

**Laser als Werkzeug für die Mikro- und  
Nanostrukturierung**  
und die darin aufgeführten wissenschaftlichen Publikationen  
E1-E51

**Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung der Venia Legendi  
genehmigte Habilitationsschrift (kumulative Habilitation)**  
von

**Dr.-Ing. habil. Andreas Ostendorf**  
geb. 06.05.1968 in Neuenkirchen

Juni 2005

## Vorwort

Der Laser hat sich seit seiner Erfindung zunehmend in verschiedenen industriellen Anwendungen als leistungsfähiges und flexibles Strahlwerkzeug etabliert. Das Potenzial des Lasers ist allerdings bei weitem noch nicht vollständig ausgeschöpft. Kontinuierliche Weiterentwicklungen auf der Strahlquellenseite sorgen dafür, dass das verfügbare Parameterfeld immer breiter wird, was wiederum neue Anwendungen z. B. in der Materialbearbeitung ermöglicht. Neben einem übergreifenden Trend zu höheren Ausgangsleistungen und damit verbunden höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten gehen Entwicklungen u. a. zu kürzeren Wellenlängen, kürzeren Pulsdauern oder verbesserter Strahlqualität. Mit letzt genannten Parametern eröffnet sich erstmals auch die Möglichkeit zur Ultrapräzisions- und Nanostrukturierung.

Initiiert durch diese Fortschritte war ein Schwerpunkt meiner Arbeiten am Laser Zentrum Hannover e.V. in den vergangenen Jahren der Überwindung bestehender Grenzen hin zu einer weiteren Miniaturisierung von lasererzeugten Strukturen gewidmet. Der folgende Beitrag fasst die relevanten Forschungsergebnisse gemäß den Anforderungen an eine kumulative Habilitation zusammen und stellt sie in den Kontext des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik. Die insgesamt 51 eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die der Habilitationskommission anstelle einer Habilitationsschrift vorgelegt werden, sind im Literaturverzeichnis mit [E1] – [E51] gekennzeichnet. Fremde Literatur, die den allgemeinen Stand der Technik beschreibt, wird mit [F1] – [F10] zitiert.

Hannover, Juni 2005

Andreas Ostendorf

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Methoden der Nanostrukturierung</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Motivation</b> .....	<b>9</b>
<b>4. Stand von Wissenschaft und Technik in der Lasermikrobearbeitung</b> .....	<b>11</b>
<b>5. Lasermethoden für die Nanostrukturierung</b> .....	<b>13</b>
• EUV-Strahlquellen für die Lithographie.....	13
• Abtrag von metallischen Werkstoffen durch Femtosekunden-Laserpulse .....	16
• Multiphotonen-Absorption in dielektrischen Werkstoffen .....	21
• Nahfeld-Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen .....	23
• 2-Photonen-Polymerisation.....	24
<b>6. Zusammenfassung</b> .....	<b>27</b>
<b>7. Eigene Publikationen</b> .....	<b>29</b>
<b>8. Fremde Literatur</b> .....	<b>35</b>

## 1. Einleitung

Die Nachfrage nach immer kleineren Strukturen hat in den letzten Jahren mit großer Dynamik weltweit zugenommen. Getrieben von der Mikro- und Nanoelektronik werden vom Trend zur Miniaturisierung zunehmend auch andere Bereiche wie z. B. die Optik oder Optoelektronik erfasst. Motivation ist hier neben der reinen Leistungssteigerung pro Bauvolumen außerdem die Ausnutzung spezifischer Effekte, die erst bei sehr kleinen Dimensionen einsetzen. So treten in der klassischen Optik Beugung und Streuung dann besonders in Erscheinung, wenn Objekte in ihrer Größe ähnlich den Wellenlängen der betrachteten elektromagnetischen Strahlung werden. Neben der Elektronik und Photonik existieren weitere Anwendungsfelder für miniaturisierte Strukturen in den Bereichen Medizintechnik (Mikrotiterplatten, Biochips, etc.), Biotechnologie und chemische Verfahrenstechnik. Nicht immer geht es jedoch um die reine Miniaturisierung. Vielfach entstehen durch die Integration von Nanostrukturen in mikroskopische und makroskopische Geometrien neue Möglichkeiten. Beispielhaft sei die Funktionalisierung von Oberflächen angeführt, wie man es beim Lotusblatt-Effekt beobachten kann.

Insbesondere die Mikroelektronik verlangt in naher Zukunft nach Strukturgrößen deutlich unterhalb von 100 nm. Diese Entwicklung wird von der Roadmap der Halbleiterhersteller international vorgegeben. Auf dem Weg von der Mikro- zur Nanoelektronik besteht dabei die besondere Herausforderung darin, rechtzeitig die notwendigen Werkzeuge zu entwickeln und bereitzustellen. Derartig kleine Strukturen werden in der Regel von der Mikrostrukturierungstechnik kommend im Top-down Prinzip weiterentwickelt. Erst wenn es in den Bereich von Strukturgrößen kleiner 10 nm geht, können nanochemisch bestimmte Bottom-Up Verfahren ihre immanenten Stärken nutzen.

Für die Herstellung deterministischer Strukturen werden gegenwärtig eine Vielzahl von Technologien und Verfahren untersucht. Neben optischen Verfahren, die in der Regel laserbasiert sind, werden weitere Technologien zur Erzeugung von nanotechnischen Strukturen erforscht. Der Laser hat in den vergangenen Jahren als Produktionswerkzeug eine Reihe von neuen Anwendungen erschlossen, die vom Automobilbau bis zur Leiterplatten- und LCD-Fertigung reichen [E1]. Die Vorteile des

Lasers liegen dabei in seiner guten Steuer- und Automatisierbarkeit, so wie in der möglichst exakten Dosierung der Energie, die spezifisch auf den Prozess und seine Anforderungen abgestimmt werden kann [E2]. Anforderungen können dabei von „möglichst hohe Präzision“ bis „möglichst schnelle Bearbeitung“ variieren. Aufgrund der Beugungsbegrenzung bei der Abbildung oder Fokussierung ist der Laser heute vorwiegend auf die Mikrobearbeitung beschränkt und hat sich dort aufgrund seiner vielfältigen Eigenschaften eine Reihe innovativer Anwendungen gesichert.

