

PROZESSEVALUIERUNG ZUR HERSTELLUNG VON  
LICHTWELLENLEITERN AUF LEITERPLATTEN

**Masterarbeit**

**Lukas Andreas Mayr, BSc**

eingereicht am:

Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe  
Des Departments Kunststofftechnik der  
Montanuniversität Leoben

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Kern  
Lehrstuhl für Synthese von Spezial- und Funktionspolymeren  
Montanuniversität Leoben

und

Dipl.-Ing. Dr. Gregor Langer  
Austria Technologie & Systemtechnik AG



Die vorliegende Masterarbeit wurde als Teil des Projekts „Waveguide Structures in polymeric resins by optical patterning“ (Projekt-Nr. IV-1.01) der Polymer Competence Center Leoben GmbH. (PCCL) im Rahmen des Kompetenzzentrum Programmes COMET des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben (Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe) und der Austria Technologie und Systemtechnik AG (AT&S) erstellt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

## **Danksagung**

Ein herzliches Dankeschön gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Kern für die Ermöglichung sowie die fachliche und organisatorische Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit seitens der Montanuniversität Leoben und der Polymer Competence Center GmbH. (PCCL) Leoben.

Seitens der Austria Technologie & Systemtechnik AG möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Gregor Langer für die hervorragende fachliche Betreuung sowie bei Herrn Dr. Günther Weichsberger für die organisatorische Betreuung bedanken. Bei meinen Arbeitskollegen Herrn Dr. Alexander Kasper, Dr. Gerald Weidinger, Dipl.-Ing. Andreas Zluc und Dipl.-Ing. Martin Fischeneder für die tagtägliche Unterstützung und die vielen wertvollen Tipps während meiner Tätigkeit. Weiteres möchte ich mich bei dem ganzen Laborteam, besonders bei Frau Dipl.-Ing. Daniela Zechner, für die Unterstützung bei der Durchführung der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen bedanken.

Ein Dankeschön gilt weiteres Herrn Dipl.-Ing. Erich Preiner für die Durchführung der Laser-direct-Imaging Versuche.

Ein großes Dankeschön geht an Herrn Dr. Valentin Satzinger vom Joanneum Research Center in Weiz für die hilfreichen und wertvollen Tipps zur Handhabung des verwendeten Materials sowie bei Frau Dr. Nicole Galler für die Durchführung der Cut-Back Messungen am Institut für Physik der Karl-Franzens-Universität Graz und bei Dr. Christoph Wächter am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena für die Durchführung der RNF-Messungen.

Abschließend möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Matthias Edler für die Unterstützung am Mask Aligner sowie bei Frau Mag. Dr. Sonja Feldbacher für die Hilfe bei der Durchführung diverser Messungen und Lösung organisatorischer Probleme bedanken.

Lukas Andreas Mayr  
Leoben, am 23. Mai 2011

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Lukas Andreas Mayr

Leoben, am 23. Mai 2011

## Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden unterschiedliche Möglichkeiten zur Aufbringung und Strukturierung eines Silikon - basierenden Polymers untersucht und bezüglich der Herstellung eines optischen Lichtwellenleiters miteinander verglichen. Für die Aufbringung der notwendigen Schichten des CLAD/CORE/CLAD Systems wurde zunächst in einem ersten Schritt der Schablonendruck optimiert. Die anschließende Belichtung selbst erfolgte dabei sowohl über Standardverfahren der Halbleiterindustrie und Elektroindustrie, wie Film und Maskenbelichtung, sowie mittels UV-Laser oder der „Laser-direct-Imaging“ Methode. Über Versuchsreihen wurden die notwendigen Prozessparameter ermittelt und auf die bei der Partnerfirma verwendeten Substratmaterialien und Gerätschaften adaptiert. Die qualitative Begutachtung der Wellenleiterquerschnitte und Oberflächen erfolgte über Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie. Die Bestimmung der relevanten Kennzahlen für die optische Übertragung erfolgte für die Dämpfung mittels Cut-Back-Messungen und für den Brechungsindexunterschied zwischen dem CLAD und dem CORE Material über „refractive near field“ Messungen. Dabei konnten vor allem UV-Laser sowie Laser-direct-Imaging strukturierte Wellenleiter in der gewünschten rechteckigen Querschnittsform mit einer Kantenlänge von 50  $\mu\text{m}$ , den optischen Eigenschaften und durch die Kombination mit einer CNC-Einheit überzeugen. Maskenbelichtungen gestalteten sich insofern problematisch, da dadurch weder die gewünschte Querschnittsform, die fehlerfreie Oberflächenstruktur noch die notwendige Reproduzierbarkeit gegeben waren.

## **Abstract**

In this master thesis, different processing and patterning methods for the manufacture of optical waveguides based on silicone resins on printed circuit boards have been studied and compared.

First of all, the application, by using a semi automatic stencil printing machine, for the required CLAD / CORE / CLAD system was optimized. The exposure itself was carried out with standard exposure systems, which are used in semiconductor and electronics industry, such as mask exposure as well as UV-Laser exposure and the “Laser-direct-Imaging” method.

Important process parameters related to heat treatment and UV intensity have been adapted to the laboratory equipment and substrate materials, which are applied by the company partner.

The assessment of the cross-section and the waveguide surface structure was performed by using light microscopy and scanning electron microscopy (SEM). To appoint the key figures, which are important for the optical performance, optical loss measurements (“cut-back”) and refractive index measurements (“refractive near field”) were carried out.

Especially UV-Laser and “Laser-direct-Imaging” structured waveguides showed a good performance regarding the desired rectangular cross-sectional shape with an edge length of 50 microns, good optical properties and a convenient handling in combination with a fully automated CNC-unit and the best reproducibility. In contrast, mask exposed waveguides suffered from non rectangular shape, surface defects at the sidewalls and poor reproducibility.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNG</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>THEORIETEIL</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Die Leiterplatte – Printed circuit board (PCB)</b>	<b>3</b>
<b>3.2</b>	<b>Lichtwellenleiter</b>	<b>4</b>
3.2.1	Aufbau und Funktion	4
<b>3.3</b>	<b>Grundlagen der Optik</b>	<b>5</b>
3.3.1	Totalreflexion und Brechung	5
3.3.2	Numerische Apertur	6
3.3.3	Optische Dämpfung	7
3.3.4	Moden	8
3.3.5	Dispersion	9
3.3.6	Streuungsverluste durch Materialabsorption	9
3.3.7	Weitere Streuverluste im Material	10
3.3.8	Strahlungsverluste durch Makrokrümmungen	10
3.3.9	Strahlungsverluste durch Mikrokrümmungen	10
<b>3.4</b>	<b>Vor- / Nachteile optischer Datenübertragung<sup>1</sup></b>	<b>11</b>
<b>3.5</b>	<b>Polymere als Lichtwellenleiter</b>	<b>12</b>
<b>3.6</b>	<b>Anforderungsprofil an die Lichtwellenleiter</b>	<b>13</b>
<b>3.7</b>	<b>Lithographie / Photolithographie</b>	<b>14</b>
3.7.1	Historischer Hintergrund	14
3.7.2	Grundlagen der Photolithographie	14
3.7.3	Der „softbake“ Prozess (SB)	16
3.7.4	Belichtung („exposure“) (UV)	16
3.7.5	„Post exposure bake“ (PEB)	16

3.7.6	Entwicklung („development“) (DEV) .....	17
3.7.7	Finaler Schritt „final cure“ (FC) .....	17
3.7.8	Beispiel für Negativ-Resists auf Basis der Photo-Acid Chemie.....	17
<b>3.8</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Querschnittsgeometrie .....</b>	<b>18</b>
3.8.1	Unterbeltung / Überbelichtung / Streuung .....	18
3.8.2	Säureverlust.....	18
<b>3.9</b>	<b>Grundlagen der Photophysik .....</b>	<b>20</b>
3.9.1	Absorption und Energielevels.....	20
3.9.2	Photochemische Prozesse und Photopolymerisation .....	22
3.9.3	Photoacid Generators .....	22
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTELLER ABSCHNITT .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>LightLink™ XP - 5202A / LightLink™ XP – 6701A .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>LightLink™ XP – 3636 Developer.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Trägersubstrat.....</b>	<b>25</b>
<b>4.4</b>	<b>Trägersubstrat Vorbehandlung .....</b>	<b>26</b>
<b>4.5</b>	<b>Aufbringungsmethode - Rakeln.....</b>	<b>26</b>
<b>4.6</b>	<b>Schichtaufbau und Härungsparameter.....</b>	<b>27</b>
<b>4.7</b>	<b>Belichtungsmethoden .....</b>	<b>29</b>
4.7.1	Standard-Film und High-Resolution-Film.....	29
4.7.2	LDI („Laser-direct-Imaging“) Verfahren .....	30
4.7.3	Laser Belichtung.....	31
<b>4.8</b>	<b>Prüfmethoden .....</b>	<b>32</b>
4.8.1	Profilometer.....	32
4.8.2	Schliff / Lichtmikroskopie.....	32
4.8.3	Rasterelektronenmikroskop (REM) .....	32
4.8.4	Gitterschnitt (Cross-Cut-Test).....	34

4.8.5	Brechungsindexbestimmung mittels RNF („refractive near field“) Methode	34
4.8.6	Cutback - Rückschneideverfahren .....	36
4.8.7	Infrarotspektroskopie („FT-IR“) .....	37
4.8.8	Kernspinresonanzspektroskopie („FT-NMR“).....	37
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Strukturaufklärung LightLink™ XP-5202A/XP-6701A .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>BOTTOM CLAD Schicht.....</b>	<b>43</b>
5.2.1	Härtungsparameter FR4 .....	43
5.2.2	Härtungsparameter für PI/Kupfer .....	48
5.2.3	Gitterschnitt an Polyimid/Kupfer.....	49
<b>5.3</b>	<b>CORE Schicht .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Einfluss der CLAD Belichtungsintensität auf den CORE .....	50
5.3.2	Standard-Film Belichtung.....	51
5.3.3	High-Resolution-Film Belichtung .....	55
5.3.4	LDI („Laser-direct-Imaging“) .....	57
5.3.5	Laser Belichtung.....	62
<b>5.4</b>	<b>Optischer Verlust („Cut-Back“).....</b>	<b>66</b>
<b>5.5</b>	<b>Brechungsindex „refractive near field“.....</b>	<b>72</b>
<b>5.6</b>	<b>TOP CLAD Schicht .....</b>	<b>76</b>
<b>5.7</b>	<b>Optimierte Parameter des Schablonendrucks .....</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>77</b>

## 1 Einleitung<sup>1 2 3 4</sup>

Der Bedarf nach immer größeren zu übertragenden Datenmengen innerhalb von Rechner – und Telekommunikationssystemen steigt von Jahr zu Jahr an. Derzeitige Systeme in der Leiterplattentechnik basieren auf Kupferbahnen. Diese leiden jedoch an hohen Verlusten und Impulsverzerrungen hervorgerufen durch Dispersion, elektromagnetische Strahlung und der Limitierung der Bandbreite auf max. 40 Gbit/s. Optische Verbindungstechniken zur Herstellung von hochbitratigen Kurzstreckenverbindungen stellen eine sinnvolle Alternative zu hochfrequenten elektrischen Verbindungen dar.[1-3]

Für die Herstellung von optischen Wellenleitern stehen unterschiedlichste Konzepte zur Verfügung. Diese reichen von dreischichtigen CLAD – CORE – CLAD Systemen bis hin zur Strukturierung mittels TPA (Two – Photon – Absorption) basierend auf Kunststoffen wie Epoxid – oder Silikonverbindungen. Optische Übertragungssysteme zeichnen sich durch hohe Bandbreiten, geringe Verluste, relativ günstiger Preis, niedriger Energieverbrauch, eine große Vielfalt an Verarbeitungsmethoden und Strukturierungsmethoden und Verzicht auf elektrische Isolation aus. [2]

Bereits heutzutage finden diese Technologien erste Anwendungen im Bereich der optischen Verbindungstechnik für Steckkarten oder in Form von optischen Kabeln. IBM prognostiziert für das Jahr 2015 die Einführung optischer Wellenleiter innerhalb und auf der Leiterplatte bis hin zu optischen Prozessorenausgänge für das Jahr 2020. [4]

---

<sup>1</sup> Bauer, J., „Leiterplatten mit innenliegender Optolage - Wellenleitertechnologie und Koppelkonzept“, 4. ITG-Workshop „Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik“, Berlin, 2005

<sup>2</sup> Selviah, D.R., „Integrated Optical and Electronic Interconnect Printed Circuit Board Manufacturing“, The Journal of the Institute of Circuit Technology, Vol. 1No. 3, 2008

<sup>3</sup> Schröder, H., et al., „Temperaturstabile Wellenleiter und optische Kopplung für elektro-optische Leiterplatten“, 3. DVS/GMM-Fachtagung, 2006

<sup>4</sup> Offrein, B.J., „Optical Interconnects for computing applications“, Swisslasernet Workshop, 2010

## 2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Optimierung unterschiedlichster Prozesse zur Herstellung eines Lichtwellenleiters basierend auf einem vorgegeben optischen Kunststoff. Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Polysiloxane, vertrieben unter dem Markennamen LightLink™ (LightLink™ XP-5202A und LightLink™ XP-6701A) der Firma Rohm & Haas Electronic Materials / Dow Chemicals. In einem ersten Schritt soll der Hauptverarbeitungsprozess, der Schablonendruck, optimiert werden. Es gilt, möglichst homogene Schichten mit konstanten Schichtstärken und frei von Luftblasen auf typische Leiterplattenmaterialien (FR4 und Polyimid), zu drucken. In Folge dessen sollen die Aushärteparameter und Belichtungsintensitäten (UV) des Herstellers optimiert bzw. an die bei Austria Technologie & Systemtechnik Aktiengesellschaft („AT&S“) verwendete Gerätschaften und Substratmaterialien adaptiert werden. Weiteres soll der Einfluss der Substratvorbehandlung auf die Schicht selbst bzw. auf die Wellenleiterstruktur untersucht werden.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden unterschiedliche Belichtungsmethoden angewendet, wie Film – oder Maskenbelichtung, aber auch Belichtungen mittels UV-Laser oder „Laser-direct-Imaging“, um die geforderten Wellenleiterstrukturen zu erhalten. Für jede dieser Methoden sollen die optimalen Parameter gefunden und die Ergebnisse mitsamt den jeweiligen Vorteilen und Nachteilen der Methode miteinander verglichen werden.

Ein besonderes Augenmerk soll auch auf mögliche Prozessgrenzen gelegt werden. Inwieweit können die Wellenleiterquerschnitte minimiert werden? Wie weit können die Prozessschritte in ihrer Dauer verkürzt werden, um dennoch ausreichend gute Ergebnisse zu erzielen?

Im dritten Teil Arbeit sollen die zuvor hergestellten Wellenleiter wieder eingebettet werden. Hierbei gilt es, diese vollständig und ohne mögliche Lufteinschlüsse zwischen den einzelnen Wellenleiter, einzubetten.

Zuletzt werden die Wellenleiter noch bezüglich ihrer optischen Eigenschaften in Form von Verlustmessungen und Bestimmung des Brechungsindex untersucht.

### 3 Theorieteil

#### 3.1 Die Leiterplatte – Printed circuit board (PCB)<sup>5 6 7</sup>

Die Leiterplatte oder auch Printed Circuit Board (PCB) dient als Trägermedium von elektronischen Bauteilen. Diese werden darauf elektrisch miteinander verbunden und mechanisch befestigt. In ihrer Grundform, früher noch als gedruckte Schaltung bezeichnet, ist diese bereits beinahe 100 Jahre alt. Heutzutage werden Leiterplatten nach unterschiedlichsten Techniken hergestellt, wobei eine Reihe von Grundverfahren miteinander kombiniert werden, um die notwendigen Anforderungen der elektrischen Schaltungstechnik nach höherer Funktionalität bei gleichzeitiger Miniaturisierung zu erfüllen.

Ausgangspunkt für die Herstellung einer Leiterplatte sind in den meisten Fällen Epoxidharz verstärkte Glasfasermatten (FR4), die je nach Verwendungszweck sowohl ein- als auch beidseitig mit Kupfer beschichtet sind. Die Erstellung der notwendigen elektrisch leitfähigen Bahnen aus der vollflächigen Kupferschicht kann nun über zwei Prozesse erfolgen. Das unbenötigte Kupfer kann entweder mechanisch oder über eine Säureätzung entfernt werden, wobei der zweite Prozess für die Massenfertigung von größerer Bedeutung ist. Dabei gilt es die zu erhalten Kupferstellen durch eine Polymerbeschichtung („photoresist“) zu schützen. Der „photoresist“ wird anschließend belichtet, entwickelt und geätzt, sodass schlussendlich nur mehr die benötigte Kupferbahn vorhanden ist.

---

<sup>5</sup> Fischer, H., et al., „Werkstoffe in der Elektrotechnik“, Carl Hanser Verlag, München, 2007

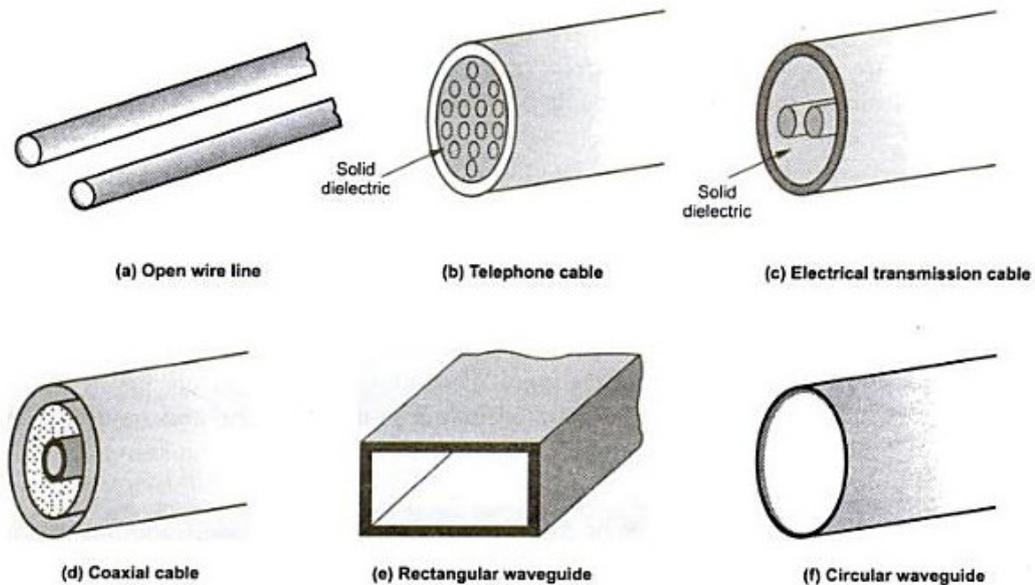
<sup>6</sup> Herrmann, G., „Handbuch der Leiterplattentechnik“, Leuze Verlag, Saulgau/Württ., 1982

<sup>7</sup> Mitzner, K., „Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor“, Newnes, Burlington, USA, 2009

## 3.2 Lichtwellenleiter

### 3.2.1 Aufbau und Funktion<sup>8 9</sup>

Durch die rasante Entwicklung in der Informationstechnik ist zu den klassischen Übertragungstechniken, wie Kupferleitungen oder Hohlleiter, die optische Signalübertragung mit Hilfe von Lichtleitfasern hinzugekommen. Diese ermöglichen wie Hohlleiter eine dämpfungsarme Ausbreitung optischer Wellentypen. Lichtwellenleiter bestehen üblicherweise aus Glas, können aber auch auf Basis von geeignet präparierten strahlungsdurchlässigen Kunststoffen bestehen. Eine Übersicht der aktuellen Übertragungsmöglichkeiten sowohl für elektrische als auch optische Signale ist in Abbildung 1 dargestellt. [8]



**Abbildung 1: Übertragungsmöglichkeiten mittels elektrischen und optischen Signalen [9]**

<sup>8</sup> Bergmann, K., „Elektrische Messtechnik – Elektrische und elektronische Verfahren, Anlagen und Systeme“, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2000

<sup>9</sup> Bakshi, U.A., Bakshi, A.V., „Transmission Lines and Waveguides“, Technical Publications Pune, Pune, Indien, 2009

### 3.3 Grundlagen der Optik<sup>10 11 12 13 14</sup>

#### 3.3.1 Totalreflexion und Brechung

Bei der Ausbreitung von Licht innerhalb eines optischen Mediums, z.B. einem Polymer, kommt es zur Abnahme der Lichtgeschwindigkeit  $c_m$ . Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_v$  und der Lichtgeschwindigkeit im Material  $c_m$  definiert die Brechungszahl  $n$ :

$$n = \frac{c_v}{c_m}$$

#### Formel 1

Fällt wie in Abbildung 1 ein Lichtstrahl unter einem Winkel  $\Theta$  vom optisch dünneren in das optische dichtere Medium ein, wird ein Teil zum Einfallslot unter dem Winkel  $\alpha$  hin gebrochen. Ein weiterer Teil wird unter dem Winkel  $\Theta'$  reflektiert. Beschrieben wird dies durch das Snelliussche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \Theta}{\sin \alpha} = \frac{n_2}{n_1}$$

#### Formel 2

Betrachtet man den umgekehrten Strahlengang, kann der Winkel  $\alpha_T$  dahingehend vergrößert werden, bis der Grenzwinkel der Totalreflexion erreicht ist. [10]

<sup>10</sup> Ziemann, O., et al., „POF-Handbuch – Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme“, Springer Verlag, Berlin, 2007

<sup>11</sup> Jenny, R., „Grundlagen zur Faseroptik“, Volpi AG, Schlieren, Schweiz, 2004

<sup>12</sup> Jahns, J., „Photonik: Grundlagen, Komponenten und Systeme“, Oldenbourg Verlag, Oldenbourg, 2001

<sup>13</sup> Brückner, V., „Optische Nachrichtentechnik – Grundlagen und Anwendungen“, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003

<sup>14</sup> Weidenfeller, H., „Grundlagen der Kommunikationstechnik“, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2002

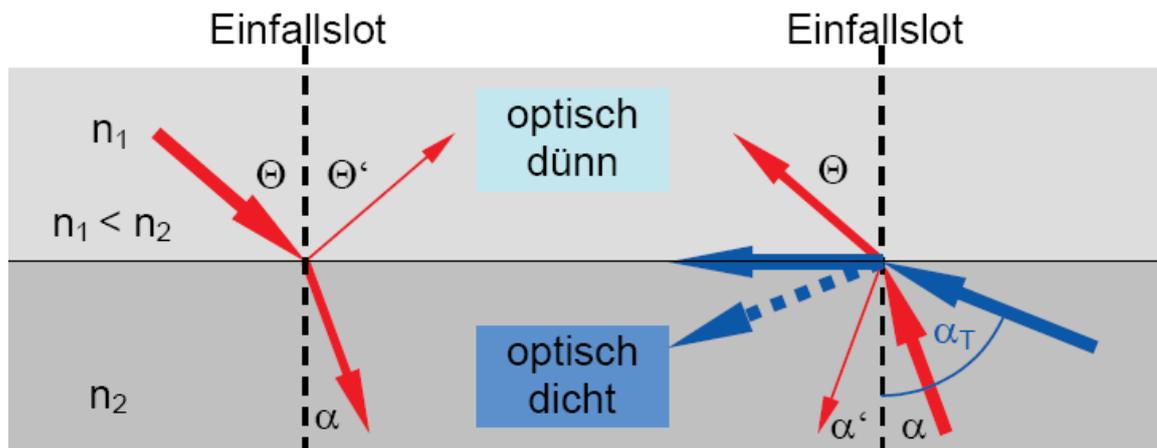


Abbildung 1: Einfallswinkel [10]

### 3.3.2 Numerische Apertur

Die numerische Apertur ist gemäß Formel 3 als Sinus des maximalen Einstrahlwinkels oder Akzeptanzwinkels  $\Theta_{\max}$  definiert. Der doppelte Einstrahlwinkel entspricht dem Öffnungswinkel.

$$A_N = \sin \Theta_{\max} = n_K \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta}$$

Formel 3

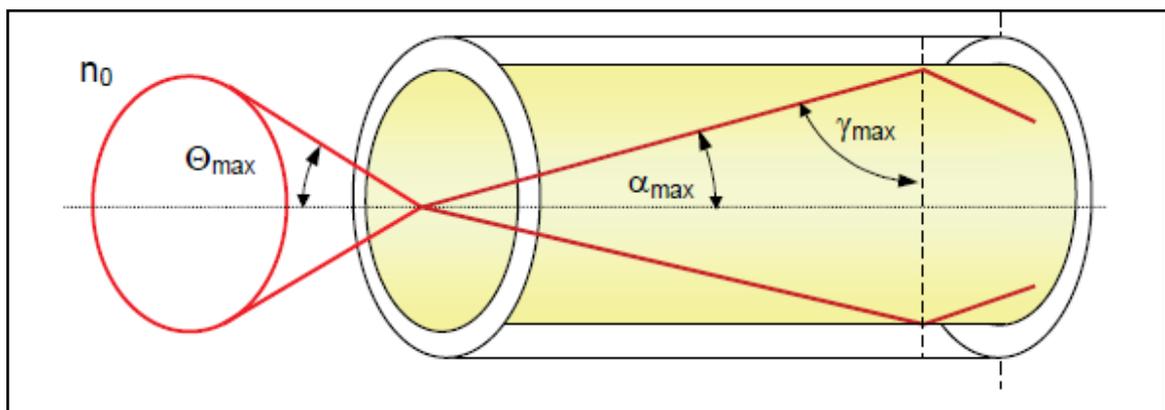


Abbildung 2: Akzeptanzwinkel [10]

Die Größe der numerischen Apertur ist ausschließlich von der Brechzahldifferenz zwischen Kern und Mantel abhängig. Polymerfasern weisen im Vergleich zu anderen Fasern, z.B. Glas, die größte numerische

Apertur und den größten Kerndurchmesser auf. Dies ist wohl der wichtigste Vorteil von Polymerfasern gegenüber Glasfasern. [10]

Die Öffnungswinkel und Kerndurchmesser von Glas- und Polymerfasern sind in Abbildung 3 dargestellt. Die erste der beiden Zahlen entspricht dabei dem Kerndurchmesser in  $\mu\text{m}$ , die Zweite dem Öffnungswinkel. Multimodale Polymerfasern haben dabei in Bezug auf Monomodalfasern einen viel größeren Querschnitt und somit einen größeren Öffnungswinkel. Dieser Unterschied erleichtert vor allem die Ankoppelung dieser an die jeweiligen Dioden.

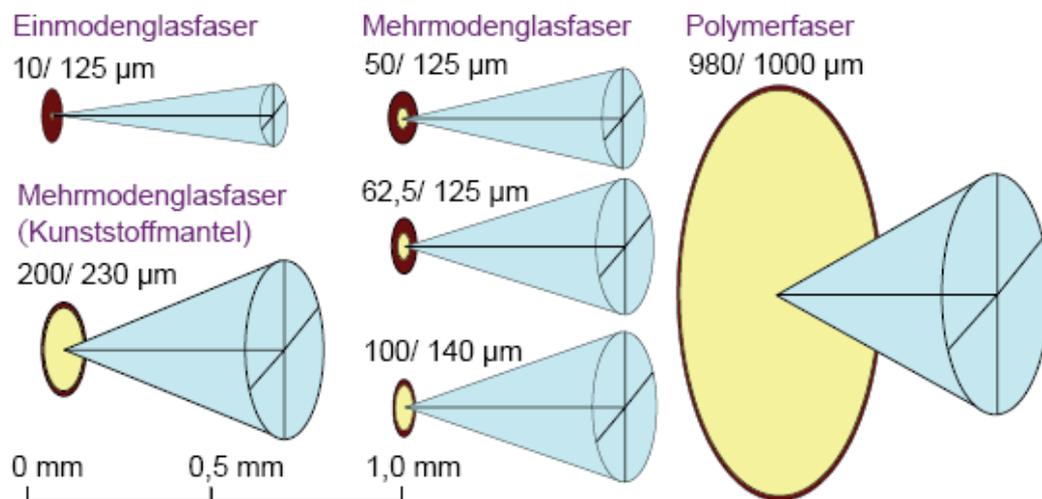


Abbildung 3: Öffnungswinkel und Kerndurchmesser [10]

### 3.3.3 Optische Dämpfung

Eine weitere wesentliche Eigenschaft, welches das Licht beim Durchgang durch eine optische Faser erfährt, ist die sogenannte optische Dämpfung. [10]

Dabei kommt es in Folge dieser zu einer Abnahme der optischen Eingangsleistung  $P_0$  über die Faserlänge  $L$ . Für die optische Ausgangsleistung  $P_L$  gilt:

$$P_L = P_0 \times e^{-\alpha' \times L}$$

Formel 4

$\alpha'$  entspricht dabei dem Dämpfungsbelag in  $\text{km}^{-1}$  [10]. Dabei ergibt sich für den Dämpfungsbelag  $\alpha$  in dB/km:

$$\alpha = \frac{10}{L} \times \log \frac{P_0}{P_L} = 4,343 \times \alpha'$$

Formel 5

### 3.3.4 Moden

Ein typisches Model für die Lichtstrahlausbreitung im Faserkern ist die zick-zack-förmige Strahlenausbreitung. Dabei wird jede Zick-Zack-Konfiguration durch ein Winkelpaar ( $\alpha$  und  $\beta$ ) beschrieben und als Mode bezeichnet. Für die Existenz eines Modes fordert die Wellentheorie, dass sich zwei aufeinanderfolgende in gleicher Richtung ausbreitende Strahlen konstruktiv überlagern.

