folie auf das PMMA ist noch zu konzipieren.

Nach dem Aufspannen der PC-Folie auf der PMMA-Platte wird die Kombination gepresst. Dies dient zum Aufschmelzen des PMMA auf der Folie. Die Schweißparameter sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Danach ist die Schichtkombination bereit zum Prägen.

Temperatur	120 °C
Druck	2,1 MPa

Tab. 5.2: Parameter zur Verschweißung von PC auf PMMA zur Herstellung eines PC/PMMA-Schichtaufbaus

Abbildung 5.2 zeigt ein Schlibfbild eines PC/PMMA-Schichtaufbaus, bei dem auf ein relativ dickes, überfrästes PMMA-Substrat ein PC-Film aufgeschweißt wurde. Auf dem Bild ist die Grenzschicht zwischen den beiden Materialien zu erkennen, wobei die Verschweißung so erfolgte, dass keine Ablösung der beiden Schichten zu sehen ist.



Abb. 5.2: 3 µm dicke PC-Folie geschweißt auf PMMA Substrat

Um zu wissen bei welcher Temperatur dieser Schichtaufbau sinnvoll geprägt werden kann, wurde das Erweichungsverhalten von PMMA (Degalan F. Röhm) und PC (Makrofol F. Bayer) als Funktion der Temperatur mit Hilfe der Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) [41] studiert. Die Makrofol-Platte, deren Eigenschaften gemessen wurden, war relativ dick und von einem anderen Hersteller als die Folie (3 µm), die für den Aufbau der Wellenleiter (dünne Pc-Folie) verwendet wurde. Da jedoch die Materialzusammensetzung laut Herstellerangabe die gleiche war, wurde davon ausgegangen, dass diese Ergebnisse auf die Folie übertragen werden können. Die im IMT durchgeführten Messungen zeigen, dass PC unter 74 C° und über 170 C° weicher als PMMA ist (siehe Abbildung 5.3).

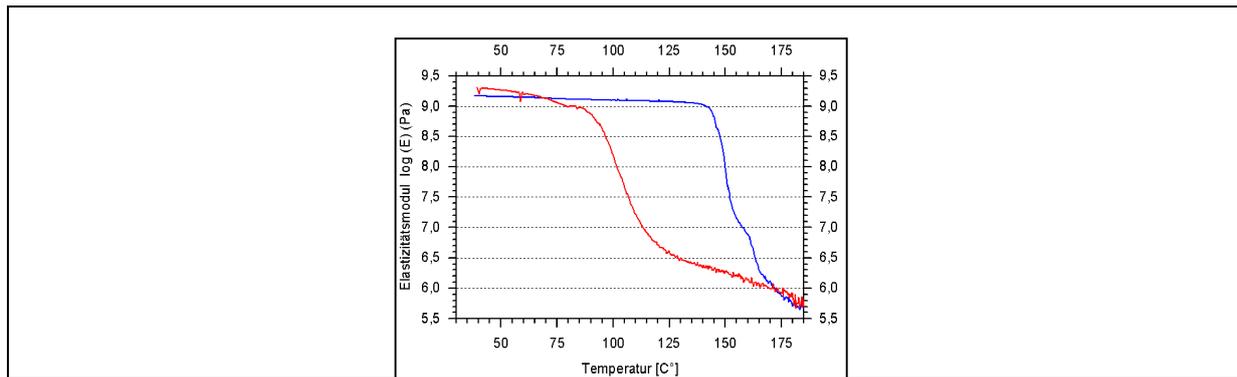


Abb. 5.3: Erweichungsverhalten des PMMA und des PC als Funktion der Temperatur. PC: Blau, PMMA: Rot

Der erste Bereich erlaubt ein Verfahren, welches Kaltprägen genannt wird. In diesem Bereich muss man massiven Druck beim Prägen anwenden, was ein Nachteil darstellt. Der zweite Bereich erlaubt ein Heißprägen mit relativ niedrigem Prägedruck. Aus diesem Grund ist das Prägen der Wellenleiter in diesem Temperaturbereich von Vorteil und wurde im Rahmen dieser Arbeit angewendet.

5.2 Abformung

Durch das Prägen mit jedem der benutzten Formeinsätze sollen sich in der Polymerplatte die in Kapitel 3.7 beschriebenen Strukturen ergeben. Im Prinzip bestehen alle zu prägenden Strukturen aus 2, 3 oder 4 μm breiten Stegen unterschiedlicher Längen und etwa 10 bzw. 30 μm Höhe, was an den Prägeprozess besondere Voraussetzungen stellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Prägeversuche dargestellt.

5.2.1 Abformen mit Formeinsatz ohne Stufe

Im Vorfeld der Untersuchungen zum Prägen mit den gemäß Kapitel 4 hergestellten Formeinsätzen wurden Untersuchungen mit einem Shim-Formeinsatz durchgeführt, bei dem die Strukturierung des Resists mit dem Elektronenstrahlschreiber direkt erfolgt. Die weitere Prozessierung erfolgte wie bei den in Kapitel 4 beschriebenen Shim-Formeinsätzen. Diese Voruntersuchungen hatten den Zweck zu testen, ob das Prinzip der Wellenleiter-Herstellung mit der Prägetechnik funktioniert. Ein weiteres Ziel war das frühzeitige Erkennen von Herstellungsproblemen, um bei der eigentlichen Formeinsatzherstellung bereits reagieren und auch bereits im Design Gegenmaßnahmen berücksichtigen zu können. Beim Prägen war dieser Formeinsatz nicht an der Prägemaschine befestigt, sondern lag einfach auf der zu prägenden Polymerplatte. Eine ca. 300 μm dicke Kautschukplatte wurde auf die wegen der Galvanik unebene Rückseite des Formeinsatzes gelegt, um den Druck auf der gesamten Oberfläche gleichmäßig zu verteilen. Die Entformungen wurden per Hand gemacht, indem die geprägte Folie vom Formeinsatz abgezogen wurde. Folgende Ergebnisse wurden bei diesen Vorversuchen erzielt:

- ∅ Zunächst wurde eine reine PMMA-Platte (Degalan5) geprägt. Dabei wurden 10 kN (3,1 MPa) auf die zu prägende Fläche ausgeübt und eine Temperatur

von 120 °C während des 5-minütigen Prägeprozesses benutzt. Nach der Entformung waren alle Strukturen zu erkennen, allerdings waren sie wegen des rauen Formeinsatzes ebenfalls rau.

- ∅ In einem zweiten Versuch wurde ein PC/PMMA-Verbund mit diesem Formeinsatz geprägt. Zuvor wurde die 3 µm dicke PC-Folie auf der PMMA-Platte bei 10 kN und 120 °C verschweißt. Dieser Aufbau wurde nachher mit 50 kN bei einer Temperatur von 200°C für 10 min geprägt. Durch mehrere Versuche wurde festgestellt, dass ein so großer Druck für ein erfolgreiches Prägen der Strukturen mit diesem Aufbau notwendig ist. Nach dem Prägen waren alle Strukturen auf der Platte zu erkennen, weiterhin zeigten diese Versuche, dass das PC auf dem PMMA verschweißt blieb, was die Herstellung von komplexen FE sinnvoll macht.

Mit dem auf der Basis von SU8 hergestellten einstufigen Formeinsatz (Sorte 1) wurden Prägeversuche in die reine PC-Schicht, die reine PMMA-Schicht sowie in den Schichtverbund PC/PMMA durchgeführt. Hierbei ergaben sich je nach Material unterschiedliche Ergebnisse:

- ∅ Für das Prägen der reinen Polycarbonatschicht wurden die folgenden Parameter (15000 kN für 300 s bei 200 °C, dann 80000 kN für 300 s bei 200 °C, dann 15000 kN bis die Temperatur 110 °C erreicht wurde) eingesetzt. Für beide Parametervarianten konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Die Stege waren trotz der lateralen Verengungen normalerweise ganz und ununterbrochen vorhanden. Bezüglich der verschiedenen gereinigten Formeinsätze ((Sauerstoffplasma, Laserablation) ergaben sich die besten Prägeergebnisse mit den mit Laser gereinigten Formeinsätzen.
- ∅ Für das Prägen der reinen PMMA-Schicht wurden mit Parametern von (10 kN; 120 °C; 5 min) eingesetzt. Im Gegensatz zum Polycarbonat ergaben sich unabhängig von dem verwendeten Formeinsatz bei langen Stegen immer Unterbrechungen (siehe Abbildung 5.4). Die Unterbrechungen traten besonders an den Orten auf, an denen die Formeinsatzvertiefungen aufgrund des Fehlers in der Chrommaske verengt waren. Die Benutzung der mit Laser gereinigten Formeinsätze hat die Ergebnisse teilweise verbessert. Damit konnten die kurzen Stege ganz geprägt werden.
- ∅ Für das Prägen der des PMMA/PC-Schichtaufbaus wurden die folgende Parameter (15000 kN für 300 s bei 200 °C, dann 80000 kN für 300 s bei 200 °C, dann 15000 kN bis die Temperatur 110 °C erreicht wurde) eingesetzt. Die hierbei erzielten Prägeergebnisse sind mit den Ergebnissen, die mit reinem PMMA erzielt wurden, vergleichbar. Während die langen Stege unterbrochen sind, konnten mit dem mit Laser gereinigten Formeinsatz gekrümmte und kurze gerade Stege fehlerfrei geprägt werden. In Abbildung 5.5 ist bei 2/3 in der Höhe des Wellenleiters eine Grenzlinie zu erkennen, bei der es sich um die Grenzschicht zwischen den beiden Materialien handeln könnte. Allerdings

ergab sich bei diesen Versuchen das Problem, dass die Polycarbonatfolienverschweißung, die während des Prägeprozess erfolgte, nicht mehr ausreichend gut war. Statt dessen blieb die Folie an vielen Stellen tief in den Gräben hängen. An vielen Stellen blieb sogar das PMMA in dem Formeinsatz hängen. Ob die Wellenleiter in diesem Fall tatsächlich aus zwei unterschiedliche Materialien bestehen, wird im nächsten Kapitel diskutiert. Der getestete Lichtwellenleiter (Kapitel 6) ist von dieser Sorte.

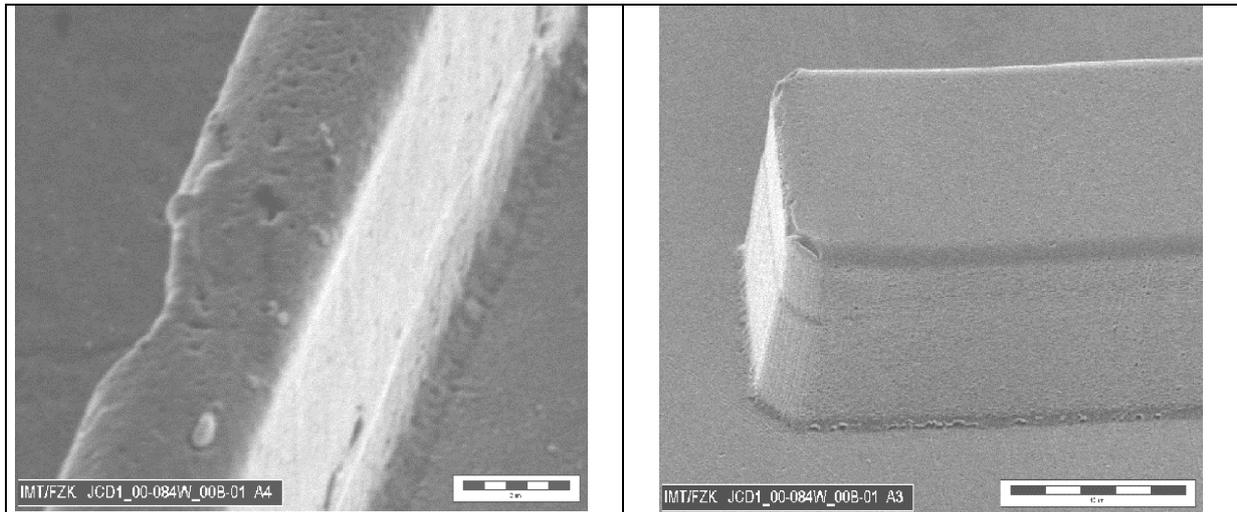


Abb. 5.4: Unterbrochener geprägter Steg aus PMMA, 10 µm hoch
Abb. 5.5: Anfang eines geprägten Stegs aus PC/PMMA

5.2.2 Abformung mit gestuftem Formeinsatz

Zur Herstellung von Wellenleiterstrukturen mit Faserführungsstrukturen wurden sowohl Prägeversuche mit dem auf der Basis von SU8 durch optische Lithographie hergestellten zweistufigen Formeinsatz (Sorte 2) als auch mit dem Formeinsatz, der durch Röntgenlithographie auf der Basis von PMMA auf dem gestuften Kupfersubstrat hergestellt wurde (Sorte 5), durchgeführt. Die Prägeparameter für die einzelnen Materialien waren identisch zu den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben:

- Mit dem Formeinsatz der Sorte 2 konnte Polycarbonat erfolgreich geprägt werden. Alle Strukturgruppen aller Breiten konnten ganz hergestellt werden. Wie in Abb. 5.6 zu erkennen ist der Bereich des Wellenleiters im Faserführungsgruben um ca. 10 µm überdehnt. Die Ursache dafür sind lokale Rauigkeit in diesen Bereichen.