Die vorliegende Arbeit und die angeführten Publikationen sollen aufzeigen, dass gegenwärtig eine Reihe von Techniken erforscht und entwickelt werden, die es ermöglichen, mit dem Laser bzw. optischer Strahlung in den Submikrometerbereich vorzudringen. Dies beinhaltet auch Methoden, mit dem Laser Strukturen jenseits des Beugungslimits herzustellen. Das Potenzial von laserbasierten Nanostrukturierungsverfahren wird im Rahmen dieser Abhandlung in Konkurrenz oder Ergänzung zu alternativen Verfahren gestellt.

Zunächst wird das Umfeld der Nanostrukturierungsverfahren dargestellt, in das sich der Laser mit seinen spezifischen Vor- und Nachteilen einfügen muss. Von der Mikrobearbeitung kommend werden dann die unterschiedlichen Verfahren dargestellt, um zu kleineren Strukturgrößen zu gelangen. Neben konventionellen lithographischen Verfahren, für die Strahlquellen mit extrem kurzen Wellenlängen benötigt werden, werden direktschreibende Verfahren für Ablations- und Polymerisationsprozesse beleuchtet. Wesentlich ist hierbei die Nutzung hochintensiver Laserpulse um nichtlineare Effekte zu induzieren, die eine Überwindung des klassischen Beugungslimits ermöglichen. Ergänzt wird die Darstellung um die Nutzung von Nahfeldtechnologien, die ebenfalls eine Nanostrukturierung ermöglichen.

## 2. Methoden der Nanostrukturierung

Im Bereich der Halbleiterfertigung werden für die nächste Generation von lithographischen Verfahren verschiedene Techniken wie die Röntgen-, Elektronen- und Ionenstrahlolithographie untersucht. Das größte Potential für die Massenfertigung nanoelektronischer Schaltkreise wird allerdings gegenwärtig der Belichtung mit extrem ultravioletter (EUV) Strahlung zugesprochen, da dies die konsequenteste Weiterentwicklung zur heutigen Excimerlaser basierten Maskenprojektion im Stepperbetrieb darstellt. Röntgenlithographische Verfahren eignen sich aufgrund der kurzen Wellenlängen prinzipiell für scharfkantige Strukturen noch bis in den unteren Nanometerbereich, jedoch gleichen sich die Absorptions- und Transmissionskoeffizienten bei Röntgenwellenlängen für alle Materialien immer mehr an, so dass geeignete Masken mit hohem Kontrast bis heute nicht existieren. Als Maskensubstrat wird häufig SiC mit einer Dicke von nur 1  $\mu\text{m}$  verwendet, was eine eingeschränkte Transmission von 57% zur Folge hat. Eine 300-500 nm dicke Au-Maskenschicht auf dem Substrat lässt ebenfalls 14% der Strahlung passieren. Die eingesetzten Masken sind daher vergleichsweise kontrastarm und die Strahlungsabsorption führt zu einer unerwünschten Temperaturerhöhung im Substratwerkstoff. Da überdies keine Spiegel oder Linsen für diesen Wellenlängenbereich existieren, kann die Maske ausschließlich als 1:1-Abbildung in unmittelbarer Nähe zu der belichteten Oberfläche genutzt werden (sog. proximity-Lithographie). Daher müssen die Maskenstrukturen die gleiche Größe wie die Strukturen auf dem Wafer besitzen, was die Maskenherstellung vergleichsweise anspruchsvoll und kostenintensiv macht. Die minimalen Strukturbreiten liegen bei einer Belichtungswellenlänge von 1 nm bei ca. 30 nm. Bei der Elektronenstrahl-Lithographie entstehen durch die hochenergetischen Elektronen im Targetmaterial störende proximity-Effekte (Aufweitung des Belichtungsvolumens im Resist durch Sekundäreffekte), welche die Genauigkeit bei diesem Verfahren herabsetzen können und nur zum Teil kompensierbar sind. Eine Methode zur Verringerung des proximity-Effektes ist die Verwendung sehr dünner Targetschichten auf Substraten mit hoher Ordnungszahl. Mit dieser Methode lassen sich dann Strukturen bis 10 nm und Aspektverhältnissen über 10 herstellen. Elektronenstrahlen sind aufgrund ihres Ladungscharakters leicht ablenkbar, so dass dieses Verfahren in der Regel als schreibendes Verfahren bei schneller und präziser Ablenkung angewendet wird. Das Ionenstrahl-Verfahren ist analog zur Elektronen-

strahlolithographie in der Regel ein schreibendes Verfahren, jedoch sind die proximity-Effekte vernachlässigbar, was zu kleineren Auflösungen bis 2 nm im Werkstück führt.

Technologisch einfacher umsetzbar als lithographische Technologien sind umformende Verfahren. So lassen sich mit dem Heißprägeverfahren in PMMA-Filmen Löcher mit Durchmessern unter 25 nm abformen. Bei diesem Verfahren wird der Resist auf Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur (PMMA: 105°C) erwärmt, so dass er unter Druck fließen kann. Der Stempel wird anschließend mit hohem Druck (40-130 bar) in den Resist gedrückt. Nach der Abkühlung wird der Stempel wieder entfernt. Für das Heißprägen sind allerdings hochpräzise Werkzeuge notwendig, die in der Regel durch Elektronenstrahlolithographie und anschließendes reaktives Ionenätzen hergestellt werden. Dieses Verfahren gehört wie das lösungsmittelunterstützte Nanoformen zur Gruppe der sog. Nanoimprint Verfahren (NIL: nanoimprint lithography). Da mittels Nanoimprint strukturierte Filme auch als Ätzmasken eingesetzt werden können, spricht man in dem Fall auch von Soft-Lithographie. Derartige Verfahren sind allerdings auf bestimmte Werkstoffkombinationen eingeschränkt. Besonders in Verbindung mit der sog. Lift-off Technik können sich sehr kleine metallische Strukturen unter 10 nm ergeben. Ebenso wie das Prägen ist es möglich, organische Suspensionen zu stempeln. Mit derartig druckenden Verfahren sind ebenfalls schon Strukturen mit Abmessungen unter 50 nm hergestellt worden. Da das Aufheizen und Abkühlen von Resists zeitaufwändig ist, nutzt man alternativ auch UV-aushärtbare Monomere, in die ein UV-transparenter Stempel bei geringem Druck (40-1000 mbar) eingepresst werden kann. Im nachfolgenden Prozessschritt wird der Resist durch den Stempel hindurch mit UV-Licht ausgehärtet und der Stempel anschließend entfernt. Minimal erzeugbare Strukturgrößen liegen mit diesem Verfahren bei 80 nm.