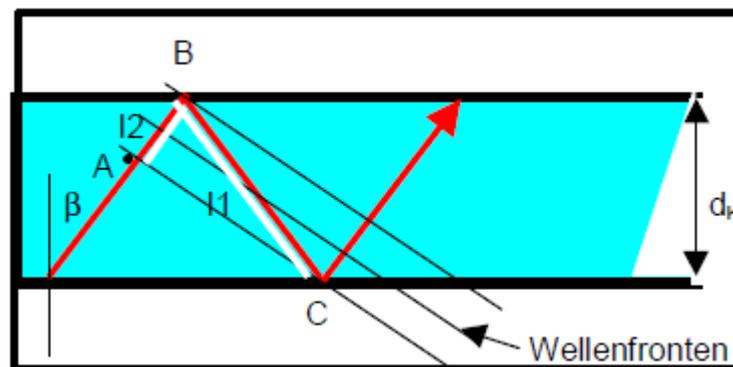


Abbildung 4:Wellenausbreitung und Moden [11]

Die Anzahl an Moden in einem optischen Leiter wird durch die Strukturkonstante  $V$  bestimmt. Diese ist abhängig von dem Kernradius  $a$ , der Lichtwellenlänge  $\lambda$  und der numerischen Apertur  $A_N$ :

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot A_N$$

Formel 6

Ist  $V$  kleiner als 2,405 handelt es sich um eine Single-Mode-Faser. Andernfalls um eine Multi-Mode-Faser. Die Anzahl der Moden im Falle einer Stufen-Index-Profil Faser (gleicher Brechungsindex über den gesamten Kern) wird näherungsweise beschreiben durch Formel 7. [11]

$$N \approx v^2/2$$

Formel 7

### 3.3.5 Dispersion

Das Laufzeitverhalten eines in einem Lichtleiter eingekoppelten Impulses hängt von zweierlei Faktoren ab. Einerseits vom Lichtwellenleitertyp und andererseits von den verwendeten Materialien des Kerns und Mantels. Laufzeitunterschiede führen zu einer Begrenzung der Bandbreite. Dieser Effekt wird als Dispersion bezeichnet. Man unterscheidet dabei zwischen:

- Modendispersion
- Chromatischer Dispersion (Material - und Wellenleiterdispersion)

Die Modendispersion entsteht hauptsächlich aufgrund der unterschiedlichen optischen Wegstrecken bei Multi-Mode-Fasern mit Stufen-Index-Profil.

Infolge der wellenlängenabhängigen Brechungszahlen des Kerns und Mantels durchlaufen Strahlen sie mit verschiedenen Wellenlängen. Dies führt zu einer wellenlängenabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit und letzt endlich bei einer spektralen Breite von  $\Delta\lambda$  zu einem zu Laufzeitunterschieden  $\Delta t$ .

Im Falle der chromatischen Wellenleiterdispersion bewirkt die wellenlängenabhängige Materialkonfiguration des Lichtwellenleiters die spektral abhängigen Laufzeitunterschiede. [11]

### 3.3.6 Streuverluste durch Materialabsorption

Absorptionsverluste können auf Verunreinigungen innerhalb des optischen Leitermaterials zurückgeführt werden. Optische Materialien, sowie Glas als auch Kunststoffe, weisen Absorptionsbänder bei bestimmten Wellenlängen auf. Diese liegen für Glas bei 1380 nm, 1240 nm, 950 nm und bei 720 nm. Dazwischen liegen Absorptionsbänder mit geringer Dämpfung bei 850 nm, 1300 nm und 1550 nm. Dies sind jene Bereiche, die sich die optische Datenübertragung zu Nutze macht. [11]

### 3.3.7 Weitere Streuungsverluste im Material

Weitere Verluste treten in Form von Streuungsverlusten auf. Die wichtigsten Materialstreuungen sind:

**Rayleigh-Streuung:** Änderung des Brechungsindex durch örtliche Materialinhomogenitäten kleiner oder vergleichbar mit der der Wellenlänge des Lichtes. Dabei wird das Licht in alle Raumrichtungen gestreut und ist damit für die „Geradeausrichtung“ verloren.

**Mie-Streuung:** Vorwiegend durch Fehler an dem Übergang Kern zu Mantel. Die Größe der Defekte liegt im Bereich der Wellenlänge des Lichtes. [11]

### 3.3.8 Strahlungsverluste durch Makrokrümmungen

Licht breitet sich sowohl im Faserkern als auch im Fasermantel aus. Geringe Brechzahlunterschiede zwischen Kern und Mantel führen dazu, dass bis zu 20 % der Lichtleistung über den Fasermantel verbreitet werden. Durchläuft das Licht eine Krümmung, so geraten Felder innerhalb und außerhalb des Kerns außer Phase. Das führt dazu, dass der Mantel Licht nach außen abstrahlt und der Kern in den Mantel leckt. Diese sind umso größer je kleiner der Krümmungsradius ist. [11]

### 3.3.9 Strahlungsverluste durch Mikrokrümmungen

Bei Mikrokrümmungen handelt es sich um regellose Krümmungen der Faserachse in der Größenordnung von einigen Zehntel Mikrometern. Diese führen zu einer permanenten Umwandlung der geführten Strahlungsmoden. [11]

### 3.4 Vor- / Nachteile optischer Datenübertragung<sup>1 15 16</sup>

Die störungsfreie Übertragung großer Datenmengen innerhalb von Rechner- und Telekommunikationssystemen erfordert immer größere Bandbreiten. Um dies zu erreichen, stellen hochbitratige Kurzstreckenverbindungen in Form von optischen Übertragungstrecken eine sinnvolle Alternative zu den hochfrequenten elektrischen Verbindungen dar. [1]

Optische Wellenleiter sind insofern von Vorteil, wenn sie zum einen eine dementsprechend niedrige Dämpfung und die damit verbunden niedrigen Lichtverluste aufweisen und zugleich die Leistungsaufnahme der elektro-optischen Wandler geringer ausfällt als für die analoge elektrische Übertragung. Zugleich ermöglicht es die optische Übertragung, dem Drang der ständigen Miniaturisierung zu folgen, da bei dieser keine zusätzliche Abschirmung von Nöten ist. [15]

Trotz einer möglichen Datenübertragung von 10 Gbit/s und mehr weist dieses System auch einige Nachteile auf. So muss es etwa gelingen, die Ankopplung an die optischen Schnittstellen und Koppellemente zu meistern. Dies erfordert zum Teil eine Genauigkeit von ca. 5  $\mu\text{m}$ . Übliche mechanische Bearbeitungsmethoden wie Bohren oder Fräsen weisen eine Genauigkeit von ca. 20 – 50  $\mu\text{m}$  auf. Ähnliche Werte werden auch bei der Platzierung der elektro-optischen Verbindungen erreicht. [1]

Nichts desto trotz muss es aber auch gelingen diese optische Systeme mit den bekannten Herstellungstechnologien, Verfahren und Anlagen bei niedrigen Kosten herzustellen. [15]

---

<sup>15</sup> Frank, M., „Die optische Leiterplatte – Konturen in Sicht“, Productronic 4, pp. 2-4, 2005

<sup>16</sup> Rho, B.S., et al., „High-reliability flexible optical printed circuit board for opto-electric interconnections“, Optical Engineering, Volume 48, Issue 1, pp. 015401-015401-7, 2009

### 3.5 Polymere als Lichtwellenleiter<sup>17</sup>

Die Photolithographie, ob in Form von Maskenbelichtung oder Laser-direct-Writing, stellt heutzutage in der PCB Forschung die wohl populärste Form der Lichtwellenleiterherstellung dar. Einige der dafür verwendeten Polymere sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Materialübersicht für Lichtwellenleiter [17]**

Hersteller	Material	Thermische Stabilität °C	Optischer Verlust @ 850 nm dB/cm
Luvantix	Epoxid	> 250	0,04
KIST	Epoxid	220	0,36
NTT	Epoxid	>200	0,1
Zen Photonics	Acrylat	>250	0,05
IBM	Acrylat	>250	0,04
Daimler Chrysler	Unbekannt	>250	0,04
RPO	Siloxan	>250	0,1
Dow Corning	Siloxan	>200	0,06
Shiplely	Siloxan	>250	<0,1

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Siloxanen. Die Vorteile der Polysiloxane liegen wie in Tabelle 1 ersichtlich in der guten Temperaturbeständigkeit und der niedrigen optischen Verluste. Weiteres zeichnen sich Polysiloxane durch die vielseitige Verarbeitungsmöglichkeiten und relativ geringen Kosten aus.

<sup>17</sup> A. Neyer, *et al.*, "Electrical-Optical Circuit Board using Polysiloxane Optical Waveguide Layer" Electronic Components and Technology, 2005. ECTC 05. Proceedings, 2005

### 3.6 Anforderungsprofil an die Lichtwellenleiter<sup>18</sup>

Um den Anforderungen eines Lichtwellenleiters auf Basis von hochtransparenten Polymeren gerecht zu werden, müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Es genügt nicht nur die optischen Anforderungen zu erfüllen. Hohe Transparenz und geringe Dämpfungen sind die Grundvoraussetzung für Lichtwellenleiter mit Übertragungsraten von bis zu 10 Gbit/s. Vielmehr müssen diese im Laufe des PCB Herstellungsprozesses stabil gegenüber Feuchte und Temperaturen bis 230 °C für einige Sekunden sein. Die Marktanforderungen an Lichtwellenleiter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. [18]

**Tabelle 2: Marktanforderungen an Lichtwellenleiter [18]**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Marktanforderungen</b>
Photoreaktiv @ 365 nm	≤ 8µm Res @ 1:1 AR
CORE Brechungsindex (RI):	
850nm	1,45 – 1,55
1320nm	1,45 – 1,55
CORE/CLAD RI	≥0,02 (1,2%)
Loss (streak/slab):	
850nm	≤0,05 dB/cm
1320nm	≤0,1 dB/cm
CORE/CLAD loss (cutback):	
850nm	<0,1 dB/cm
1320nm	<0,1 dB/cm
Stabilität:	
Feuchte - Aufnahme	Stabil @ 85°C/85%
Löt-Temperatur	≤230°C für 20 Sekunden

<sup>18</sup> Moynihan, M. et al., „Hybrid Inorganic-Organic Aqueous Base Compatible Waveguide Materials for Optical Interconnect Applications“, Proc. SPIE, Vol. 5212, 50, 2003.

## 3.7 Lithographie / Photolithographie<sup>19 20 21 22 23</sup>

### 3.7.1 Historischer Hintergrund

Der Ursprung der Lithographie geht auf Joseph Nicéphore Niépce zurück. Im Jahre 1822 gelang es ihm einen Kupferstich des Kardinals *Georges d'Amboise* zu kopieren und zu fixieren. Dazu legte er dieses über eine mit Bitumen, gelöst in Lavendelöl, beschichtete Glasplatte und setzte es der Sonne aus. Nach ca. 2 bis 3 Stunden wurden die unbedeckten Flächen hart. Die bedeckten Flächen konnten mit einem Gemisch aus Terpentin und Lavendelöl entfernt werden. 1827 erzeugte der Franzose Augustin Lemaître den ersten Kupferstich auf Basis eines photolithographischen Prozesses mit anschließender Ätzung. 100 Jahre später, basierend auf den Niépce Prozess, entstanden die ersten Photolithographien auf Basis von Masken, gefolgt von einem chemischen Prozess. Jene Zeit, in der auch die ersten Leiterplatten hergestellt wurden. [19]

### 3.7.2 Grundlagen der Photolithographie

Bei der Photolithographie erfolgt die Bildübertragung mittels einer Maske im Kontaktverfahren über Schattenprojektion oder durch eine optische Abbildung auf einem lichtempfindlichen Polymerfilm. Heutzutage werden für diesen Prozessschritt vorgefertigte Halbzeuge verwendet, sogenannte Fotoresistfilme oder Fotolackfilme. In der Photolithographie kommen zwei unterschiedliche Systeme zum Einsatz, Positivlacke und Negativlacke (siehe Abbildung 5). Photolacke bestehen generell aus einem festen „Matrixanteil“ und einem lichtempfindlichem Anteil. Beide sind in einem Lösungsmittel gelöst. Heutzutage werden hauptsächlich Positivlacke eingesetzt. Hauptgrund hierfür ist die bessere Quellbeständigkeit und die einfachere Entsorgung. [19,20]

---

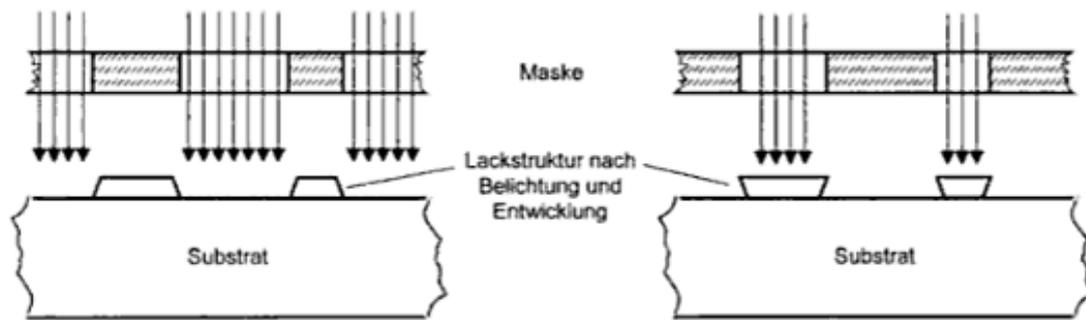
<sup>19</sup> *Madou, M.J.*, „Fundamentals of microfabrication – The Science of Miniaturization“, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2002

<sup>20</sup> *Thuselt, F.*, „Physik der Halbleiterbauelemente“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005

<sup>21</sup> *Völklein, F.*, „Praxiswissen – Mikrosystemtechnik: Grundlagen-Technologien-Anwendungen“, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000

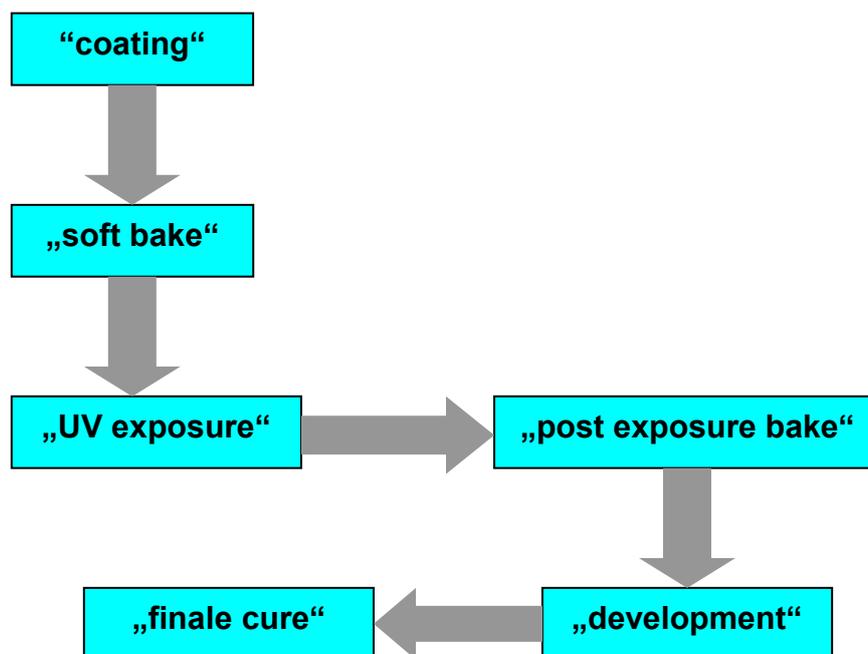
<sup>22</sup> *Trefonas, P.*, et al., „Examination of the mechanism of the post exposure bake effect“ SPIE Vol. 920, pp. 203 – 211, 1988

<sup>23</sup> *Nguyen, N., Wereley, S.* „Fundamentals and Applications of Microfluidics“, Artech House Inc. 2002



**Abbildung 5: Schichtstruktur Positiv- und Negativlack [20]**

Die Photolithographie beinhaltet eine ganze Reihe von unterschiedlichen aufeinander folgenden Prozessschritten. Diese sind in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: Prozessablauf in der Photolithographie**

### **3.7.3 Der „softbake“ Prozess (SB)**

Dieser erste Schritt nach dem Rakeln, „Spin coating“ oder Sprühbeschichtung ist eine Temperaturbehandlung, die zu der Erzeugung eines festen Films und der weitgehenden Entfernung des Lösungsmittels dient. Dadurch wird ein mögliches Aufkleben der photolithographischen Maske bei einer Kontaktbelichtung vermieden, die Haftung verbessert und Spannungen abgebaut. Der „softbake“ Prozess erfolgt üblicherweise bei Temperaturen von 75 °C bis 100 °C. [19,21]

### **3.7.4 Belichtung („exposure“) (UV)**

Im Anschluss an den „softbake“ Prozess werden die Proben durch eine Maske oder Film belichtet. Im einfachsten Falle handelt es sich dabei um eine UV Lampenbelichtung über eine Maske. Dabei ist darauf zu achten, dass die richtige Intensität, Richtung, Spektrale Breite sowie gleichmäßige Verteilung der Intensität über die Probe gewählt wird. In der Photolithographie werden unterschiedlichste Wellenlängen wie EUV („extreme UV“) mit 10 bis 14 nm, DUV („deep UV“) mit 150 bis 300 nm sowie UV („near UV“) mit 350 bis 500 nm, verwendet. Im UV Bereich sind dies vorwiegend die G-line (435 nm) oder die I-line (365 nm) auf Basis von Quecksilber-Hochdrucklampen. [19,21]

### **3.7.5 „Post exposure bake“ (PEB)**

Der „post exposure step“ wird oftmals in der Photolithographie verwendet, um den im Laufe der Belichtung initiierten chemischen Prozess zu vollenden. Die Effizienz des „post exposure bake“ hängt vor allem vom Diffusionskoeffizient der photoaktiven Komponente, welcher von unterschiedlichen Variablen, wie dessen Größe, dem Polymer und der Menge an Lösungsmittelrückständen abhängt, ab. Der „post exposure step“ ist ein essentieller und zugleich kritischer Prozess, um die Löslichkeit der unbelichteten Stellen in der nachfolgenden Entwicklung zu garantieren. [19, 21, 22]

### 3.7.6 Entwicklung („development“) (DEV)

Dieser Schritt entspricht der Transformation des latenten Bildes (noch nicht sichtbar) aus dem Belichtungsschritt in eine geometrische Oberflächenstruktur. Dabei werden unbelichtete Stellen mittels z.B. eines Lösungsmittels entfernt. [21]

### 3.7.7 Finaler Schritt „final cure“ (FC)

Je nach Ofensystem werden die Schichten noch bei ca. 150 °C für ca. 10 bis 60 Minuten ausgelagert, um noch nicht vollständig abgelaufene Vernetzungsreaktionen zu vollenden. [19, 21]

### 3.7.8 Beispiel für Negativ-Resists auf Basis der Photo-Acid Chemie

Ein typischer Vertreter dieser negativ Resists basierend auf der Photo-Acid Chemie sind sogenannte SU8 Lacke. Diese bestehen üblicherweise aus drei Komponenten:

- Epoxid-Harz
- Lösungsmittel, wie z.B. Gammabutyrolacton (GBL)
- Photo-Acid Generator, wie z.B. ein Triarylium-Sulfonium-Salz (siehe auch Abschnitt 3.9.3)

Der Photolack wird zunächst flächig mit unterschiedlichen Methoden wie z.B. Spin-Coating oder Rakeln, aufgetragen. Anschließend wird das Lösungsmittel im „softbake“ (siehe Abschnitt 3.7.3) vollständig entfernt. Zur Aktivierung des Photo-Acid Generators wird diese Schicht im „exposure“ Schritt (siehe Abschnitt 3.7.4) mittels z.B. UV-Lampen belichtet. Dies führt zur Freisetzung einer starken Säure, z.B.  $\text{H}^+\text{SbF}_6^-$ , vgl. Abschnitt 3.9.3. Im anschließendem „post exposure bake“ (siehe Abschnitt 3.7.5) bewirkt diese, je nach Art des Systems, eine Polymerisation des Monomers oder eine Vernetzung eines Polymers mit einer mittleren Molmasse über eine Spaltungsreaktion und einer Kondensation. Im abschließendem „final cure“ (siehe Abschnitt 3.7.7) wird die Schicht noch fixiert. [23]

### 3.8 Einflussfaktoren auf die Querschnittsgeometrie<sup>24 25</sup>

#### 3.8.1 Unterbelichtung / Überbelichtung / Streuung

Das Licht fällt im Idealfall kollinear auf die zu belichtenden Stellen der Photomaske ein. Bei einer höheren Intensität oder schräg liegender Proben kann es Streuung am Substrat kommen, wodurch eine Verbreiterung des Querschnitts (siehe Abbildung 7) möglich ist. [24]

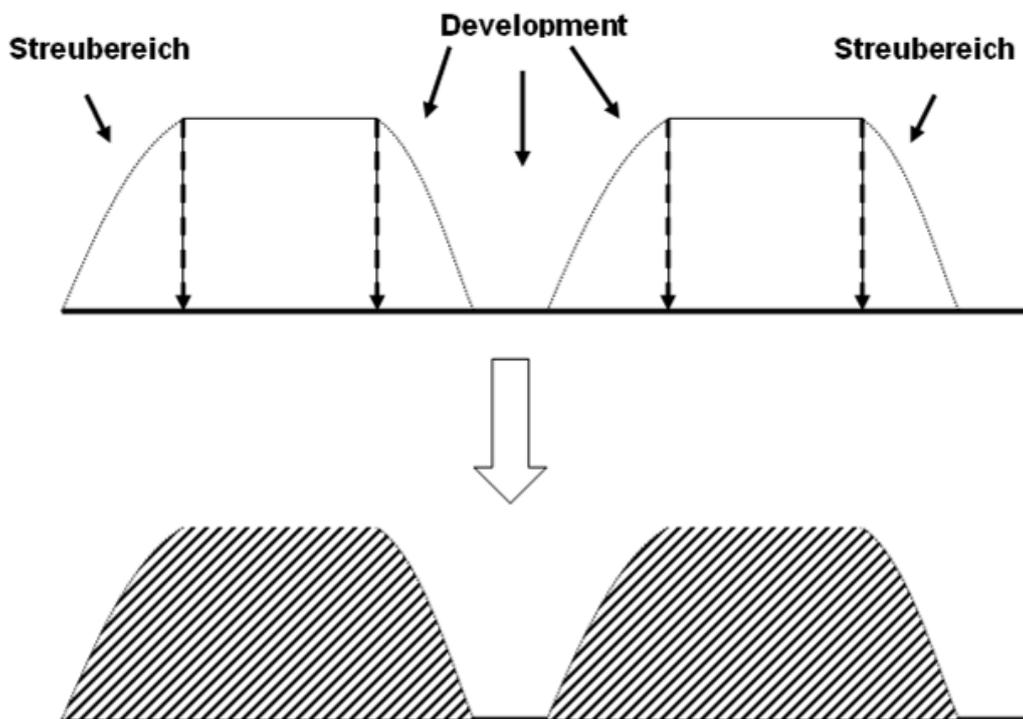


Abbildung 7: Streueffekte durch Überbelichtung [24]

#### 3.8.2 Säureverlust

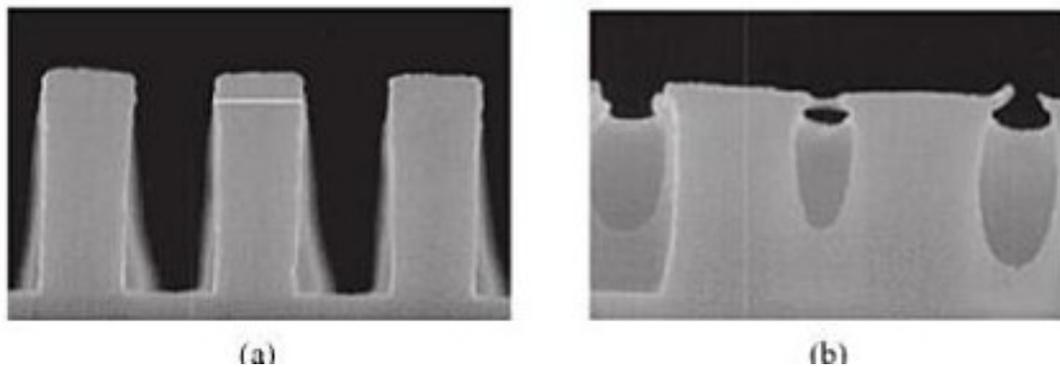
Die auf unterschiedlichste Weise gebildete Säure (Photoacid, z.B. HSbF<sub>6</sub>) kann im Laufe der Belichtung verloren gehen und somit nicht zur gewünschten Reaktion (z.B. Polymerisation, Kondensation oder Abspaltung von Schutzgruppen) beitragen. Im Bereich der Mikrolithographie werden dabei zwei

<sup>24</sup> Mack, C.A., „Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication“, Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2007

<sup>25</sup> H. Ito, et al., "Influence of Acid Generator Structure on T-Top Formation in High Temperature Bake Process for Environmental Stabilization" *Proc. SPIE* 2438, 53-60, 1995

unterschiedliche Typen des Säureverlusts unterschieden. Ein Verlust tritt in der Zeit zwischen Belichtung und „post exposure bake“ auf. Ein Mechanismus dieses zeitverzögerten Verlusts an Säure beruht auf der Diffusion atmosphärischer basischer Verunreinigungen durch die Oberfläche. Das daraus resultierende Ergebnis ist eine Neutralisation dieser in Gebieten nahe der Oberfläche und eine Abnahme der Wirkung der Säure. [25]

Ein Beispiel für diesen Effekt anhand eines Resists ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: T - Formation durch atmosphärische Kontamination [25]**

Ein weiterer Verlustmechanismus basiert auf einer basischen Kontaminierung durch Reste von Stickstoff enthaltenden Verbindungen auf den Substraten. Diese wirken als Säurefänger nahe der Substratoberfläche.

Säure kann weiteres durch Verdampfen an der Oberfläche verloren gehen. Die Menge der verdampften Säure ist abhängig von der Größe des Moleküls sowie von der Wechselwirkung mit dem Polymer. [25]

### 3.9 Grundlagen der Photophysik<sup>26 27 28 29 30 31 32 33 34</sup>

#### 3.9.1 Absorption und Energielevels

Als Grundlage für photochemische Prozesse dient die Absorption von Photonen bzw. Quanten mit ausreichender Energie. Erfolgt nun die Einstrahlung von elektromagnetischen Wellen, kommt es zur Anregung von Elektronen in einen energetisch höheren Zustand. Der Prozess selbst kann durch das sogenannte Jablonski Diagramm beschrieben werden.

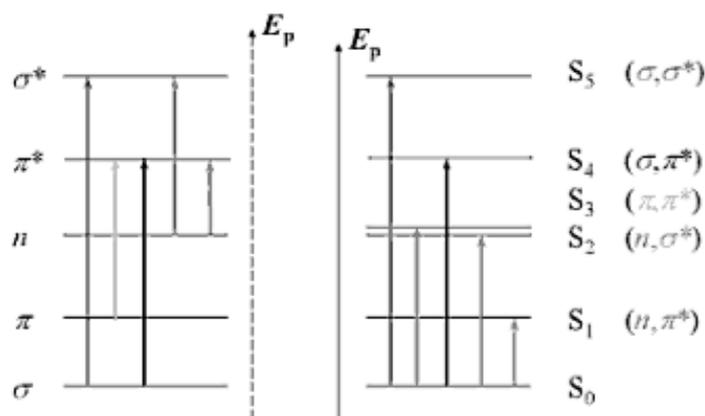


Abbildung 9: Molekülorbital – und Jablonski Diagramm [26]

Das linke Diagramm stellt ein Energieschema mit je einem  $\sigma$ -,  $\pi$ - und  $n$ -Orbital ( $n$  = nichtbindend) dar. Diese sind für den Zustand  $S_0$  mit je einem Elektronenpaar besetzt. Kommt es zur Absorption eines Photons wird eines der

<sup>26</sup> Skrabal, P.M., „Spektroskopie - eine methodenübergreifende Darstellung vom UV- bis zum NMR-Bereich“, VDF Verlag, Zürich, 2009

<sup>27</sup> Allen, N.S., „Photochemistry and Photophysics of Polymer Materials“, Wiley Verlag, Hoboken, New Jersey, 2010

<sup>28</sup> Rabek, J.F., „Mechanisms of photophysical processes and photochemical reactions in polymers“, John Wiley & Sons, Chichester, 1987

<sup>29</sup> Lazauskaite, R., „Synthesis and cationic photopolymerization of electroactive monomers containing functional groups“, Polym. Adv. Technol. 2005; 16: 571–581, 2005

<sup>30</sup> Barclay, G.G., et al., „Thermal Stability of Sulfonate Ester Photoacid Generators in Phenolic Matrixes“, Chem. Mater., 7 (7), pp 1315–1324, 1995

<sup>31</sup> Verstegen, J.M.R., „Post-Crosslinking of functional Polymers using Photo Acid Generators“, Dissertation Technische Universität Eindhoven, 1998

<sup>32</sup> Fouassier, J.P., „Photoinitiated Polymerisation – Theory and Applications“, Rapra Review Reports Volume 9, Number 4, 1998

<sup>33</sup> Crivello, J.V., „Possibilities for photoimaging using onium salts“, Polym. Eng. Sci. 23, 953, 1983

<sup>34</sup> Ito, H., „Microlithography Molecular Imprinting - Chemical Amplification Resists in Microlithography“, Springer Verlag, Heidelberg, 2005

Valenzelektronen aus dem  $\sigma$ -,  $\pi$ - und  $n$ -Orbital in ein antibindendes  $\sigma^*$ - oder  $\pi^*$ -Orbitale angeregt. Das  $\Delta E$  dazwischen entspricht der  $E$  der absorbierten Photonen. Je nach Orbital handelt es sich dabei um  $\sigma$ -  $\sigma^*$ ,  $\sigma$ -  $\pi^*$ -,  $\pi$ -  $\pi^*$ - oder  $n$ -  $\sigma^*$ - und  $n$ -  $\pi^*$ - Übergänge.

Die Übergangszustände werden mit  $S_{0-n}$  (siehe Abbildung 10) bezeichnet, wobei der Zustand  $S_1$  den niedrigsten aller möglichen Energiezustände darstellt. Für die Besetzung der Molekülorbitale gelten sowohl das Pauli Prinzip (keine Elektronen mit gleichem Quantenzustand) und die Hund'sche Regel.