Das Prägen von PMMA mit diesem Formeinsatz ergab dagegen fast immer unterbrochene Stege. Ausgenommen davon sind die ganz kurzen Stege, deren Breite 4 µm ist (siehe Abbildung 5.7). In diesem Fall tritt die Überdehnung nicht auf was auf eine bessere Entformbarkeit des PMMA trotz der erkennbaren Rauigkeit schließen lässt. Außerdem konnten sogar die gekrümmten Wellenleiter, deren Breite 2 µm ist,

manchmal ganz geprägt werden. Das Prägen des PC/PMMA-Schichtaufbaus hat ähnliche Ergebnisse wie beim PMMA ergeben.

- Das Prägen mit dem Formeinsatz der fünften Sorte hat unabhängig von dem Material fast immer schlechte Ergebnisse ergeben. Aufgrund der zu tiefen Gräben (ca. 30 μm statt 10 μm) (siehe Kapitel 4.2.5), die die Wellenleiter prägen sollten, waren die Entformungskräfte zu hoch. Unabhängig vom geprägten Material bleiben die Stege im Formeinsatz hängen. Ausgenommen davon sind die 4 μm breiten Stege aus reinem Polycarbonat (siehe Abbildung 5.8).

Diese schmalen Stege sind ebenfalls nach dem Entformen auf 40 μm in der vertikalen Richtung überdehnt. Dies wirkt sich auf die Breite über der gesamten Höhe aus. Das Prägen der Stufe war unabhängig von dem geprägten Material dagegen immer erfolgreich.

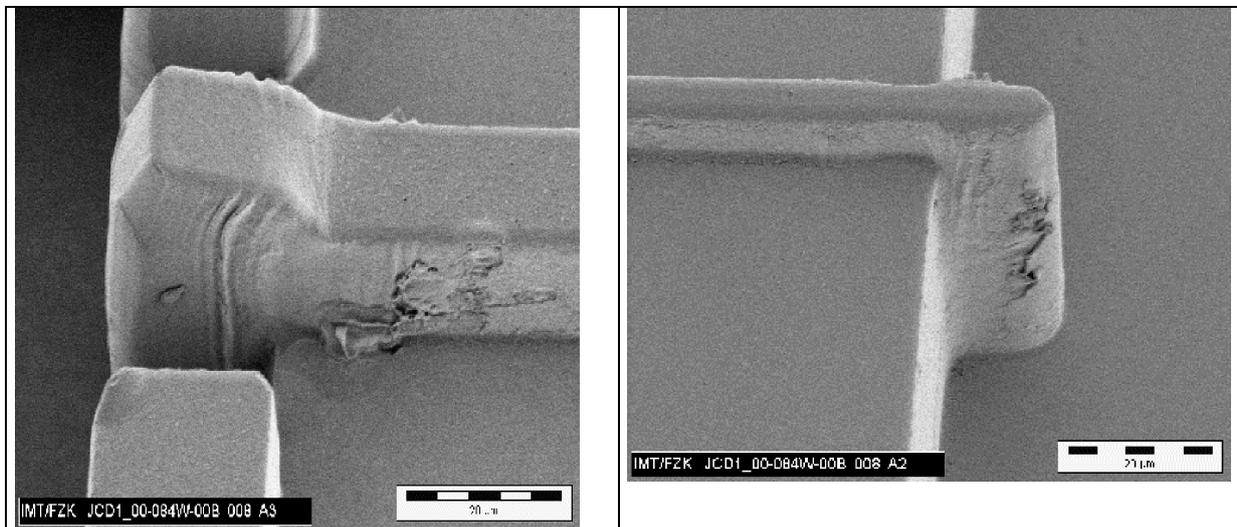


Abb. 5.6: Mit SU8-Formeinsatz geprägtem Steg aus Polycarbonat: 13 μm breit (lokal), 10 μm hoch.

Abb. 5.7: Mit SU8-Formeinsatz geprägtem Steg aus PC/PMMA, 4 μm breit, 10 μm hoch

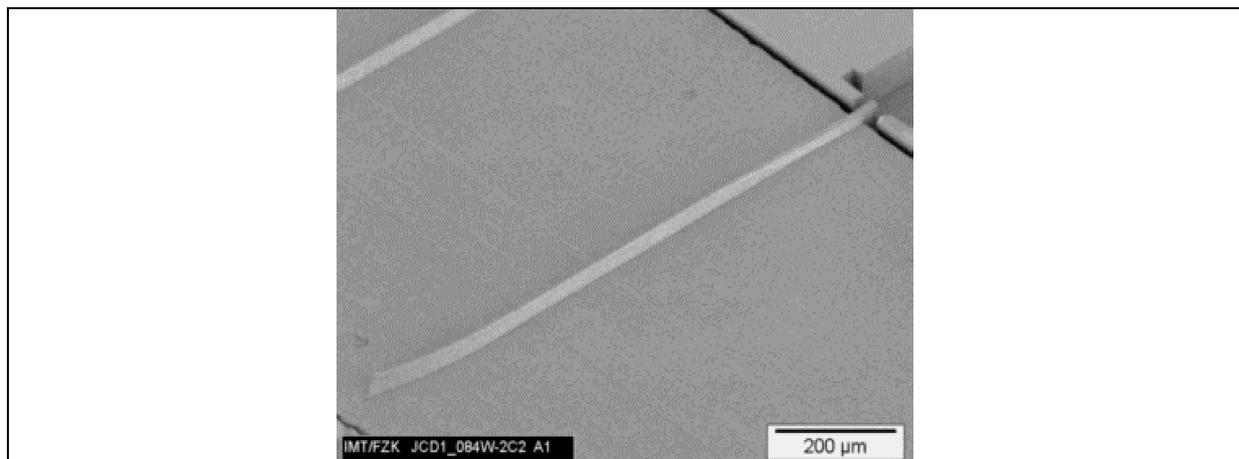


Abb. 5.8: : Mit LIGA-Formeinsatz geprägtem Steg aus Polycarbonat: 4 μm breit, ca 40 μm hoch

5.2.3 Schlussfolgerungen

Die Prägeversuche haben gezeigt, dass der Prägeerfolg und die Qualität von der Rauigkeit des Formeinsatzes und des verwendeten Materials abhängig ist.

Bei Verwendung von Polycarbonat als Prägematerial konnten sowohl mit dem gestuften als auch mit dem einstufigen Formeinsatz auf der Basis von SU8 gute Ergebnisse erzielt werden. Auch die schmalen Wellenleiterstrukturen waren mit Ausnahme von Defekten, die bereits durch die Maske bedingt sind, fehlerfrei. Allerdings kam es an manchen Stellen, an denen die Wellenleiter in den Faserführungsgraben reichen zu Überdehnungen der Strukturen. Dies wird auf eine erhöhte Rauigkeit und eine dadurch bedingte Verzahnung des Polycarbonates mit dem Formeinsatz zurückgeführt.

Im Falle von reinem PMMA und dem Materialverbund PC/PMMA konnten diese guten Ergebnisse nicht erzielt werden. In diesem Fall sind die Wellenleiterstege mit Ausnahme der 4 µm breiten und relativ kurzen Stege abgerissen. Dies lässt den Schluss zu, dass PMMA den Entformungskräften, die möglicherweise durch raue Seitenwände höher als üblich sind, bei feinen Strukturen nicht Stand hält

Die Verwendung des durch Röntgenlithographie hergestellten Formeinsatzes führte auch bei reinem Polycarbonat zu nicht befriedigenden Abformergebnissen. Dies wird aber ausschließlich auf die große Tiefe der Gräben zurückgeführt.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die Qualität der Formwerkzeuge und die bisher ermittelten Abformparameter noch verbessert werden müssen, um Wellenleiter mit der gewünschten Qualität herzustellen.

6 Charakterisierung der Wellenleiter

Um festzustellen, ob die geprägten Wellenleiterstrukturen nach dem Prägen den erwarteten Aufbau aufweisen, muss deren wellenleitendes Verhalten überprüft werden. Hierzu eignen sich zum einen Dämpfungsmessungen, die jedoch nur einen integralen Wert über alle Verluste im Wellenleiter ergeben. Ebenso können Nahfeldaufnahmen der Lichtintensität am Ende des Wellenleiters Aufschluss über den Aufbau des Wellenleiters geben. In beiden Fällen muss jedoch sichergestellt werden, dass die Messergebnisse nicht von der Lichtintensität überdeckt werden, die von der Lichtquelle außerhalb des Wellenleiters zum Detektor gelangt. Aus diesem Grunde ist es von Vorteil gekrümmte Wellenleiter für diese Charakterisierungen zu verwenden. Da es bei dieser Charakterisierung nur darum ging festzustellen, ob in den Rippenstrukturen Wellenleitung vorherrscht, wurden einstufige Wellenleiter, die mit dem nach Kap. 4.2.1 hergestellten Formeinsatz erzeugt wurden, verwendet.

6.1 Bestimmung der Leistungsverluste

Zur Bestimmung der Wellenleiterdämpfung wurden zwei Methoden angewendet, deren Messaufbau im Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ) der Universität Karlsruhe von Herrn Dipl.-Ing Christian Koos realisiert wurde. Es handelt sich um eine einfache Intensitätsmessung [42] sowie um eine Messung die darauf beruht, dass der Wellenleiter als Fabry-Perot-Resonator [43] betrachtet wird. Die Messung wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Koos durchgeführt.

6.1.1 Intensitätsmethode

Bei der Intensitätsmethode wird die in den Wellenleiter eingestrahlte Lichtleistung zu der am Wellenleiterende ausgekoppelten Intensität ins Verhältnis gesetzt. Mit der folgenden Gleichung kann das dimensionslose Dämpfungsmaß D [dB] ermittelt werden.

$$D = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (6.1)$$

Hierbei ist

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha z} \quad (6.2)$$

P_{out} die ausgekoppelte Lichtleistung, P_{in} die eingekoppelte Leistung, z ist die Wellenleiterlänge [km], α ist die Leistungsdämpfungskonstante [km^{-1}]. [31]. Es ergibt sich

$$D = 10 \alpha z \log e \quad (6.3)$$

Zur Durchführung dieser Messung wurde der in Abbildung 6.1 skizzierte Messaufbau verwendet, der aus folgenden Komponenten besteht:

- Lasermodul (Fa. Santec) dessen durchstimmbare Lichtfrequenz in eine Monomodeglasfaser eingekoppelt wird
- Schiebetisch (3 Achsen) zur Positionierung der Glasfaser vor dem zu messenden Wellenleiter, um eine optimale Einkopplung des Lichtes in den Wellenleiter zu erreichen.

- zu prüfender Wellenleiter
- Schiebetisch (3 Achsen) zur Positionierung der Detektionsfaser hinter dem Wellenleiter
- Powermeter (Fa. HP) zur Messung der von der Detektionsfaser aufgenommenen Lichtleistung

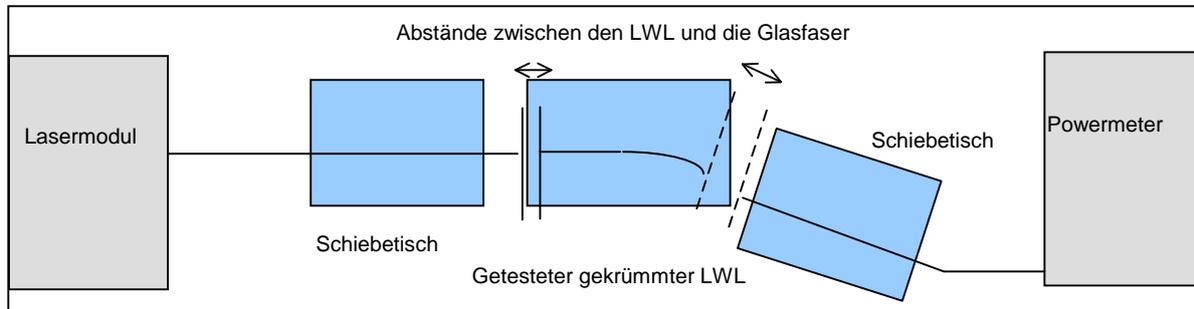


Abb. 6.1: Versuchsaufbau1 Intensitätsmessung

Mittels des Lasermoduls und der angekoppelten Glasfaser wird Licht mit einer Wellenlänge von $1,55\ \mu\text{m}$ mit einer Leistung von $0\ \text{dBm}$ in die Glasfaser und von dort in den Wellenleiter eingekoppelt. Das von dem Wellenleiter abgestrahlte Licht wird mit der Detektionsfaser, bei der es sich ebenfalls um eine Monomodefaser handelt, erfasst und von dem Powermeter gemessen. Dabei wird durch die lateral gekrümmte Form des Wellenleiters und die Verwendung einer Monomodefaser als Detektionsfaser verhindert, dass das von der Eingangsfaser abgestrahlte Licht direkt in die Ausgangsfaser einkoppelt. Um die maximale Einkopplung und Auskopplung zu erreichen, müssen die Eingangs- und Ausgangsfasern mit den Verschiebetischen zu dem Lichtwellenleiter genau justiert werden. Dadurch, wie die Wellenleiter von der geprägten Platte gesägt wurden, war man gezwungen einen axialen Abstand von ca. $100\ \mu\text{m}$ zwischen dem Anfang des Wellenleiters und der Glasfaser einzuhalten. Zwischen dem Wellenleiterende und der mit der am Powermeter angeschlossene Faser betrug der Abstand $200\ \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 6.1).