In Silizium lassen sich mit dem sog. laserunterstützten Imprintverfahren (LADI: laser assisted direct imprint) Strukturgrößen von 10 nm bei hohen Prozessgeschwindigkeiten (<250 ns pro Prägevorgang) fertigen. Dabei erwärmt ein Excimerlaser-Puls durch einen transparenten Stempel eine dünne Schicht auf Schmelztemperatur, so dass der Stempel dann in die flüssige Grenzschicht geprägt werden kann. Silizium ist mit seiner geringen Schmelzviskosität (ca. 30% von der des Wassers) besonders gut für diesen Prozess geeignet [F1].

Ebenfalls vergleichsweise simple Verfahren für die Nanostrukturierung sind die Rastersondenverfahren, die aus der Oberflächenmikroskopie stammen und unter dem Begriff SPM (Scanning Probe Microscopy) zusammengefasst werden. Beim Rasterkraftverfahren (AFM: Atomic Force Microscopy) werden Oberfläche und Sondenspitze angenähert und der Abstand bzw. die Kraftwirkung zwischen beiden über ein optisches Meßverfahren geregelt. Durch Bewegungen des Substrates können dann im Kontaktmodus in relativ weichen Substraten Strukturen bis hinunter zu 20 nm erzeugt werden. Besser geeignet ist dieses Verfahren ebenso wie das Rastertunnelmikroskop (STM: Scanning Tunneling Microscopy) aber zur Manipulation von Nanopartikeln oder ähnlich kleinen Objekten. Interessante Möglichkeiten bestehen bei einer elektrisch induzierten Strukturierung. Bei AFM-Sonden konnten unter Anlegen einer Spannung Oxidationsstrukturen in Metallen mit lateralen Dimensionen um 70 nm erzeugt werden. Bei STM-Sonden konnten durch gezielte Manipulation des elektrischen Feldes zwischen Sonde und Substrat sogar noch kleinere Linienbreiten bis 50 nm präpariert werden. In letzter Zeit wurden überdies Untersuchungen durchgeführt, bei dem eine STM- als auch eine AFM-Spitze mit einem fokussierten Laser bestrahlt wurde. Die Spitze wirkt dabei wie eine Empfangsantenne für den einfallenden Laserstrahl, ist aber auch gleichzeitig Sendeantenne, um das verstärkte Nahfeld an der Spitze zum Werkstück zu übertragen. Strukturen um 20 nm konnten durch die Bestrahlung einer STM-Sonde mit Nanosekunden-Laserpulsen hergestellt werden [F2]. Nachteilig bei STM-Verfahren ist die Einschränkung der zu bearbeitenden Werkstoffe auf Metalle und Halbleiter. Mittels AFM-Sonden und Nanosekunden-Laserpulse wurden ebenfalls Strukturabessungen bis 20 nm berichtet [F3]. Mit diesem vorrangig laserbasierten Verfahren können bei im Nahfeld verstärkten Intensitäten von  $3 \text{ MW/cm}^2$  Pixelgrößen von 20-30 nm an Siliziumoberflächen oxidiert werden. Da die Reproduzierbarkeit bei Nanosekunden-Pulsdauern durch thermische Effekte, z. B. auf den Abstand Sonde/Werkstück, eingeschränkt ist, wurde dieses Verfahren mit Femtosekunden-Pulsdauern optimiert. Bei der Bestrahlung von Goldschichten konnten Strukturen mit Abmessungen im Bereich 10 nm geschrieben werden [F4]. Nachteilig bei den Rastersondenverfahren ist allerdings die geringe Effizienz dieser Verfahren, so dass die Anwendungen vornehmlich auf den Labor- und Erprobungsbetrieb bei sehr geringen Stückzahlen beschränkt sind.

Für konventionelle Laserverfahren sind gegenwärtig in der Regel das Beugungslimit in Kombination mit der Strahlqualität und die thermischen Randbedingungen im Bearbeitungsprozess die limitierenden Größen, die ein Vordringen in den Nanometerbereich erschweren. Ausgehend von diesen Restriktionen sollen Verfahren erforscht und entwickelt werden, welche diese Grenzen überwinden und Strukturen im Bereich von 50-500 nm herzustellen vermögen.

### 3. Motivation

Die Präzisionsbearbeitung mit Lasern wird konventionell begrenzt durch die Auflösung, mit der ein Laserstrahl auf das Werkstück fokussiert werden kann. Beim Durchlauf der von einem Objekt ausgehenden Lichtstrahlen in einem optischen System kommt es zu Beugungserscheinungen an den Begrenzungen der einzelnen optischen Komponenten [E3]. Ein leuchtender Objektpunkt wird daher selbst in einem sphärisch und chromatisch vollkommen korrigierten Objektiv nicht als Punkt, sondern als Beugungsscheibchen (sog. Airy-Scheibchen) mit dem Radius  $r = 1,22 \cdot \lambda \cdot f/D = 0,61 \cdot \lambda/NA$  abgebildet, umgeben von mehreren nach außen sehr schnell an Intensität verlierenden konzentrischen schmalen Kreisen ( $\lambda$  ist die verwendete Wellenlänge,  $f$  die Brennweite,  $D$  der Durchmesser der Linse und  $NA$  die Numerische Apertur der Optik). Es konzentrieren sich etwa 84% des gesamten Lichts auf die Airy-Scheibe, innerhalb des zweiten dunklen Rings liegen 91% des Lichts. Sollen zwei Objekte z. B. in einem Mikroskop abgebildet werden, die vom Objektiv aus gesehen einen Winkelabstand von  $d\varphi$  haben, so gelten diese noch als auflösbar, wenn bei den Beugungsscheibchen das Helligkeitsmaximum des einen Objekts auf dem ersten Helligkeitsminimum des anderen zu liegen kommt, d.h. wenn die beiden Helligkeitsmaxima keinen geringeren Abstand als  $d = 0,61 \cdot \lambda/NA$  haben (Rayleigh-Kriterium). Da dieser Abstand gleich  $f \cdot d\varphi$  ist, folgt für die Auflösungsgrenze  $d\varphi = 1,22 \cdot \lambda/D$ .