Daneben existieren auch noch Triplett-Zustände (Intersystem Crossing ISC) mit zwei parallelen ungepaarten Elektronenspins. Dieser ist im Gegensatz zum Singulett-Zustand stabiler. Kehrt ein Elektron aus dem Triplett-Zustand mitsamt einer nicht erlaubten Spinumkehr zurück spricht man von Phosphoreszenz. Bei der Umkehr aus dem erlaubten Singulett-Zustand handelt es sich um eine Fluoreszenz. [26,27]

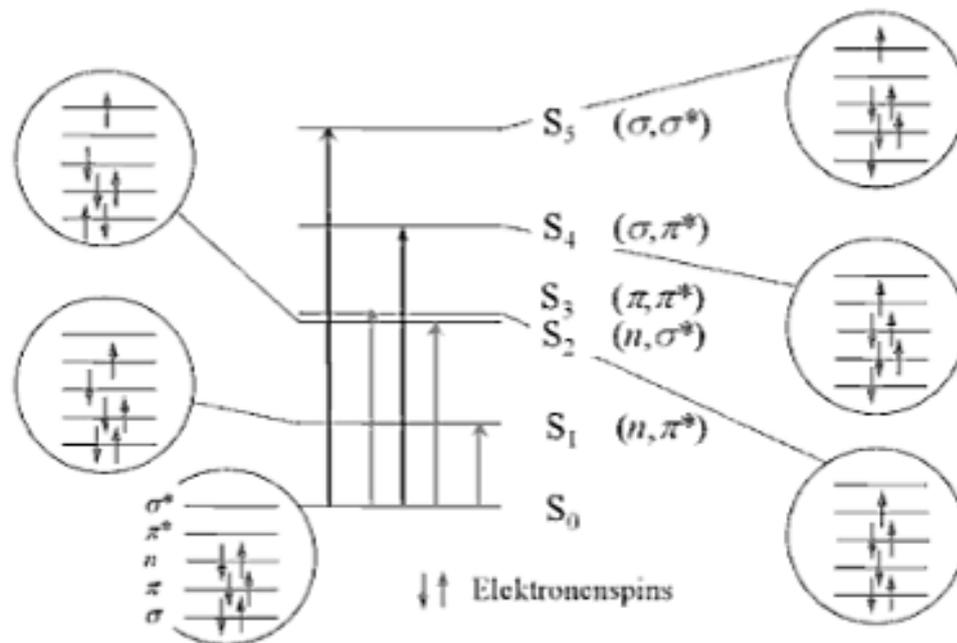


Abbildung 10: Jablonski Diagramm mit Besetzung der Orbitale [26]

### 3.9.2 Photochemische Prozesse und Photopolymerisation

Nach Jan F. Rabek [30] basieren photochemische Prozesse grundsätzlich auf vier Gesetzmäßigkeiten:

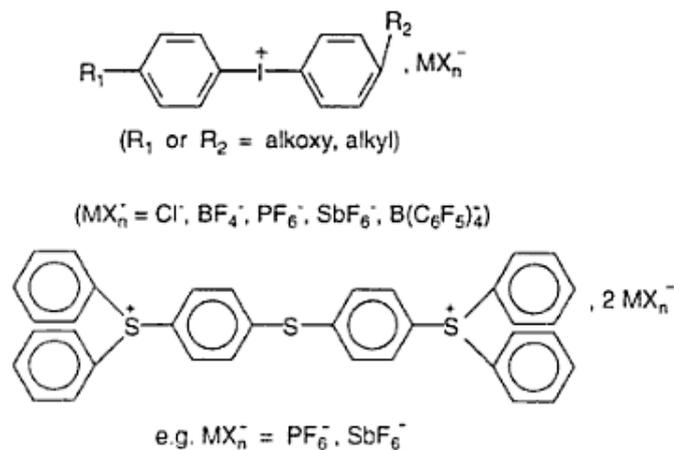
- Eine photochemische Reaktion tritt nur ein, wenn Licht mit ausreichender Energie absorbiert wird.
- Jedes Photon bzw. Lichtquant aktiviert genau ein Molekül.
- Jedes absorbierte Photon bzw. Quant von einem Molekül besitzt eine gewisse Wahrscheinlichkeit für einen Singulett Zustand ( $S_1$ ) oder Triplet Zustand ( $T_1$ ).

Die  $S_1$  und  $T_1$  Zustände sind die nötigen Grundzustände für die meisten organischen photochemischen Prozesse. Aufgrund der deutlich längeren Lebenszeit eines Triplet Zustandes (105-mal so lange) in Bezug auf den  $S_1$  Zustand wird davon ausgegangen, dass die meisten photochemischen Prozesse auf diese zurückgeführt werden können. Die photochemischen Prozesse laufen dann zumeist in zwei Schritten ab:

- Die PRIMÄRE photochemische Reaktion läuft direkt durch die absorbierten Photonen bzw. Quanten ab. Diese ist unabhängig von einem Wärmeeintrag.
- Die SEKUNDÄRE photochemische Reaktion (Dunkelreaktion) sind Reaktionen, hervorgerufen durch die in der primären Reaktion gebildeten Radikale, Ionen, oder Elektronen.

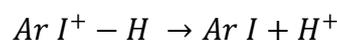
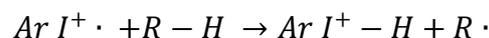
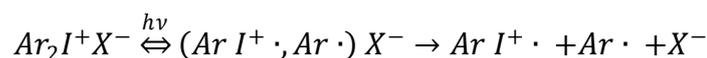
### 3.9.3 Photoacid Generators

Photoacid Generatoren (PAG) sind eine spezielle Klasse von Photoinitiatoren. Diese erzeugen unter Einstrahlung von Ultraviolettem Licht Säuren. Zu den bekanntesten und wohl meist untersuchten PAG gehört die Klasse der Onium-Salze. Diese Klasse von PAG besteht aus einer kationischen Einheit verbunden mit einer oder mehreren Alkylgruppen oder aromatischen Gruppen und einem Anion. Die wohl am weit verbreitetsten Verbindungen basieren auf Diaryliodonium und Triarylsulfonium Salzen (siehe Abbildung 11). [31]



### Abbildung 11: Photoacid Generator basierend auf Onium-Salzen [28]

Ein möglicher Reaktionsmechanismus, bei der eine Photolyse an einem Diaryliodonium Salz unter Einwirkung von UV Licht stattfindet, ist in Abbildung 12 dargestellt.



### Abbildung 12: Reaktionsmechanismus

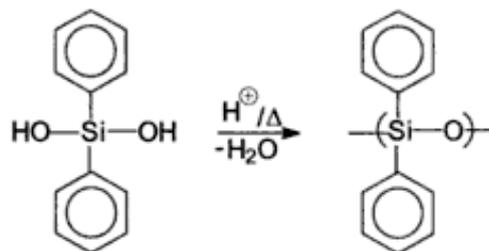
Nach Anregung des Diaryliodonium Salzes mit ultraviolettem Licht erfolgt in einem ersten Schritt eine homolytische Spaltung der Kohlenstoff-Iod Bindung unter Bildung eines Aryliodonium Kation Radikals, ein Arylradikals und ein Anion. Das Aryliodonium Kation reagiert in weiterer Folge durch Abstraktion eines Wasserstoffatoms eines Monomers unter Bildung weiterer Radikale. Zusätzlich zu den Radikalen entsteht auch starke Bronsted Säure HX, wobei X<sup>-</sup> für PF<sub>6</sub><sup>-</sup>, BF<sub>4</sub><sup>-</sup>, AsF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SbF<sub>6</sub><sup>-</sup> steht. [31]

Photoacid Generatoren werden heutzutage im Wesentlichen für zwei Verfahren eingesetzt:

1. Die kationische Photopolymerisation bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber der radikalischen Polymerisation. Diese ist unempfindlich gegenüber Sauerstoff, weist eine deutliche Nachpolymerisation im Dunklen auf, besitzt einen geringen Schrumpf sowie gute mechanische Eigenschaften des UV gehärteten Materials.

Bei der Auswahl des Photoacid Generators müssen vielerlei Faktoren wie Belichtungsquelle, Löslichkeit, Mischbarkeit, thermische Beständigkeit, Hydrolysebeständigkeit, Toxizität, Stärke der generierten Säure, Kosten und vieles mehr berücksichtigt werden. [29]

2. Eine weitere Möglichkeit der Vernetzung ist über eine Säure katalysierte Spaltungs – und Kondensationsreaktion. Ein Beispiel hierfür ist eine Säure katalysierte Vernetzungsreaktion eines Di-phenyl-Silandiols (siehe Abbildung 13) im Laufe des „post exposure bake“ unter der Bildung eines Polysiloxans bei gleichzeitiger Abspaltung eines Moleküls Wassers. [34]



**Abbildung 13: Kondensationsreaktion eines Di-phenyl-Silandiols zu einem Polysiloxans [34]**

## 4 Experimenteller Abschnitt

### 4.1 LightLink™ XP - 5202A / LightLink™ XP – 6701A

Als Ausgangsprodukt für die Herstellung von optischen Wellenleitern dient ein eigens dafür entwickeltes Polymer auf Basis eines organischen Siloxans der Firma Rohm & Haas Electronic Materials / Dow Chemicals. Das Material für die beiden CLAD Schichten (BOTTOM und TOP) trägt die Bezeichnung LightLink™ XP – 5202A, jenes für die CORE Schicht LightLink™ XP – 6701A. Beide Polymere werden mit Photoacid Generatoren kationisch vernetzt, vgl. Abschnitt 5.1.

### 4.2 LightLink™ XP – 3636 Developer

Der Entwickler dient zur Entfernung der nicht UV belichteten Stellen der CORE Schicht bestehend aus:

- 90 % Wasser
- 1,0 – 5 % Natronlauge
- < 1 % Netzmittel

### 4.3 Trägersubstrat

Als Trägersubstrate für die Aufbringung der CLAD und CORE Schichten dienen FR4 Platten und Polyimid/Kupfer(DuPont Pyrolux flexible composites LF 9130 R) Verbunde. FR4 (FR = Flammbeständig) Platten sind heutzutage das Standard Trägermaterial in der PCB Fertigung. Diese besitzen einen nicht elektrisch leitfähigen Kern und eine oder zwei Kupferschichten. Der Kern besteht dabei aus einer in Epoxidharz getränkten Glasfasermatte. Für die Aufbringung der optischen Lichtwellenleiter wurden die beiden Kupferschichten jedoch weggeätzt.

Bei dem Polyimid/Kupfer Verbund (Abbildung 14) handelt es sich um eine ca. 75 µm dicke Polyimid Folie mit einer 45 µm dicken Kupferschicht. Zur besseren Handhabung wurde diese jedoch nicht entfernt.



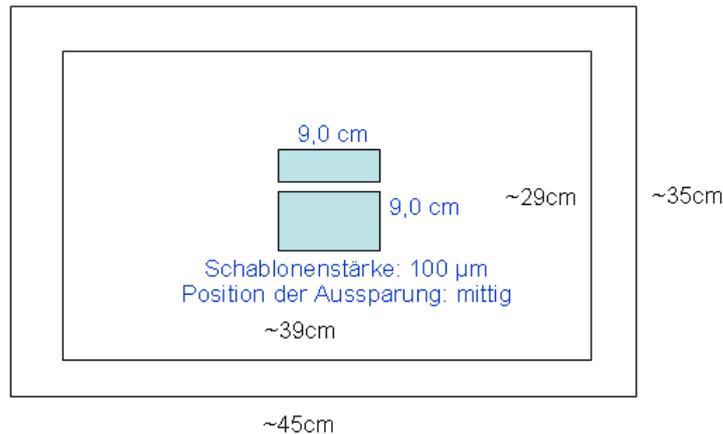
Abbildung 14: Polyimid/Kupfer Trägersubstrat

#### 4.4 Trägersubstrat Vorbehandlung

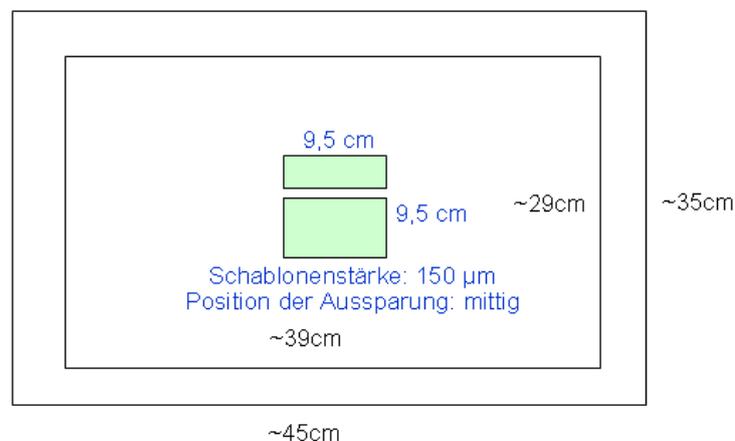
Die FR4 Platten sowie die PI/Kupfer Verbunde wurden zuerst mit Isopropanol(IPA) und Aceton von Unreinheiten wie Staub und Fetten gereinigt. Die Polyimid/Kupfer Verbunde wurden zusätzlich noch bei 90 °C im Ofen ausgelagert. Restfeuchtigkeit im Polyimid sollte damit verhindert werden. Zur Verbesserung der Hafteigenschaften wurde zusätzlich beim PI eine Plasmabehandlung durchgeführt.

#### 4.5 Aufbringungsmethode - Rakeln

Für die Aufbringung der CLAD und CORE Schichten wurde eine manuelle Sieb- und Schablonendruckmaschine vom Typ EKRA MAT S30 verwendet. Die Abmaße der verwendeten Schablonen für die BOTTOM CLAD Schicht ist in Abbildung 15 dargestellt. Jene für die CORE und TOP CLAD Schicht in Abbildung 16.



**Abbildung 15: Schablone für BOTTOM CLAD Schicht**



**Abbildung 16: Schablone für CORE und TOP CLAD Schicht**

#### 4.6 Schichtaufbau und Härtparameter<sup>35</sup>

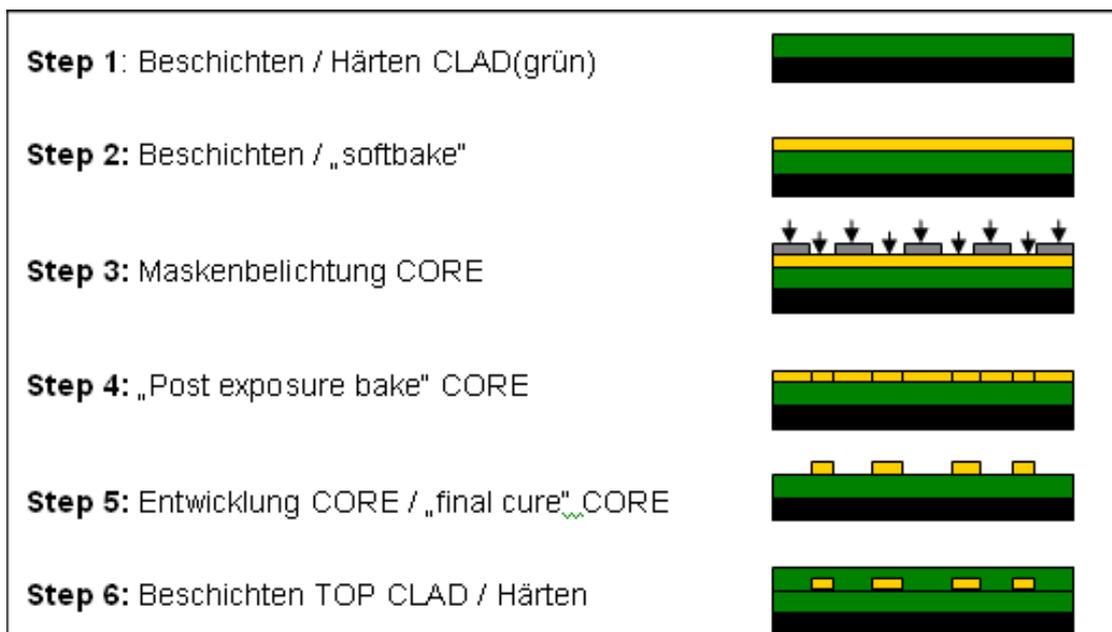
Ausgangspunkt für den notwendigen Schichtaufbau zur Herstellung eines Lichtwellenleiters auf Basis eines Polymers sind die in Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.3 verwendeten Materialien. Die Härtparameter und Entwicklungsparameter zur Erzeugung einer Schicht sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Aushärtung und Belichtung erfolgte dabei in einem Heraeus Vacutherm VT 6130P, die „UV exposure“ in einem ORC HMW 680GW mit einer Metallhalogenlampe MHL-8027S (Spektralbreite von 300 – 450 nm) der Firma Ushio America Inc. und die Bestimmung der UV Intensität über ein ILT 390B Belt Radiometer. Für die Herstellung des Wellenleiters mit BOTTOM CLAD, CORE und TOP CLAD sind die in Abbildung 17 notwendigen „Steps“

<sup>35</sup> Datenblatt LightLink™ Rohm & Haas Electronic Materials

nacheinander durchzuführen. Im „soft bake“ werden zunächst bei 90 °C und einer Verweilzeit von 15 bzw. 30 Minuten zwischen 98,5 und 99,5 % des Lösungsmittels (PGMEA) entfernt. Anschließend erfolgt mittels einer „I-line UV exposure“ die notwendige UV Belichtung zur Aktivierung des photochemischen Prozesses. Der nachfolgenden „post exposure bake“ wirkt einerseits als Katalysator für den in Step 3 aktivierten Prozess, andererseits zum Abbau von inneren Spannungen. Die Entwicklungszeit für den CORE liegt für eine 25 µm Schicht bei ca. 1 Minute. Die dabei herausgebildete Struktur oder CLAD Schicht wird dann durch den „final cure“ vollständig durchgehärtet.

**Tabelle 3: Prozessparameter Rohm & Haas / DOW Chemicals [35]**

Prozessschritt	LightLink™ XP - 5202A	LightLink™ XP - 6701A
	CLAD	CORE
„soft bake“	15 Minuten / 90 °C	30 Minuten / 90 °C
„I-Line UV exposure“	1000 mJ/cm <sup>2</sup>	500 mJ/cm <sup>2</sup>
„post exposure bake“	10 Minuten / 90 °C	10 Minuten / 90 °C
„Entwicklung	-	2 – 3 Minuten
„final cure“	60 Minuten / 145 °C	60 Minuten / 145 °C



**Abbildung 17: Prozessschritte für Lichtwellenleiterherstellung [35]**

## 4.7 Belichtungsmethoden <sup>36</sup>

### 4.7.1 Standard-Film und High-Resolution-Film

Die UV-Belichtung mittels Filmen (bedruckte Polymerfolie) stellt eine schnelle und unkomplizierte Methode zur Strukturierung von photoaktiven Schichten dar. Dabei wird der Film flächig auf der Probe aufgebracht und mittels einer Quarzglasscheibe (90 % Transparenz bei 365 nm) bedeckt. Eine Anbringung dieser über eine Vakuumfolie ohne Quarzglasscheibe ist aufgrund der Strukturierung der Vakuumfolie nicht möglich. Für das Wellenleiterdesign wurden sowohl Linien als auch Kurven mit unterschiedlichen Breiten bzw. mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Wellenleitern auf die Trägerfolie gedruckt. Die Kurven unterscheiden sich nur im Radius. Ein Abbild der Filmmaske ist in Abbildung 18 dargestellt.

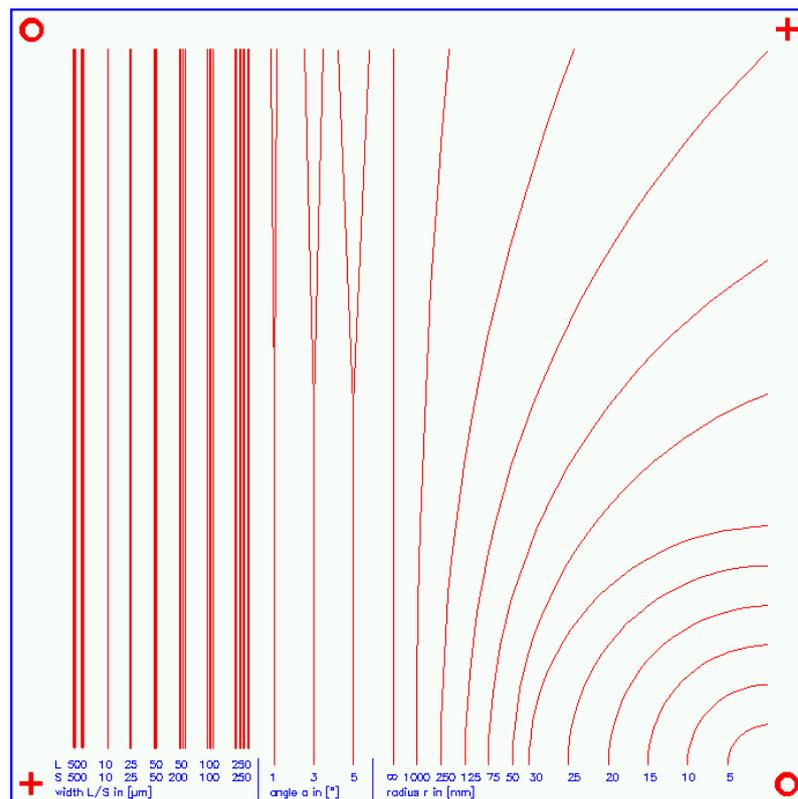


Abbildung 18: Wellenleiter Design Vorlage

<sup>36</sup> www.scanlab.de

#### 4.7.2 LDI („Laser-direct-Imaging“) Verfahren

Bei der LDI („Laser-direct-Imaging“) Belichtung erfolgt die Strukturierung des Photoresist bzw. des optischen Materials direkt mittels eines Lasers ohne die Verwendung von Photomasken oder Photofilmen. Das gewünschte Muster wird zuerst über ein CAM („Computer Aided Manufacturing – Tool) erstellt und in das LDI System eingespielt. Dies gewährleistet kurzfristige Änderungen, schnelle Umrüstzeiten und ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit. Die minimale Auflösung dieser Belichtungsart beträgt ca. 25  $\mu\text{m}$ . Die Belichtung selbst erfolgt mittels eines Palladiumlasers (351nm bis 355 nm) der Firma Orbotech (Paragon<sup>TM</sup> – 8000H). Dieser fährt die zu belichtende Fläche Linie für Linie ab, wobei der Laser ständig aus- und eingeschaltet wird. Eine Abbildung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 19 dargestellt. Der wesentliche Unterschied zu der in Abschnitt 4.7.3 beschriebenen Methode besteht in der Komplexität der Strukturen. Mit der „Laser-direct-Imaging“ Methode können sowohl Kurven, Linien, Kreise, Rechtecke und vieles mehr erzeugt werden, was mittels UV-Laser nur bedingt möglich ist.

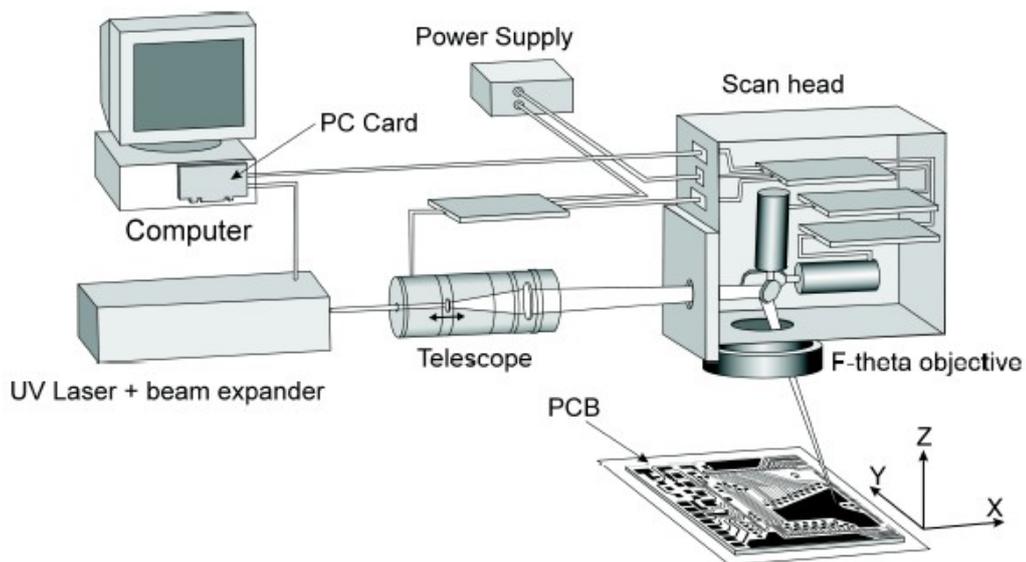


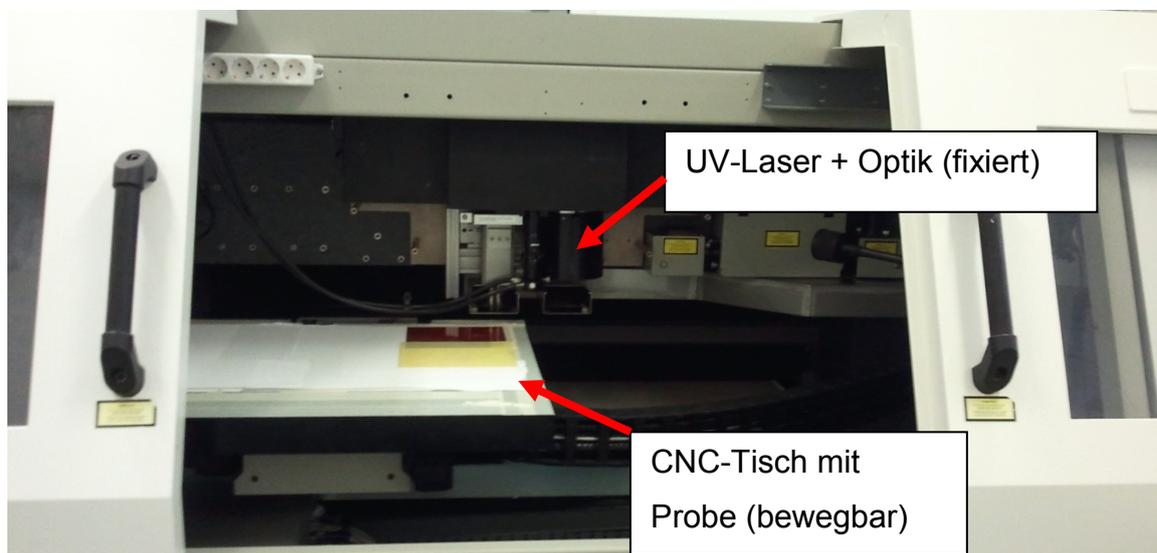
Abbildung 19: Aufbau eines „Laser-direct-Imaging“ Systems [36]

### 4.7.3 Laser Belichtung

Die Belichtung mittels Laser kombiniert eine Reihe von Vorteilen in einer Methode. Das benötigte Design kann einfach über ein Gerber-File eingespielt und in den CNC Code implementiert werden. Daraus folgt, dass weder Masken, Filme oder dergleichen benötigt werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der vektoriell angesteuerten CNC Einheit, wodurch Kurven und Geraden einwandfrei angefahren werden können.

Für die Strukturierung selbst wird zunächst die Probe auf den CNC-Tisch gelegt, mittels Vakuum fixiert und je nach gewünschtem Design eine vorgegebene Route abgefahren. Der Laserstrahl selbst bewegt sich nicht. Zusätzlich kann der Laser ein – und ausgeschaltet werden, wodurch auch etwas komplexere Strukturen möglich sind.

Bei dem Laser handelt es sich um den Typ Coherent AVIA 355-4500, einem Frequenz-Verdreifachtem, Q-switched, Dioden gepumptem Festkörper Laser mit einer maximalen Leistung von 4.5 W bei 25 kHz mit einer Wellenlänge von 355 nm. Ein Abbild dessen gemeinsam mit der CNC-Einheit ist in Abbildung 20 zu sehen.



**Abbildung 20: GSI Lumonics mit CNC-Tisch und Laseroptik**

## 4.8 Prüfmethoden <sup>37 38 39 40 41</sup>

### 4.8.1 Profilometer

Für die Bestimmung von Schichtdicken, Oberflächenstrukturen sowie der Oberflächenrauigkeit wurde ein Profilometer vom Type Dektak 130 (Veeco Instruments) verwendet. Die Vermessung der Oberfläche erfolgt dabei elektromechanisch mittels einer Diamantspitze.

### 4.8.2 Schliff / Lichtmikroskopie

Für die Betrachtung der Querschnitte der Wellenleiter wurden diese in EpoFix von STRUERS GmbH. (Deutschland) eingebettet und im Anschluss geschliffen.

### 4.8.3 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) ermöglicht eine Darstellung der mikromorphologischen Oberflächenbeschaffenheit. Anwendung findet diese hauptsächlich bei der Darstellung von Oberflächenmodifikationen sowie in der Fraktographie.

Der Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops ist in Abbildung 21 dargestellt. Dabei werden aus einer Wolframglühkathode Elektronen freigesetzt und zu einer auf Nullpotential liegenden ringförmigen Anode hin beschleunigt. Ein auf Nullpotenzial liegender Wehneltzylinder bündelt den Elektronenstrahl. Dieser Elektronenstrahl muss nun auf das Objekt gelenkt und abrasternd bewegt werden. Die Ablenkung erfolgt über elektromagnetische Linsensysteme. Für die Abbildung der Oberfläche können sowohl Rückstreuelektronen als auch Sekundärelektronen herangezogen werden. Erstere enthält größere Tiefeninformationen bei geringerer Auflösung. Sekundärelektronen sind daher besser für Aussagen der unmittelbaren Probenoberfläche geeignet. Die

---

<sup>37</sup> Heine, B., „Werkstoffprüfung: Ermittlung von Werkstoffeigenschaften“, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2003

<sup>38</sup> DIN EN ISO 2409, Paints and varnishes - Cross-cut test (ISO 2409:2007)

<sup>39</sup> Datenblatt „Erichsen – Cross Hatch Cutter Models 295“

<sup>40</sup> Voges, E., Petermann, K., „Optische Kommunikationstechnik – Handbuch für Wissenschaft und Industrie“, Springer Verlag, Berlin, 2002

<sup>41</sup> Grote, N., Venghaus, H., „Fibre Optic Communication Devices“ Springer Verlag, Berlin, 2001

Darstellung des Bildes erfolgt mittels einer Bildröhre. Die Elektronen werden von einem Elektronenkollektor aufgefangen und zu einem Signal verarbeitet. Stufenlose Vergrößerungen bis hin zu 1:100000 sind möglich.

Die Proben selbst können ohne großen Aufwand untersucht werden, wobei die Größe dieser bei Durchmessern von 25 mm liegt. Diese werden auf einem um 360° drehbaren und 60° kippbaren Probenhalter positioniert. Schlecht elektrisch leitende Proben können Streifen im Bild bewirken, die durch plötzliche Entladungen zustande kommen. Ist die Oberfläche nichtleitend, muss sie zusätzlich mit Kohlenstoff oder Gold (hohe Sekundärelektronenausbeute) bedampft werden. Dabei werden Schichten bis zu 20 nm mittels Bedampfen oder Sputtern aufgebracht. Im Falle einer Goldschicht muss diese zuvor mit Kohlenstoff unterlagert werden, um ein Perlen zu verhindern. Diese Schichten sind so dünn, dass es zu keiner Beeinflussung der optischen Auflösung kommt. Tritt weiterhin eine elektrische Aufladung auf, kann zusätzlich noch die Beschleunigungsspannung reduziert werden. [37]

Die Messungen wurden an einem Zeiss-LEO 982, "Gemini" durchgeführt.