Nach Optimierung der Glasfaserpositionen wurde eine maximale Leistung von $-45\ \text{dBm}$ gemessen. Damit beträgt die Summe aller Verluste (Einkopplung, Auskopplung, intrinsische Dämpfungsverluste, Krümmung des Wellenleiters) in dem Wellenleiter $45\ \text{dB}$. Es ist hier zu bemerken, dass die Endflächen des Wellenleiters nicht poliert wurden. Somit ist zu erwarten, dass die Endflächen des Wellenleiters eine ähnliche Rauigkeit haben, wie die Seitenwände. Aufgrund dieser Rauigkeit sinkt die eingekoppelte Lichtleistung stark in Vergleich zum idealen Fall (polierte Endflächen), da eine starke Streuung an den rauen Endflächen auftritt. Das vom Wellenleiter ausgekoppelte Licht hat aufgrund dieser Streuung und der herstellungsbedingten Verrundung der Endfläche einen größeren lateralen Ausbreitungswinkel als dies für einen idealen Wellenleiter der Fall wäre. Dadurch ergeben sich auch bei der Detektion des vom Wellenleiter ausgekoppelten Lichtes mit einer Monomodefaser wieder hohe Verluste. Entlang des Wellenleiters trägt nicht nur die prozessbedingte Rauigkeit und die Materialdämpfung, sondern auch die maskenbedingten Verengungen der Wellenleiter zu den Verlusten bei.

Damit man einen Anhaltspunkt für die Einkopplungsverluste des Wellenleiters rechnen kann, gibt man vor, dass die Lichtintensität gleichmäßig über den Glasfaserkern verteilt ist. Deswegen kann man annehmen, dass die Verluste bei der Einkopplung unter der Annahme von 20% Verluste* durch raue Stirnfläche und aufgrund des Abstandes zwischen Faser und Wellenleiter sowie Modenfeldfehlpassung mindestens 12 dB betragen. Die Verluste bei der Kopplung in die Detektionsfaser können unter der Annahme eines doppelt so großen Abstrahlwinkels aufgrund der Verrundung der Endfläche und der gleichen Annahme die Rauigkeit betreffend zu mindestens 15 dB abgeschätzt werden. Die Dämpfung aufgrund der Krümmung des Wellenleiters kann bei einem idealen Schichtaufbau vernachlässigt werden. Da der vermessene Wellenleiter 1 mm lang war, würden dann die Wellenleiterverluste bei höchstens 18 dB/mm liegen.

Diese Abschätzung ist aber grob, weil die Intensitätsverteilung des Lichts über den Glasfaserkern nahe zu Gaußförmig ist. Außerdem ist die Stirnflächenrauigkeit des Wellenleiters nicht genau definiert. Deswegen sollte die Wellenleiterdämpfung durch die Vermessung unterschiedlich langer Wellenleiter ermittelt werden (siehe Kapitel 3.7). Die Steigung der Ausgleichsgeraden durch die Punkte, die die Dämpfung für die jeweilige Wellenleiterlänge darstellen, ist ein Maß für die intrinsische Wellenleiterdämpfung. Leider war diese Messung nicht möglich, da gerade diese Wellenleiter bei der Abformung nicht defektfrei hergestellt werden konnten.

6.1.2 Resonatormethode

Aus diesem Grunde wurde zur Bestimmung der Wellenleiterdämpfung unabhängig von den Einkoppelverlusten eine Methode gewählt, bei der die Wellenleiter als Resonatoren betrieben werden. Dabei werden die Endflächen des Wellenleiters als reflektierende Resonatorendflächen betrachtet.

Das in den Wellenleiter eingekoppelte Licht wird aufgrund von Fresnelreflektion an der Endfläche des Wellenleiters zum Teil reflektiert (ca. 4%). Wenn die eingekoppelte Lichtwelle die Bedingung $\lambda=2L/m$ (λ ist der Wellenlänger innerhalb der Wellenleiter, L ist seine Länge, m ist eine ganze Zahl) erfüllt, entstehen in dem Wellenleiter stehende Wellen und damit verhält sich der Wellenleiter als ein Fabry-Perot-Resonator. Aus dem Maxima des Leistungstransmissionskoeffizient (T_{\max}) und dem Minima des Leistungstransmissionskoeffizient (T_{\min}) lässt sich der Dämpfungskoeffizient (α) in dem Material innerhalb des Resonators nach folgender Gleichung ermitteln (siehe Anhang 1):

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln r_1 r_2 + \frac{1}{L} \ln \frac{\sqrt{\eta} + 1}{\sqrt{\eta} - 1} \quad (6.4)$$

Mit:

$$\eta = T_{\max} / T_{\min} \quad (6.5)$$

L = Länge des Wellenleiters, r_1, r_2 = Amplitudenreflektionskoeffizient an den Stirnflächen

Um das Fabry-Perot-Interferenz-Muster (siehe Abbildung 6.2) des Wellenleiters erfassen zu können, wurde der in Abbildung 6.3 schematisch dargestellte Messaufbau verwendet, der

* An glatte PMMA/Luft- bzw. Glas/Luft-Grenzfläche beträgt die reflektierte Lichtintensität jeweils ca. 4%

am IHQ im Rahmen anderer Arbeiten aufgebaut und automatisiert wurde. Der verfügbare Messaufbau erlaubt die Bestimmung von Dämpfungswerten bis 9 dB/mm. Größere Dämpfungen können aufgrund zu großem Rauschens nicht mehr ermittelt werden. Licht eines durchstimmbaren Lasermoduls (Santec TSL-220) wird über eine Monomodefaser in den Wellenleiter eingekoppelt. Die Faser ist auf einem Verschiebetisch montiert, um diese optimal zur Stirnfläche des Wellenleiters ausrichten zu können. Am Ende des Wellenleiters befindet sich ebenfalls eine auf einem Verschiebetisch montierte Faser, die zur Detektion des aus dem Wellenleiter austretenden Lichtes verwendet wird und an ein Powermeter (HP 8153A) angeschlossen ist. Mit dem Powermeter wird die Intensität, die von der Faser detektiert wurde, gemessen. Lasermodul und Powermeter sind an einen Rechner angeschlossen. Über ein auf LabView (National Instruments) basierendes Programm (geschrieben am IHQ, TH Karlsruhe) werden die Geräte gesteuert, die Parameter der Messroutine eingegeben und die Daten erfasst und dargestellt. Dabei wird während der Messung die von dem Lasermodul erzeugte Wellenlänge von 1550 nm bis zu 1560 nm kontinuierlich geändert. Die ermittelte Leistung wird am Bildschirm des PC als Funktion der Wellenlänge dargestellt.

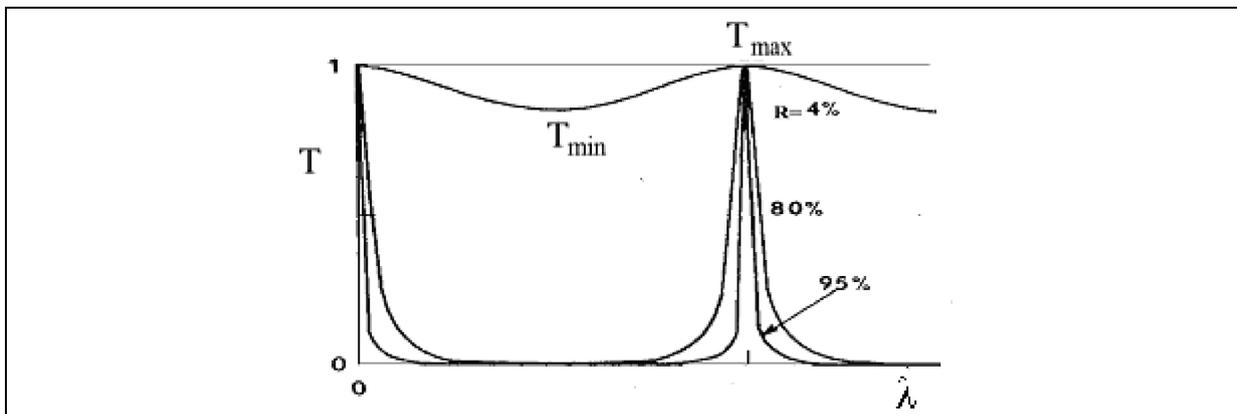


Abb. 6.2: Fabry-Perot-Interferenz-Muster, $R = |r|^2$, R: Leistungreflektionskoeffizient

Abb. 6.4 zeigt exemplarisch eine solche Messkurve. Aus dieser Messkurve ermittelt man für η einen mittleren Wert von ca. 1. Unter der Annahme, dass die Reflexionskoeffizienten an den Stirnflächen $r_i \approx 0,2$ ($r_i = (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)$, $n_1 \approx 1,5, n_2 = 1$) betragen, ergibt sich daraus ein Wert für α von 1,254. Daraus ergibt sich nach Gleichung 6.3 ein Wert für die Dämpfung von ca. 5 dB/mm. Hierbei handelt es sich um eine „Worst-Case“-Abschätzung, da anzunehmen ist, dass aufgrund der Rauigkeit der Wellenleiterstirnflächen die Reflexionskoeffizienten eher kleiner als 0,2 sind.

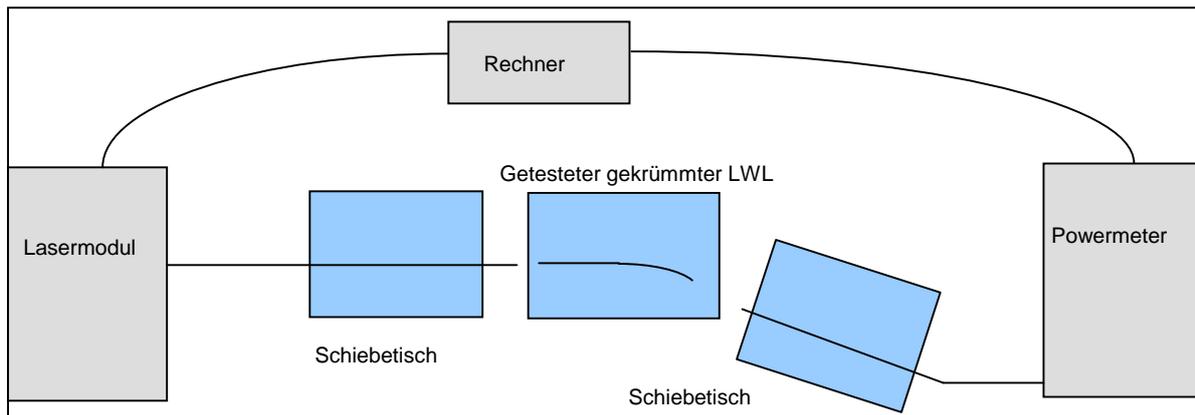


Abb. 6.3: Versuchsaufbau 2 zur Ermittlung der Dämpfung nach dem Resonatorprinzip

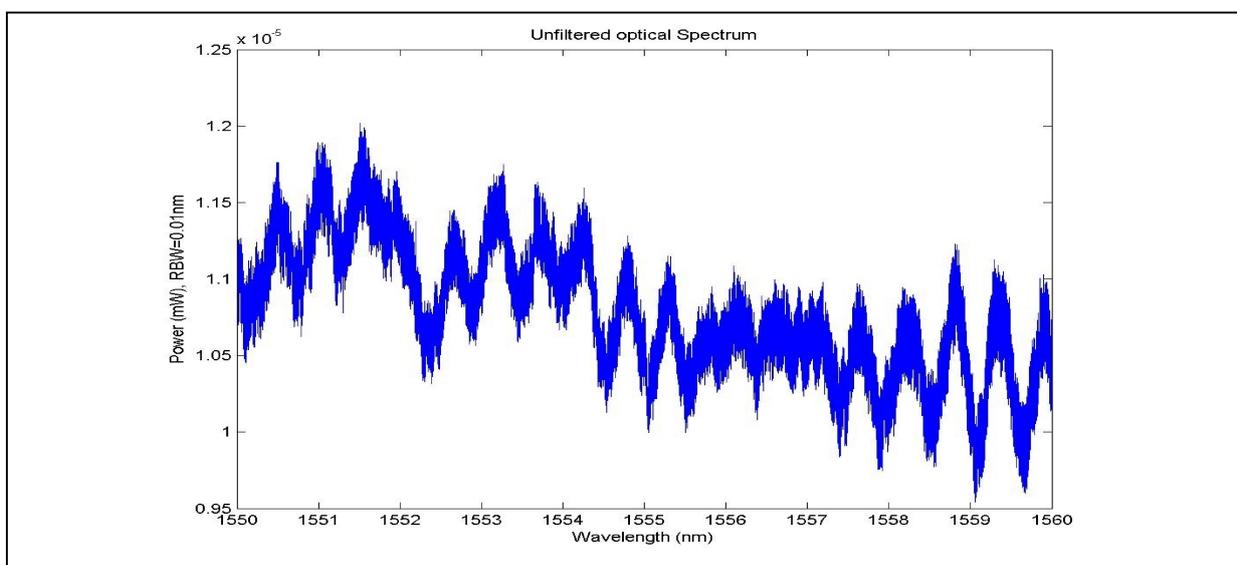


Abb. 6.4: Resonanzmuster des als Fabry-Perot-Resonator betrachteten Wellenleiter

Der Wert für die intrinsische Dämpfung des Wellenleiters ergibt sich aus der Summe der Materialdämpfung, der Dämpfung aufgrund der Rauigkeiten der Wellenleiter und aufgrund von Verlusten, die durch die Krümmung des Wellenleiters und die Güte der Grenzschicht zwischen Wellenleiter und Substratuntergrund entstehen. Die Verluste aufgrund der Krümmung können bei einem PC/PMMA-Schichtaufbau vernachlässigt werden. Die reinen Materialverluste betragen 0,5 dB/mm. Die Ursache der Verbleibenden ca. 5 dB könnte entweder die Rauigkeit oder sonstige geometrische Unzulänglichkeiten der Wellenleiter sein. Sie können aber dadurch entstehen dass Verluste in Substrat auftreten aufgrund der Tatsache, dass der Wellenleiter ganz aus einem Material besteht. Insofern war es notwendig, weitere Untersuchungen zum Nachweis der Existenz der wellenleitenden Schicht durchzuführen.