Da in der Mikroskopie Unterschiede in Form und Helligkeit die Fähigkeit des Auges zur Auflösung von Strukturen wesentlich beeinflussen, führt man noch einen physiologischen Faktor  $k$  ein. Das praktische Ergebnis ist, dass zwei Teilchen noch voneinander getrennt beobachtet werden können, wenn ihr Abstand ungefähr  $\lambda/2$  beträgt, vorausgesetzt, die Numerische Apertur hat einen Wert nahe 1,0. Da das Auflösungsvermögen umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist, kann es durch die Verwendung von kurzwelligerem Licht verbessert werden (Ultraviolett-mikroskopie, Elektronenmikroskopie). Bei der Immersionsmikroskopie kann die Einbettung des Objekts in ein optisches Medium mit großer Brechzahl, z. B. Öl, die Numerische Apertur und damit das Auflösungsvermögen erhöhen.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Beleuchtung. Während man bei Teleskopen und beim Auge vom Auflösungsvermögen für selbstleuchtende Objekte

(Helmholtzsches Auflösungsvermögen) spricht, hat Abbe das Auflösungsvermögen für nichtselbstleuchtende Körper untersucht (hauptsächlich in Bezug auf die Mikroskopie). Nach Abbe beruht die Bildentstehung auf der Beugung des Lichts, wobei vor allem die erste Beugungsordnung für die Bildentstehung wesentlich ist. Die Abbildungsqualität ist nach Abbe beugungsbegrenzt, wenn die erste Beugungsordnung das Gerät gerade noch ungestört durchläuft. Beträgt der halbe Öffnungswinkel des Objektivs  $\varphi$ , so erhält man bei parallel einfallender Beleuchtung über die Beugungsgleichung  $\sin\varphi = \lambda/d$  den minimalen Abstand zu  $d = \lambda/\sin\varphi = \lambda/NA$ . Bei einer schrägen Beleuchtung, bei der die 0. und +1. Beugungsordnung noch vom optischen System erfasst werden, geht der gesamte Öffnungswinkel in die Gleichung ein. Man erhält damit den minimalen Abstand zweier aufzulösender Objektpunkte zu  $d = \lambda/\sin 2\varphi_0 = 0,5 \cdot \lambda/NA$ . Das daraus resultierende Auflösungsvermögen ist damit um den Faktor 1,22 größer als das Auflösungsvermögen für selbstleuchtende Objekte (s. o.), wenn man zusätzliche physiologische Korrekturfaktoren vernachlässigt. Vom Standpunkt der modernen Optik her besteht aber kein prinzipieller Unterschied zwischen der Helmholtzschen und der Abbeschen Vorstellung des Auflösungsvermögens.

Bei einem gaußschen Strahl ist der minimale Fokaldurchmesser durch die Strahltaile gegeben und ergibt sich zu  $d = 0,64 \cdot \lambda/NA$ . Aus den verschiedenen Betrachtungen lässt sich das Auflösungsvermögen damit allgemein zu  $d = k \cdot \lambda/NA$  mit  $k = 0,5 \dots 1,0$  angeben.

## 4. Stand von Wissenschaft und Technik in der Lasermikrobearbeitung

Gegenwärtig hat der Laser neben den konventionellen Schweiß- und Schneidapplikationen an metallischen [E4, E5] und dielektrischen [E6, E7] Werkstoffen, die primär aus dem Fahrzeugbau stammen, verstärkt das Feld der Mikrobearbeitung besetzt. Der weltweite Umsatz mit Lasersystemen betrug in 2002 ca. 3700 Mio. US\$. Ungefähr 900 Mio. US\$ entfallen dabei auf Anwendungen im Mikrobereich [F5]. Die eingesetzten Technologien differenzieren sich in die Nutzung von UV-Lasern als Belichtungsquellen für die Halbleiterlithographie und für direktbearbeitende Verfahren z. B. die photochemische oder photothermische Ablation von nichtleitenden Materialien. Daneben werden insbesondere in der Elektronikfertigung gepulste gütegeschaltete Festkörperlaser mit Spitzenleistungen von einigen 10 kW zum Beispiel für das Präzisionsbohren und -strukturieren bei hohen Durchsätzen eingesetzt [E8]. In den letzten Monaten und Jahren gibt es überdies zahlreiche Entwicklungen, die sich mit modengekoppelten Ultrakurzpulslasern als Alternative beschäftigen. Vorteil bei der Bearbeitung mit Femto- und Pikosekundenlasern ist dabei, dass nahezu alle Werkstoffe mit gleich hoher Qualität abgetragen werden können [E9, E10, E11]. Problematisch insbesondere bei verstärkten Lasersystemen ist hierbei allerdings noch die begrenzte Ausgangsleistung, welche industrielle Anwendungen heute noch ungünstig erscheinen lässt [E12, E13]. Auch im Bereich der Schweiß- und Fügeverfahren gibt es Entwicklungstendenzen von Hochleistungs-kW-Lasern für den Fahrzeugbau hin zu kleinen kompakten Faserlasern mit Grundmodestrahlung bei einigen 10 W, die prädestiniert für eine Vielzahl von Präzisionsanwendungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik sind [E14].

Excimer-Laser mit ihrem Emissionsspektrum von 351 nm bis 157 nm eignen sich insbesondere für die Mikrostrukturierung von transparenten Glaswerkstoffen und Polymeren [E15]. Aufgrund ihres homogenen und rechteckigen Strahlprofils sind sie neben Bohrverfahren auch gut zum Oberflächenabtrag geeignet. Durch eine geschickte Prozessführung kann eine Abtragsoberfläche mit annähernd optischer Qualität erreicht werden. Bei flexibler Überlagerung der Einzelpulse kann bei Maskenprojektionsverfahren auch ein dreidimensionaler Mikroabtrag (ggfs. auch auf

unebenen Oberflächen, die für die Lithographie nicht zugänglich sind) realisiert werden. Dieses Verfahren ist insbesondere durch seine hohe Automatisierbarkeit und Flexibilität gekennzeichnet [E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22]. Eine interessante Alternative zur Projektionsbelichtung von Resists mit anschließender Entwicklung ist das Direktstrukturieren von Resist-Materialien mit UV-Lasern [E23]. Da bei diesem Verfahren auf eine aufwändige Maske verzichtet werden kann, ist es insbesondere für kleine Stückzahlen oder im Entwicklungs- und Prototypenbereich eine viel versprechende Alternative.