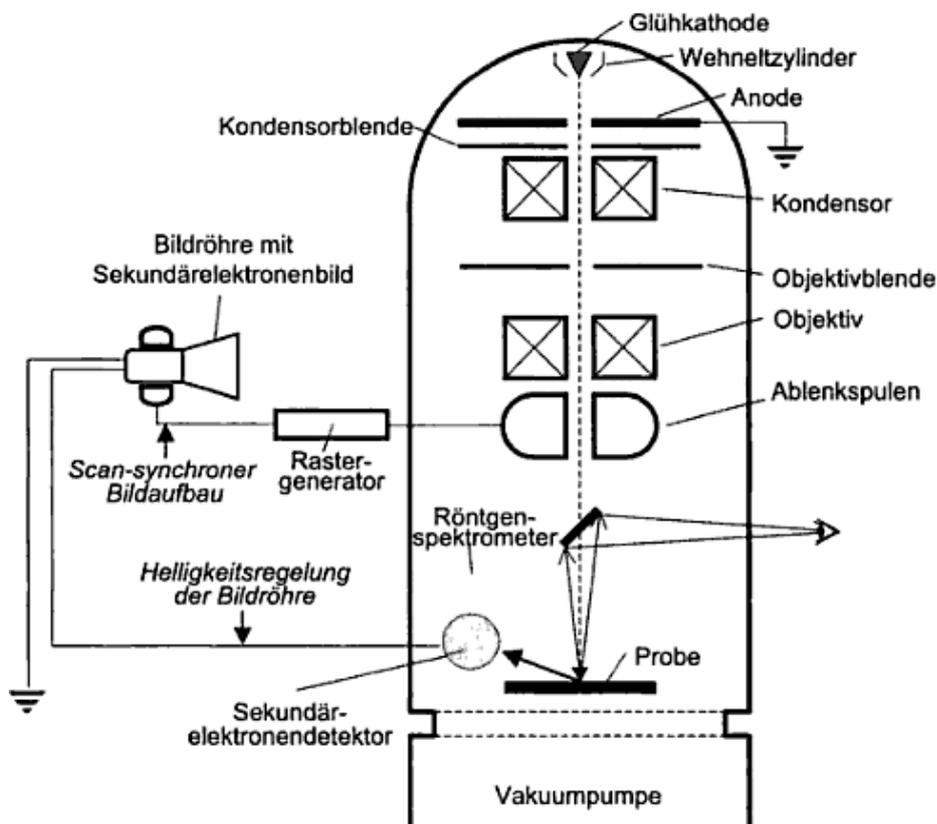


Abbildung 21: Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops [37]

#### 4.8.4 Gitterschnitt (Cross-Cut-Test)

Zur Untersuchung der Hafteigenschaften des LightLink™ CLAD auf Polyimid wurden zusätzlich Gitterschnitt-Tests nach DIN EN ISO 2409 [38] durchgeführt. Hierfür wurde eine Cross Hatch Cutter Models 295 in Kombination mit einem Scotch 8915 Klebeband verwendet.

**Tabelle 4: Klassifizierung nach DIN EN ISO 2409 [38,39]**

	Beschreibung	Klassifizierung
	Gerade saubere Schnitte	0
	Verluste an den Schnittpunkten. Gesamtverlust kleiner als 5 %	1
	Verluste an Kanten und Schnittpunkten. Gesamtverlust kleiner als 15 %.	2
	Verlust an Kanten sowie ganze Flächen. Gesamtverlust kleiner als 35 %	3
	Verlust an Kanten sowie ganze Flächen. Gesamtverlust kleiner als 65 %	4
	Gesamtverlust größer als 65 %	5

#### 4.8.5 Brechungsindexbestimmung mittels RNF („refractive near field“) Methode

Die Nahfeld-Methode stellt die einzige Möglichkeit zur direkten Bestimmung eines Brechungsindexprofils einer optischen Faser dar. Dabei wird ein Laserstrahl auf den Wellenleitereingang fokussiert, an welchem das Brechungsindexprofil bestimmt werden soll.

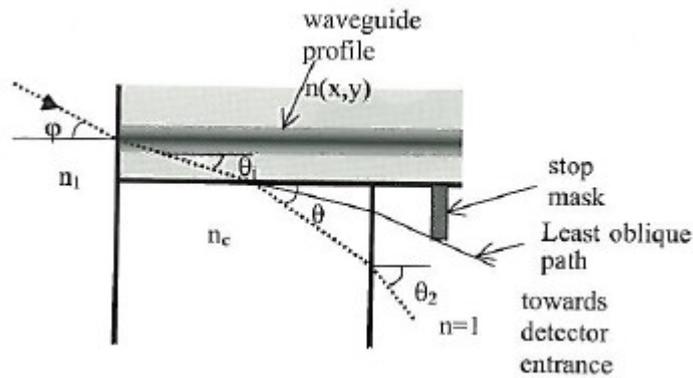


Abbildung 22: RNF-Versuchsaufbau [41]

An der Rückseite der Probe wird eine sogenannte „Stopper mask“ angebracht, welche eine Photodiode zum Teil abdeckt. Für den dabei entstehenden Strahlengang gilt:

$$n_1 \times \sin \varphi = n(x, y) \times \sin \theta_i$$

Formel 8

$$n_c \times \cos \theta = n(x, y) \times \cos \theta_i$$

Formel 9

$$n_c \times \sin \theta = \sin \theta_2$$

Formel 10

Jener Teil des Lichtes zwischen dem Winkel  $\theta_{2\min}$  und  $\theta_{2\max}$  wird über ein Linsensystem einer Laserdiode zugeführt. Unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes kann jedem Ausgangswinkel ein Eingangswinkel zugeordnet werden, wobei für  $n_1=1$  gilt. Hierfür folgt:

$$\sin^2 \varphi - \sin^2 \theta_2 + n_c^2 = n^2(x, y)$$

Formel 11

$n^2(x,y)$  bezeichnet hierbei den gesuchten Brechungsindex des Profils und  $n_c$  jener des bekannten Umgebungsmedium.

Bei der Messung selbst wird über ein hochpräzises xyz-Schraubensystem der Fokus quer über den Wellenleiterquerschnittbewegt und die zugehörige Detektorleistung registriert. Das gesamte detektierte Licht entspricht dabei dem Integral vom Winkel  $\varphi_{\min}$  bis  $\varphi_{\max}$ .

$$I_p(n(x, y)) = \int_{\varphi_{\min}(n(x, y))}^{\varphi_{\max}} I(\varphi) \times d\varphi$$

Formel 12

Die Ausgangsleistung hängt somit wie in Formel 12 ersichtlich von den lokalen Brechungsunterschieden  $n(x, y)$  ab. Über diese Methode kann der Brechungsindex bzw. die Brechungsindexverteilung mit einer Genauigkeit von bis zu  $10^{-4}$  bestimmt werden. [41]

#### 4.8.6 Cutback - Rückschneidverfahren

Für die Bestimmung des optischen Verlustfaktors wird die Leistung am Wellenleiterausgang für unterschiedliche Längen (72.5, 65.5, 56, 44 und 34.5 mm) des Wellenleiters gemessen. Dadurch kann der Abschwächungskoeffizient bzw. die daraus resultierende Dämpfung des Wellenleiters bestimmt werden. Jeder einzelne Wellenleiterquerschnitt wird bezüglich der Qualität der Einkoppel- und Abbildungsflächen mittels eines optischen Mikroskops kontrolliert und wenn notwendig gereinigt. Die Einkoppelung des Lichtes erfolgt dabei mittels Monomodefaser (Butt-Coupling, Faser FS-SN-4224 Thorlabs mit  $NA = 0.12$ ) bei einer Wellenlänge von 850 nm. Die Abbildung auf die Kamera bzw. auf den Photodetektor erfolgt über ein 20x Objektiv mit  $NA = 0.4$ .

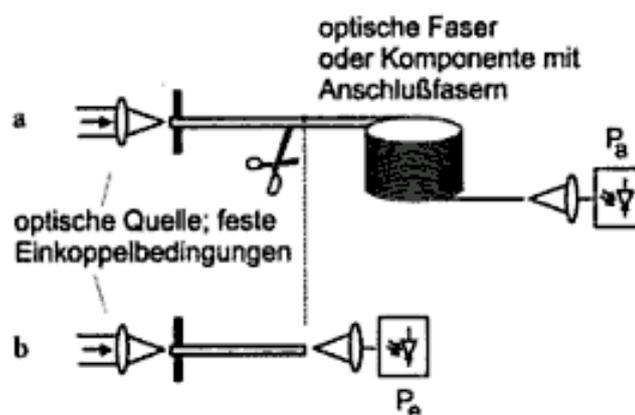


Abbildung 23: Prüfaufbau einer „cutback“ Messung [40]

### **4.8.7 Infrarotspektroskopie („FT-IR“)**

Für die Infrarotspektroskopischen Untersuchungen wurde ein Perkin Elmer „Spectrum one“ im Transmissionsmodus verwendet. Das zu untersuchende Material musste zuerst mit 1-methoxypropan-2-yl acetat verdünnt werden, um eine ausreichend dünne Schicht durch Spin coating zu erzielen. Als Trägermaterial dienten dabei Calcium-Fluorid Plättchen.

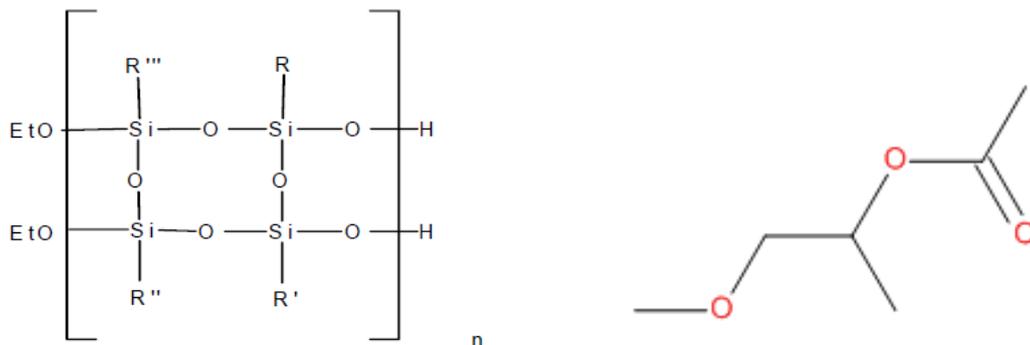
### **4.8.8 Kernspinresonanzspektroskopie („FT-NMR“)**

Für die Kernspinresonanzspektroskopie wurden 10 mg bis 20 mg des zu untersuchenden Materials eingewogen und anschließend mit deuteriertem Chloroform ( $\text{CDCl}_3$ ) verdünnt. Die Messung wurde mit einem Varian 400 MHz high Resolution FT-NMR sowohl im  $^1\text{H}$ -NMR als auch im  $^{13}\text{C}$ -NMR Modus durchgeführt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Strukturaufklärung LightLink™ XP-5202A/XP-6701A<sup>42 43 44 45</sup>

Nach *Shelnut et al. [42]* handelt es sich bei den verwendeten Materialien um ein im negativ Verfahren photostrukturierbares organisches Silsesquioxane. Silsesquioxane zeichnen sich durch ihre geringe Feuchtaufnahme und einer guten thermischen Stabilität aus. Abhängig von den funktionellen Gruppen können maßgeschneiderte Polymere bezogen auf Lösungsrate, Brechungsindex, Doppelbrechungsrate sowie der optischen Verlustrate hergestellt werden.



**Abbildung 24: Silsesquioxane [42] und 1-methoxypropan-2-yl acetat**

Ein weiterer Bestandteil des Gemisches ist das Lösungsmittel Propylen-glycol-monomethyl-ether-acetat (1-methoxypropan-2-yl acetat).

Diese beiden Komponenten werden sowohl in der Literatur als auch in den dazugehörigen Patenten EP 1 535 977 A1 [43], EP 1 426 793 B1 [44] und EP 1 586 603 B1 [45] erwähnt und stimmen auch mit den Messergebnissen überein. In der Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Infrarot Spektren von LightLink™ XP-5202A CLAD und XP-6701 CORE in den einzelnen Prozessschritten dargestellt. Die Banden und deren Zuordnung sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt. Diese können nur dem verwendeten Lösungsmittel PGMEA und dem Silsesquioxane bzw. dessen Substituenten zugeordnet werden. Bei den

<sup>42</sup> *Shelnut, J., et al., „Aqueous Base Compatible Waveguide Materials for Optical Interconnect Applications”, CLEO Poster Session II, Baltimore, Maryland, 2003*

<sup>43</sup> *Shelnut, J., EP 1 535 977 A1, Rohm and Haas Electronic Materials, Marlborough, 2005*

<sup>44</sup> *Shelnut, J., Moynihan, M., EP 1 426 793 B1, Shipley Company, Marlborough, 2009*

<sup>45</sup> *Shelnut, J., Pugliano, N., EP 1 586 603 A1, Rohm and Haas Electronic Materials, Marlborough, 2005*

Substituenten handelt es sich vorwiegend um –OH bzw. Phenylgruppen. Charakteristische Banden für den Photoacid Generator bzw. die der bei der Belichtung freierwerdenden Säure konnten aufgrund der geringen Konzentration nicht gefunden werden.

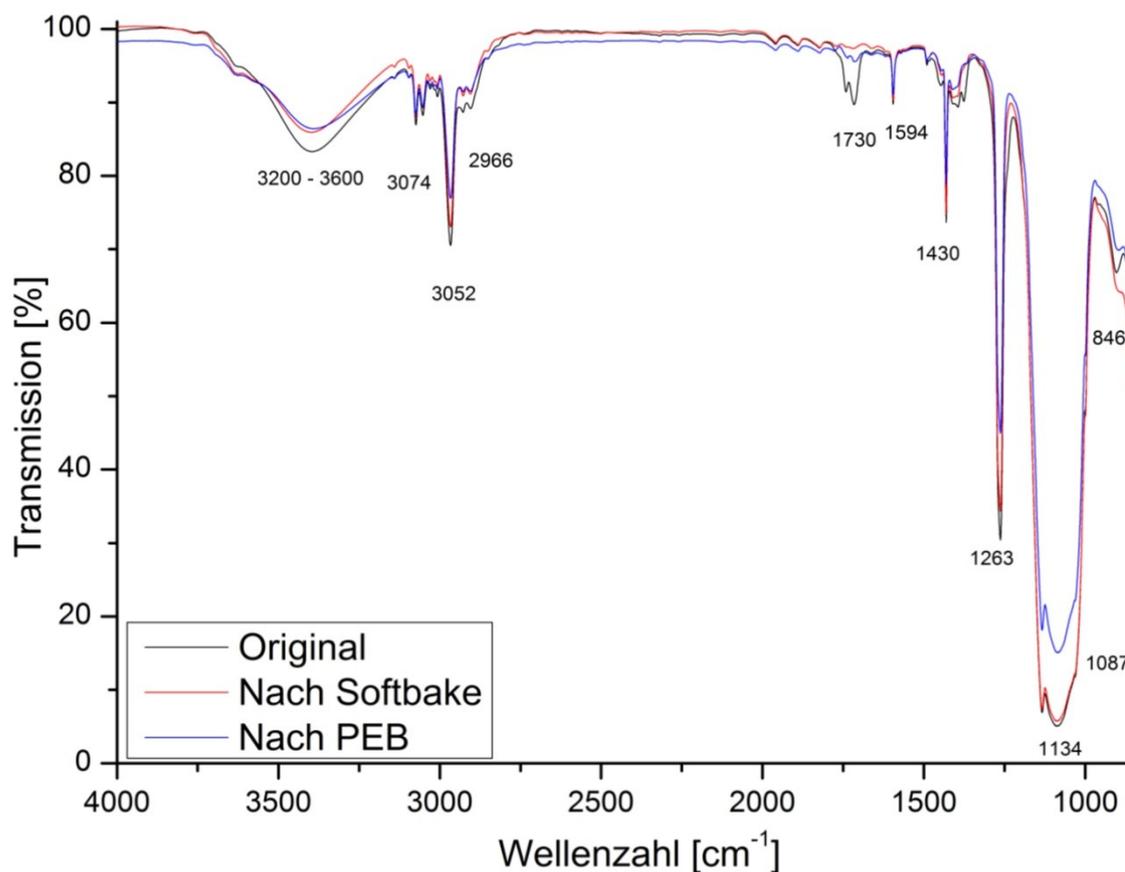


Abbildung 25: IR Spektrum der einzelnen LightLink™ XP-5202 CLAD Prozessschritte

Tabelle 5: Charakteristische Banden von LightLink™ XP-5202A

Wellenzahl [cm <sup>-1</sup> ]	Zuordnung	Intensität
3700 - 3200	Si-OH	s
3074	=C-H (Aromat)	w
3052	=C-H (Aromat)	w
2966	-C-H	m
1730	-C=O	m
1594,1430,1134,1087	Si-Phenyl	s,m
1263,846,803	Si-CH <sub>3</sub>	s

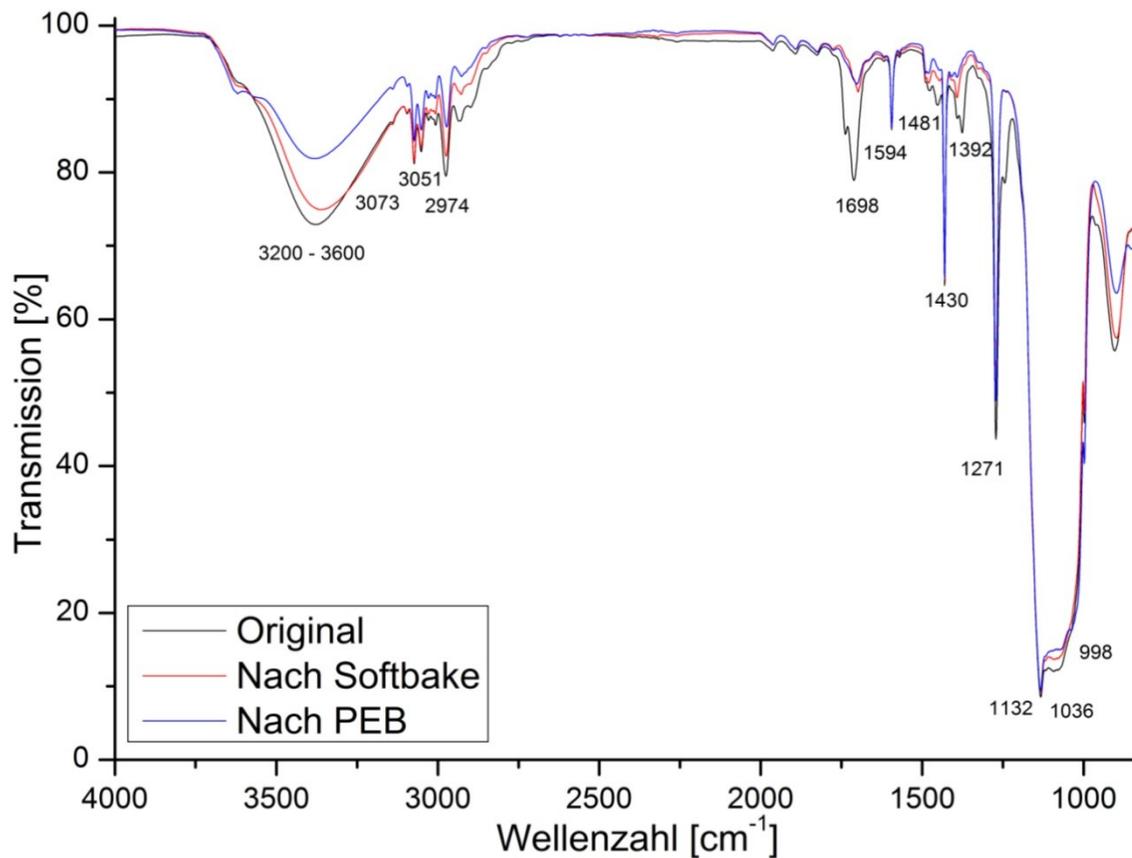


Abbildung 26: IR Spektrum der einzelnen LightLink™ XP-6701 CORE Prozessschritte

Tabelle 6 Charakteristische Banden von LightLink™ XP-6701A

Wellenzahl [cm <sup>-1</sup> ]	Zuordnung	Intensität
3700-3200	Si-OH	s
3051	=C-H (Aromat)	w
3073	=C-H (Aromat)	w
2974	-C-H	m
1698	C=O	m
1594,1430,1132,1036,998	Si-Phenyl	s,m
1481	-CH <sub>3</sub>	m
1392	-CH <sub>3</sub>	w
1271	Si-CH <sub>3</sub>	s

Ähnliche Resultate lieferten auch die  $^1\text{H-NMR}$  und  $^{13}\text{C-NMR}$  Messungen. Der Großteil der chemischen Verschiebungen kann dem Lösungsmittel Propylen-glycol-monomethyl-ether-acetat sowohl beim CORE als auch beim CLAD Material zugeordnet werden. Zusätzlich konnten wie bereits bei der Infrarotspektroskopie an Silizium substituierte Phenyl-, Methyl und Hydroxygruppen bestimmt werden. Einige der Verschiebungen konnten aufgrund ihrer geringen Intensität bzw. aufgrund mangelnder Anhaltspunkten nicht zugeordnet werden können.

#### $^1\text{H-NMR}$ und $^{13}\text{C-NMR}$ an LightLink™ XP-5202A:

$^1\text{H-NMR}$ (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$ (ppm) = 7.30(breit, Si-Phenyl),  $\delta$ =5.06(Sextett, 1H, -CHO-COCH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 3.67(Quartett, 1H, -OH)  $\delta$  = 3.44(2H, O-CH<sub>2</sub>-CH),  $\delta$  = 3,36(d, 1H, -CHCH<sub>3</sub>-),  $\delta$  = 2.05(s, 3H, -CH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 1.21(d, 3H, CH<sub>3</sub>-CH-O),  $\delta$  = 0.09(s, Si-CH<sub>3</sub>)

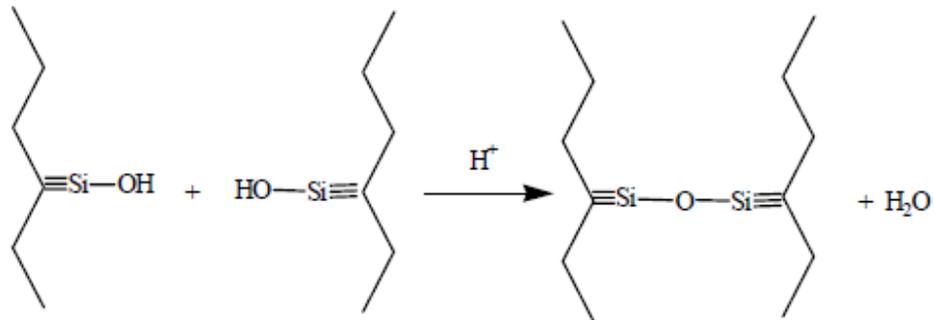
$^{13}\text{C-NMR}$ (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$ (ppm) = 170.68(s, C=O),  $\delta$  = 134.03 und  $\delta$  = 127.6(Phenyl-Si),  $\delta$  = 74.96(s, 1C, -O-CH<sub>2</sub>-CHCH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 69.25 (s, CH<sub>2</sub>-CHCH<sub>3</sub>-O),  $\delta$  = 59.07(s, Me-O),  $\delta$  = 21.25 (s, Me-CO),  $\delta$  = 18.24(s, 1C, -CH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 16.48(s, Me-CH-)

#### $^1\text{H-NMR}$ und $^{13}\text{C-NMR}$ an LightLink™ XP-6701A:

$^1\text{H-NMR}$ (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$ (ppm) = 7.30(breit, Si-Phenyl),  $\delta$ =5.07(Sextett, 1H, -CHO-COCH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 3.67(Quartett, 1H, -OH),  $\delta$  = 3.45( 2H, O-CH<sub>2</sub>-CH),  $\delta$  = 3,37(d, 1H, -CHCH<sub>3</sub>-),  $\delta$  = 2.06(s, 3H, -CH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 1.70(breit, nicht zugeordnet),  $\delta$  = 1.23(d, 3H, CH<sub>3</sub>-CH-O),  $\delta$  = 0.07(breit, Si-CH<sub>3</sub>)

$^{13}\text{C-NMR}$ (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$ (ppm) = 170.66(s, C=O),  $\delta$  = 134.03 und  $\delta$  = 127.69(Phenyl-Si),  $\delta$  = 74.99(s, 1C, -O-CH<sub>2</sub>-CHCH<sub>3</sub>),  $\delta$  = 69.25 (s, CH<sub>2</sub>-CHCH<sub>3</sub>-O),  $\delta$  = 59.11(s, Me-O),  $\delta$  = 21.29 (s, Me-CO), (s, Me-CO),  $\delta$  = 16.51(s, Me-CH-)

Die große Anzahl an Hydroxyl Gruppen sowohl im IR als auch im NMR Spektrum würde zugleich auch noch den von Shelnut et al. beschriebenen Reaktionsmechanismus bestätigen. Dabei erfolgt die Vernetzung der einzelnen Silsesquioxan-Moleküle durch eine säurekatalysierte Spaltungsreaktion und anschließender Kondensation. Im Folgendem (Abbildung 27) ist die Vernetzungsreaktion im Detail dargestellt. Dabei reagieren zwei an das Silsesquioxan-Molekül substituierte Hydroxyl-Gruppen miteinander bei gleichzeitiger Abspaltung eines Moleküls Wassers. Die Spaltungsreaktion erfolgt dabei säurekatalysiert im Laufe des „post exposure bake“. Ein ähnlicher Reaktionsmechanismus ist in Abschnitt 3.9.3 dargestellt.



**Abbildung 27: Kondensationsreaktion der Vernetzung (Säure katalysiert)**  
[42]

## 5.2 BOTTOM CLAD Schicht

### 5.2.1 Härtungsparameter FR4

Als Ausgangspunkt für die nachfolgende Prüfmatrix dienten die Aushärteparameter seitens des Herstellers von LightLink™. Dieser empfiehlt für die Beschichtungsmethode Rakeln folgende Parameter für eine Schichtdicke von 25 – 75 µm auf FR4 Substraten:

- Eine „soft bake“ Zeit von 15 Minuten bei 90 °C.
- Eine „I-line UV exposure“ von 1000 mJ/cm<sup>2</sup>.
- Eine „post exposure bake“ Zeit von 10 Minuten bei 90 °C.
- Eine „final cure“ Zeit von 60 Minuten bei 145 °C.
- 

Um ein bestmögliches Ergebnis für eine Schichtdicke von ca. 50 µm zu erhalten, wurde diese um 20 % nach oben und unten erweitert. Daraus ergaben sich folgende Werte:

- Eine „soft bake“ Zeit von 12, 15 und 18 Minuten bei 90 °C.
- Eine „I-line UV exposure“ von 800, 1000 und 1200 mJ/cm<sup>2</sup>.
- Eine „post exposure bake“/„final cure“ Zeit von 8/45, 10/60 und 12/90 Minuten.

Dies ergibt in Summe 27 Variationen der Aushärteparameter. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 30 - Abbildung 32 dargestellt.

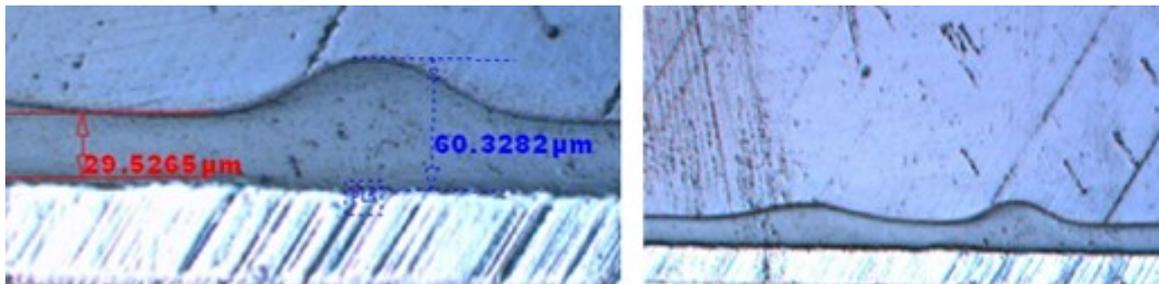
Es folgte eine optische Beurteilung der 27 Proben. Grundsätzlich konnten dabei 4 unterschiedliche Oberflächendefekte beobachtet werden. Diese sind:

- Klebrige Oberfläche
- „fingerprint“ – Struktur
- Schlierenbildung
- Feine Risse – verteilt über ganze Probe

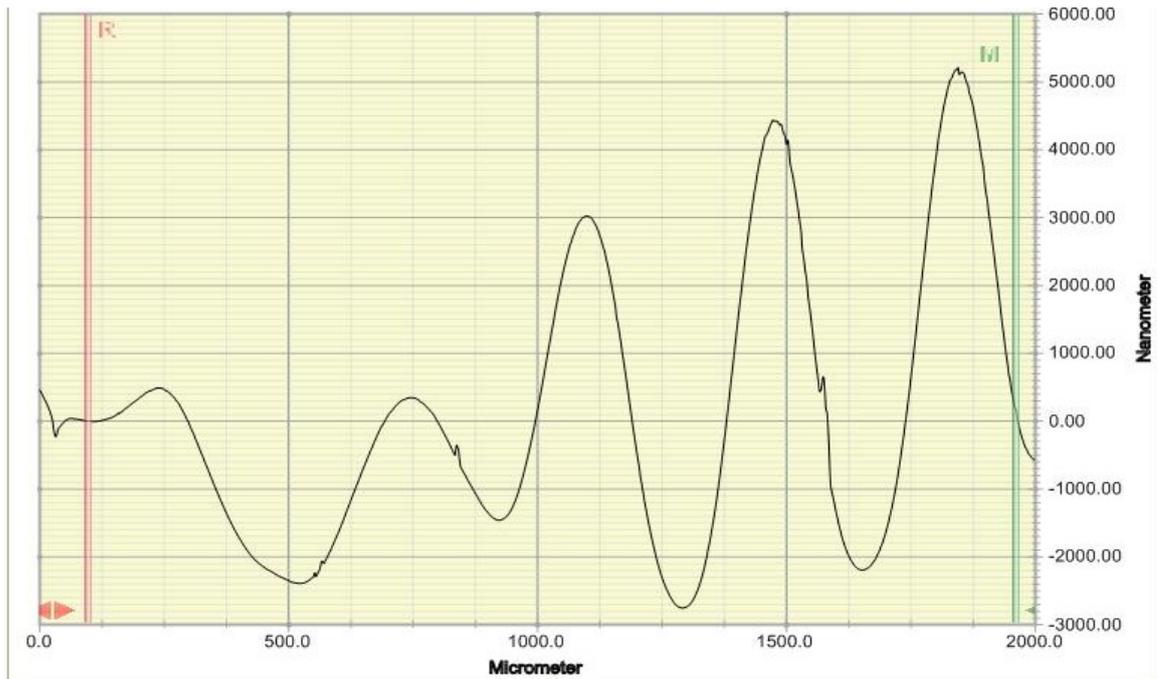
Die Klassifizierung der Oberflächenklebrigkeit erfolgte in **+** (für stark klebrig), **0** (für mäßig klebrig) und **-** (für nicht klebrig). Für den Fall **+**, in dem es möglich ist,

die Probe durch Kontakt mit den Finger aufzuheben, sind sowohl die Aushärtezeiten („soft bake, post exposure bake und final cure“) als auch die „I-line UV exposure“ Intensität zu gering gewählt. Längere Aushärtezeiten im Ofen und erhöhte Belichtungszeiten reduzierten den Effekt. Eine geringe Klebrigkeit blieb jedoch bei den gewählten Aushärteparametern trotzdem erhalten. Die Schlierenbildung lässt sich auf dieselben Ursachen zurückführen. Diese konnten durch längere Belichtung- und Härtezeiten vermieden werden.