6.2 Analyse des Abstrahlprofils des Wellenleiters

Leider kann die Existenz der wellenleitenden Schicht aufgrund der Wellenleitergröße und der geringeren Brechzahlhubunterschiedes nicht mit dem Mikroskop festgestellt werden. Außerdem haben die beiden Materialien (PC und PMMA) die gleiche Farbe, so dass sich

auch daraus kein Erkennungsmerkmal ableiten lässt. Die REM-Aufnahmen von geprägten PC und PMMA-Wellenleitern zeigen zwar eine schwer erkennbare Grenzlinie, eine klare Aussage, dass diese Linie die Grenzlinie zwischen geprägtem PC und PMMA ist, kann leider nicht gegeben werden. Somit bleibt nur die Analyse der vom Wellenleiter abgestrahlten Leistung. Diese ist von der Mode abhängig, die sich im Wellenleiter ausbilden kann. Diese Mode ist für einen Wellenleiter, der aus PC/PMMA besteht, unterschiedlich zu der Mode in einem reinen PMMA-Wellenleiter. Insofern sollte sich auch das Nahfeldprofil für einen zweischichtigen Aufbau von einem einschichtigen Rippenwellenleiter unterscheiden.

Um Kenntnis über das Abstrahlprofil des Wellenleiters zu erhalten, wurde der zu vermessende, gekrümmte Wellenleiter simuliert. Im ersten Fall wurde angenommen, dass der Wellenleiter ganz aus PMMA besteht. Im zweiten Fall wurde ein Schichtaufbau aus PC/PMMA angenommen, wobei die Dicke der PC-Schicht $3\ \mu\text{m}$ beträgt. Abbildung 6.5 zeigt die Leistungsverteilung am Ende des reinen PMMA-Lichtwellenleiters. Abbildung 6.6 zeigt die Leistungsverteilung am Ende des PC/PMMA-Lichtwellenleiters

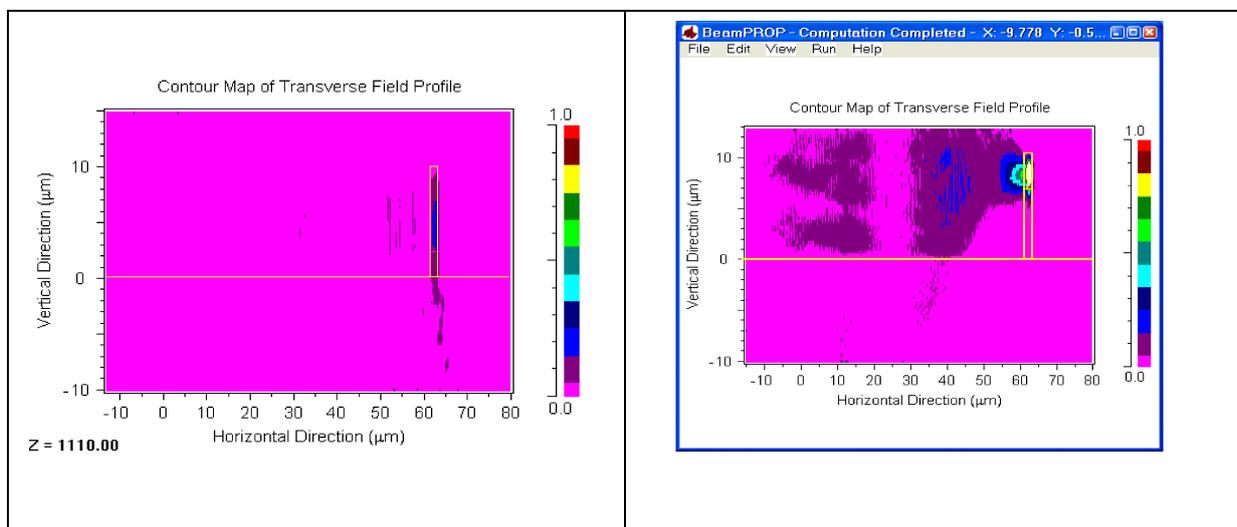


Abb. 6.5: Leistungsverteilung am Ende des reinen PMMA-Lichtwellenleiters

Abb. 6.6: Die Leistungsverteilung am Ende des PC/PMMA-Lichtwellenleiters

Wie man erwartet, ist die Mode beim Wellenleiter aus PC/PMMA im oberen Teil auf einen Bereich auf $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ zentriert (Abbildung 6.6). Zusätzlich erkennt man einen Strahlungsuntergrund links vom Wellenleiter, der sich aufgrund der Abstrahlung aufgrund der Rauigkeit ergibt. Im Falle, dass der Wellenleiter ganz aus PMMA besteht (Abbildung 6.5) ist die Leistung praktisch über die gesamte Wellenleiterrippe verteilt und reicht mit einer leichten Versetzung nach rechts in das Substrat. Da die Leistung insgesamt kleiner ist als beim PC/PMMA-Wellenleiter ist die Untergrundstrahlung nur noch an einzelnen Punkten aufzulösen.

Um eine Aussage machen zu können, um welche Art von Wellenleiteraufbau es sich handelt, muss das Abstrahlverhalten des Wellenleiters experimentell ermittelt und mit dem Simulationsergebnis verglichen werden.

Zur Erfassung der Intensitätsverteilung am Ende des Wellenleiters wurde der Versuchsaufbau in Abbildung 6.1 leicht abgeändert (siehe Abbildung 6.7) und zwar so, dass

ein PC steuerbarer Schiebetisch auf der Basis eines Piezoantriebes (Newport ESP300) an der Endseite des LWL montiert wurde, dessen Bewegung in der horizontalen Ebene senkrecht zu dem Wellenleiter (X-Achse) durch einen PC genau kontrolliert werden kann.

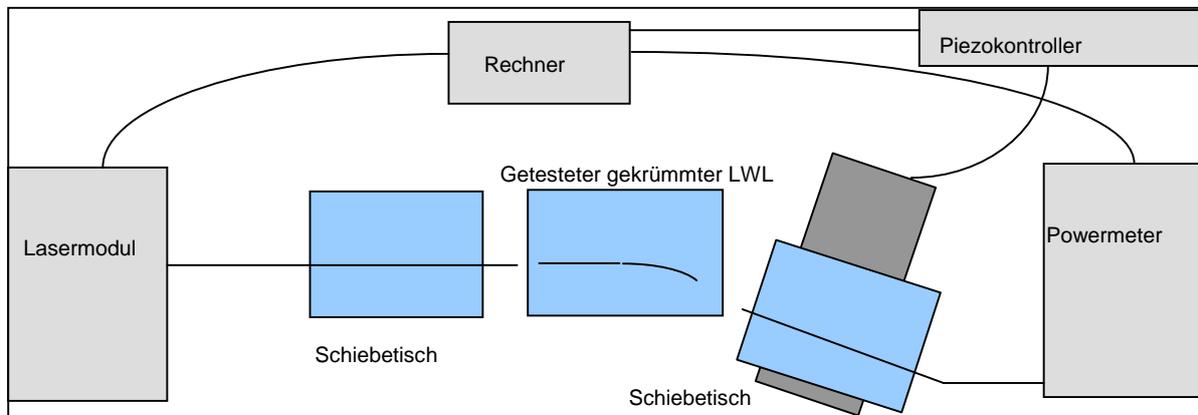


Abb. 6.7: Versuchsaufbau 3 Zur Erfassung der Intensitätsverteilung am Ende des Wellenleiters

Auf dem Schiebetisch befindet sich eine Glasfaser, in die die abgestrahlte Leistung des Wellenleiter eingekoppelt werden kann. Diese Leistung wird mit dem Powermeter gemessen. Für die Steuerung der Geräte wurde ein Programm geschrieben*. Über das Programm und den Piezokontroller wird der steuerbare Schiebetisch mit der darauf gesetzten Faser schrittweise in horizontale Richtung bewegt. Bei jedem Stillstand des Tisches wird die von dem Wellenleiter abgestrahlte Lichtleistung gemessen und auf dem Bildschirm dargestellt. Am Ende der Messserie werden die Messwerte als eine ASCII-Datei gespeichert. Damit man die von dem Wellenleiter abgestrahlte Lichtleistung in der Ebene, die parallel zu der LWL-Stirnfläche liegt, erfasst, wiederholt man das Messverfahren nach dem die vertikale Lage der Faser durch einen zweiten Schiebetisch manuell um einen bestimmten Wert ($1\ \mu\text{m}$) geändert wurde.

Abbildung 6.8 zeigt ein farbcodiertes Bild der von dem nach links gekrümmten Wellenleiter (Krümmungsradius beträgt $700\ \mu\text{m}$) abgestrahlten Lichtleistung. In dieser Messung wurde der Messbereich in der horizontalen Richtung auf $80\ \mu\text{m}$ und in der vertikale Richtung auf $30\ \mu\text{m}$ festgelegt, die Messauflösung in beiden Richtungen betrug $1\ \mu\text{m}$. In dem Bild sieht man die in die Faser eingekoppelte Lichtleistung als Funktion des Ortes. Zur Orientierung ist in das Bild die vermutete Lage des Rippenwellenleiters eingezeichnet. Vom Lichtwellenleiterzentrum ausgehend verläuft das Intensitätsprofil schräg nach unten als Leckmode in das Substrat. Bei den weiteren erkennbaren Nebenmaxima handelt es sich um Untergrundstrahlung aufgrund der Streuung oder um Lichtreflexionen aus der Umgebung. Die Leistungsunterschiede zwischen dem Intensitätsmaximum und der Leckmode sind gering. D.h. es gibt keine richtige Leistungszentrierung des Licht in dem Wellenleiter. Ein Vergleich des gemessenen Leistungsprofil mit den berechneten (siehe Abbildungen 6.5 und 6.6), führt zu dem Schluss, dass das gemessene Profil eher dem Profil des reinen PMMA-Wellenleiters ähnelt. Zwar ist dort die Verbiegung nicht so stark, was aber auf Messgenauigkeit und die Tatsache zurückgeführt werden kann, dass es sich beim gemessenen Profil um eine Faltung aus der Intensitätsverteilung mit der Detektorfläche, der $9\ \mu\text{m}$ großen Faser handelt. Diese Faltung führt zu einer Verbreiterung der Intensitätsverteilung.

* Das Programm wurde von Herrn J. Brosi und Herrn C. Koos geschrieben (IHQ)

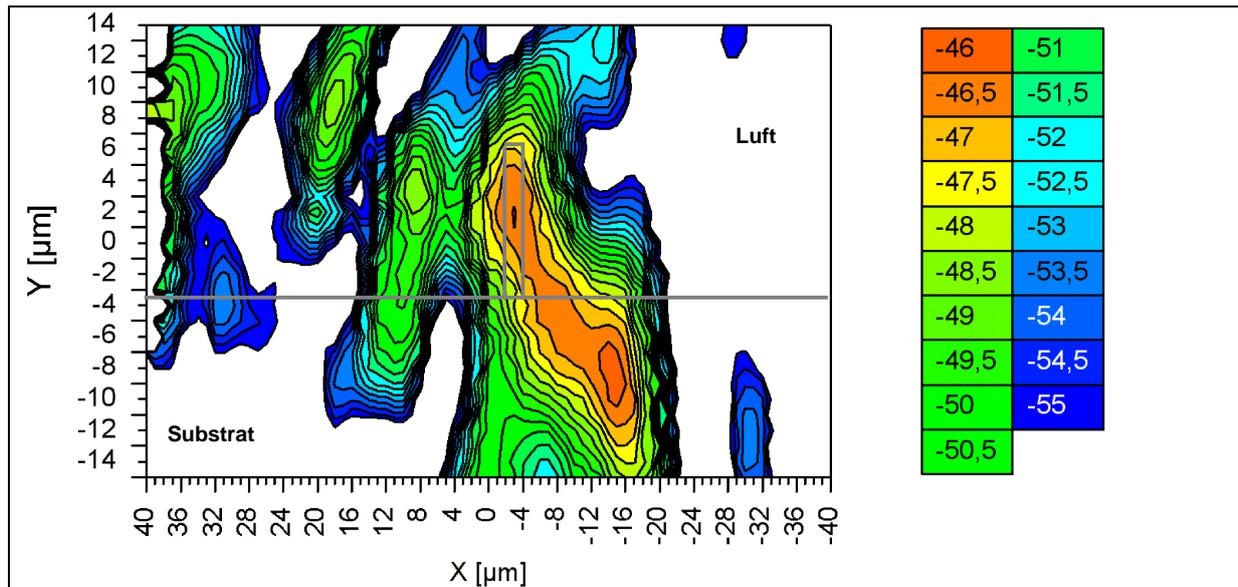


Abb. 6.8: Ein farbcodiertes Bild der von dem nach links gekrümmten LWL abgestrahlten Lichtleistung.