Frequenzkonvertierte, d. h. hinsichtlich der Emissionsfrequenz verdrei- und vervierfachte Nd-Laser werden für die Mikrobearbeitung in der Regel gütegeschaltet. Die hohen Pulsspitzenleistungen bis 100 kW bei einigen Nanosekunden Pulsdauer erlauben eine schonende Präzisionsbearbeitung von einer Vielzahl von Werkstoffen, von Metallen bis zu Polymeren. Die im Vergleich zu Excimer-Lasern hohe Repetitionsrate von bis zu 100 kHz ermöglicht überdies einen hohen Durchsatz, der insbesondere in der Leiterplattenfertigung für das Bohren von Durchkontaktierungen (sog. via-holes) zum Tragen kommt. Dennoch hinterlässt die Bearbeitung mit ns-Pulsdauern thermische Einflussbereiche in der Größenordnung von einigen 10  $\mu\text{m}$  [E24].

Allen gegenwärtig vorhandenen Verfahren ist gemeinsam, dass sie bei minimalen Strukturabmessungen im Mikrometerbereich arbeiten. Dieser Bereich ist aufgrund der klassischen linearen Optik gut zugänglich und bei den eingesetzten Wellenlängen durch einfache Fokussierung oder Maskenprojektion vergleichsweise leicht erschließbar.

## 5. Lasermethoden für die Nanostrukturierung

Eine weitere Verkleinerung der Strukturgrößen bis in den Nanometerbereich ist bei Laserverfahren durch eine einfache Perfektionierung der Optiken nicht möglich. Vielmehr sind neue Ansätze gefragt, die jenseits der klassischen Optik liegen. Neben einer weiteren Verkleinerung der eingesetzten Wellenlänge von UV über Vakuum-UV (VUV) zu Extrem-UV (EUV) für lithographische Verfahren sind insbesondere nichtlineare Prozesse geeignet für eine weitere Verkleinerung der Dimensionen.

- ***EUV-Strahlquellen für die Lithographie***

In der Massenfertigung werden heute üblicherweise photolithographische Verfahren zur Erzeugung von Strukturen im  $\mu\text{m}$ - und sub- $\mu\text{m}$ -Bereich eingesetzt. Der kleinste noch darstellbare Abstand zweier Punkte ergibt sich bei Projektionsoptiken nach der Abbéschen Formel (s. o.) allgemein zu

$$d = k \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1).$$

Der Faktor  $k$  impliziert neben den Fraunhoferschen Beugungseffekten und dem Kohärenzgrad der Strahlung auch die Anforderungen an die Intensitätsmodulation. Ein Wert von  $k=1$  bedeutet hinsichtlich dieses Parameters, dass die Intensität zwischen zwei noch aufzulösenden Punkten auf Null abfallen muss. Kleinere  $k$ -Werte ergeben sich dadurch, dass räumlich getrennte Lacköffnungen auch dann noch erzeugt werden, wenn die Intensitätsmodulation einen ausreichenden Wert aufweist. Neuartige Photoresists liefern noch ausreichend trennbare Strukturen, wenn die Intensität zwischen zwei aufzulösenden Objekten nur um einige 10% abfällt, d.h. bei Modulationen von nur 20% oder darunter. Typische Werte liegen dann bei  $k=0,4$  oder sogar leicht darunter. Weitere Ansätze zur Reduzierung der Strukturgrößen ergeben sich durch die Verringerung der genutzten Wellenlänge und der Erhöhung der Numerischen Apertur der Optik. Als Lichtquellen werden seit Mitte der neunziger Jahre Excimer-Laser mit Wellenlängen von zunächst 248 nm, dann 193 nm und nunmehr 157 nm eingesetzt. Im Extremfall ergeben sich bei einer Wellenlänge von 157 nm, einer Numerischen Apertur von 0,9 und  $k=0,35$  minimale Strukturbreiten gemäß Abbé von ca. 60 nm.

Für die nächste Generation werden gegenwärtig Quellen mit einer Wellenlänge um 13 nm im sogenannten EUV-Spektralbereich entwickelt. Die Entwicklungen konzentrieren sich auf Hochleistungsquellen um 13 nm, da für diese Wellenlänge Multilayeroptiken aus Mo/Si-Schichten mit hoher Reflektivität bis zu max. 70% verfügbar sind. Für die geforderten Durchsätze in der späteren Halbleiterproduktion werden am Eingang eines Wafer-Steppers mehr als 100 W EUV-Leistung benötigt. Hierbei konkurrieren zwei plasmabasierte Quellentechnologien: Entladungsquellen und laserinduzierte Plasmen (Abb. 1). Für beide Quellenkonzepte ergibt sich durch die Anforderung der Steppereingangsleistung, dass mehr als 1000 W EUV-Leistung im Raumwinkel von  $2\pi$  ausgehend vom Plasma emittiert werden müssen. Ebenfalls von besonderer Bedeutung ist die Quellengröße und die Divergenz der Strahlung. Anforderungen gehen dahin, Quellgrößen, in denen das Plasma umgesetzt wird, mit Durchmessern von 1 mm zu fordern. Weitere Restriktionen sind hinsichtlich hoher zeitlicher und räumlicher Stabilität definiert [F6].

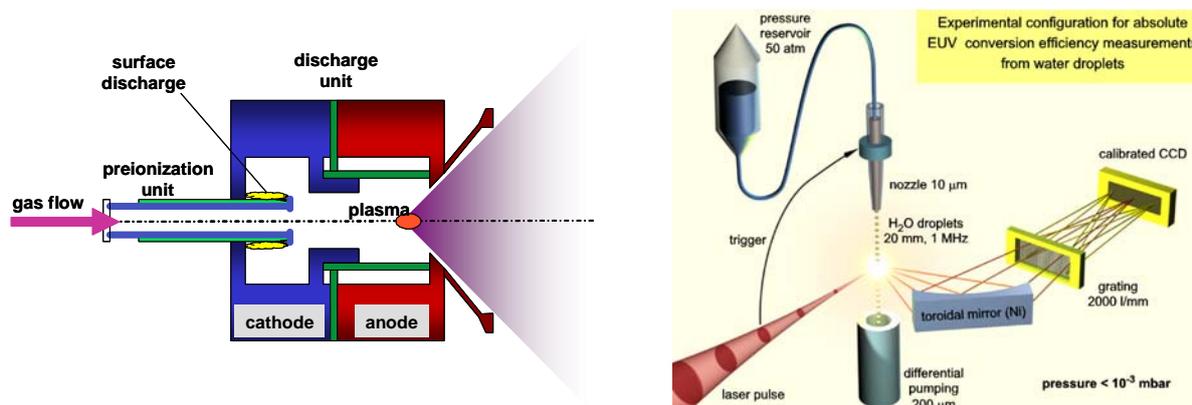


Abbildung 1: Z-Pinch Plasma-Entladungsquelle (links) und laserinduziertes Plasma (rechts), Quelle: xtreme technologies GmbH