Ein weiterer Effekt ist die sogenannte „fingerprint“ Struktur. Charakterisierend für diese ist, dass sie immer lokal auftreten mit einer ungefähren Größe von 1 cm<sup>2</sup>. Sie treten frühestens im Laufe des „post exposure bake“ auf. Ursache dafür könnte eine nachträgliche lokale Schrumpfung des Polysiloxans sein. Die Oberfläche erscheint dabei „runzelig“ mit kleinen Erhebungen bis zu 50 µm. Eine Abbildung dessen ist in Abbildung 28 sowie eine Oberflächenvermessung mittels einem Profilometer in Abbildung 29 zu sehen.



**Abbildung 28: Schliffbilder einer „fingerprint“ Struktur**



**Abbildung 29: Profilometer Messung einer „fingerprint“ Struktur**

Weiters wurde in Folge vermehrt auftretender Oberflächenfehler die Anzahl dieser im zentralen Bereich der Schichten mitgezählt. Trotz einwandfreier Oberfläche nach dem Rakelprozess bildeten sich im Verlauf des „softbake“ Prozess immer wieder Luftblasen. Fehler nach der „UV exposure“ sind hauptsächlich auf Staubfasern zurückzuführen, da die Proben im ORC ständig einer erheblichen Luftkühlung ausgesetzt sind.

<b>Process:</b>	<b>BOTTOM CLAD</b>										
<b>Substrate:</b>	<b>FR4</b>										
<b>Material:</b>	<b>LightLink XP-5202A</b>										
<b>process step</b>	<b>parameter</b>		<b>Sample #</b>								
	fix	var	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Soft bake @ T = 90°C	T = 90°C	t (min)	12								
I-Line UV exposure	λ = 365 nm	d (mJ/cm <sup>2</sup> )	800			1000			1200		
Post exposure bake	T = 90°C	t (min)	8	10	12	8	10	12	8	10	12
final cure	T = 145°C	t (min)	45	60	90	45	60	90	45	60	90
<b>optical quality</b>											
	fix	var	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Klebrig	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	+	+	+	+	0	+	0	0
Finger print	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	+	+	+	+	+	+	-	-
Schlieren	+(yes)/0(moderate)-(no)		-	+	+	+	+	+	+	+	-
Feine Risse ok?	+(yes)/0(moderate)-(no) yes/no		no	no	no	no	no	no	no	no	no
	Fehler nach Rakeln		2	2	2	1	1	2	1	1	0
	Fehler nach soft bake		5	3	5	3	5	5	5	3	0
	Fehler nach UV		6	3	6	4	6	6	6	4	1

Abbildung 30: Prüfmatrix FR4 für Samples 1-9

<b>Process:</b>	<b>BOTTOM CLAD</b>											
<b>Substrate:</b>	<b>FR4</b>											
<b>Material:</b>	<b>LightLink XP-5202A</b>											
<b>process step</b>	<b>parameter</b>		<b>Sample #</b>									
	fix	var	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Soft bake @ T = 90°C	T = 90°C	t (min)	15									
I-Line UV exposure	λ = 365 nm	d (mJ/cm <sup>2</sup> )	800			1000			1200			
Post exposure bake	T = 90°C	t (min)	8	10	12	8	10	12	8	10	12	
final cure	T = 145°C	t (min)	45	60	90	45	60	90	45	60	90	
<b>optical quality</b>												
	fix	var	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Klebrig	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	0	+	+	0	0	+	-	-	
Finger print	+(yes)/0(moderate)-(no)		-	-	+	+	+	-	+	+	-	
Schlieren	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	-	-	-	-	-	+	-	-	
Feine Risse ok?	+(yes)/0(moderate)-(no) yes/no		no	no	no	no	yes	yes	no	yes	yes	
	Fehler nach Rakeln		1	3	0	3	1	1	2	3	3	
	Fehler nach soft bake		3	3	3	5	3	3	2	6	4	
	Fehler nach UV		4	3	3	5	3	3	2	6	4	

Abbildung 31: Prüfmatrix FR4 für Samples 10 - 18

<b>Process:</b>	<b>BOTTOM CLAD</b>																				
<b>Substrate:</b>	<b>FR4</b>																				
<b>Material:</b>	<b>LightLink XP-5202A</b>																				
<b>process step</b>	<b>parameter</b>		<b>Sample #</b>																		
	fix	var	19	20	21	22	23	24	25	26	27										
Soft bake @ T = 90°C	T = 90°C	t (min)	18																		
I-Line UV exposure	$\lambda = 365 \text{ nm}$	d (mJ/cm <sup>2</sup> )	800			1000			1200												
Post exposure bake	T = 90°C	t (min)	8	10	12	8	10	12	8	10	12										
final cure	T = 145°C	t (min)	45	60	90	45	60	90	45	60	90										
<b>optical quality</b>																					
	fix	var	19	20	21	22	23	24	25	26	27										
Klebrig	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	0	0	+	0	0	0	0	-										
Finger print	+(yes)/0(moderate)-(no)		-	+	+	-	-	+	-	-	+										
Schlieren	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	+	+	+	-	-	-	-	+										
Feine Risse	+(yes)/0(moderate)-(no)		+	-	-	+	-	+	+	-	-										
ok?	yes/no		no	no	no	no	yes	no	no	no	no										
	Fehler nach Rakeln		2	3	2	0	2	2	1	2	0										
	Fehler nach soft bake		4	4	3	4	2	3	2	3	1										
	Fehler nach UV		4	4	3	4	2	3	2	3	1										

Abbildung 32: Prüfmatrix FR4 für Samples 19-27



Die besten Aushärteparameter ergaben sich dadurch bei:

- Einer „soft bake“ Zeit von 15 Minuten bei 90 °C.
- Einer „I-line UV exposure“ von 1000 mJ/cm<sup>2</sup>.
- Einer „post exposure bake“ Zeit von 2 Minuten bei 90 °C.
- Einer „final cure“ Zeit von 30 Minuten bei 145 °C.

### 5.2.3 Gitterschnitt an Polyimid/Kupfer

Untersucht wurde die Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung (Plasma) von der Intensität sowie von der Beständigkeit der Plasmabehandlung über die Zeit. Bereits unbehandelte Polyimidproben erreichten eine Klassifizierung von 1 bis 2 nach DIN EN ISO 2409 [38]. Längere Belichtungszeiten (höhere Intensität) verschlechterten diese bis hin zur Klassifizierung 4. Durch die Plasmabehandlung konnte eine Klassifizierung von 0 erreicht werden. Die Beständigkeit dieser konnte mindestens 264 Stunden bzw. 11 Tage aufrecht erhalten werden bevor sie bedruckt wurden. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7: Gitterschnitt Ergebnisse an Polyimid/BOTTOM CLAD**

Material	Vorbehandlung	UV [mJ/cm <sup>2</sup> ]	PEB/FC	Klassifizierung
PI	keine	1000	2/30	1/2
PI	Plasma(0h)	1000	2/30	0
PI	Plasma(120h)	1000	2/30	0
PI	Plasma(144h)	1000	2/30	0
PI	Plasma(264h)	1000	2/30	0
PI	Plasma(0h)	2000	2/30	1
PI	Plasma(0h)	3000	2/30	2

## 5.3 CORE Schicht

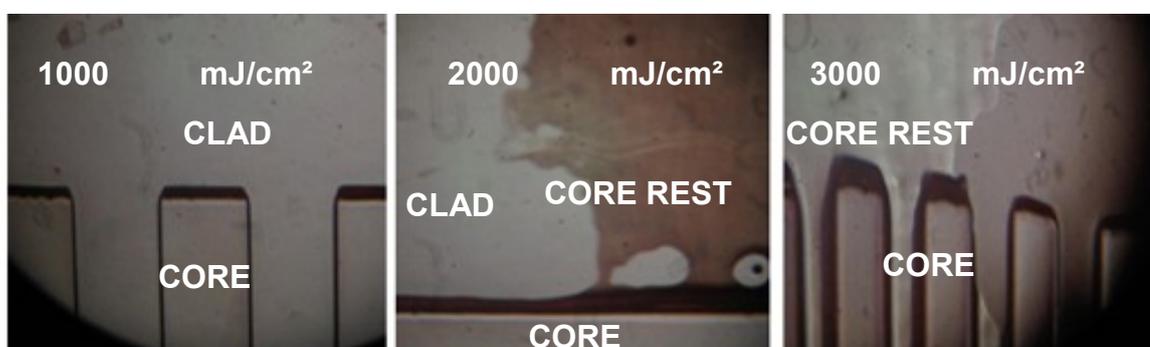
### 5.3.1 Einfluss der CLAD Belichtungsintensität auf den CORE

Untersucht wurde die Abhängigkeit der Belichtungsintensität der BOTTOM CLAD Schicht auf den Entwicklungsschritt des CORE Materials. Eine Übersicht der einzelnen Samples ist in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8: CLAD Belichtungsintensität auf Developer Prozess**

Sample	SB	UV	PEB/FC	SB	UV	DEV	PEB/FC
	[min]	[mJ/cm <sup>2</sup> ]	[ ]	[min]	[mJ/cm <sup>2</sup> ]	[min]	[ ]
	<b>CLAD</b>			<b>CORE</b>			
1	15	1000	2/30	30	500	2	10/60
2	15	1000	2/30	30	750	2	10/60
3	15	2000	2/30	30	500	2	10/60
4	15	2000	2/30	30	750	2	10/60
5	15	3000	2/30	30	500	2	10/60
6	15	3000	2/30	30	750	2	10/60

Hierbei wird ersichtlich, dass sich mit steigender UV Belichtungsintensität der BOTTOM CLAD Schicht deutlich schlechtere Ergebnisse im Entwicklungsschritt des CORE (mit 500 mJ/cm<sup>2</sup> und 750 mJ/cm<sup>2</sup>) ergaben. Dies äußerte sich vorwiegend durch nicht entfernte Reste unbelichteten CORE Materials. Auch längere Entwicklungszeiten konnten die CORE RESTE nicht entfernen.



**Abbildung 34: Lichtmikroskopische Aufnahme CORE RESTE auf BOTTOM CLAD**

### 5.3.2 Standard-Film Belichtung

Für die Standard-Filmbelichtung wurden die Verarbeitungsparameter seitens des Herstellers in nachfolgender Prüfmatrix (siehe Abbildung 35) erweitert. Die Standardherstellparameter sind:

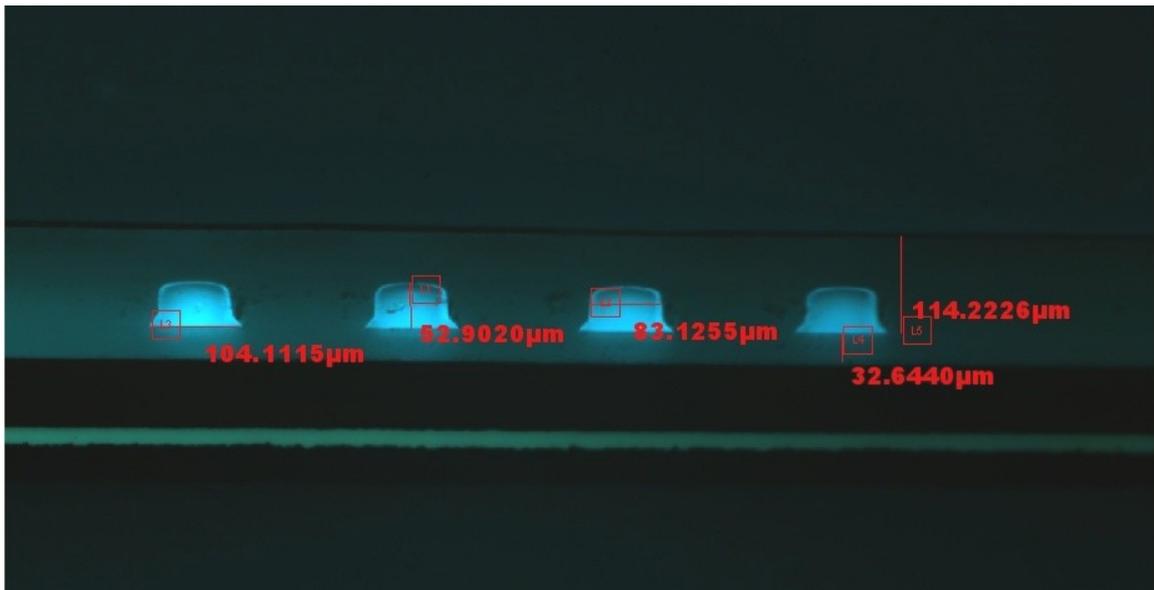
- Eine „soft bake“ Zeit von 30 Minuten bei 90 °C.
- Eine „I-line UV exposure“ von 500 mJ/cm<sup>2</sup>.
- Eine „post exposure bake“ Zeit von 10 Minuten bei 90 °C.
- Eine „final cure“ Zeit von 60 Minuten bei 145 °C.

Sample matrix:														
Process:	CORE UV-FILM													
Substrate:	PI													
Material:	LightLink XP-6701A													
process step	parameter		Sample #											
	CORE	Sample	63	66	64	50	68	60	76	49	70	69	71	72
	fix	var	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Soft bake	T = 90°C	t (min)	30											
I-Line UV exposure	λ = 365 nm	d (mJ/cm <sup>2</sup> )	500				600				750			
Post exposure bake	T = 90°C	t (min)	2	4	7	10	2	4	7	10	2	4	7	10
Water rinse	T = 21°C	t (min)	1											
Development	T = 21°C	t (min)	2											
final cure	T = 145°C	t (min)	60											

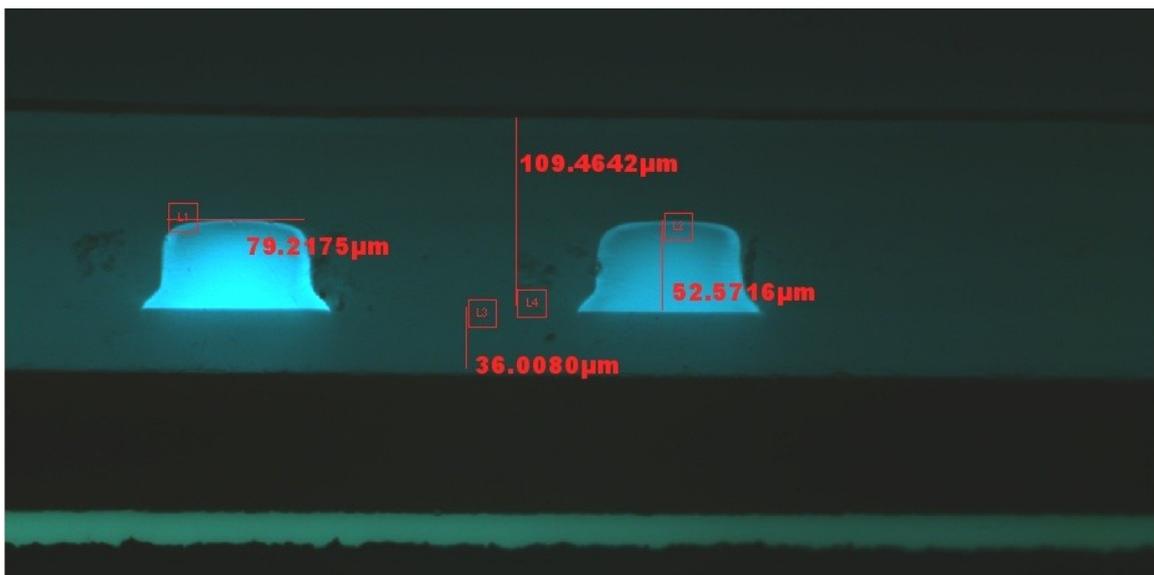
**Abbildung 35: Prüfmatrix der Standard-Film Belichtung**

Untersucht wurde dabei der Einfluss der Belichtungsintensität sowie der „post exposure bake“ Zeit auf die Querschnittsgeometrie der Wellenleiterstruktur. Dabei wurden die Belichtungsintensitäten nach oben hin erweitert. Zu geringe Belichtungsintensitäten führten immer wieder zu Haftungsproblemen im Laufe des Entwicklungsschrittes, wobei diese im schlimmsten Fall vollständig entfernt wurden. Betreffend die Querschnittsform in Abhängigkeit der Belichtungsintensität konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen 500 mJ/cm<sup>2</sup> bis 750 mJ/cm<sup>2</sup> beobachtet werden. Diese entspricht jener in Abbildung 36 und Abbildung 37 bei einer Schichtdicke des CORE Materials von ca. 50 µm und einer Wellenleiter Breite von ca. 70 µm an der Oberseite und 100 µm an der Basis. Auffallend dabei ist jedoch der immer vorhandene Fuß an beiden Seiten der Wellenleiterbasis. Dieser lässt sich einerseits durch eine schlechte Kollinearität des Lichtes erklären, wodurch das Licht nicht im rechten Winkel zur

Oberfläche einfällt. Andererseits kann es durch Reflexionen und Streuung am Polyimid bzw. am Kupfer auf der Rückseite der Probe zur Überbelichtung besonders in oberflächennahen Zonen, bezogen auf das Polyimid, kommen. Ein weiterer Erklärungsversuch über eine Beugung am Einfachspalt/Doppelspalt und anschließender konstruktiven Überlagerung der Lichtwellen erscheint aufgrund der Abmessungen der Spaltbreite und der Wellenlänge des Lichtes von 300 nm – 450 nm wenig sinnvoll.



**Abbildung 36: Schliffbild (10-fach) 50 µm Wellenleiter mit 200 µm Abstand bei 500 mJ/cm<sup>2</sup> und 10 Minuten „post exposure bake“ Zeit**

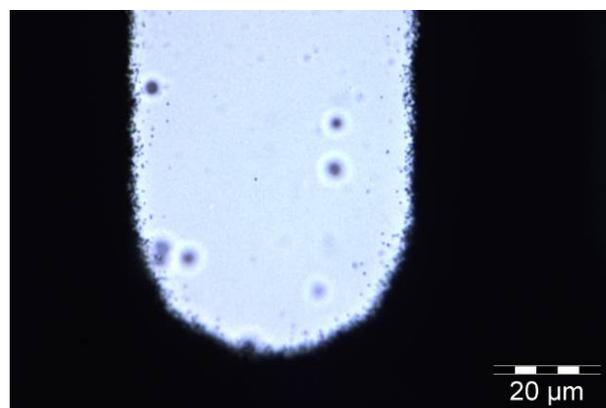


**Abbildung 37: Schliffbild (20-fach) 50 µm Wellenleiter mit 200 µm Abstand bei 500 mJ/cm<sup>2</sup> und 10 Minuten „post exposure bake“ Zeit**

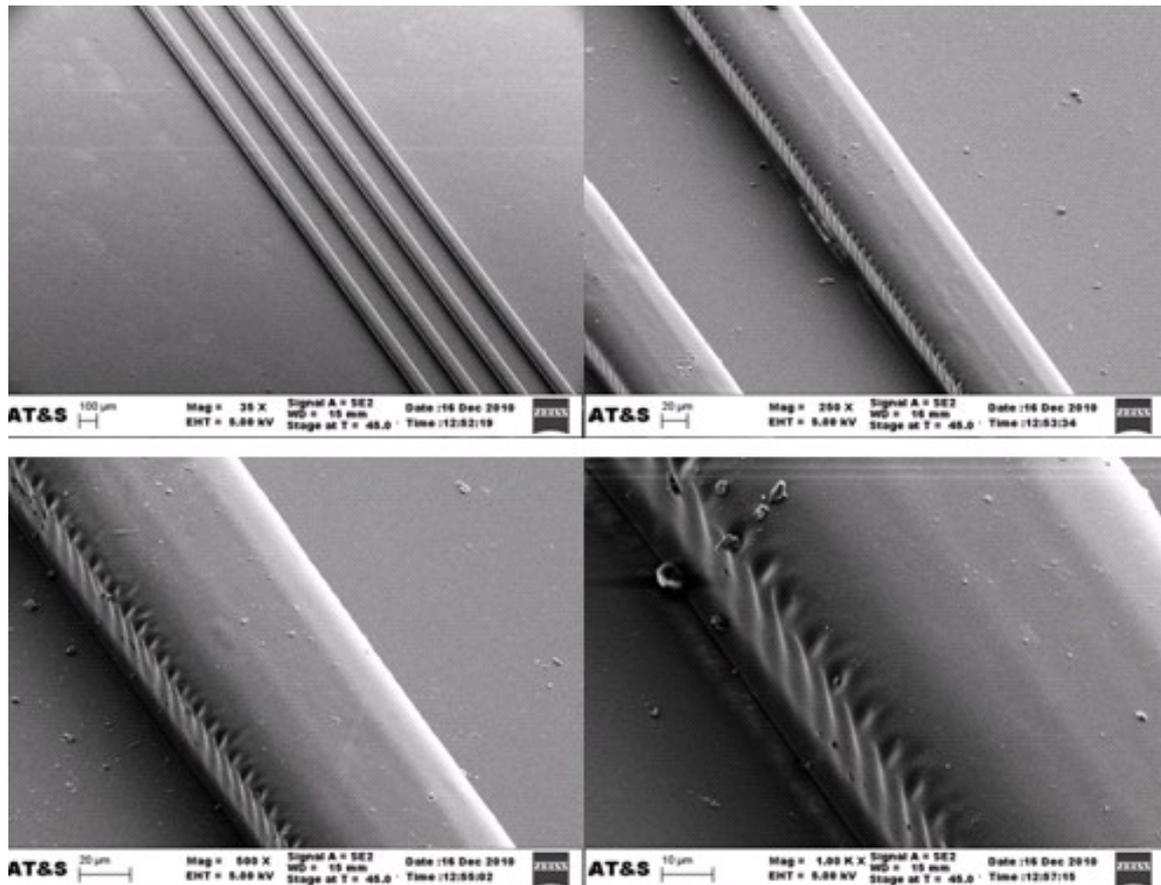
Weiteres wurde die Abhängigkeit der „post exposure bake“ Zeit auf die Querschnittsgeometrie in Anlehnung an die Verkürzung dieser bei der CLAD Schicht untersucht. Eine qualitative Aussage über den Einfluss langer bzw. kurzer „post exposure bake“ Zeiten gestaltet sich insofern als schwierig, da bereits 2 Minuten zur vollständigen Vernetzung ausreichen und es zu keinerlei Veränderung bezogen auf die Querschnittsform durch Erhöhung bis hin zur empfohlenen Zeit kommt. Um jedoch mögliche Haftungsprobleme zu vermeiden, wurde diese bei 10 Minuten belassen.

Ein weiterer wesentlicher Punkt der optischen Begutachtung der Wellenleiterstruktur stellt dessen Oberfläche dar. Diese beeinflusst die Qualität der Wellenleiter bezüglich des optischen Verlustes deutlich stärker als die Querschnittsform. In Abbildung 39 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Standard-Film belichteten Wellenleiter dargestellt, beginnend bei einer Vergrößerung von 35x bis hin zu 1000x. Die Oberfläche des Wellenleiters erscheint dabei glatt und ohne größere Oberflächenfehler. Problematischer ist jedoch die riefenartige Struktur an den beiden seitlichen Flanken. Diese Fehlstellen können sehr wohl zum Auskoppeln des Lichtes aus dem CORE führen und somit zu schlechteren Werten beim optischen Verlustes, einer geringeren Bandbreite oder einer reduzierten Bitfehlerhäufigkeit (BER = „bit error rate“) führen.

Die Ursache dafür liegt in der Qualität der geplotteten Fotomaske (vgl. Abbildung 18). Diese zeigt (siehe Abbildung 38) aufgrund der geringen Auflösung ausgefranste Ränder.



**Abbildung 38: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiterzuges der Photomaske eines Standard-Film**



**Abbildung 39: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bzw. Wellenleiterbündel bei Belichtung über einen Standard-Film bei a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung bei 500 mJ/cm<sup>2</sup> und 10 Minuten „post exposure bake“ Zeit**

Die Standard-Film Belichtung stellt wohl die einfachste Strukturierungsmethode dar, bringt jedoch viele Nachteile mit sich. Hauptproblem dieser Methode stellt die Positionierung bei vollständigem Kontakt mit der Oberfläche über die gesamte Wellenleiterlänge dar. Bereits kleinste Abhebungen dieser führten zu erheblichen Verbreiterungen des Querschnitts. Die Anbringung dieser über eine Quarzglasscheibe und einer darüber liegenden Vakuumfolie verbesserte dies, führte aber nicht zu einer Verbesserung in der Reproduzierbarkeit des Verfahrens. Die Beibehaltung einer konstanten Größe des Querschnittes muss aber gewährleistet werden. Größere Abmessungen könnten zu Verlusten bei der Einkoppelung des Lichtes in die ca. 100 µm kreisrunde Öffnung an der Photodiode führen.

### 5.3.3 High-Resolution-Film Belichtung

In Bezug auf die in Abschnitt 5.3.2 gewonnenen Erkenntnisse und unter Verwendung eines deutlich höher aufgelösten Fotofilms konnten keine markanten Unterschiede in der Querschnittsform erzielt werden. Diese entspricht jener der Standard-Film strukturierten Wellenleiter mit abgerundeten Ecken an der Oberseite und den beiden Füßen rechts und links an der Wellenleiterbasis. Die Breite konnte von ca. 100  $\mu\text{m}$  auf ca. 75  $\mu\text{m}$  bei einer Höhe von 50  $\mu\text{m}$  reduziert werden. Ein Abbild der Wellenleiterquerschnitte ist in Abbildung 40 und Abbildung 41 zu sehen.

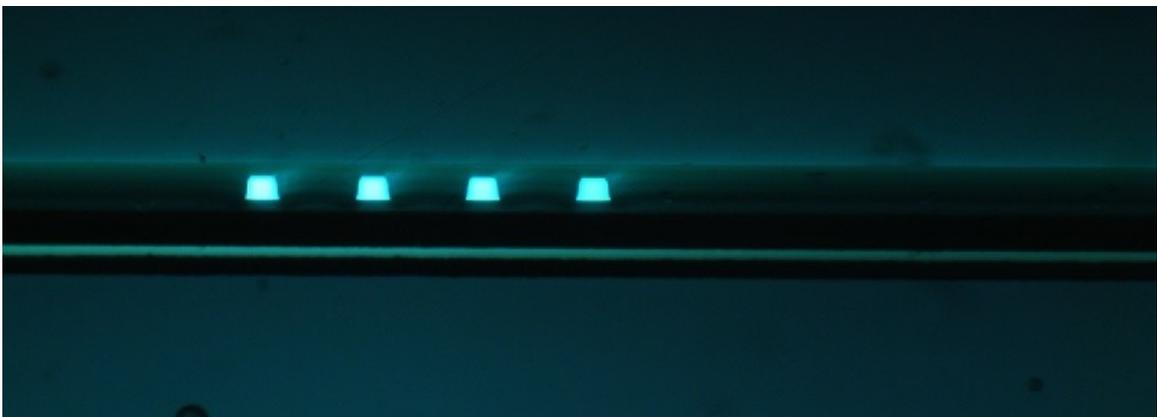


Abbildung 40: Schlichtbild (5-fach) 50  $\mu\text{m}$  Wellenleiter mit 200  $\mu\text{m}$  Abstand bei 500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$

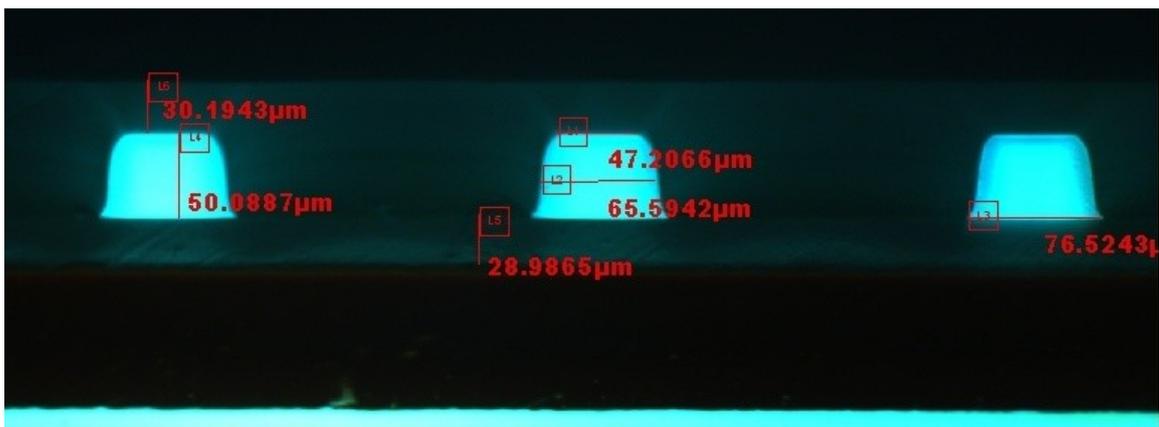
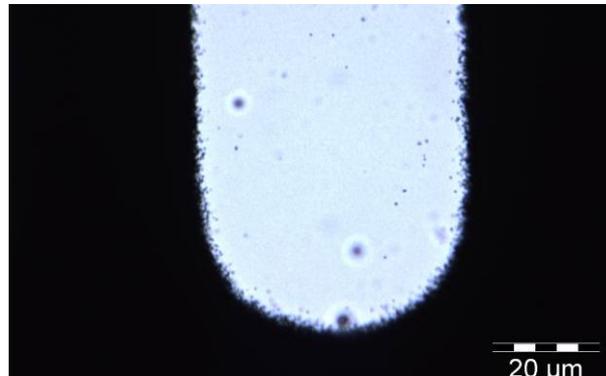


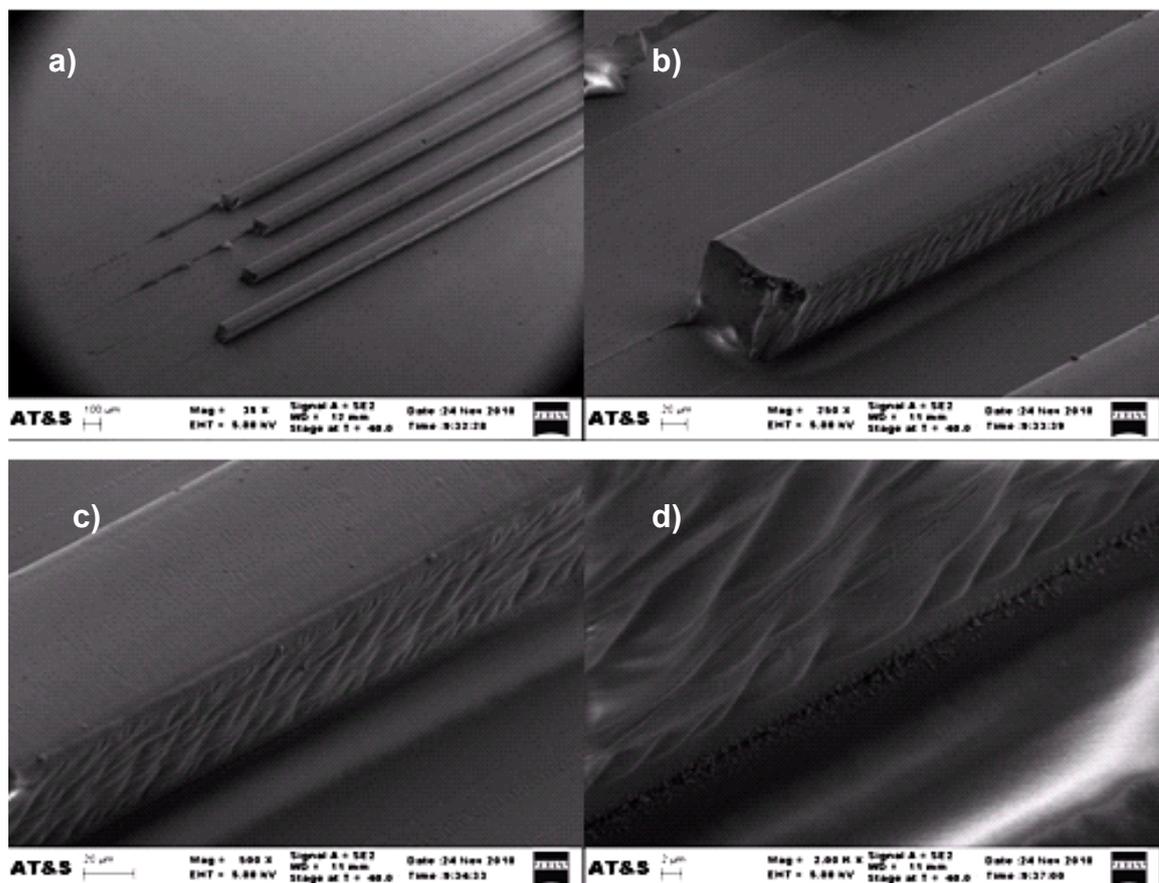
Abbildung 41: Schlichtbild (20-fach) 50  $\mu\text{m}$  Wellenleiter mit 200  $\mu\text{m}$  Abstand bei 500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$

Ein ähnliches Bild zeigt auch die Oberfläche des Wellenleiters (siehe Abbildung 43). Diese zeigt wie zuvor unter der Verwendung des Standard-Films Riefen,

jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt. Die Ursache liegt wiederum in der Qualität des Fotofilms (siehe Abbildung 42).