6.3 Schlußfolgerungen

Mit den durchgeführten Versuchen kommt man zu der Schlussfolgerung dass der getestete Wellenleiter nicht aus einem Schichtaufbau aus PC und PMMA sondern ganz aus PMMA besteht. Da die gemessene Höhe der Stege 10 µm beträgt, heißt das, dass die Folie beim Prägen zerrissen ist und nicht, wie es beabsichtigt war, in die Wellenleiter eingeprägt wurde.

Das widerspricht den Ergebnissen der Voruntersuchungen (Kapitel 5.2.1) wo kein Haftproblem des Folienvverbundes festgestellt werden konnte. Diese und die Tatsache, dass die Folie nicht bei 180 °C geschmolzen ist, legt die Vermutung nahe, dass die Eigenschaften der Folie, die für die Wellenleiterherstellung eingesetzt wurde, mit den Eigenschaften der am Anfang der Arbeit getesteten Polycarbonatmaterialien nicht übereinstimmen und die Folie nicht aus reinem Makrofol ist, sondern eine Zusammensetzung aus mehreren Polymeren. Der Hersteller (F. Goodfellow) gibt allerdings an, dass es sich um monoaxial orientiertes Makrofol handelt.

Aufgrund dieses Verdachts wurden die Eigenschaften der Folie durch Thermogravimetrie (STA) und Differenzthermoanalyse und Dynamische (Scanning) Differenz-Kalorimetrie (DSE) Methoden getestet. [41]

Bei den STA-Untersuchungen verascht man die gleiche Menge von unterschiedlichen Materialien unter inerter Atmosphäre und schließt aus dem Veraschungsprozeß und den Rückständen auf die Zusammensetzung des Materiales. Wenn die Restaschemenge gleich ist, weist dies darauf hin, dass die getesteten Materialien identisch sind. Es wurde deswegen 10 g von jedem der beiden Materialien genommen und getestet. Die Zersetzung der dünnen PC-Folie fing bei 400 °C an, wobei sie bei der in den Vorversuchen verwendeten Folie (dickere Folie) bei 500 °C angefangen hat. Die totale Veraschung der dünnen PC-Folie ergab sich bei ca. 500 °C, und 22% der Anfangsmenge sind zurückgeblieben. Die

Veraschung der dickeren Folie ergab sich bei ca. 600 °C. Hier sind 25% der Anfangsmenge zurückgeblieben. Die im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbare Restaschemenge weist darauf hin, dass beide Materialien zumindest dieselbe Grundzusammensetzung haben. Zusatzstoffe in der dünnen PC-Folie sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen Temperatur, bei dem Veraschungsprozess beginnt, nicht auszuschließen. Ein weiterer Hinweis darauf ist die Tatsache, dass die dünnen PC-Folie eine leichte grünliche Verfärbung aufweist, während die dickere Folie eine klar und transparent ist. Außerdem fängt die dünnen PC-Folie bei 290 °C an bräunlich zu werden; ein Hinweis für die Zersetzung einer Komponente. Die Zersetzung von Polycarbonat fängt laut Literatur üblicherweise erst ab 340 °C an.

Durch die Dynamische-Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter [41] wurde die Frage nach dem Unterschied dieser Folien weiterverfolgt. Ca. 15 mg vom 130 µm dicken Makrofol wurden in der Anlage aufgeheizt. Bei diesem Material wurde die Glasübergangstemperatur (T_g) zu ca. 150 °C bestimmt (Sprung in der Messkurve in Abbildung 6.9). Die Probe wurde bis 200 °C weiter aufgeheizt. Danach wurde sie abgekühlt. Anschließend wurde sie noch einmal aufgeheizt. Dabei ergab sich die T_g bei der selben Temperatur, die Kurve hat sich bei dem zweiten Aufheizen nicht verändert (siehe Abbildung 6.9). Die Materialverluste bei diesem Experiment betragen 30 µg.

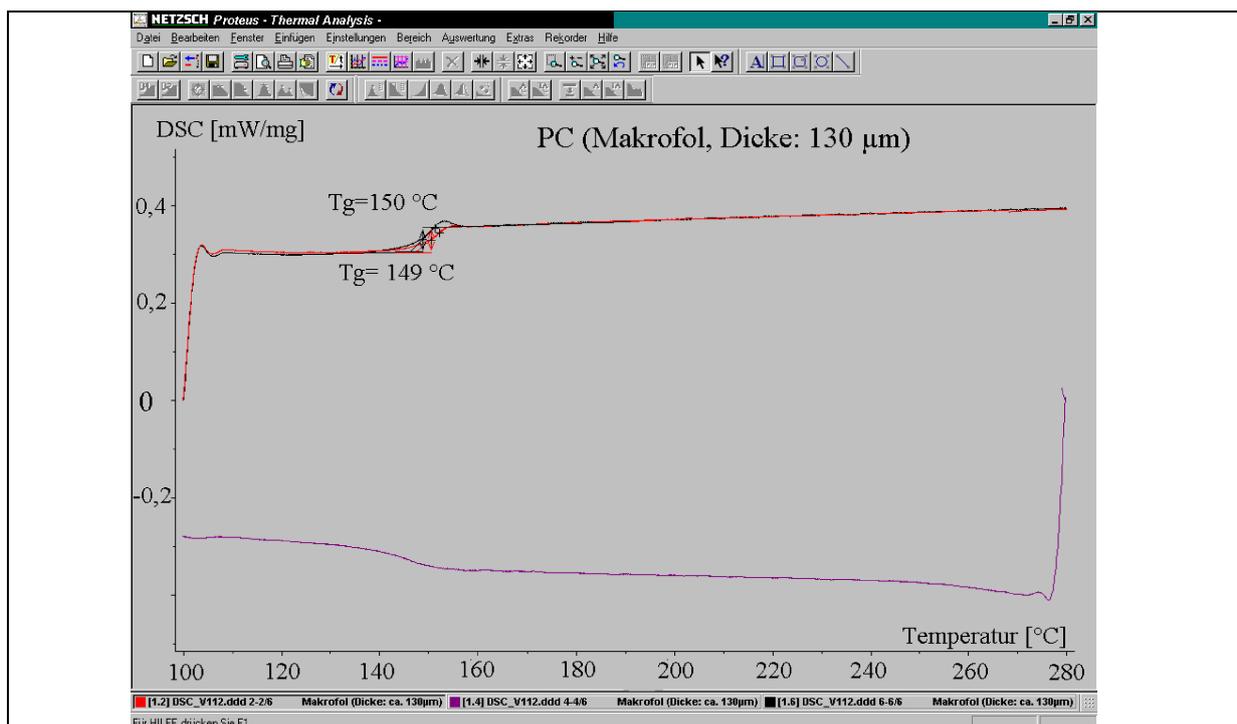


Abb. 6.9: Dynamische-Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter-Messung für dickes Polycarbonat (130 µm), das für die Vorversuche verwendet wurde

Eine ca. 4 mg große Menge der dünnen PC-Folie wurde in der selben Art und Weise aufgeheizt (siehe Abbildung 6.10). Dabei ergab sich eine Glasübergangstemperatur (T_g) von ca. 160 °C. Bei weiterem Aufheizen ergaben sich zwei weitere Peaks: ein Peak trat bei 222,3 °C auf der andere bei 238,8 °C (siehe Abbildung 6.10). Die Peaks ergeben sich durch das Aufschmelzen der Kristalliten des monoaxialen Makrofol. Das Material wurde anschließend abgekühlt und daraufhin zum zweiten Mal aufgeheizt. Dieses Mal trat die Glasübergangstemperatur bei 125,5 °C auf. Ein weiteres Aufheizen des Polycarbonats ergibt

keine weiteren Peaks, da das Material nach dem ersten Aufheizen amorph geworden ist. Der Gewichtsverlust beträgt bei 4 mg Anfangsmenge 92 µg.

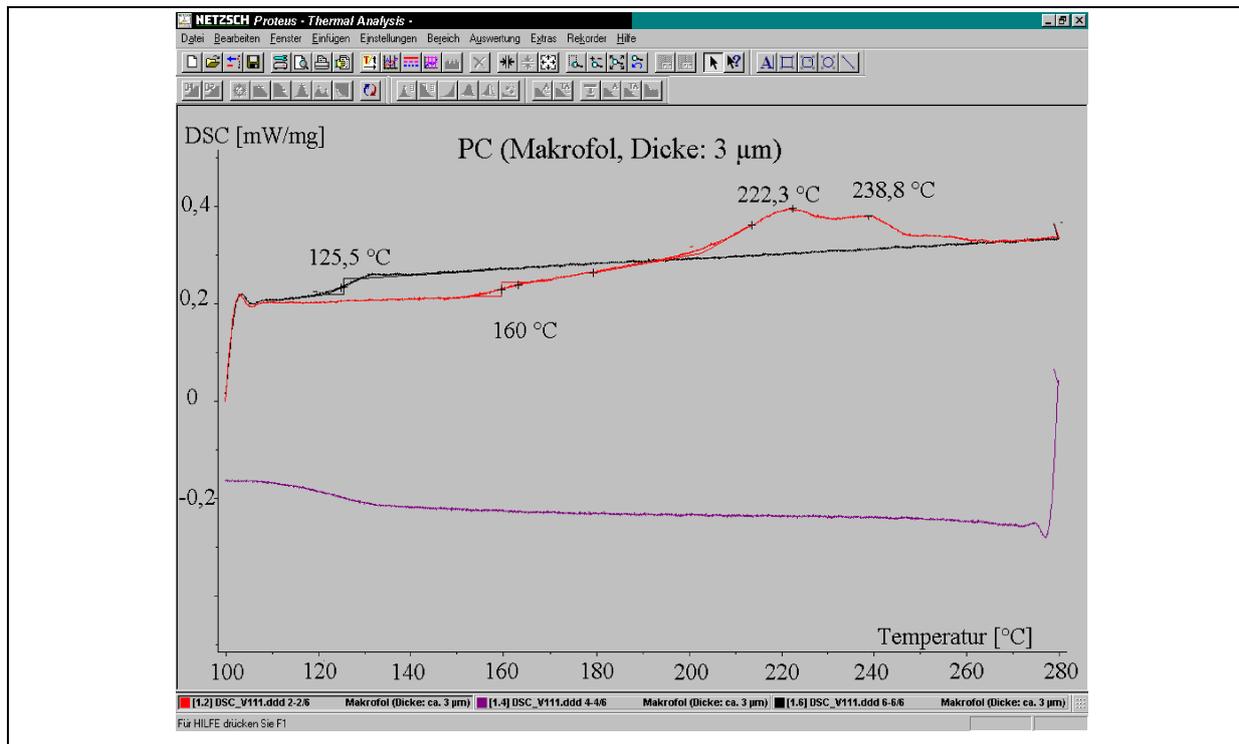


Abb. 6.10: Dynamische-Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter-Messung für 3 µm dicken PC

Diese Versuche untermauern die Vermutung, dass die beiden Materialien in ihrer Grundzusammensetzung identisch sind und dass es sich um Makrofol handelt. Die unterschiedlichen Gewichtsverluste beim Aufheizen, die unterschiedlichen Farben der Materialien (besonders die Änderung der Farbe der dünnen PC-Folie von grünlich zu bräunlich bei 280°C) und das Absinken des T_g -Werts der dünnen PC-Folie beim zweiten Aufheizen auf 125,5 °C gibt den Hinweis, dass die beiden Makrofolmaterialien unterschiedliche Zusatzstoffe enthalten. Ein weiterer Unterschied ist die monoaxiale Orientierung der dünnen Folie, wobei dieser Unterschied beim zweiten Aufheizen der Folie aufgehoben werden kann.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist die mangelnde Abformbarkeit des PC/PMMA-Schichtverbundes erklärbar.

7 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde analysiert, inwieweit es möglich ist, durch Prägetechnik, wie sie im Rahmen des LIGA-Verfahrens angewendet wird, in zweischichtigen Polymeraufbauten monomodige Wellenleiter mit integrierten Faserführungsstrukturen zur passiven Faserankopplung für Anwendungen in der Nachrichtentechnik herzustellen. Dazu war es nicht nur notwendig, eine geeignete Materialkombination zu erarbeiten, die sowohl die optischen Eigenschaften als auch die aus dem Prägeprozess sich ergebenden Randbedingungen erfüllt. Es musste insbesondere auch eine geeignete Prozesstechnik entwickelt werden, die es erlaubt, die für den Prägeprozess notwendigen Formeinsätze herzustellen.