Mittels durch Selbstkompression verdichteter Entladungsplasmen (sog. Pinch-Plasmen) sind Temperaturen von 20 eV erzeugbar, deren Strahlungsmaximum bei 13 nm liegt. Durch die Wahl des entsprechenden Mediums kann ein effizienter Prozess ermöglicht werden. So können mit Xenon Konversionseffizienzen von 1% erzielt werden, während Lithium Effizienzen bis 4% ermöglicht, wobei allerdings in erheblichen Maße Debrisprobleme auftreten. Mit Entladungsplasmen können gegenwärtig bis zu 50 W EUV-Leistung in  $2\pi$  sr erzeugt werden, was 5,5 W am Eingang eines Belichters bedeuten würde. Laserinduzierte Plasmen haben den Vorteil, dass dort keine Verschleiß behafteten Elektroden eingesetzt werden und die Verlustwärme

einfacher abgeführt werden kann. Nachteilig ist, dass für die oben genannten Anforderungen gepulste Laser mit mittleren Leistungen von bis zu 100 kW erforderlich sind. Derartige Laser sind heute nicht verfügbar und bringen in der Entwicklung eigene Herausforderungen mit. Die leistungsstärkste laserinduzierte EUV-Quelle an den Sandia National Laboratories liefert gegenwärtig etwa 2 W EUV-Leistung am Stepper-Eingang.

Eine besonders kompakte Alternative für kleinskalige Lithographie-Anwendungen und messtechnische EUV-Applikationen stellt die Entwicklung einer EUV-Röhre dar [E25]. Dieses Konzept, welches alle Probleme, die sich aus Plasmaquellen ergeben, vermeidet, beruht auf der Modifikation einer konventionellen Röntgenröhre mit einer Verschiebung der Emissionswellenlänge in den EUV-Bereich. Wie in einer Röntgenquelle, die auch mit Hilfe des photoelektrischen Effektes mit kurzen Pulsen betrieben werden kann [E26], werden freie Elektronen in einem elektrischen Hochspannungsfeld beschleunigt und auf einem Target abgebremst. Als Targetmaterialien werden für die EUV-Emission Beryllium für 11,4 nm und Silizium für 13,5 nm eingesetzt. Das physikalische Prinzip beruht auf der Stoßionisation durch Elektronen auf die inneren Schalen der Targetmaterialien. Bei Silizium liegt die Emission der L-Schale bei genau 13,5 nm und bei Beryllium ist die  $K_{\alpha}$ -Linie bei 11,4 nm zu finden. Nachteilig und damit leistungsbegrenzend ist bei diesem Ansatz, dass insbesondere bei den verwendeten Materialien mit niedrigen Ordnungszahlen Auger-Übergänge auf Kosten von Strahlungsübergängen bei freien Plätzen in der K- und L-Schale zunehmen.

Im Gegensatz zu den breitbandigen Plasmaquellen ist das Spektrum der Röhrenquelle deutlich schmalbandiger. Sowohl für Beryllium- als auch Silizium Targets konnte mit einem Spektrometer eine Bandbreite um die exakten Maxima bei 11,4 nm und 13,5 nm von nur 1,5 nm nachgewiesen werden (Abb. 2). Die erreichten Ausgangsleistungen liegen bei 34  $\mu$ W [E27].

Hauptanwendungsfelder für diese Technologie sind damit besonders Reflexionsmessungen in der Optikentwicklung, Transmissionsmessungen für EUV-Masken und -Filter sowie die kostengünstige Kalibrierung von EUV-Komponenten. Die geringen Leistungen sind für diese Anwendungen bereits ausreichend.

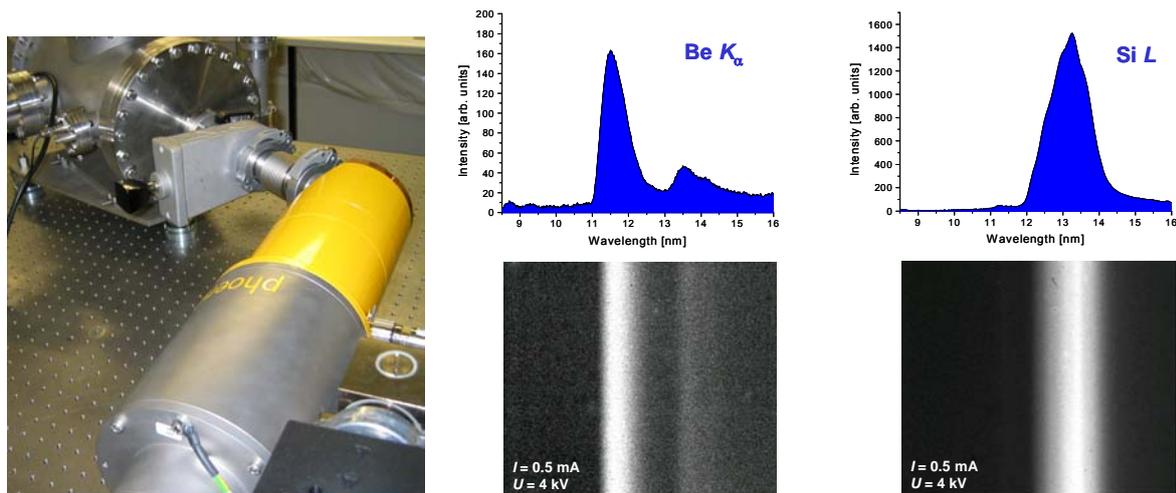


Abbildung 2: EUV-Elektronenröhre (links) mit Spektren für Beryllium- und Silizium-Targetmaterialien

Höhere Leistungen bis zu 6 mW können in Zukunft erwartet werden durch eine Vergrößerung des Auftrefffläche für Elektronen auf dem Target und eine weitere Steigerung bis ca. 1 W insbesondere durch aktive Kühlung der Anode sowie durch Drehanodenaufbauten.