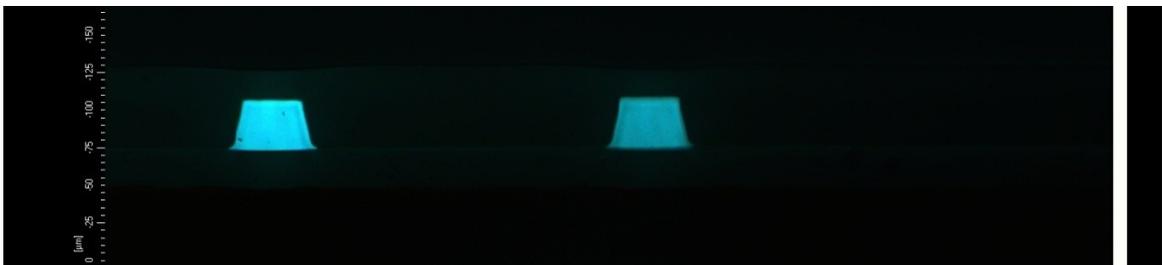
**Abbildung 42: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiterzuges der Photomaske eines High-Resolution-Films**



**Abbildung 43: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bzw. Wellenleiterbündel bei Belichtung über einen High-Resolution-Film mit  $500 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung bei  $500 \text{ mJ/cm}^2$**

### 5.3.4 LDI („Laser-direct-Imaging“)

Über das „Laser-direct-Imaging“ Verfahren konnte die Wellenleiterquerschnittsgröße erstmals deutlich reduziert und gleichzeitig eine wünschenswerte beinahe quadratische Geometrie erzielt werden. Die Abmessungen bei einer Belichtungsintensität von  $300 \text{ mJ/cm}^2$  betragen  $40 \text{ }\mu\text{m}$  an der Oberseite und ca.  $55 \text{ }\mu\text{m}$  an der Wellenleiterbasis. Diese Werte können jedoch über die Intensität, welche über die Abrasterungsgeschwindigkeit eingestellt wird, vergrößert sowie verkleinert werden, wobei ab ca.  $100 \text{ mJ/cm}^2$  und weniger Haftungsprobleme auftreten können. Die beiden noch vorhandenen Füße mit einer Breite von jeweils ca.  $5 \text{ }\mu\text{m}$  könnten durch weitere Optimierungsschritte vor allem in der Fokussierung sowie durch eine Optimierung der Flankenkorrektur verbessert oder vermieden werden. Weiteres erfolgte hierbei die Belichtung des Wellenleiterzuges quer zur Wellenleiterrichtung, das heißt, der Wellenleiter wird Scheibe für Scheibe aufgebaut. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 für  $300 \text{ mJ/cm}^2$  dargestellt.



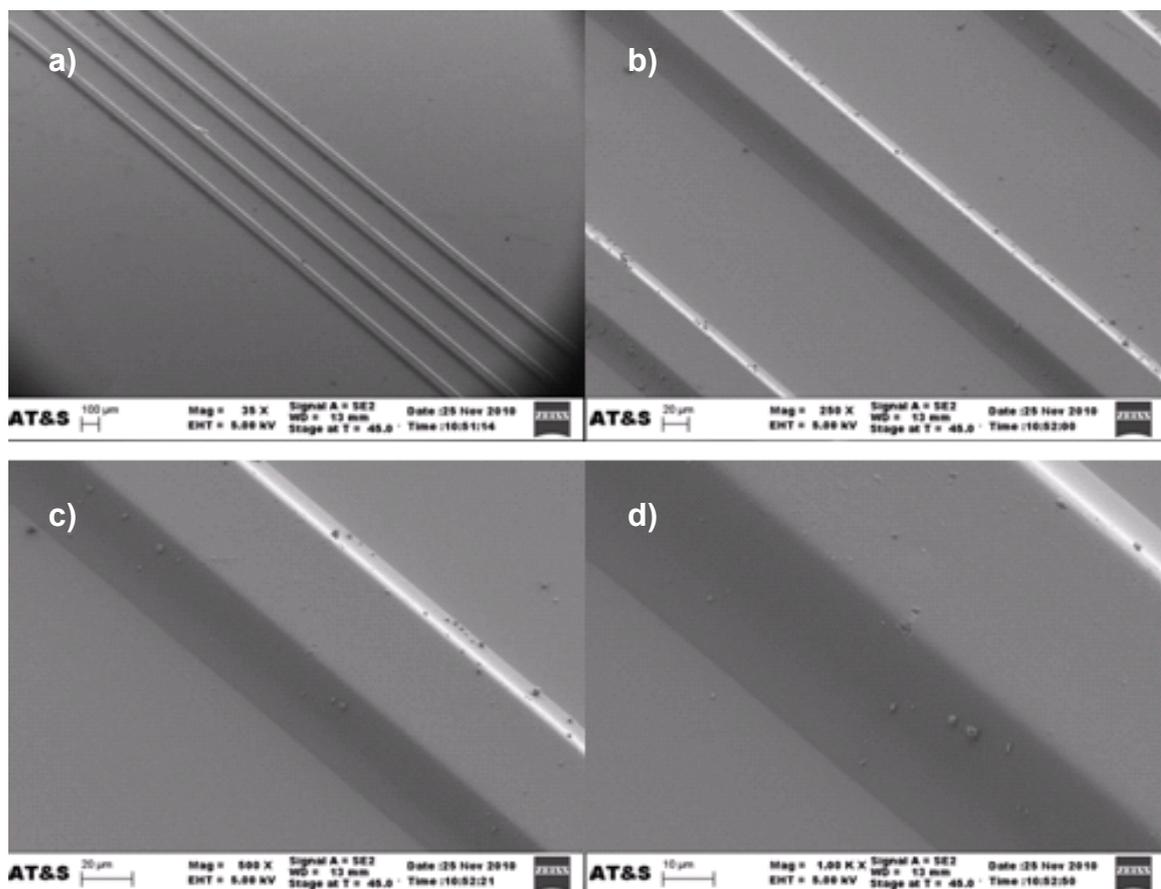
**Abbildung 44: Schlichtbild (20-fach)  $50 \text{ }\mu\text{m}$  Wellenleiter mit  $200 \text{ }\mu\text{m}$  Abstand bei  $300 \text{ mJ/cm}^2$  Belichtungsintensität**



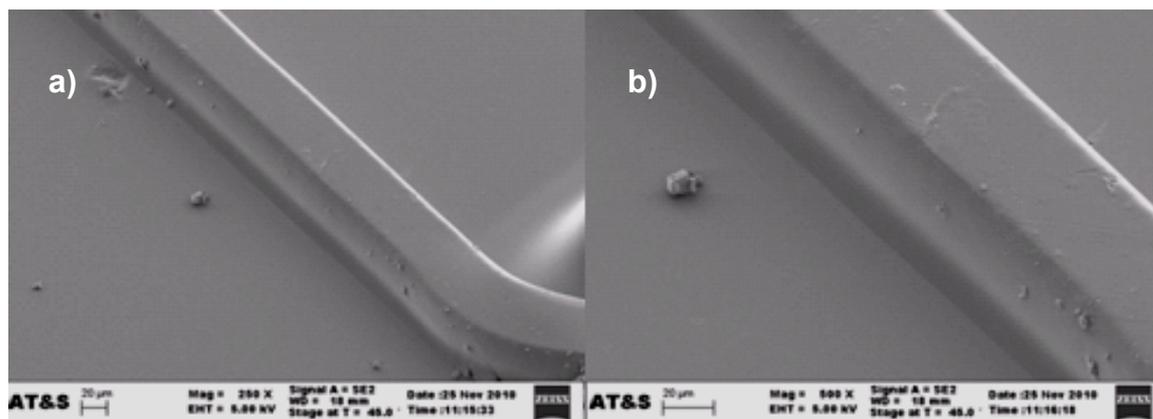
**Abbildung 45: Schlichtbild (10-fach)  $50 \text{ }\mu\text{m}$  Wellenleiter mit  $200 \text{ }\mu\text{m}$  Abstand bei  $300 \text{ mJ/cm}^2$  Belichtungsintensität**

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Oberflächenstruktur der Wellenleiterzüge gelegt, wobei sowohl Linien als auch Kurven mit unterschiedlichen Belichtungsintensitäten produziert worden sind.

In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind Kurven und Linien bei  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  Belichtungsintensität dargestellt. Die längere Belichtung führt lediglich dazu, dass es zu einer Verbreiterung bei gleichzeitiger Abflachung der seitlichen Flanken kommt. Die Oberfläche erscheint dabei glatt und ohne Strukturierungsfehler sowohl bei Geraden als auch im Falle der Kurven.

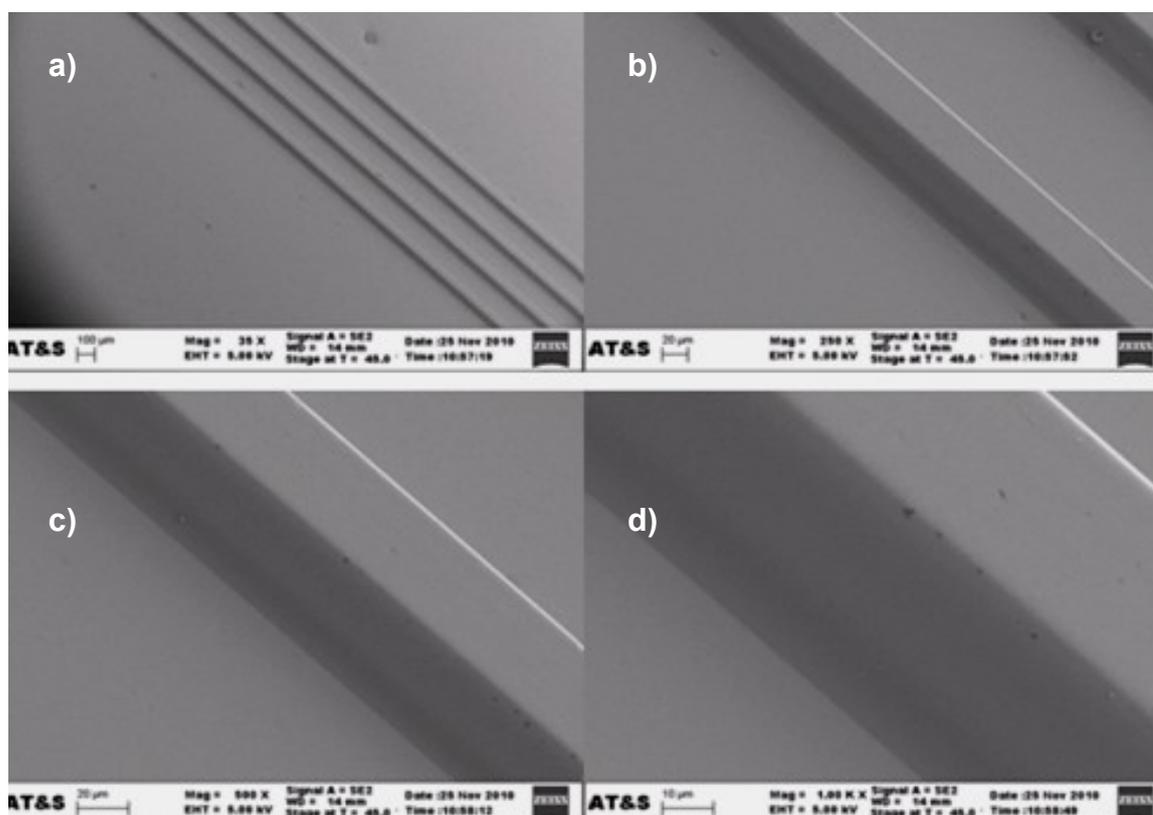


**Abbildung 46: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bei Belichtung mittels LDI mit  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**

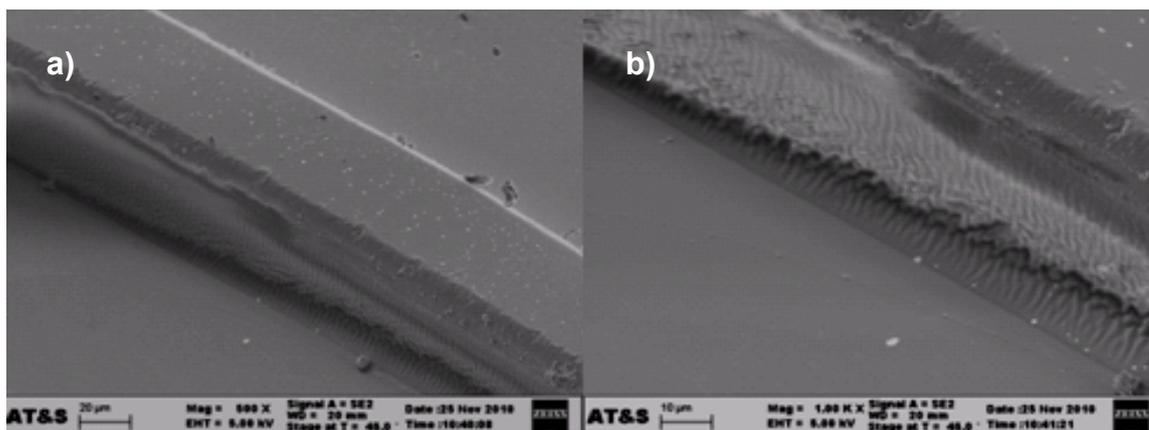


**Abbildung 47: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Wellenleiterstruktur bei Belichtung mittels LDI mit  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 500-facher, b) 1000-facher Vergrößerung**

Ab einer Belichtungsintensität von  $300 \text{ mJ/cm}^2$  treten Oberflächendefekte in Form von Rillen und Riefen an den Seitenflanken der Kurven auf. Die Linien können weiterhin problemlos erzeugt werden.

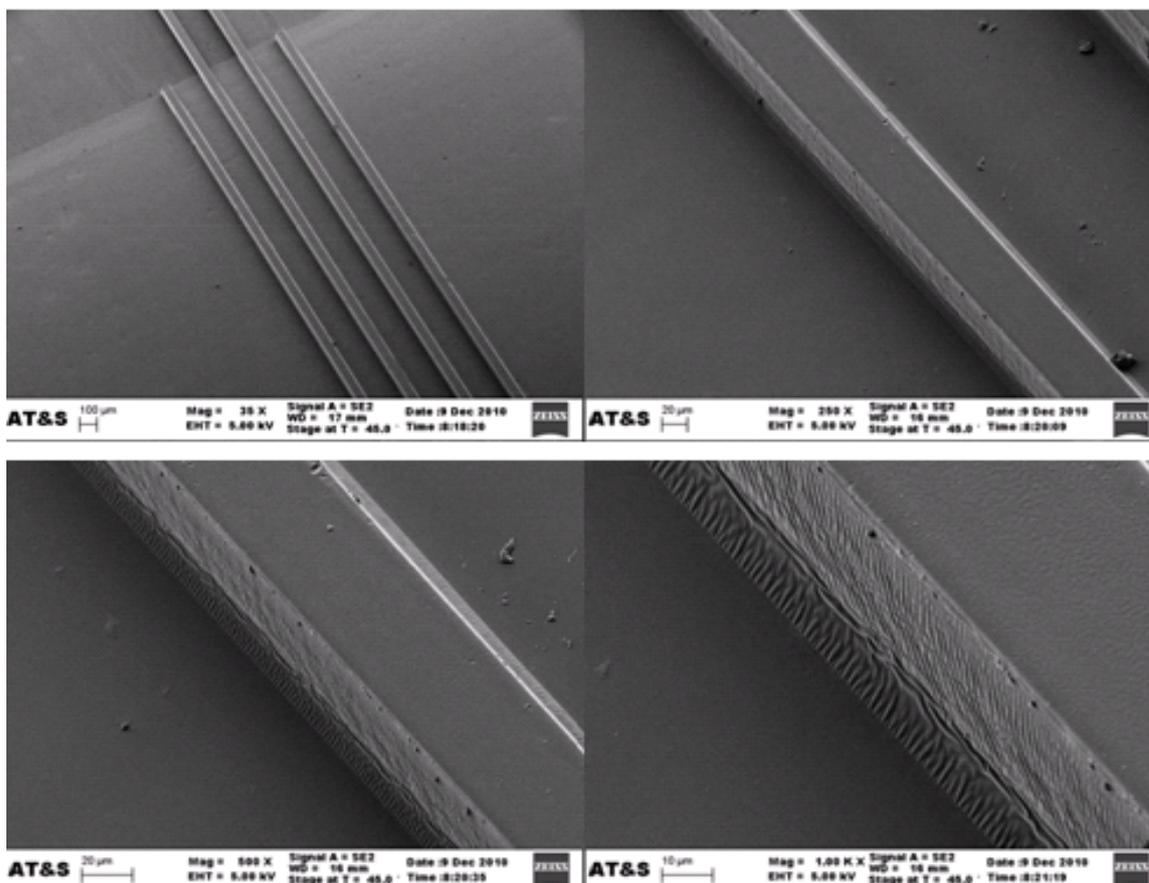


**Abbildung 48: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bei Belichtung mittels LDI mit  $300 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**



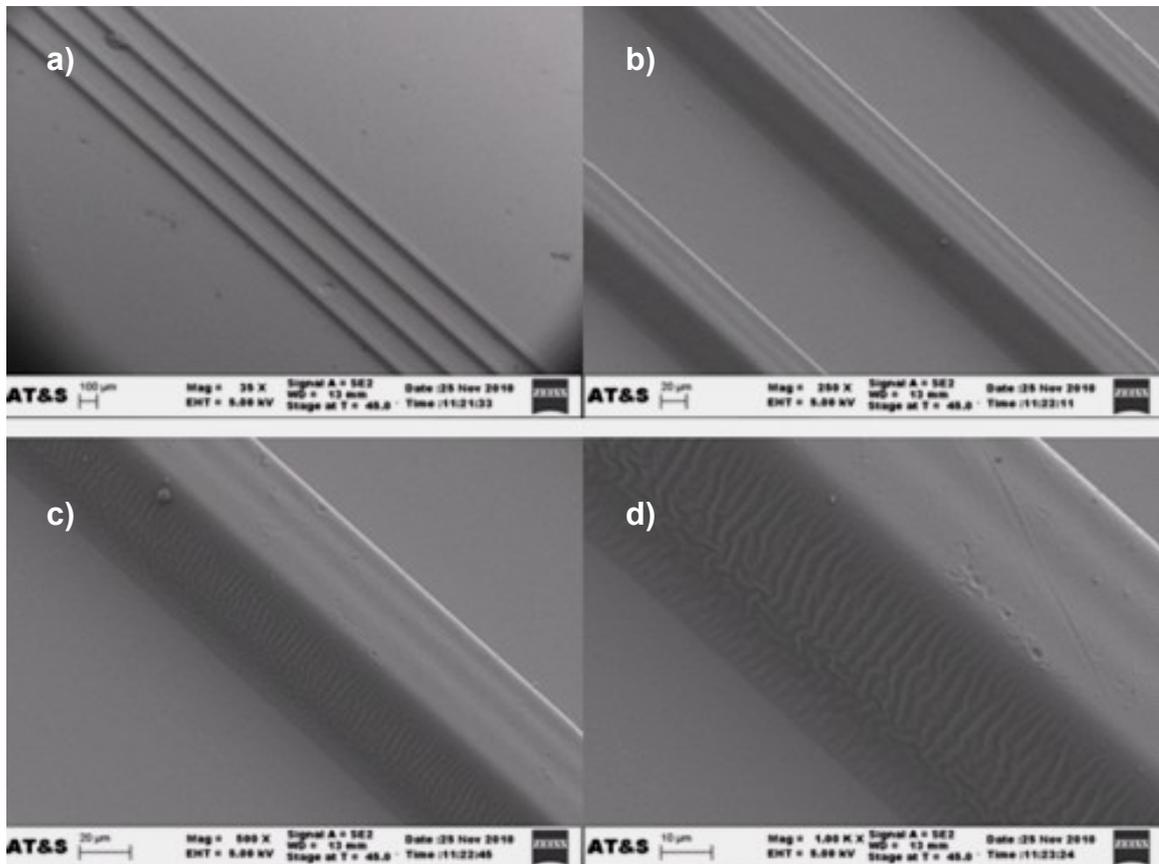
**Abbildung 49: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Wellenleiterstruktur bei Belichtung mittels LDI mit  $300 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 500-facher, b) 1000-facher Vergrößerung**

Im Falle einer Belichtung entlang der Wellenleiterzüge konnten deutlich schärfere und steiler abfallende Flanken erzielt werden.

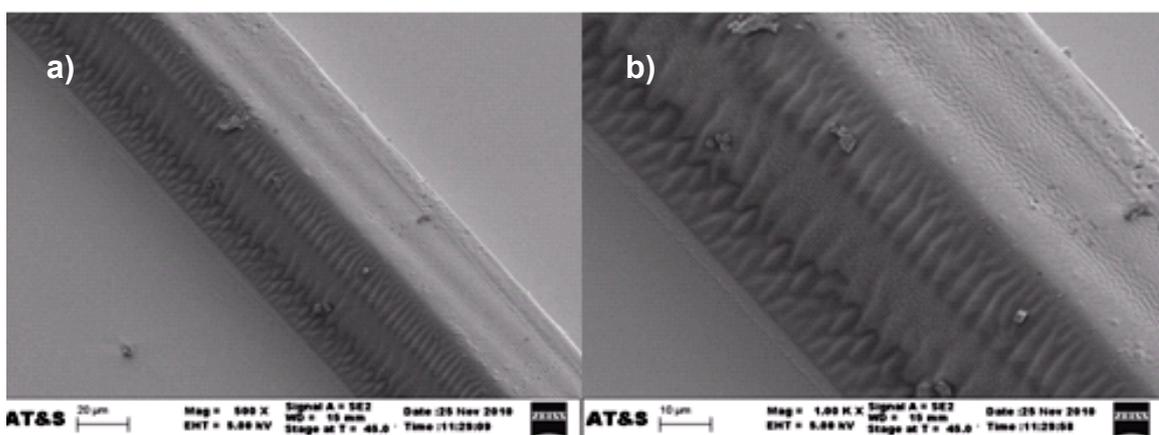


**Abbildung 50: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bei Belichtung mittels LDI mit  $300 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**

Ab einer Belichtungsintensität von  $100 \text{ mJ/cm}^2$  treten Strukturierungsfehler bei allen Wellenleiterzügen auf. Die geringe Intensität reicht in diesem Falle nicht mehr für eine einwandfreie und gleichmäßige Vernetzung des Polymers aus.



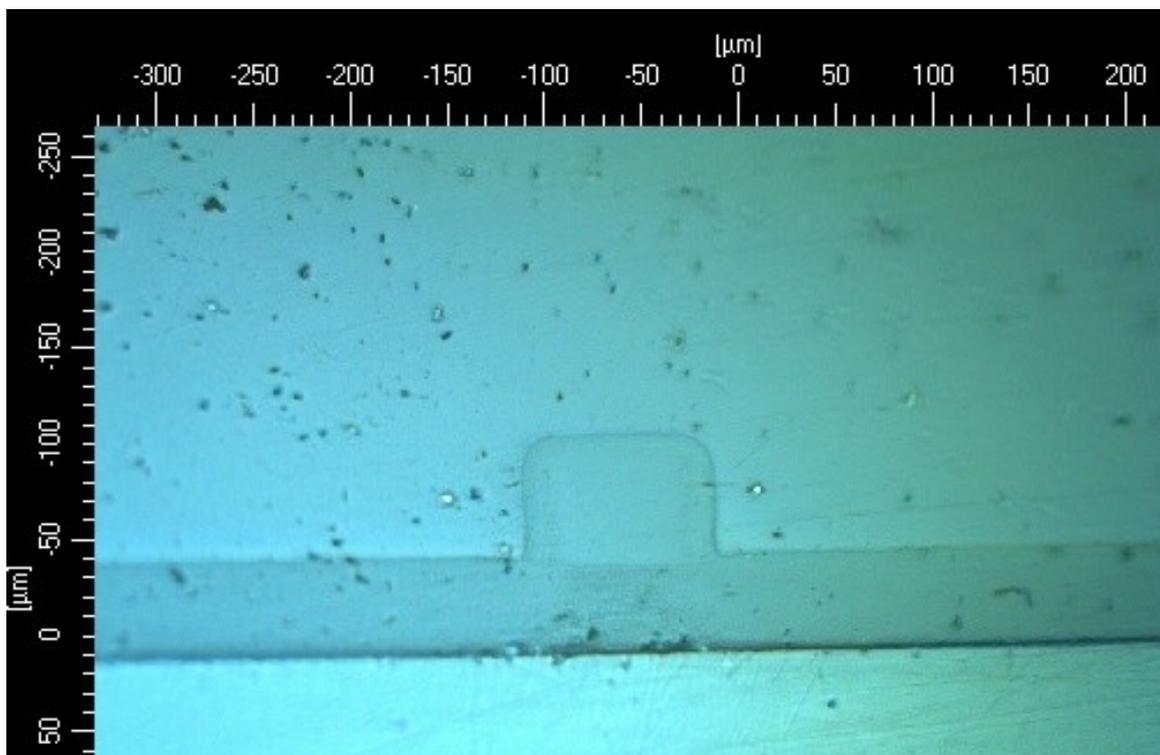
**Abbildung 51: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiters bei Belichtung mittels LDI mit  $100 \text{ mJ/cm}^2$  in a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**



**Abbildung 52: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Wellenleiterstruktur bei Belichtung mittels LDI mit  $100 \text{ mJ/cm}^2$  Belichtung in a) 500-facher, b) 1000-facher Vergrößerung**

### 5.3.5 Laser Belichtung

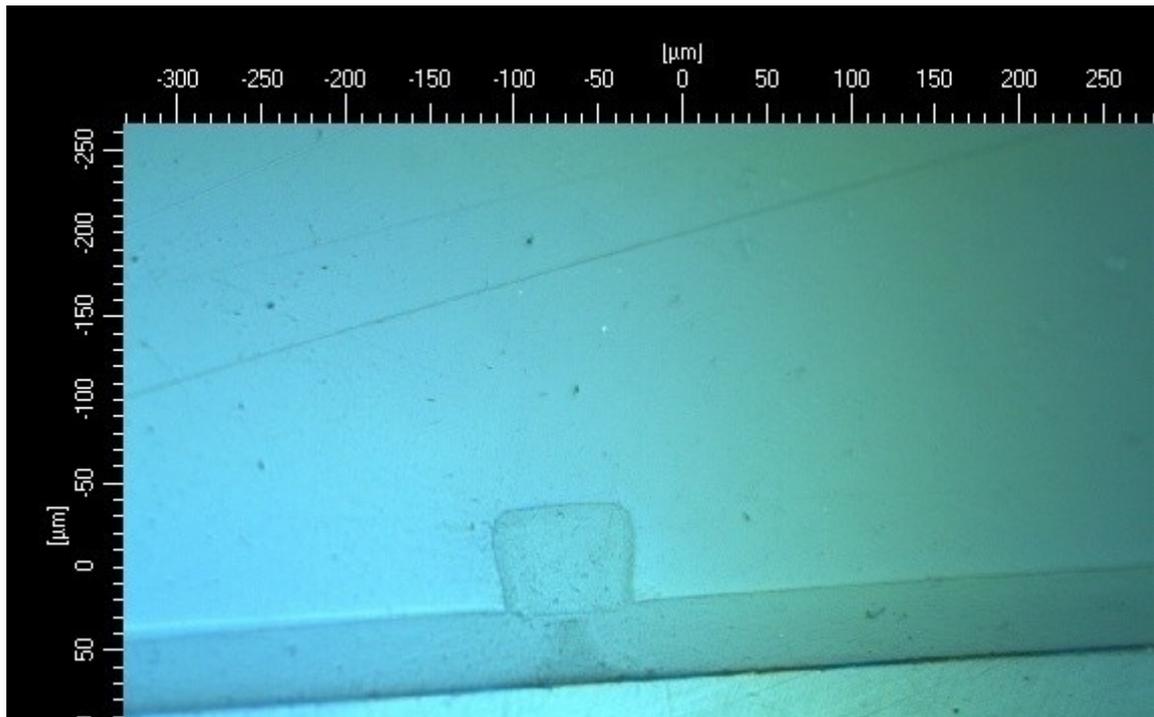
Bei der UV-Laser Belichtung konnte jene Wellenleiterquerschnittsform, die der gewünschten quadratischen Form von  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  entspricht, beinahe erzielt werden. Die gewünschte Breite kann über die Laserleistung in Kombination mit der CNC-Vorschubgeschwindigkeit eingestellt werden, wobei geringe Leistungen (70 bis 75 % der maximalen Leistung) niedrige Geschwindigkeiten (500 mm/min und weniger) erfordern. Ab einer Leistung von 80% muss die Geschwindigkeit auf mindestens 1000 mm/min eingestellt werden. Die Ursache liegt in der horizontalen Verschiebung der benötigten Intensität der Gauß Verteilung des Laserstrahls. Eine lichtmikroskopische Abbildung der Querschnittsform ist in Abbildung 53 für 85 % Laserleistung und 2000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit zu sehen. Der dargestellte Wellenleiter weist eine beinahe rechteckige Form auf. Durch die Kollinearität des Laserstrahls weisen diese Art von Wellenleiter keine signifikanten Verbreiterung an der Wellenleiterbasis auf, verglichen mit jenen der Filmmaskenbelichtung (siehe Abschnitt Standard-Film Belichtung 5.3.2 und Abschnitt 5.3.3).