Die Analyse der für den Prägeprozess zugänglichen Materialien ergab, dass unter dem Gesichtspunkt der Verbindung der Materialien und der Prägbarkeit eine Kombination aus PC als Wellenleitermaterial und PMMA als Substrat- und Mantelmaterial geeignet ist. Hinsichtlich der Dämpfung sind die Materialien mit einem Dämpfungswert von ca. 1 dB/mm bei der Wellenlänge von 1,55 μm zwar nicht ideal, aber durchaus noch akzeptabel. Der Brechzahlhub ist mit 0,0686 relativ groß, so dass in den Wellenleitern eine gute Führung erzielt werden kann.

Die auf der Basis dieser Materialkombination durchgeführten Simulationen ergaben, dass die Größe der Wellenleiter im Bereich von 3 μm x 3 μm liegen sollte, damit die Wellenleiter monomodig bleiben. Werden Wellenleiter in PC auf PMMA dieser Größe simuliert, so ergeben sich auch bei einer Krümmungsradius von 50 μm Abstrahlverluste von ca. 10 dB. Diese Verluste können deutlich vermindert werden (0,5 dB bei einem Krümmungsradius von 50 μm), wenn man den PC-Wellenleiter auf einem Sockel aus PMMA realisiert. Die Gesamthöhe der dadurch erzeugten Rippe sollte größer als 6 μm sein. Aus diesen Ergebnissen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Realisierung von relativ eng gekrümmten Wellenleitern auch in einem Polymerschichtaufbau Sinn macht, zumal die durch die Krümmung entstehenden Verluste kleiner sind als die Materialverluste und deutlich kleiner als die Koppelverluste. Die Koppelverluste liegen bei Ankopplung einer Standardglasfaser mit einem Kern mit 9 μm Durchmesser aufgrund der unterschiedlichen Querschnittsgeometrie und der daraus resultierenden Modenfeldfehlanspassung bei ca. 11 dB. Diese können durch Strukturieren eines Tapers an der Einkoppelstelle vermindert werden. Wie die Simulationen zeigen führt allerdings nur ein Aufwärtstaper zu einer Verminderung der Einkoppelverluste. Für einen Abwärtstaper werden die Verluste für alle Breiten des Tapers an der Koppelstelle unter den Randbedingungen dieser Arbeit größer. Die Verluste konnten für einen Aufwärtstaper der eine Anfangsbreite von 12 μm aufweist und mindestens 90 μm lang ist auf 7,1 dB reduziert werden. Aufgrund dieser Ergebnisse sollte bei zukünftigen Designs immer ein entsprechender Taper vorgesehen werden, was auch aufgrund der Möglichkeit der freien Formgebung des Designs beim LIGA-Verfahren kein Problem darstellt. Vorteilhaft wäre auch ein Tapern in vertikaler Richtung, was jedoch verfahrensbedingt nur sehr schwer möglich ist.

Zur Herstellung der Formeinsätze wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Wege verfolgt.

Im ersten Fall wurde mit Hilfe von UV-Lithographie unter Verwendung des Negativ-Resists SU8 ein Formeinsatz hergestellt. SU8 lässt sich aufgrund seines hohen Kontrasts auch mit UV-Lithographie sogar in größeren Dicken (bis einige 100 μm) mit senkrechten Seitenwänden strukturieren. Obwohl dieser Weg aufgrund der einfacheren Prozessierbarkeit und der Erzielbarkeit geringer Toleranzen in den Resistschichten für die Anwendung interessant ist, ergibt sich ein wesentlicher Nachteil. Wie erwartet führte die Beugung des UV-Lichts an den Absorberkanten auch bei einem Hard-Kontakt zwischen Chrommaske und Resistschicht zur Abrundung der Wellenleiterenden in der Resiststruktur, die als Form für die Galvanik dient. Dieser Fehler wird auch in die geprägte Struktur des Polymeraufbaus übertragen. Dieser Effekt führt aufgrund der sich daraus ergebenden höheren Divergenz des von dem Wellenleiter ausgekoppelten Lichts zu zusätzlichen Koppelverlusten. Dieser Fehler kann zukünftig prinzipiell vermindert werden, wenn am Layout Strukturen vorgesehen werden, die so auszulegen sind, dass die Lichtintensität im Eckenbereich vermindert wird und somit eine Kompensation der aufgrund der Beugung zuviel eingestrahlten Intensität erfolgt. Hierzu müssen in zukünftigen Arbeiten zunächst Simulationen zur Dosisablagerung bei der UV-Belichtung durchgeführt werden. Auf der Basis dieser Ergebnisse muss ein neues Layout und eine neue Chrommaske hergestellt werden. Sollte es gelingen, mit dieser Maßnahme die Verrundung der Wellenleiterenden auf eine Größe vergleichbar zu der bei der Röntgenlithographie entstehenden Verrundung zu reduzieren, so ist die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode der Herstellung der Resiststruktur für den Formeinsatz auf der Basis von SU8 auf Grund von Kostengesichtspunkten dem röntgenlithographischen Weg vorzuziehen. Geklärt werden muss aber außerdem die Frage des Entfernens des SU8-Resists aus dem Formeinsatz, was ein generelles Problem darstellt. Hierzu wurden im Rahmen der Arbeit die Laser-Ablation angewendet. Hiermit konnte der 64 μm dicke Resist in den zweischichtigen Formeinsätzen nahezu vollständig entfernt werden. Die Rauigkeit der Formeinsätze hat sich dadurch nur sehr begrenzt erhöht.

Im zweiten Fall wurde der Formeinsatz mit dem LIGA-Verfahren hergestellt, wobei als Substrat eine Kupferplatte verwendet wurde, die an den Stellen, an denen die Faserführungsgruben entstehen sollen, mit einem Feinfräser tiefer gefräst war. Die Bestrahlung erfolgte mit Röntgenstrahlung an ANKA. Im Verlaufe der Arbeit erwies sich die Maskenherstellung schwieriger als erwartet. Insbesondere die Haftung der feinen Resiststrukturen, die die Wellenleiter darstellen, und die Herstellung von Justierkreuzen in den Masken stellten ein größeres Problem dar. Erst nach Optimierung der Bestrahlungsdosis und des Entwicklungsprozesses sowie des Membranaufbaus war es möglich, mit dem Elektronenstrahlschreiber die geforderten Strukturen herzustellen und daraus eine Zwischenmaske zu fertigen, die als Arbeitsmaske eingesetzt werden konnte. Die Goldabsorberhöhe von 1,8 μm erwies sich sowohl aufgrund von Simulationen als auch aufgrund der Ergebnisse der Experimente als ausreichend. Justierkreuze konnten hergestellt werden, nachdem deren Layout in Hinsicht auf eine Verminderung von Kerbspannungen in den Absorberecken der Justierkreuze minimiert wurde. Die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Erkenntnisse zur Herstellung von Zwischenmasken (siehe Kapitel 4.1.2) sollten generell in die Fertigung Eingang finden, da sich damit nicht nur die Qualität und Ausbeute bei kleinen Strukturen, sondern auch bei Standardstrukturen verbessern sollte. In Projekten, bei denen kleine Strukturen hergestellt werden sollen, sind die erarbeiteten Parameter unbedingt anzuwenden.

Die Verwendung gestufter Kupferplatten für die Herstellung gestufter Formeinsätze ist zwar prinzipiell möglich, aber nicht ideal. Zum einen ist die geforderte Toleranz der Stufenhöhe nur sehr schwer einzuhalten, zum anderen ist der Herstellungsschritt sehr fehleranfällig. Darüber hinaus weist die gefräste Seitenwand der Stufe immer eine relativ große Rauigkeit und einen leichten Grat auf, der zwar nicht die Funktion der Elemente aber den Abformprozess negativ beeinflussen kann. Für zukünftige Arbeiten sollte überlegt werden, ob es nicht günstiger ist, die Stufe durch Galvanik in eine lithographisch hergestellte Form herzustellen und die galvanisierte Schicht auf die gewünschte Höhe abzufräsen. Dies hat den Vorteil, dass die Seitenwand glatt ist und dass die Höhe in einem Planfrässchritt genauer eingestellt werden kann. Zusätzlich könnte zur genaueren Höheneinstellung nach dem Fräsen ein Trockenätzprozess nachgeschaltet werden, mit dem das Kupfer der oberen Ebene abgetragen, das Kupfer der unteren Ebene aber aufgrund des schützenden Resists nicht angegriffen wird. Eine weitere Möglichkeit der Herstellung der gestuften Grundplatte bestünde darin, die erste Stufe durch optische Lithographie in SU8 herzustellen. In diesem Fall müssten Stufe und Grundplatte mit einer Galvanikstartschicht vor dem Aufbringen des Resists versehen werden, was jedoch kein Problem darstellen sollte. Der weitere Prozess wäre analog zu dem bei Verwendung einer gefrästen Kupfergrundplatte. Dieser Weg hätte den Vorteil, dass durch den Schleuderprozess bei der Herstellung der SU8-Schicht, die Stufenhöhe direkt eingestellt werden kann und damit kein Frässchritt erfolgen muss. Auch die Seitenwand wäre so glatt, wie es der Lithographieprozess erlaubt.

Die mit den nicht ganz perfekten Formeinsätzen durchgeführten Prägeversuche brachten leider nicht die gewünschten Erfolge im Falle eines zweischichtigen Aufbaus. Es konnten nur die kurzen Stege (ca. 1000 μm lang) defektfrei abgeformt werden. Das Ergebnis war das Gleiche, wenn reines PMMA abgeformt wurde. Im Gegensatz dazu war das Prägeergebnis deutlich besser, wenn nur reines Polycarbonat geprägt wurde. Dies lässt den Schluss zu, dass die Rauigkeit der Formeinsatzseitenwände im Falle von PMMA zu einer Verzahnung und damit beim Prägen zum Abreißen der Strukturen führt. Untermauert wird diese Vermutung dadurch, dass die Polycarbonatstrukturen in der Regel überzogen sind, aber noch nicht abgerissen. Insofern ist es zwingend notwendig, die Seitenwandqualität der Formeinsätze zu verbessern. Gegebenenfalls muss auch über den Einsatz von Trennmitteln nachgedacht werden, um die Haftkraft zwischen Polymer und Seitenwand zu vermindern.

Die optische Analyse der Strukturen zeigt, dass diese Dämpfungen im Bereich von 5 dB/mm aufweisen, wobei anzunehmen ist, dass mindestens 1 dB auf Materialdämpfung zurückzuführen ist. Der Rest ist auf Unzulänglichkeiten der Wellenleiterstruktur zurückzuführen, wie größere Rauigkeit, Einkerbungen aufgrund eines Schreibfehlers bei der Herstellung der Masken u.s.w. Darüber hinaus kann aufgrund der Ergebnisse nicht gesagt werden, ob es sich wirklich um einen zweischichtigen Wellenleiter handelt oder ob nicht die Polycarbonatfolie während des Prägeprozesses gerissen ist und damit nicht in den Wellenleitergraben gedrückt wurde. Materialanalysen untermauern dies Vermutung. Insofern ist davon auszugehen, dass der im Rahmen dieser Arbeit erzielte Stand der Prägetechnik nicht zu einem optimierten Ergebnis hinsichtlich der Wellenleiter und deren Qualität geführt hat. Dieser Prozessschritt birgt somit noch ein deutliches Optimierungspotential. Möglicherweise ist es auch notwendig, auf eine andere Materialkombination überzugehen, die einen größeren Viskositätsunterschied als PC/PMMA bei der Prägetemperatur aufweist.

Eine Neuauswahl sollte auch unter dem Gesichtspunkt einer verminderten Materialdämpfung erfolgen.

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit keine qualitativ hochwertigen Wellenleiterstrukturen hergestellt werden konnten, wurden mit der Lösung der Probleme bei der Maskenherstellung und mit der Erarbeitung der Unzulänglichkeiten bei der Formeinsatzherstellung die Voraussetzungen geschaffen, in folgenden Arbeiten verbesserte Ergebnisse zu erzielen. Insbesondere die Herstellung von Formeinsätzen auf der Basis von SU8 erscheint hierbei attraktiv. Weitere Arbeiten müssen sich sicherlich auf die Optimierung des Prägeprozesses konzentrieren und Lösungen für die im Rahmen dieser Arbeit aufgetretenen Probleme erarbeiten. Da dies möglich erscheint, sollte das Potential, welches das im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Konzept zur Herstellung monomodiger Wellenleiter mit integrierten Faserführungsstrukturen zur passiven Faserankopplung für Anwendungen in der Nachrichtentechnik birgt, auch erschlossen werden können.