- **Abtrag von metallischen Werkstoffen durch Femtosekunden-Laserpulse**

Laser mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich haben sich als interessante Werkzeuge für die Mikromaterialbearbeitung erwiesen, mit denen man nahezu alle Werkstoffe sehr effizient bei optimal lokalisierter Wärmeeinbringung strukturieren kann [E28, E29]. Der Prozess ist gekennzeichnet durch eine minimale thermische und mechanische Beeinflussung des Substrates, eine vergleichsweise hohe Reproduzierbarkeit sowie durch eine niedrige und scharf ausgeprägte Abtragschwelle [E30]. Die minimalen Strukturgrößen lassen sich bei Verwendung von einfachen Optiken durch das Abbé'sche Gesetz berechnen und liegen in der Größenordnung der Wellenlänge, d.h. für Ti:Saphir Laser bei ca. 1  $\mu\text{m}$ . Interessante Anwendungen für Strukturen oberhalb einiger 10  $\mu\text{m}$  werden gegenwärtig im Präzisionsbohren z. B. für automobile Anwendungen gesehen. Mit Femtosekunden-Laserpulsen konnten Bohrungen mit extrem geringen Toleranzen reproduzierbar

gefertigt werden, die überdies noch eine Strukturvariation des Bohrloches hin zu einer konischen bzw. revers konischen Form zuließen [E31, E32, E33, E34]. Dabei wurden neben der Energiedichte insbesondere auch die Einflüsse der Polarisierung und des Fortschreitens des Bohrloches mit zunehmender Pulszahl untersucht und geeignete Maßnahmen und Strategien zur Vermeidung von Prozessfehlern generiert (z. B. Drehung des linearen Polarisationsvektors, Fokuslagenanpassung).

Die Wechselwirkung von Femtosekundenpulsen mit metallischen Werkstoffen basiert auf der Absorption der einfallenden Laserstrahlung durch das Elektronengas aufgrund von Inverser Bremsstrahlung, dem nachfolgenden Übergang der Energie an das Festkörpergitter, dem Aufbruch der Bindungen und die folgende Materialausdehnung. Das zeitliche und räumliche Verhalten der Elektronen-  $T_e$  und Festkörpergittertemperatur  $T_i$  mit der folgenden Materialausdehnung kann durch das eindimensionale 2-Temperatur-Modell für dünne Metallschichten ausreichend angenähert werden [E35]:

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = -\frac{\partial Q(x)}{\partial x} - \gamma(T_e - T_i) + S - P_e \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \gamma(T_e - T_i) - (P_i + P_c) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} (P_c + P_e + P_i) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Die Gleichungen (2) und (3) sind die Energieerhaltungssätze für das Elektronensystem und Gittersystem mit  $C_e$  und  $C_i$  die Wärmekapazitäten,  $Q(x)$  den Wärmefluss,  $\gamma$  den Übergangsfaktor zwischen Elektronensystem und Gitter,  $S$  der Wärmequelle für den einfallenden Laserstrahl,  $P_e$  und  $P_i$  den thermischen Drücken und  $u$  der Geschwindigkeit des verdampften Materials. Gleichung (4) repräsentiert das Newtonsche Gesetz mit  $\rho$  der Dichte des verdampften Materials und  $P_c$  des elastischen Druckes. Gleichung (5) stellt das Massenerhaltungsgesetz dar. Bei der Bearbeitung mit Femtosekundenpulsen tritt nun ein starkes Überhitzen der Elektronen ein, wobei die Relaxationszeit der Elektronen ausschließlich durch Elektronenstöße bestimmt wird. Die Wärmeleitung durch die Elektronen nimmt dabei stark mit der Elektronen-

temperatur ab, so dass mit Femtosekundenpulsen präzise Abträge nahezu ohne schädigende thermische Nebeneffekte erzielt werden können [E36].

Die Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen mit Festkörpern ist charakterisiert durch zwei Schwellwerte: Die Schwellenergiedichte für thermische Schädigung  $F_{th}^d$  und für Materialabtrag  $F_{th}^a$  (Abb. 3).  $F_{th}^d$  wird festgelegt durch das Erreichen der Schmelztemperatur,  $F_{th}^a$  durch den Beginn der Materialverdampfung. In der Nähe der Verdampfungs-Schwellenergiedichte wird die Abtragsrate durch die optische Eindringtiefe und eine logarithmische Abhängigkeit von der Energiedichte gekennzeichnet. Durch wiederholte Aufheiz- und Abkühlvorgänge und den damit wiederkehrenden Schmelz- und Rekristallisationsvorgängen kann überdies eine Abhängigkeit der Schädigungs- und Abtrags-Schwellenergiedichten von der Anzahl einfallender Pulse und damit eine Art Inkubationsverhalten beobachtet werden [E37].

Zur Erzeugung von Strukturen unterhalb der Beugungsgrenze wird der Strahl des Femtosekundenlasers mit einem Mikroskop- oder Schwarzschildobjektiv stark fokussiert. Bei sehr geringer Pulsenergie kann eine Blasen- bzw. Schaumbildung nach einigen 100 Pulsen beobachtet werden. Dies ist auf Inkubationseffekte zurückzuführen, d. h. mit jedem Puls akkumulieren lokale Defekte und die Temperatur nimmt graduell zu. Die Energiedichte bewegt sich dabei zwischen den Schwellenergiedichten für das Aufschmelzen und Abtragen. Erhöht man nun die Energie um einen kleinen Betrag, so ist nach der gleichen Anzahl an Pulsen ein sehr kleines Loch an der Oberfläche zu beobachten, welches von einer ähnlichen blasenartigen Struktur umgeben ist. Dies deutet darauf hin, dass die Spitzenintensität bei einem gaussförmigen Strahlprofil in diesem Fall im Zentrum über der Abtragschwelle liegt. Die minimale reproduzierbare Strukturgröße, die mit einem Ti:Saphir-Laser und einem Schwarzschild-Mikroskopobjektiv in 100 nm dicken Chrom-Schichten mit diesem Verfahren hergestellt werden konnten, liegen bei 100 nm [E38].