**Abbildung 53: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiterquerschnitts bei Belichtung mittels UV-Laser mit 26 A oder 85% Leistung und 2000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit**

Die abgerundeten Flanken an der Oberseite des Wellenleiters können wiederum auf die Intensitätsverteilung des Laserstrahls (Gauß) zurückgeführt werden.

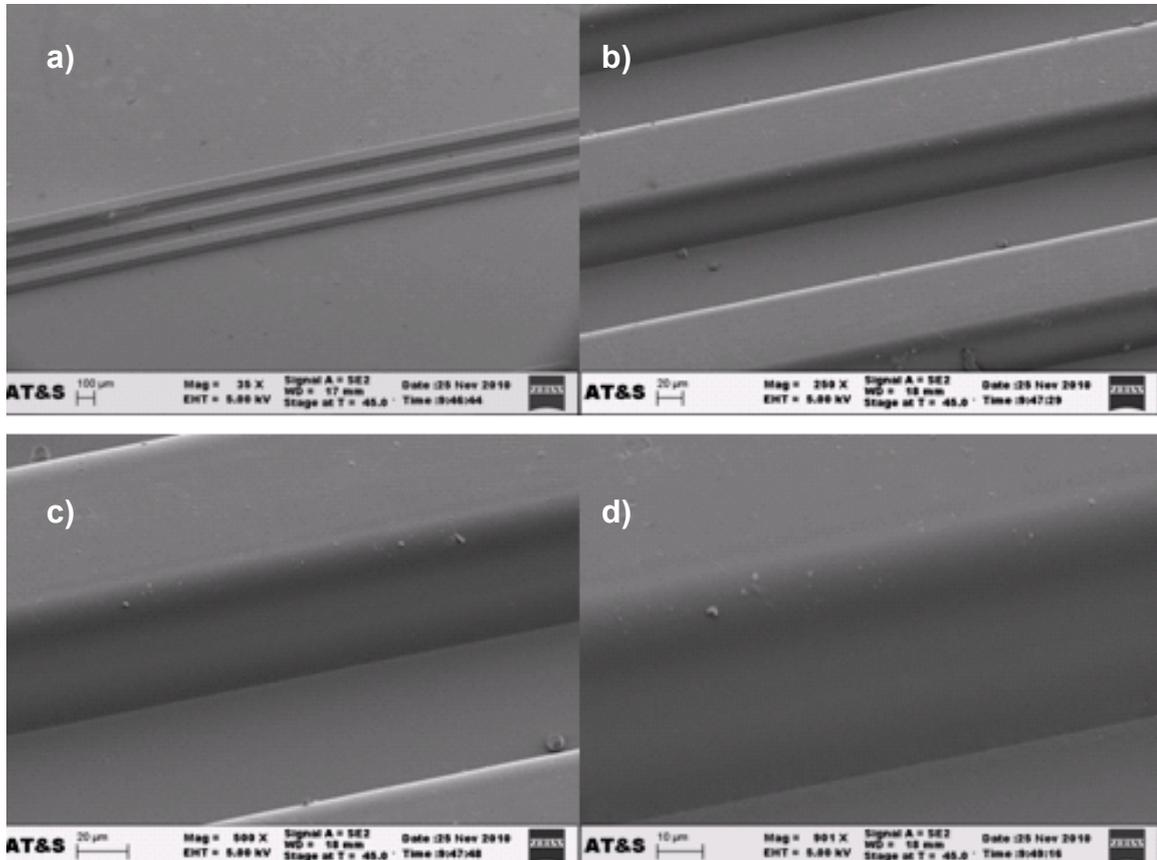
Eine kontinuierliche Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer unzureichenden Belichtung und zu einer Ausbildung eines T-förmigen (siehe Abbildung 54) Wellenleiterquerschnitts (ab ca. 6000 mm/min).



**Abbildung 54: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Wellenleiterquerschnitts bei Belichtung mittels UV-Laser mit 26 A oder 85% Leistung und 6000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit**

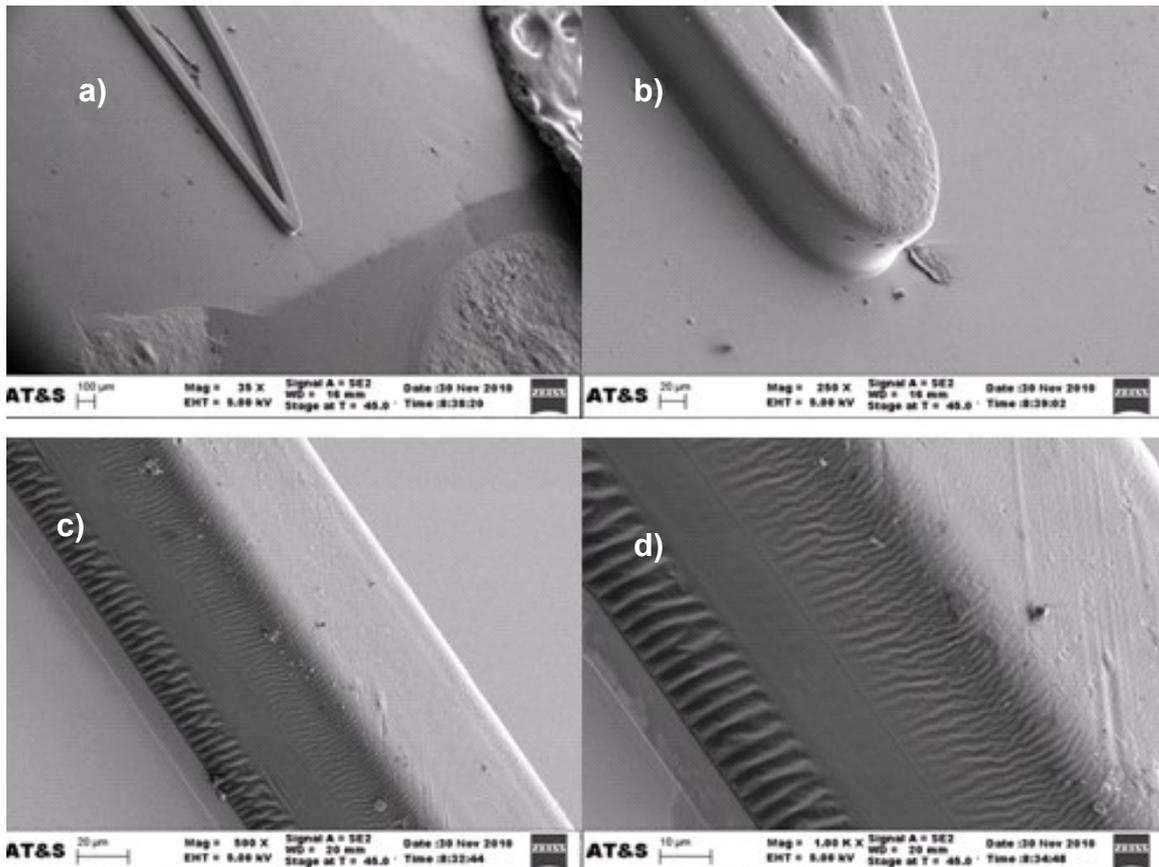
Eine weitere Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit auf 10000 mm/min und gleichbleibender Laserleistung von 85 % bzw. 26 A führt zu einer weiteren Verkleinerung der Wellenleiterbasis, wobei es im schlechtesten Fall zur partiellen bzw. vollständigen Ablösung des Wellenleiters von der BOTTOM CLAD Schicht im Laufe des Entwicklungsschritts bzw. bei der weiteren Verarbeitung kommen kann.

Bezüglich der Oberflächenstruktur konnten keinerlei Fehler im Falle der geradlinigen Wellenleiterzüge beobachtet werden. Diese weisen eine glatte, fast perfekte Oberfläche auf. Eine elektronenrastermikroskopische Aufnahme ist in Abbildung 55 zu sehen.



**Abbildung 55: Rasterelektronenmikroskopische eines Wellenleiters bei Belichtung mittels UV-Laser mit 85% Leistung und 2000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit bei a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**

Problematischer ist die Herstellung von Kurven bei sehr hohen Geschwindigkeiten. Ein Abbild dieser bei einer Laserleistung von 80 % und einer Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm/min ist in Abbildung 56 zu sehen. Diese weisen besonders im Bereich kleinerer Radien Riefen an den Seitenwänden auf. Die Ursache hierfür liegt aber vor allem in der hohen Beschleunigung nach dem Richtungswechsel. Über eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit kann dies vermieden werden, wobei dies gleichzeitig auch zu einer Vergrößerung im Wellenleiterquerschnitt führt.



**Abbildung 56: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Wellenleiterstruktur bei Belichtung mittels UV-Laser mit 80% Leistung und 500 mm/min Vorschubgeschwindigkeit bei a) 35-facher, b) 250-facher, c) 500-facher, d) 1000-facher Vergrößerung**

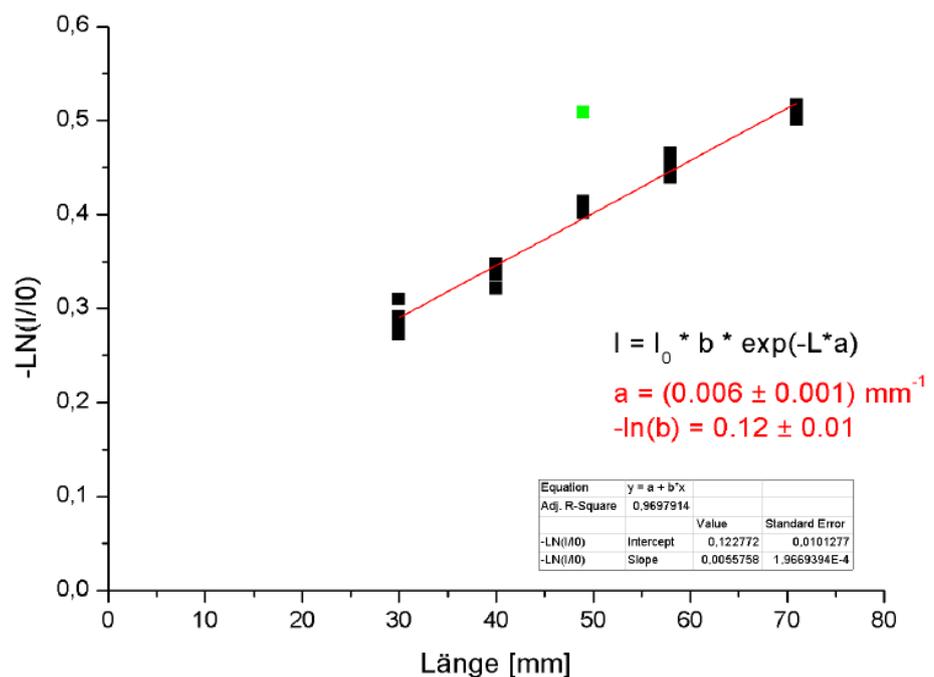
Zusammenfassend konnte mit der UV-Laserbelichtung das gewünschte Ziel eines Wellenleiters mit  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  Querschnittsfläche beinahe erzielt werden. Zusätzlich zeichnet sich dieses Verfahren eine sehr gute Reproduzierbarkeit aus, vor allem in der Wellenleiterquerschnittsbreite unabhängig von der Schichtdicke des CORE Materials. Ohne Verwendung von Fotofilmen und Fotomasken konnten weiters sehr schöne, wenig verunreinigte und fehlerfreie Oberflächen erzeugt werden. Dies ist ein weiterer großer Vorteil gegenüber der Kontaktbelichtung.

## 5.4 Optischer Verlust („Cut-Back“)

Die „Cut-Back“ Messungen wurden im Zeitraum vom 16.02.2011 bis 31.03.2011 von Frau Dr. Nicole Galler am Institut für Physik der Karl-Franzens-Universität Graz durchgeführt.

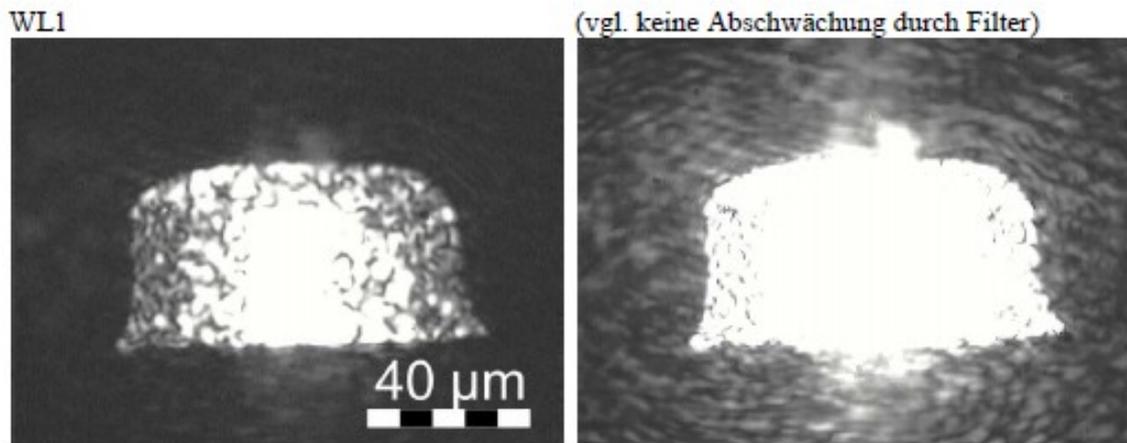
In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 57, Abbildung 59, Abbildung 61 und Abbildung 63) sind die Ergebnisse der „Cut-Back“ Messungen (Abschwächungskoeffizient  $\alpha$  und Dämpfung) für die Belichtungsmethoden Standard-Film, High-Resolution-Film, UV-Laser und Laser-direct-Imaging dargestellt. Für jede dieser Methoden wurden mindestens zwei maximal vier Wellenleiter betrachtet und bezüglich der optischen Dämpfung vermessen. Zusätzlich wurde die Lichtverteilung am Wellenleiterausgang aller betrachteten Wellenleiter optisch festgehalten.

### Standard-Film:



**Abbildung 57: Bestimmung der Dämpfung eines mittels Standard-Film strukturierten Wellenleiters**

Abschwächungskoeffizient ( $\alpha$ ):  $(0.006 \pm 0.001) \text{ mm}^{-1}$   
**Dämpfung:**  $(0.26 \pm 0.04) \text{ dB/cm}$   
 Eingekoppelte Leistung: ca. 88 %



**Abbildung 58: Abbild der Lichtfeldverteilung am Wellenleiter Ausgang eines mittels Standard-Film strukturierten Wellenleiters mit (links) und ohne (rechts) Filter**

Für jene Wellenleiter, welche mit Standard-Film und High-Resolution-Film belichtet wurden, konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die mittels Standard-Film (siehe Abbildung 57, Änderung der Eingangsleistung zur Wellenleiterausgangsleistung in Abhängigkeit von der Wellenleiterlänge) belichteten Wellenleiter erreichten dabei eine Dämpfung von 0.26 dB/cm bei einer Fehlerbreite von 0.04 und jene mittels High-Resolution-Film (siehe Abbildung 59) eine Dämpfung von 0.48 dB/cm bei einer Fehlerbreite von 0.22. Die Fehlerbreite im Falle der High-Resolution-Film Belichtung von 0.22 lässt sich vorwiegend auf mikroskopische Verunreinigungen der Filmmaske, der Quarzglasscheibe oder der Vakuumfolie zurückführen. Die Riefen an den Seitenflanken (vor allem bei jenen der Standard-Film strukturierten Wellenleiter, siehe Abschnitt 5.3.2) scheinen dabei nur eine untergeordnete Rolle zu spielen und führen nur zu sehr geringen Lichtauskopplungen. Abbildung 58 zeigt nur sehr geringe optische Lichtauskopplungen bzw. Streuungseffekte beim Übergang zwischen CLAD und CORE. Die mit dem High-Resolution-Film erzeugten Wellenleiter (siehe Abbildung 60) zeigen ausgeprägte Streuungseffekte durch Oberflächendefekte oder Verunreinigungen. Dies ist auch eine der Ursachen der erhöhten Dämpfung.

High-Resolution-Film:

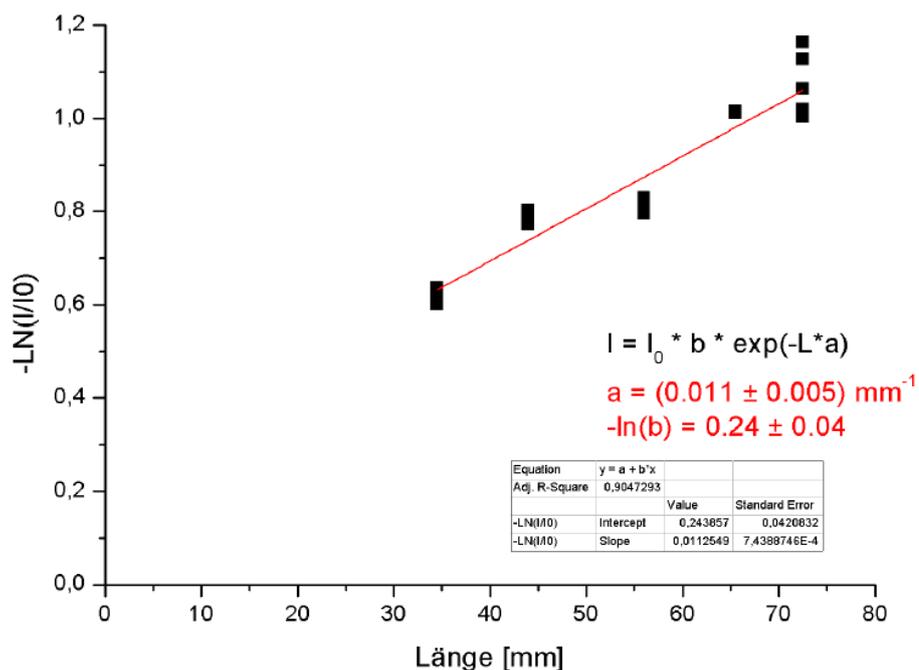


Abbildung 59: Bestimmung der Dämpfung eines mittels High-Resolution-Film strukturierten Wellenleiters

Abschwächungskoeffizient ( $\alpha$ ):  $(0.011 \pm 0.005) \text{ mm}^{-1}$   
**Dämpfung:**  $(0.48 \pm 0.22) \text{ dB/cm}$   
 Einkoppelte Leistung: ca. 80 %

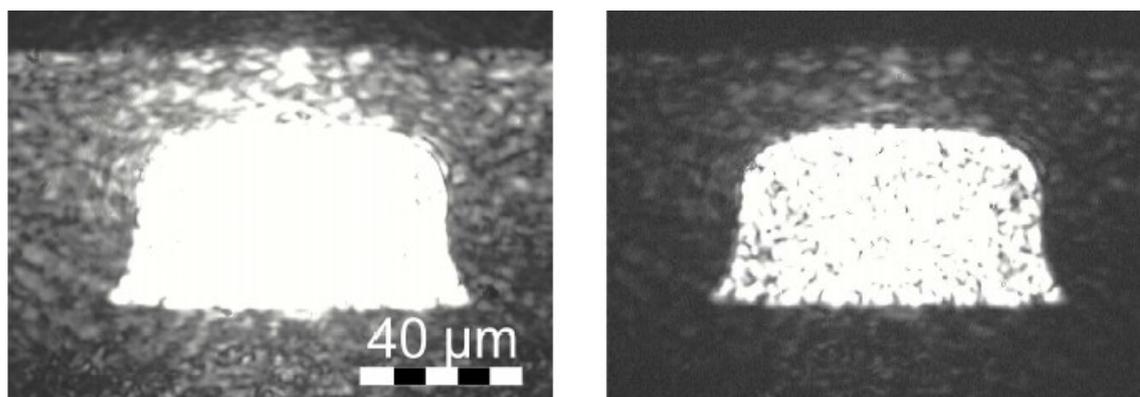
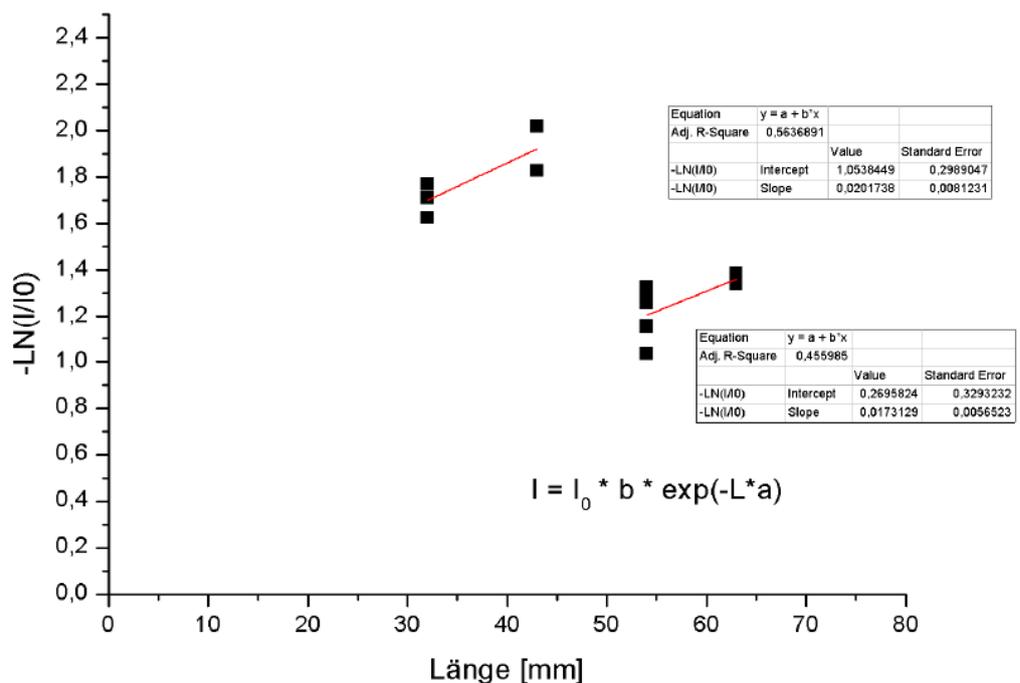


Abbildung 60: Abbild der Lichtfeldverteilung am Wellenleiter Ausgang eines mittels High-Resolution-Film strukturierten Wellenleiters ohne (links) und mit (rechts) Filter

Im Falle der Strukturierung mittels UV-Laser sank während der Versuchsreihe die Leistung (siehe Abbildung 61) am Wellenleiter Ausgang beim Übergang von 54 mm auf 43 mm sehr stark ab. Der Grund für diesen enormen Abfall kann vor allem auf die Probenbehandlung bzw. auf den Schliff zurückgeführt werden. Eine Veränderung des Materials über die Zeit kann aufgrund der zu dieser Messung parallel durchgeführten Arbeiten an Filmmasken und Laser-direct-Imaging strukturierten Proben ausgeschlossen werden. Um dennoch eine ungefähre Einschätzung der Größe der optischen Dämpfung zu erlangen, wurde eine Gerade an alle vier Messpunkte gelegt. Dies ergibt einen Abschwächungskoeffizienten von 0.17 bis 0.2 mm<sup>-1</sup> und somit eine Dämpfung von ca. 0.7 bis 0.9 dB/cm.

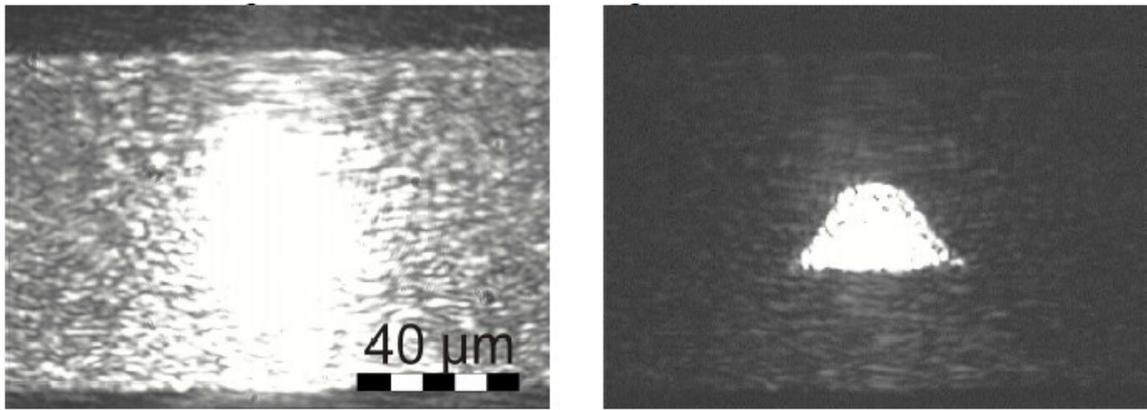
**UV-Laser:**



**Abbildung 61: Bestimmung der Dämpfung eines mittels UV-Laser strukturierten Wellenleiters**

Abschwächungskoeffizient ( $\alpha$ ):  $(0.17 \pm 0.005) \text{ mm}^{-1}$

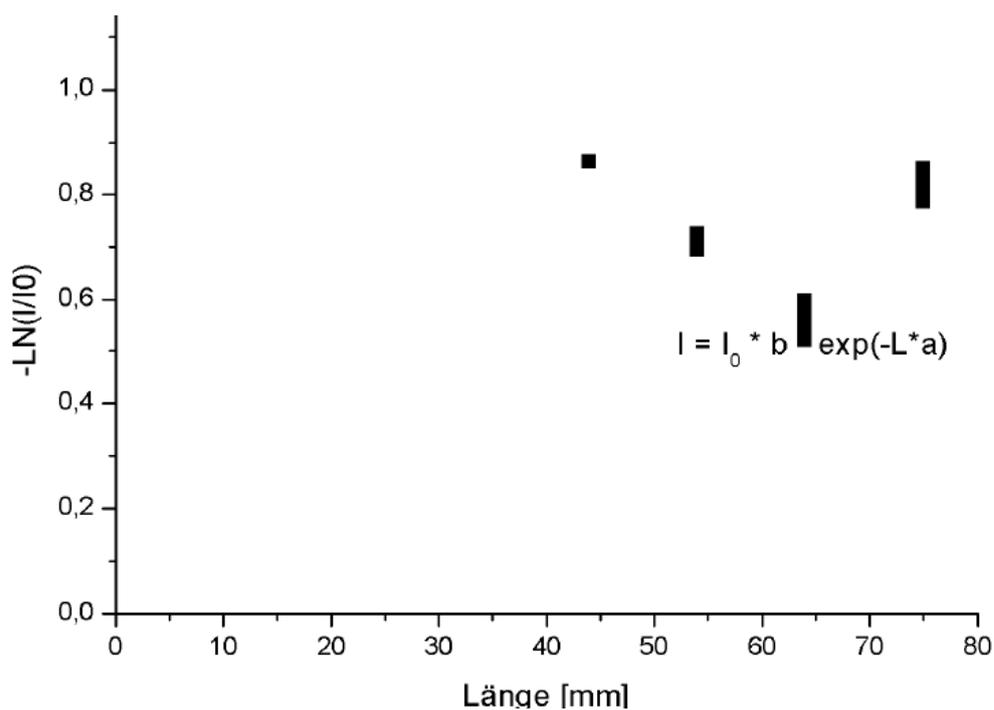
Dämpfung:  $(0.7 \pm 0.2) \text{ dB/cm}$



**Abbildung 62: Abbild der Lichtfeldverteilung am Wellenleiter Ausgang eines mittels UV-Laser strukturierten Wellenleiters ohne (links) und mit (rechts) Filter**

Im Falle der Laser-direct-Imaging strukturierten Proben (siehe Abbildung 63) konnte kein sinnvoller Dämpfungswert ermittelt werden. Die Proben zeigten unter anderem eine sehr starke Streuung der Werte, vor allem auch durch Abnahme der Leistung am Wellenleiter Ausgang (größere Werte von  $-LN(I/I_0)$ ). Weiteres wiesen die Proben eine sehr starke Lichtstreuung (siehe Abbildung 64) auf. Umso größer die Streuung, umso mehr leuchtet der Wellenleiter auf. Im Laufe der Untersuchungen hat sich dieses Streuungszentrum von der Mitte des Wellenleiters (ca. 35 mm) hin zur Einkoppelung verschoben (ca. 20 mm). Diese Änderung im Streuungsverhalten könnte auf Fehler bei der Probenpräparation hinweisen.