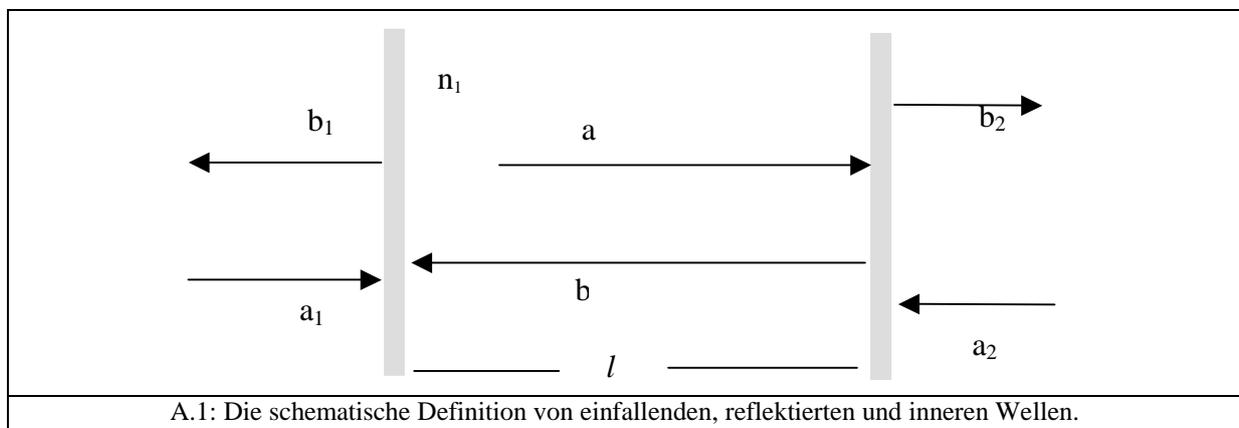
Literaturverzeichnis

- [1] C. Baack and C. Walf, Photonics in Future Telecommunications, Proceedings of the IEEE 81, S. 1624-1632, 1993
- [2] L. Müller, Polymere für in Abformtechnik hergestellte integriert-optische Lichtleiter, Fortschritt-Berichte. VDI-Verlag GmbH, 2000
- [3] N.N., New Roads to the Future. Research and Technology Darmstadt: Detusche Telekom, 1997
- [4] H. Hultsch, Optische Telekommunikationssysteme, Damm-Verlag Gelsenkirchen, 1996
- [5] R. Heinsteins, Communication Technology: An Overview, mst news 1, S. 4-5, 1998
- [6] R. Kersten, L. Roß, Integrierte Optik, Der Mikroelektronik auf den Fersen, Bild der Wissenschaft, 1989
- [7] E. Penning, G.D. Khoe, M. K. Smit, and T. Staring, Integrated-Optic Versus Microoptic Devices for Fiber-Optic Telecommunication Systems: A Comparison, IEEE Journal, Selected Topics in Quantum Electronics QE-2, S. 151-164, 1996
- [8] A. Müller, J. Götttert, J. Mohr, Aufbau hybrider mikrooptischer Funktionsmodule für die optische Nachrichtentechnik mit dem LIGA-Verfahren, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-5786, Mai 1996
- [9] Rogner A, Neyer A: Methode for Manufacturing Devices for Optical Fiber Networks and Devices Manufactured Thereby: Patent Nr. US 27984, 3, 1993
- [10] P. Ziegler, Aufbau von optisch-elektrischen Funktionsmodulen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens für die optische Übertragungstechnik, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-6344, 1999
- [11] H. Celtikci, Herstellung von 3-dimensionalen Strukturen mittels Resistsystem EPON SU-8, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Fachhochschule Reutlingen, Diplomarbeit, 2001
- [12] W. Menz, J. Mohr, Mikrosystemtechnik für Ingenieure, 2, erweiterte Auflage, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997
- [13] J. Mohr, LIGA - A Technology for Fabrication Microstructures and Microsystems, Sensors and Materials, Vol. 10, S. 363-373, 1998
- [14] J. Göttlicher, M. Hagelstein, Synchrotron Radiation Facility for Microfabrication and Analytical Services (Beamline Book), ANKA, Forschungszentrum Karlsruhe, 2001
- [15] S. Achenbach, Optimierung der Prozessbedingungen zur Herstellung von Mikrostrukturen durch ultratiefe Röntgenlithographie (UDXRL), Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, FZKA-6576, 2000
- [16] A. Müller, J. Götttert, J. Mohr, Aufbau hybrider mikrooptischer Funktionsmodule für die optische Nachrichtentechnik mit dem LiGA-Verfahren, Wissenschaftlicher Bericht Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-5786, 1996
- [17] B. Anderer, W. Ehrfeld, J. Mohr, Grundlagen für die Röntgentiefenlithographische Herstellung eines planaren Wellenlängen-Demultiplexers mit selbstfokussierenden Reflexionsbeugungsgitter, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, FZKA-4702, 1990
- [18] E. Resnikova, V. Nasmov, J. Mohr, Deep X-Ray Lithography Characteristics of SU8 Photo Resist. Zur Veröffentlichung eingereicht in Nucl Ins Meth Res B.
- [19] J. Mohr, Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, KfK-4414, 1988
- [20] V. Ghica, W. Glashauser, Siemens AG, Verfahren für die spannungsrisssfreie Entwicklung von bestrahlten Polymethylmethacrylat-Schichten, Deutsche Offenlegungsschrift 30 39 110, 1982
- [21] R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, S. Helfert, Numerical Techniques for Modeling Guided-Wave Photonic Devices, IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics. Vol 6. No. 1. January / February 2000.
- [22] BeamPROP™ Handbuch, Version 4.0, 2002, Rsoft, Inc. Research Software, 200

- Executive Blvd. Ossining, NY 10562, 2002
- [23] R. Scarmozzino and R. M. Osgood, Comparison of Finite Difference and Fourier-Transform Solutions of Parabolic Wave Equation with Emphasis on Integrated Optics Applications, *J. Opt. Soc. Amer. A*, Vol **8**, S. 724, 1991
- [24] A. Bamberger, F. Coron, J.-M. Ghidaglia, An Analysis of the B.P.M. Approximation of the Helmholtz Equation in an Optical Fiber, Vol. **21**, No. 3, S. 405-424, 1987
- [25] G. Ronald Hadley, Multi Step Method for Wide-Angle Beam Propagation, *Optical Letters* 15, Vol. **17**, No. 24, 1992
- [26] G. R. Hadley, Wide-Angle Beam Propagation Using Pade Approximant Operators, *Optics Letters*, Vol. 17, S. 1426, 1992
- [27] W. P. Huang, C. L. XU, Simulation of Three-Dimensional Optical Wave Guides by a Full Vector Beam Propagation Method, *J. Quantum Electron*, vol. **29**, S. 2639, 1993
- [28] D. Yevick, A Guide to Electric Field Propagation Techniques for Guided-Wave Optics, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. **26**, S.185-197, 1994
- [29] R. Clauberg, P. von Allmen, Vectorial Beam-Propagation Method for Integrated Optics, *Electronics Letters*, Vol. **27**, S. 654, 1991
- [30] Y. Chul Chung, N. Dagli, An Assessment of Finite Difference Beam Propagation Method. *J. Quantum Electronics*, Vol. **26**, S. 1335-1339, 1990
- [31] G. Grau W. Freude, *Optische Nachrichtentechnik. Eine Einführung*, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin, 1991
- [32] Lucent Technologies, Product Manual, 1995
- [33] J. Bennett, L. Mattsson, *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America, 2nd edition, 1999
- [34] M. Frank, Firma RSoft, Persönliche Mitteilung, 2002
- [35] E. Resnikova, V. Nasmov, J. Mohr, Deep X-Ray Lithography Characteristics of SU8 Photo Resist. Zur Veröffentlichung eingereicht in *Nucl Ins Meth Res B*.
- [36] E. Resnikova, Persönliche Mitteilung1, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2002
- [37] E. Resnikova, Persönliche Mitteilung2, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2002
- [38] E. Resnikova, Persönliche Mitteilung3, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2002
- [39] www.fresneltech.com/graphs, siehe Anhang 4
- [40] www.goodfellow.com, siehe Anhang 5
- [41] H. K. Cammenga, W.F. Hemminger, *Methoden der thermischen Analyse*, Springer-Verlag, 1989
- [42] A. K. Ghatak, M. R. Shenoy, *Fiber Optics Through Experiments*, Indian Institute of Technology, Delhi, 1994
- [43] H. A. Haus, *Waves and Fields in Optoelectronics*, Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07623, 1984.
- [44] K. Schumacher, Design, Herstellung und Charakterisierung eines mikro-mechanischen Gyrometers auf der Basis der LIGA-Technik, Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, FZKA-6361, 1999
- [45] P. Meyer, Persönliche Mitteilung, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003
- [46] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, 2nd Edition, 1987

Bestimmung von Wellenleiterdämpfung nach Fabry-Perot-Interferometer-Methode

Im Prinzip besteht das Fabry-Perot-Interferometer aus zwei ebenen, parallelen, stark reflektierenden Flächen in einem gegenseitigen Abstand l . Dieser Abstand l ist normalerweise groß im Vergleich zu optischen Wellenlängen. Die in den Resonator eingekoppelten Wellen überlagern sich mit den Wellen (a , b in Abbildung A.1), die sich innerhalb des Resonators an seinen Endflächen reflektieren. Wenn der Phasenunterschied $2kl = m2\pi$ beträgt, entstehen stationäre Wellen ($k = 2\pi / \lambda$, λ : die Wellenlänge innerhalb des Resonators, m : eine ganze Zahl). Die resonanten Wellenlängen erfüllen dann die Gleichung $\lambda = 2l / m$ bzw. $f = mc / 2n_{eff}l$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit, n_{eff} der effektive Brechungsindex des Resonatormodus ist. Der Abstand zwischen nacheinander folgenden Maxima (oder Minima) des Fabry-Perot-Interferenz-Muster beträgt $\Delta f = c / 2n_{eff}l$. Abbildung A.1 zeigt die schematische Definition von einfallenden, reflektierten und inneren Wellen.



Für das Schema kann man eine Streu-Matrix S definieren, mit $b = Sa$ wobei:

- $a \equiv \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$, $b \equiv \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$, $S \equiv \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$ [1]

In diesem Fall ist

$$S = \frac{1}{1 - r_1 r_2 e^{-j\delta}} \begin{bmatrix} -(r_1 - r_2 e^{-j\delta}) & -t_1 t_2 e^{-j\delta/2} \\ -t_1 t_2 e^{-j\delta/2} & -(r_2 - r_1 e^{-j\delta}) \end{bmatrix} \dots\dots\dots[2]$$

- $\delta / 2 = \omega n_{eff} l / c = kl$ bei verlustfreien Materialien, $\omega = 2\pi f$.
 $\delta / 2 = \omega n_{eff} l / c = kl - j l \alpha / 2$ bei reellen Materialien wenn der Einfallswinkel null beträgt.
 α : Der Leistungsdämpfungskoeffizient in dem Material innerhalb des Resonators
- t_i sind die Amplitudentransmissionskoeffizienten der Resonatorendflächen, r_i sind die Amplitudenreflexionskoeffizienten der Resonatorendflächen. Für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Fall kann man die komplexen Anteile der Brechungsindices vernachlässigen. Es ergeben sich dann reelle Amplitudenreflexionskoeffizienten.

Aus Gleichung 1 und 2 erhält man $b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$. Wenn $a_2 = 0$ ergibt sich:

$$b_2 = \frac{-t_1 t_2 e^{-j\delta/2}}{1 - r_1 r_2 e^{-j\delta}} a_1 \dots\dots\dots[3]$$

Die Transmission des Resonators beträgt:

$$T = \frac{|b_2|^2}{|a_1|^2} = \frac{T_1 T_2 e^{-\alpha l}}{|1 - r_1 r_2 e^{-j2kl} e^{-\alpha l}|^2} \dots\dots\dots [4]$$

Wobei $T_i = t_i t_i^*$

$$T(\lambda) = \frac{T_1 T_2 e^{-\alpha l}}{1 + r_1^2 r_2^2 e^{-2l\alpha} - 2r_1 r_2 e^{-l\alpha} \cos 2kl} \dots\dots\dots [5]$$

T_{max} entspricht $\cos(2kl) = 1$ und T_{min} entspricht $\cos(2kl) = -1$

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{(1 + r_1 r_2 e^{-\alpha l})^2}{(1 - r_1 r_2 e^{-\alpha l})^2} = \eta \dots\dots\dots [6]$$

und damit beträgt der Leistungsdämpfungskoeffizient in dem Material innerhalb des Resonators

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln r_1 r_2 + \frac{1}{L} \ln \frac{\sqrt{\eta} + 1}{\sqrt{\eta} - 1} \dots\dots\dots [7]$$

Versuche zum Herstellung geeigneter Arbeitsmaske

AM-Nr	Bestrahlungsparameter	Entwicklungsparameter	Dokumentierte Verschrotungsgrund
01737	1,8 GeV ANKA, BA:419 mA min/cm	GG:100 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100% Ti-Folie ist bei der Bearbeitung gerissen
01775	1,6 GeV ELSA BA: 3700 mA min/cm	GG:100 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100% Mäanderförmige galvanisierte Strukturen
01817	1,6 GeV ELSA BA: 3700 mA min/cm	GG:120 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100% Wafer gebrochen
01868	1,3 GeV ANKA BA 6272 mA min/cm	GG:100 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
		GG:50 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
		GG:90 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
01882	1,3 GeV ANKA BA 6272 mA min/cm	GG:100 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
		GG:30 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
		GG:50 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100%
1946	1,3 GeV ANKA BA 6272 mA min/cm	GG:130 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100% Strukturen deformiert
1950	1,3 GeV ANKA BA 4,833 mA min/cm (Dicke des PMMA ist 40 µm)	GG:200 min } BDG: 20 min } H ₂ O: 10 min }	Schall 100% Ti-Folie nach dem erfolgreichen Abheben ohne äußere Einflüsse gerissen

BA: Bestrahlungsaufwand. Schall: Ultraschalleistung. GG,BDG: Entwicklersystem für bestrahltes PMMA

Parameter des Simulationsprogrammes

- Mögliche Einkopplungsfelder

Für die Lösung der Propagationsgleichungen mit dem Simulationsprogramm BeamPROP müssen die Brechzahlprofile $n(x,y,z)$ und das eingekoppelte Feld $\hat{E}(x, y, z = 0)$ bekannt sein.

Das Programm akzeptiert beliebige Brechzahlprofile, die durch die Eingabe entsprechender Gleichungen definiert werden können. Als ein Sonderfall kann auch ein Step-Index-Profil berücksichtigt werden.

Das Programm erlaubt die Einkopplung eines oder mehrerer möglicher Feldformen in einen entworfenen Wellenleiter. Diese Arten kann man wie folgt zusammenfassen [22]:

- ∅ File

Die Form und Stärke des Feldes ist als eine ASCII Datei bearbeitet und gespeichert.

- ∅ Computed Mode

Das Programm rechnet die Mode des Wellenleiters aus, dann koppelt diese Mode in den Wellenleiter ein

- ∅ Slab Mode oder Fiber Mode

Für zweidimensionale Wellenleiter koppelt das Programm eine Slab Mode ein. Für dreidimensionale Wellenleiter koppelt es eine Faser Mode (LP_{mn}) ein. Die genaue Eigenschaften dieser Moden sind einzustellen.

- ∅ Gaussian

Das Feld ist als $\exp(-2x^2/a^2) = \exp(x^2/w^2)$ definiert. w (der Strahlradius) kann man eingeben

- ∅ Rectangle

Die Form dieses Feld ist rechteckig, dessen Breite man eingeben kann

- ∅ Multi Mode

In diesem Fall ist das Feld eine Überlagerung aller Moden, die in den entworfenen Wellenleiter sich formen können. Die Modenleistung ist jeweils gleich. Die Modenphase ist aber zufällig.

- Erlaubte Wellenleiterformen

- ∅ Fiber

Die Form besteht aus einem elliptischen (od. Kreis-) Kern, der in ein einheitliches Material eingebettet ist.

- ∅ Channel

Wie bei Fiber, aber der Kern hat einen rechteckigen Querschnitt.

- ∅ Diffused

Diese Form bezieht sich auf Wellenleiter, die durch Diffusion in einem Substrat entstehen. Im Programm bestehen diese Wellenleiter aus einem Substrat, worin ein halb-elliptischer Wellenleiter sich durch Diffusion geformt hat. Die Gleichungen, die die Diffusion beschreiben sind im Handbuch angegeben [22]

- ∅ Rib/Ridge

Zwei Rechtecke definieren den Mantel und das Substrat. Dazwischen befindet sich ein Film von einer einstellbaren Dicke. Ein Teil dieses Films ist lokal dicker als entlang dem Rest der Struktur. Dieser Film definiert den Wellenleiter.

∅ Multilayer

Ist ein Rib/Ridge, wobei der Film aus mehreren Schichten verschiedenen Materialien bestehen kann.

• Monitortypen

∅ *File power*

Die Leistung oder die Phase einer in dem Lichtwellenleiter propagierenden Mode wird durch das Überlappungsintegral zwischen dem Feld an jeder transversalen Ebene in Ausbreitungsrichtung und ein mit ASCII-Datei beschriebenes Feld ermittelt.

∅ *Slab mode Phase/Fiber Mode Phase*

Die Leistung oder die Phase einer in dem Lichtwellenleiter propagierenden Mode wird durch das Überlappungsintegral zwischen dem Feld an jeder transversalen Ebene in der Ausbreitungsrichtung und der lokale Slab-Wellenleiter-Mode ermittelt

∅ *Gaußsche Power/ Phase*

Die Leistung oder die Phase einer in dem Lichtwellenleiter propagierenden Mode wird durch das Überlappungsintegral zwischen dem Feld an jeder transversalen Ebene in der Ausbreitungsrichtung und einer Gaußschen Mode ermittelt

∅ *Launch Power*

Die Leistung oder die Phase einer in dem Lichtwellenleiter propagierenden Mode wird durch das Überlappungsintegral zwischen dem Feld an jeder transversalen Ebene in der Ausbreitungsrichtung und dem in den Wellenleitern eingekoppelten Feld

∅ *WG power*

Das Leistungsintegral für das betrachtete Feld an jeder transversalen Ebene in Ausbreitungsrichtung wird über ein einstellbares Fenster ausgerechnet.

∅ *Total power*

Berechnet die gesamte Leistung für das betrachtete optische Feld an jeder transversalen Ebene in Ausbreitungsrichtung. Die Rechnung erfolgt über die gesamte transversale Ebene.

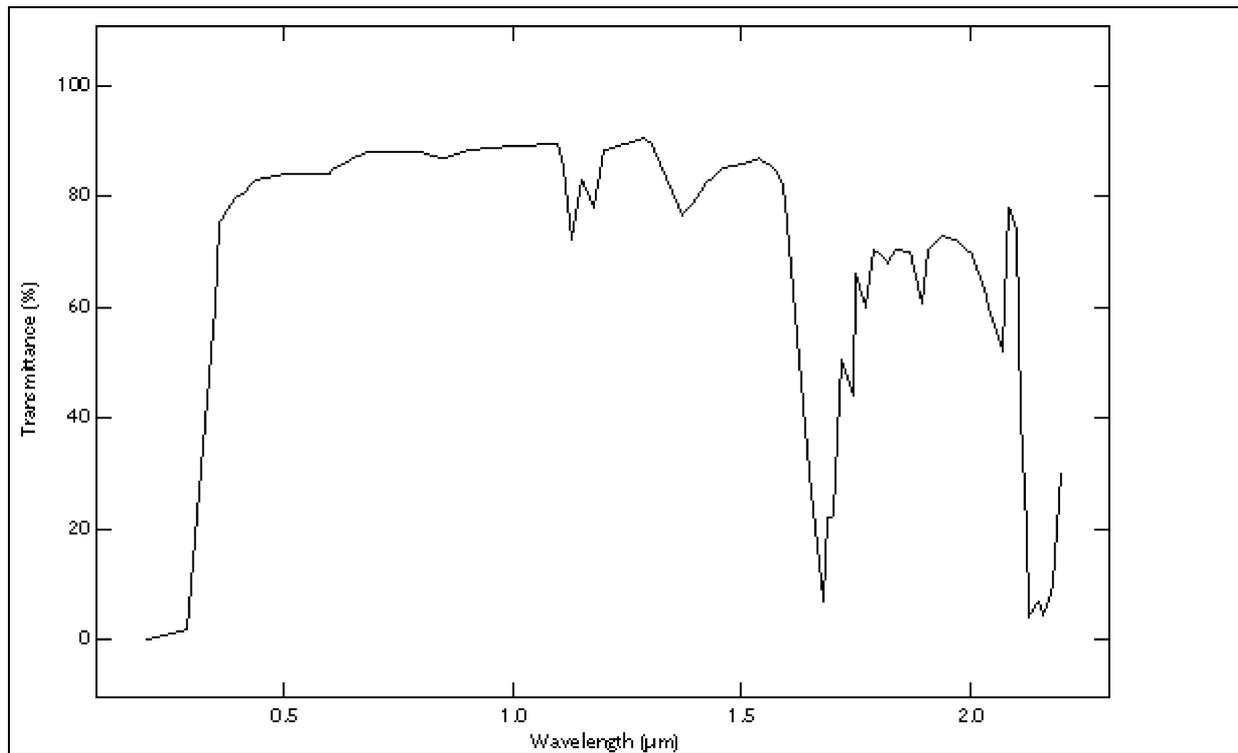
∅ *Effective index*

Berechnet die effektive Brechzahl der betrachteten Mode an jeder transversalen Ebene in Ausbreitungsrichtung des Lichtes.

∅ *Field 1/e width, Field 1/e height*

Berechnet die 1/e-Breite und Höhe der betrachteten Mode an jedem Gitterpunkt in Ausbreitungsrichtung des Lichtes

Transmission der Polycarbonate



A.4: Transmission der Polycarbonate in Bezug zu der eingekoppelten Wellenlänge (Dicke der getesteten Probe aus Polycarbonate beträgt 3,2 mm)

Properties of Polycarbonate Film

Thickness 0.003mm
 Grade - Makrofol KG® monoaxially oriented & crystallized

Thickness tolerance ±20%
 Size tolerance (linear dimension) <100mm ±1mm
 >=100mm +2% / -1%

General Description: General Description : A crystal clear and colorless, amorphous engineering thermoplastic notable for its high impact resistance (which remains high down to -40C). It has reasonably good temperature resistance, good dimensional stability and low creep but somewhat limited chemical resistance and is prone to environmental stress cracking. It also has poor fatigue and wear properties.

Applications include glazing, safety shields, lenses, casings and housings, light fittings, kitchenware (microwaveable), medical apparatus (sterilisable) and CD's (the discs).

Chemical Resistance

Acids - concentrated	Fair
Acids - dilute	Good
Alcohols	Good
Alkalis	Poor
Aromatic hydrocarbons	Poor
Greases and Oils	Good
Halogens	Poor
Ketones	Poor

Electrical Properties

Dielectric constant @ 1MHz	2.9
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)	15-67
Dissipation factor @ 1MHz	0.01
Surface resistivity (Ohm/sq)	10 ¹⁵
Volume resistivity (Ohm cm)	10 ¹⁴ -10 ¹⁶

Mechanical Properties

Abrasive resistance - ASTM D1044 (mg/1000 cycles)	10-15
Coefficient of friction	0.31
Compressive strength (MPa)	>80
Elongation at break (%)	100-150
Hardness - Rockwell	M70
Izod impact strength (J m ⁻¹)	600-850
Poisson's ratio	0.37
Tensile modulus (GPa)	2.3-2.4
Tensile strength (MPa)	55-75

Physical Properties

Abbe number	34.0
-------------	------

Anhang 5

Density (g cm ⁻³)	1.2
Flammability	V0-V2
Limiting oxygen index (%)	25-27
Refractive index	1.584-6
Resistance to Ultra-violet	Fair
Water absorption - equilibrium (%)	0.35
Water absorption - over 24 hours (%)	0.1

Thermal Properties

Coefficient of thermal expansion (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	66-70
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	140
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	128-138
Lower working temperature (C)	-135
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	~1200
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.19-0.22 @ 23C
Upper working temperature (C)	115-130

Properties Polycarbonate Film

Property		Value
Dielectric Strength @25µm thick	kV mm ⁻¹	350 @ 40µm
Dissipation Factor @1MHz		0.010
Extension to break - Longitudinal	%	~100 - grade N,DE1, ~40 - grade KG
Extension to break - Transverse	%	~100 - grade N,DE1, >100 - grade KG
Heat-sealing Temperature	C	204-221
Initial Tear Strength	g µm ⁻¹	12-29
Permeability to Carbon Dioxide @25C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	4.8
Permeability to Hydrogen @25C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	9.0
Permeability to Nitrogen @25C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	0.23
Permeability to Oxygen @25C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	1.05
Permeability to Water @25C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	1050
Tensile strength - Longitudinal	MPa	>80 - grade N,DE1, >220 - grade KG
Tensile strength - Transverse	MPa	>80

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. V. Saile für die Übernahme des Referats und Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Freude für die Übernahme des Korreferats danken. Besonders bedanke ich mich bei ihnen für regelmäßige Diskussionen und eine intensive Betreuung.

Außerdem gilt mein Dank an Herrn Dr. J. Mohr. für seine Übernahme der Betreuung, die Ermöglichung der selbständigen Durchführung der Arbeit und die Korrektur meiner schriftlichen Arbeit.

Weiterhin danke ich

- Frau Dr. E. Reznikova für die Unterstützung bei der optischen Lithographie
- Herrn Jakobs für die Herstellung der Röntgenzwischenmaske
- Herrn Biedermann für die Zusammenarbeit bei der Prägetechnik
- Herrn Dr. A. Last für zahlreiche wissenschaftliche Beratungen
- Herrn Dipl.-Ing C. Koos für die Zusammenarbeit bezüglich der Wellenleitercharakterisierung
- Herrn H. Hellriegel für die Vorbereitung von Proben
- Herrn H. Klein für die Herstellung der mit PMMA gegossenen Proben
- Herrn B. Röder für die Bestrahlung von Proben und Masken mit dem Elektronenstrahlschreiber
- Herrn R. Wittemann und Herrn J. Schuardt für die CAD-Arbeiten
- Frau B. Matthis für die Galvanikarbeiten
- Herrn P. Abaffy und Herrn G. Schüler für die REM Bilder

Schließlich möchte ich allen weiteren Mitarbeitern des IMT danken, die mir bei der Durchführung dieser Arbeit geholfen haben.