In Summe wiesen alle Strukturierungsmethoden (mit Ausnahme der nicht messbaren Laser-direct-Imaging Proben) Werte im Bereich von 0.2 – 0.7 dB/cm auf. Dies entspricht einem 20- bis 70-fachen erhöhten Werten verglichen mit jenem Messdaten am reinen Polymer seitens des Herstellers Rohm & Haas. Dieser beziffert den optischen Verlust auf 0.01 dB/cm. Verglichen mit anderen Publikation erscheinen diese Werte jedoch realistisch. Die großen Abweichungen lassen sich größtenteils auf die Prozessierung (Verunreinigungen der Masken, atmosphärische Kontaminationen, Reinraum, Druck- und Schichtstärkenverteilung) zurückführen.

**Laser-direct-Imaging:**

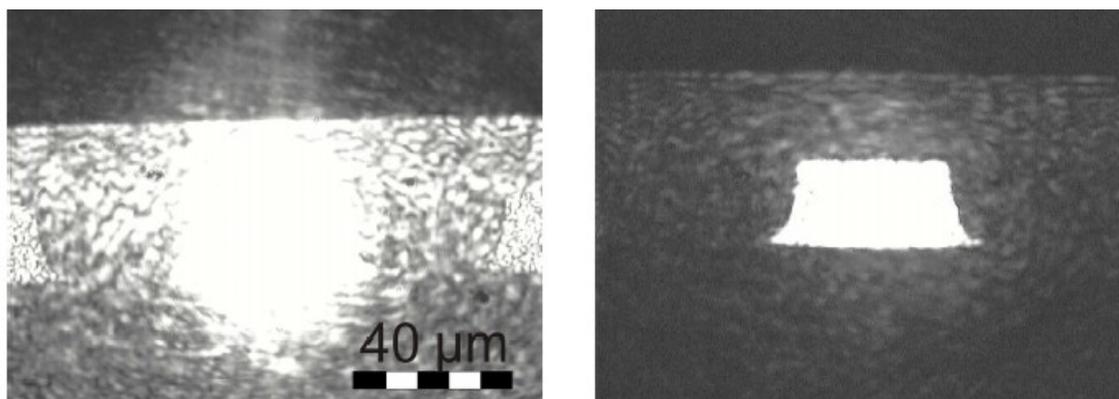
**Abbildung 63: Bestimmung der Dämpfung eines mittels Laser-direct-Imaging strukturierten Wellenleiters**

Abschwächungskoeffizient ( $\alpha$ ):

(nicht bestimmbar)  $\text{mm}^{-1}$

**Dämpfung:**

(nicht bestimmbar) **dB/cm**

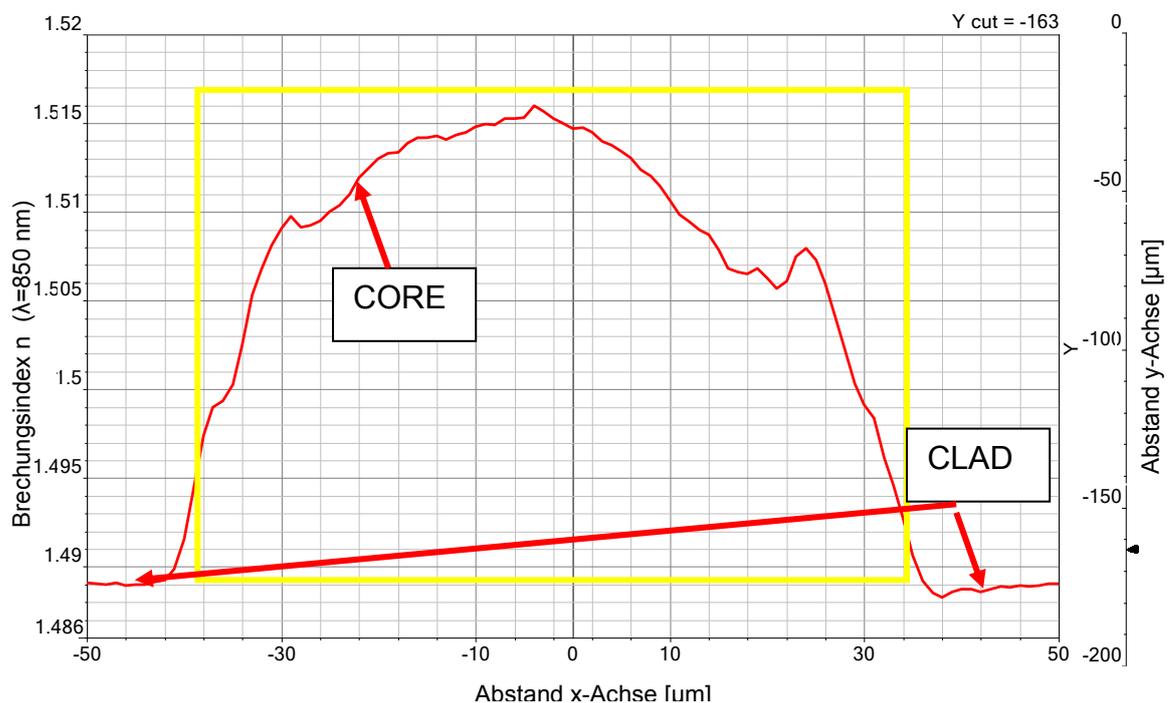


**Abbildung 64: Abbild der Lichtfeldverteilung am Wellenleiter Ausgang eines mittels Laser-direct-Imaging strukturierten Wellenleiters mit (links) und ohne (rechts) Filter**

## 5.5 Brechungsindex „refractive near field“

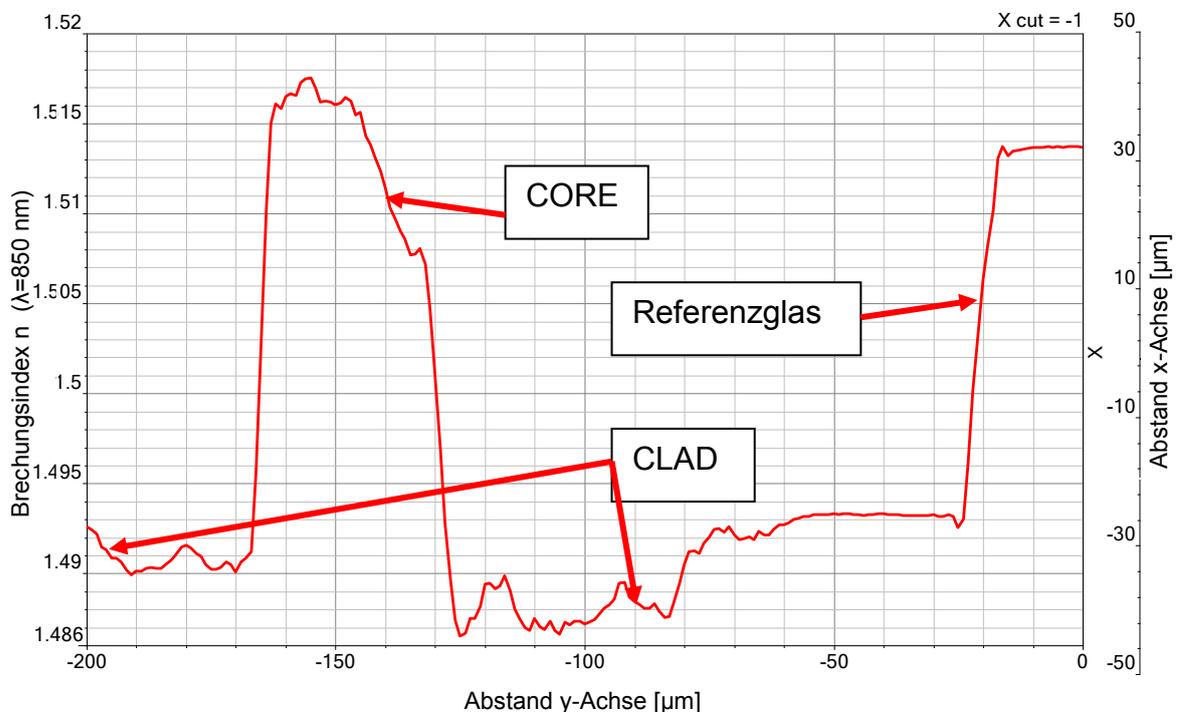
Die im Folgenden dargestellten „refractive near field“ Messungen wurden im März 2011 von Herrn Dr. Christoph Wächter am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena/Deutschland durchgeführt.

In den nachfolgenden Abbildungen Abbildung 65 bis Abbildung 70 sind die Ergebnisse in Form von Brechungsindex Profilen für Laser, LDI und Film strukturierte Wellenleiter dargestellt. Für die Messung an sich mussten die Proben auf einen Glasträger geklebt, gesägt und anschließend poliert werden. Aufgrund der Weichheit des Materials wurden diese noch zusätzlich 30 Minuten bei 200 °C getempert. Nur so konnten eine zufriedenstellende Grenzfläche präpariert werden. Trotz der Temperung zeigten die Proben weiterhin noch Rauigkeiten, was jedoch eine Brechzahlbestimmung mit begrenzter Genauigkeit zuließ.



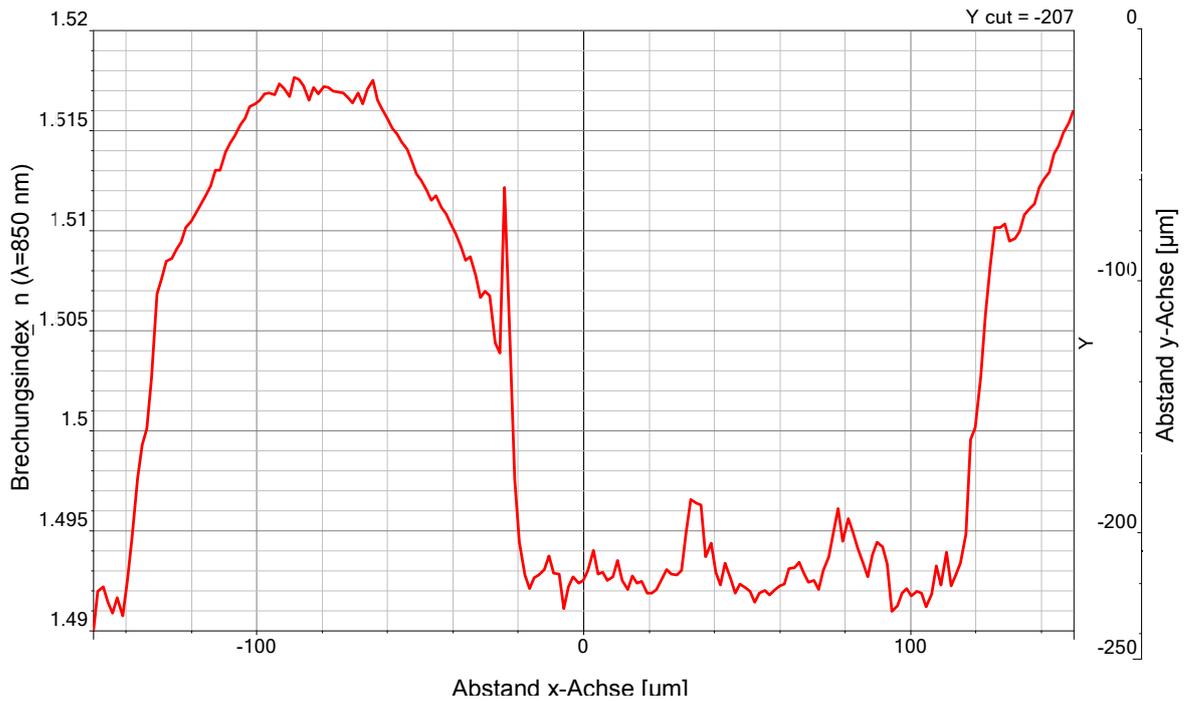
**Abbildung 65: Brechungsindex Profil horizontal an Wellenleiter Unterseite eines laserstrukturierten Wellenleiters**

Für die Laser strukturierten Wellenleiter liegt das Maximum des Wellenleiterkernes bei 1,517 und jenes für das Cladding Material bei 1,488. Wegen der Rauigkeiten in den Grenzflächen (siehe Abbildung 66 im Bereich von  $-120 < y < 80 \mu\text{m}$ ) kann die Genauigkeit nicht besser als  $\pm 0,002$  geschätzt werden. Somit ergibt sich eine Brechzahldifferenz von 0,029. Die Abbildung 65 zeigt dabei den Brechungsindex beim Übergang des CLAD Materials zum Core Materials, wobei die X-Achsen Koordinate 0 den zentralen Bereich des CORE darstellt. Im Gegenteil dazu ist in Abbildung 66 der vertikale Durchgang und die damit verbundene Änderung bis hin zum Referenzglas (Wellenleiter sind auf Referenzglas laminiert) zu sehen.

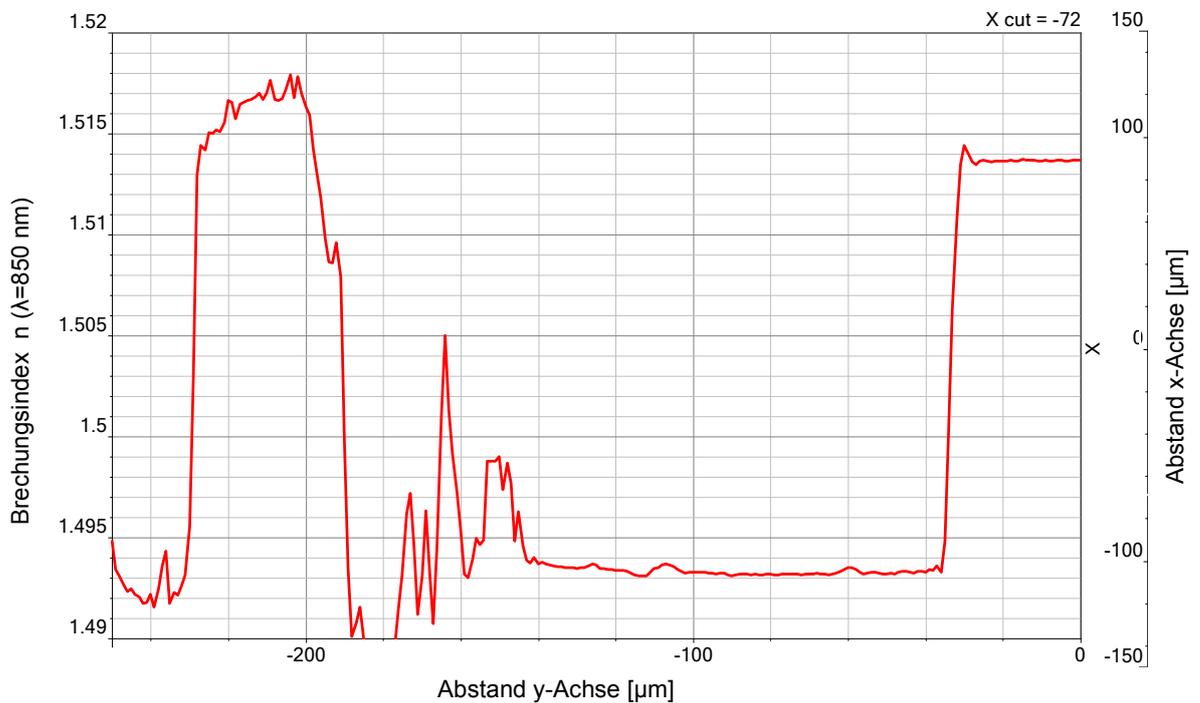


**Abbildung 66: Brechzahlprofil vertikal (WL links, nach rechts Immersion und Referenzglasblock)**

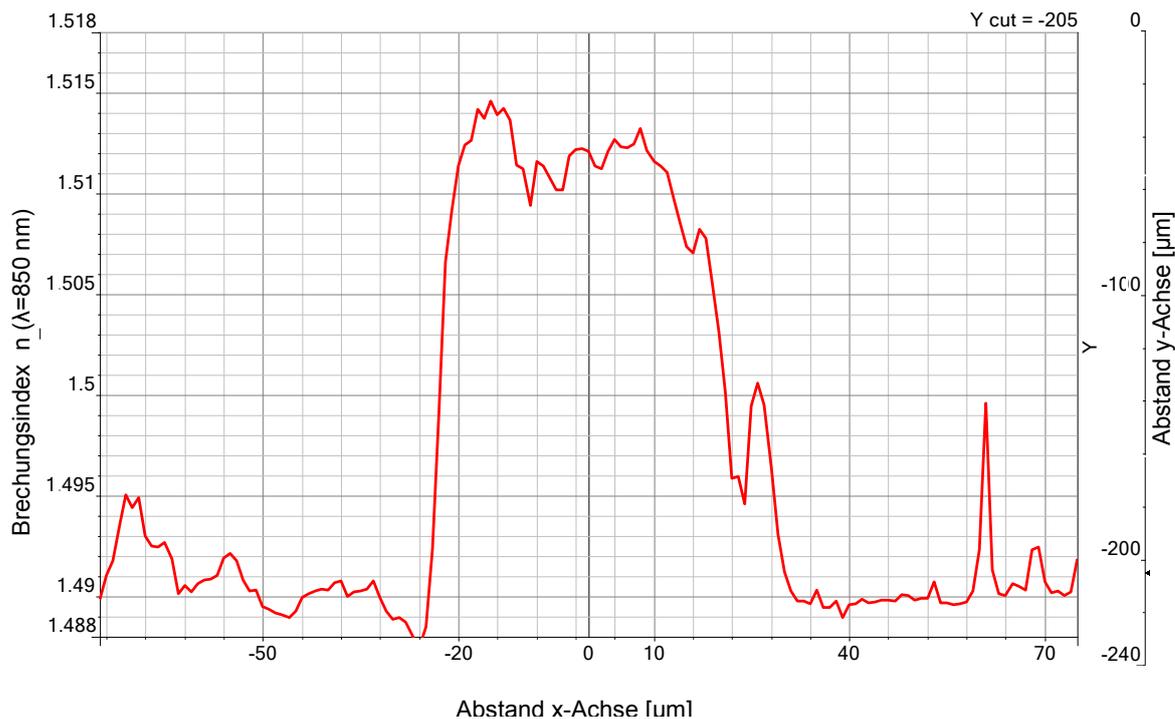
Jene mittels LDI und High-Resolution-Film strukturierten Wellenleiter zeigten dasselbe Verhalten. Für LDI Proben konnte eine Brechzahl im Kern von 1,517 und für das Cladding 1,492 erzielt werden, was einem Indexhub von 0,025 entspricht. Für die High-Resolution-Film Proben konnte eine Brechzahl von 1,513 im Kern und 1,490 im Cladding, was einem Indexhub von 0,023 entspricht, erzielt werden. Die dazugehörigen Diagramme sind in Abbildung 67 bis Abbildung 70 dargestellt.



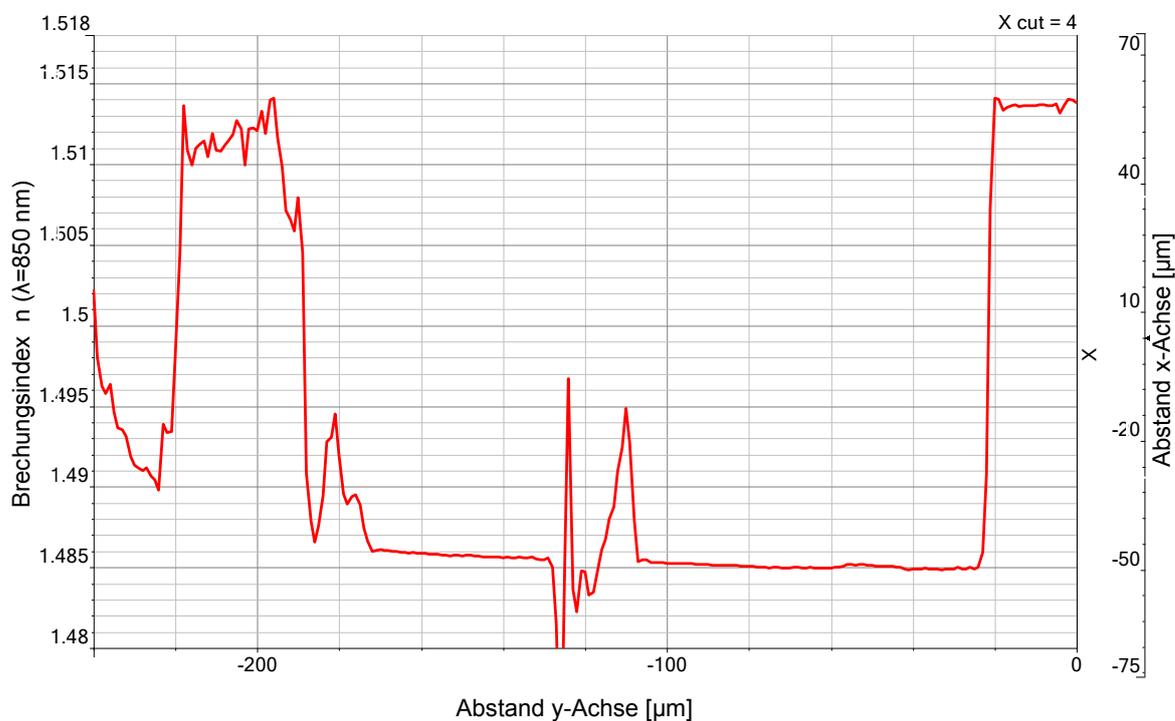
**Abbildung 67: Brechungsindex Profil horizontal an Wellenleiter Unterkante eines LDI strukturierten Wellenleiters**



**Abbildung 68: Brechzahlprofil vertikal (WL links, nach rechts Immersion und Referenzglasblock) für LDI**



**Abbildung 69: Brechungsindex Profil horizontal an Wellenleiter Unterkante eines mittels High-Resolution-Film strukturierten Wellenleiters**



**Abbildung 70: Brechzahlprofil vertikal (WL links, nach rechts Immersion und Referenzglasblock) für High-Resolution-Film**

Verglichen mit der Brechungszahl des Herstellers (1,490 für das Cladding und 1,512 für das CORE Material) weisen die Ergebnisse der RNF Messung nur sehr geringe Unterschiede auf. Signifikante Veränderungen durch unterschiedliche Belichtungsmethoden konnten dabei nicht festgestellt werden, wodurch alle drei Methoden zur Herstellung optischer Wellenleiter bezogen auf die notwendige Differenz in der Brechzahl geeignet sind.

## 5.6 TOP CLAD Schicht

Die zuletzt aufgebrachte TOP CLAD Schicht kann über eine Vergrößerung des Absprunges und eines geringer gewählten Anpressdruckes einwandfrei aufgebracht werden. Die niedrige Viskosität des CLAD Materials bei Raumtemperatur ermöglicht die vollständige Ausfüllung der Zwischenräume ohne jegliche Luftporen. Die weitere Prozessierung erfolgt nach Empfehlung des Herstellers. Die Schichtdicke beträgt dabei 30 µm bis 50 µm zwischen Wellenleiter und Umgebung.

## 5.7 Optimierte Parameter des Schablonendrucks

Die optimierten Rakelparameter für die BOTTOM CLAD, CORE und TOP CLAD Schicht sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

**Tabelle 9: Rakelparameter**

	<b>BOTTOM CLAD</b>	<b>CORE</b>	<b>TOP CLAD</b>
<b>Anpressdruck</b>	2,60	2,45	2,20
<b>Absprung</b>	0,45	1,05	1,07
<b>Geschwindigkeit</b> <b>[mm/min]</b>	462	462	430

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein vorgegebenes Material (LightLink™ XP-5202A CLAD und LightLink™ XP-6701 CORE von Rohm & Haas Electronic Materials) zur Herstellung von optischen Lichtwellenleitern auf Leiterplatten bezüglich der notwendigen Prozessschritte untersucht, optimiert und an die Gerätschaften der Austria Technologie & Systemtechnik Aktiengesellschaft adaptiert.

Zunächst wurde die Materialaufbringung mittels einer halbautomatischen Schablonendruckmaschine durchgeführt. Durch die Wahl geeigneter Parameter wie dem Anpressdruck, dem Absprung und der Vorschubgeschwindigkeit, konnten die notwendigen Schichten erzielt werden. Abhängig vom gewählten Substrat weisen diese Schichten mehr oder weniger Oberflächendefekte in Form von Luftblasen auf. Glatte Oberflächen wie Polyimid neigen im Gegensatz zu FR4, dem Standardmaterial der Leiterplattenindustrie, nur zu einer geringen Luftblasenbildung. Eine weitere Problematik dieser Methode zur Materialaufbringung stellt die Schichtdicke bzw. die Schichtdickenverteilung innerhalb einer Probe dar. Die geringe Viskosität des Materials, das flexible Substrat und die halbautomatische Schablonendruckmaschine führten zu Schichtdickenverteilungen innerhalb einer Probe von bis zu 10 µm.

Weiters wurden Untersuchungen zur Charakterisierung des Materials in Form von IR-Spektroskopie und NMR-Spektroskopie durchgeführt. Dabei konnten wichtige Informationen gewonnen werden. Bei der Vernetzung selbst handelt es sich um eine kationisch katalysierte Kondensationsreaktion von Silanol-Gruppen unter Abspaltung von Wasser basierend auf der Photoacid-Chemie.

Im zweiten Teil der durchgeführten Arbeiten, basierend auf den Angaben des Herstellers Rohm & Haas Electronic Materials, wurden die Prozessparameter für beide Materialien optimiert und an die Gerätschaften adaptiert. Durch die Verwendung einer Hotplate („Heizplatte“) konnten zusätzlich die Prozesszeiten deutlich reduziert werden.

Es wurden unterschiedliche Belichtungsmethoden zur Strukturierung der CORE Schicht angewendet und bezüglich der Querschnittsgeometrie und Oberflächenqualität untersucht. Für die Querschnittsvermessung wurden die

Proben in Epoxidharz eingebettet, geschliffen und anschließend mittels Lichtmikroskop untersucht. Die Oberflächenstrukturbestimmung erfolgte über Rasterelektronenmikroskopie. Für die Untersuchung der relevanten optischen Eigenschaften wurden sowohl Brechungsindexmessungen mittels der „refractive near field“ Methode und Dämpfungsmessungen über die „cut-back“ Methode durchgeführt. Bei den Belichtungsmethoden handelte es sich um eine Standard-Film Belichtung, eine High-Resolution-Film Belichtung, eine UV-Laser Belichtung und der Laser-direct-Imaging Belichtung.

Beide Arten der Filmbelichtung zeigten dabei ein sehr ähnliches Verhalten sowohl in der Wellenleiterstruktur als auch bei den optischen Eigenschaften. Unregelmäßigkeiten in der Schichtdicke der BOTTOM CLAD Schicht und in der CORE Schicht führten immer wieder zu Lufteinschlüssen zwischen CORE Schicht und Filmmaske. Eine Quarzglasscheibe in Kombination mit einem „Vaccum Bag“ verbesserte das Verhalten erheblich. Nichts desto trotz konnte keine ausreichend gute Reproduzierbarkeit gewährleistet werden, wodurch die Wellenleiter und Wellenleiterbündel stark in ihrer Breite (ca. 70  $\mu\text{m}$  bis 120  $\mu\text{m}$ ) schwankten. Ein weiterer Nachteil dieser Methode liegt in der Auflösung der Filmmaske. Unscharfe Konturen dieser führten zur Bildung riefenartiger Strukturen an den Seitenwänden. Unter Verwendung der High-Resolution-Filmmaske verringerte sich dieser Effekt, konnte jedoch nicht vollständig vermieden werden.

Weitere intensive Versuche zur Herstellung der Wellenleiter wurden mittels UV-Laser und Laser-direct-Imaging durchgeführt. In beiden Fällen konnte der Wellenleiter in seinen Abmessungen deutlich reduziert werden. Dies bedeutet für UV-Laser strukturierte Wellenleiter eine Basisbreite von 70  $\mu\text{m}$ , für Laser-direct-Imaging eine Basisbreite von 50  $\mu\text{m}$ . Oberflächenstrukturfehler konnten bei UV-Laser als auch bei Laser-direct-Imaging strukturierten Proben durch Auswahl geeigneter Prozessparameter fast vollständig vermieden werden. Lediglich Laser-direct-Imaging strukturierte Proben zeigten aufgrund der Funktionsweise (der Wellenleiter wird scheibenförmig aufgebaut) immer wieder Probleme bei kurvenförmigen Leiterzügen. Im Falle des UV-Lasers konnten sowohl Linien als auch Kurven einwandfrei erzeugt werden.

Neben den geometrischen Eigenschaften und Oberflächenstrukturen sind gute optische Eigenschaften eine der Grundvoraussetzungen für die Qualität des

Lichtwellenleiters. Alle vier Belichtungsmethoden konnten in Bezug auf den notwendigen Brechungsindexunterschied zwischen CLAD und CORE Schicht überzeugen. Dabei konnte ein Brechungsindexhub von 0.02 bis 0.03 erzielt werden. Diese Differenz ist ausreichend zur Gewährleistung der Totalreflexion und stimmt auch mit dem Datenblatt überein.

Eine weitere Eigenschaft für die Qualität der Übertragung ist die optische Dämpfung. Filmmasken strukturierte Wellenleiter wiesen eine Dämpfung von 0.2 dB/cm bis 0.4 dB/cm auf. UV-Laser strukturierte Wellenleiter erzielten eine Dämpfung von 0.7 dB/cm. Diese Werte liegen somit um das 20- bis 70- fache über dem theoretischen Wert am reinen Basismaterial. Beide Laserbelichtungen zeigten zusätzlich noch eine sehr große Streuung in der Versuchsreihe. Zusätzliche Untersuchungen sind daher unbedingt erforderlich.

Zusammenfassend ist es mit allen vier Methoden möglich Wellenleiter herzustellen, wobei Laser gestützte Systeme deutlich mehr Möglichkeiten bieten. Diese Systeme sind einfacher zu bedienen, weisen eine gute Reproduzierbarkeit auf und können bei Bedarf mit einer CNC-Einheit kombiniert werden. Dadurch kann eine Ankoppelung des Wellenleiters an die Diode über optische Systeme gelöst werden. Der Wellenleiter kann direkt an die Diode belichtet werden. Eine Positionierung der Diode an einen Wellenleiter ist aufgrund der heutigen Technik bei einer geforderten Genauigkeit von 15 µm noch nicht möglich.

LightLink™ stellt somit eine sinnvolle Möglichkeit zur Herstellung von optischen Wellenleitern auf Leiterplatten dar, da dieses Material bereits kommerziell erhältlich ist und auf diese spezielle Anwendung hin maßgeschneidert wurde.