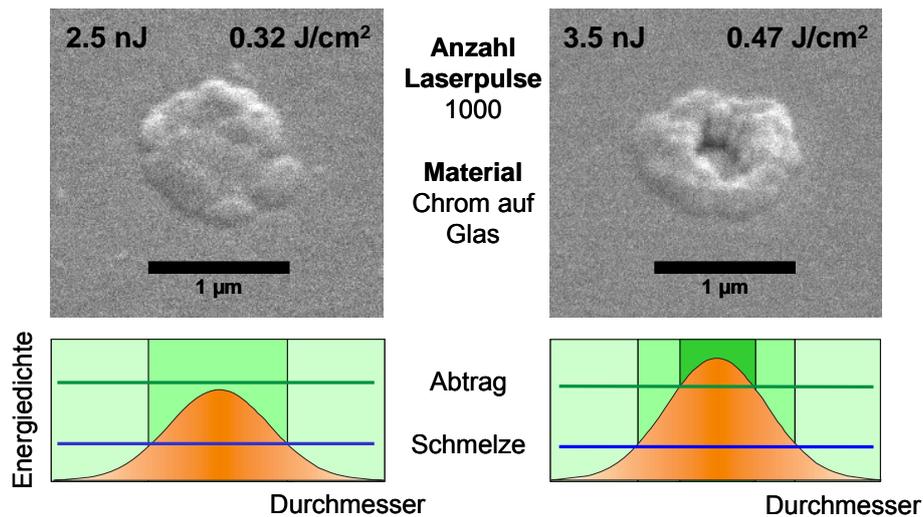


Abbildung 3: Spitzenenergiedichte unterhalb (links) und oberhalb (rechts) der Abtragungsschwelle

Eine Verkleinerung des lateralen Übergangsbereiches, in dem die Blasenbildung auftritt, kann durch eine Maskenprojektion erreicht werden. Die Flanken des auf die Oberfläche auftreffenden Intensitätsbildes sind dabei in der Regel wesentlich steiler, jedoch nehmen bei einem einfachen Sub- $\mu\text{m}$ -Loch die Beugungseffekte stark zu. Das Maskenprojektionsverfahren eignet sich daher für komplexe  $\mu\text{m}$ -Strukturen mit Einzelabmessungen im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich [E39].

Beim Abtragen von Metallen mit einzelnen Pulsen kann der Prozess nach dem Erscheinungsbild der Mikrostrukturen in zwei Gruppen eingeteilt werden kann (Abb. 4). Diese unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen kann man auf die materialspezifische Elektron-Phonon-Kopplung zurückführen, welche die Zeitdauer des Energietransfers vom Elektronensystem zum Phononensystem bestimmt.

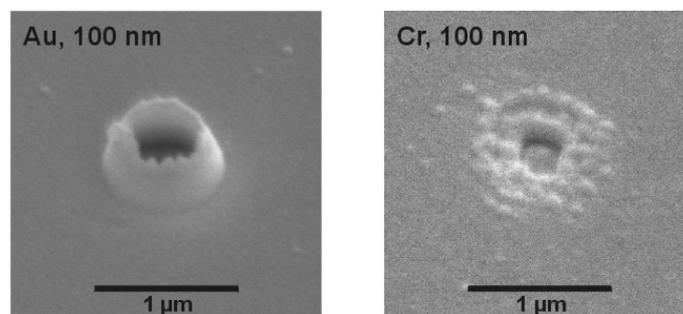


Abbildung 4: Typische Oberflächenmodifikationen an 100 nm dicken Metallschichten erzeugt mit gepulster Laserstrahlung. Die verwendeten Pulsenergien betragen ca. 1,6-fache des Schwellwertes zum Abtragen ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t_p = 30 \text{ fs}$ , ein Puls).

Es ist anzunehmen, dass das Metall vom festen in den flüssigen Zustand übergeht, wenn der Energietransfer vom Elektronensystem ins Phononensystem langsam stattfindet. Ist der Energietransfer sehr schnell, so findet ein Sprung von der festen zur gasförmigen oder Plasma-Phase statt, wobei außergewöhnliche Strukturen, wie z.B. Blasen und Nanospitzen beobachtet werden (Abb. 5).

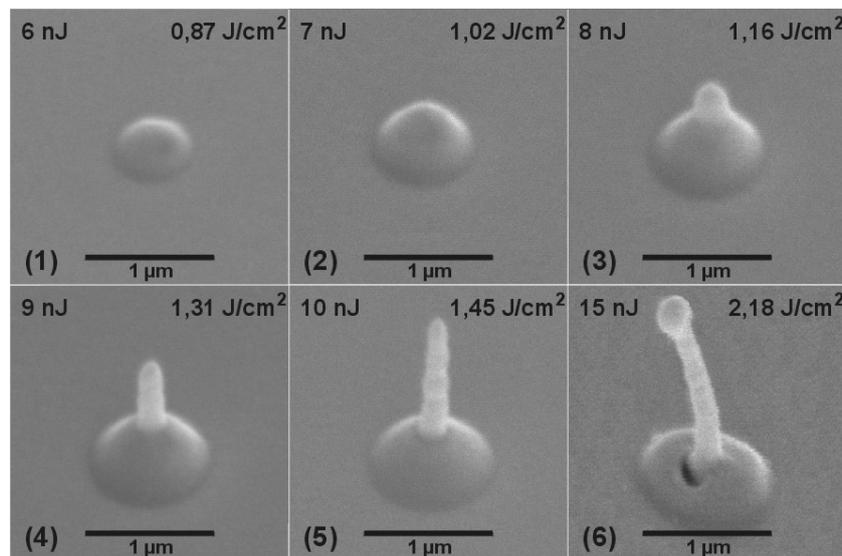


Abbildung 5: Oberflächenmodifikationen auf einer 60 nm dicken Goldschicht erzeugt bei unterschiedlichen Fluenzen (REM,  $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t_p = 30 \text{ fs}$ , ein Puls).

Bei der Bildung von Nanospitzen entsteht auf der Oberfläche bei geringen Energiedichten zunächst eine blasenartige Struktur. Mit zunehmender Energiedichte wächst zusätzlich eine Spitze mit Abmessungen im Nanometerbereich im Zentrum der Blase. Das qualitative Erscheinungsbild entspricht dem eines in eine Flüssigkeit fallenden Tropfens. Näherungsweise kann ein ähnlicher Prozess in einem durch Laserstrahlung geschmolzenen Metallfilm stattfinden, der durch einen einzelnen Puls erhitzt worden ist. Die Oberflächenwellen, welche durch einen Flüssigkeitstropfen hervorgerufen werden, laufen im Zentrum zusammen und formen in der Regel dadurch ein flüssigen Jet bzw. Tropfen. Durch einen auftreffenden Laserpuls wird eine Bewegung der Schmelze initiiert. Die ausgelöste Welle kann im Zentrum kollidieren und anschließend bildet sich aufgrund einer hohen Abkühlrate ein erstarrter Jet aus.

- **Multiphotonen-Absorption in dielektrischen Werkstoffen**

Der Ablationsprozess an transparenten und halbleitenden Werkstoffen basiert auf der nichtlinearen Wechselwirkung mit ultrakurzen Pulsen. Sie erfordert eine extrem hohe Konzentration von Photonen in Raum und Zeit, d. h. hohe Intensitäten bzw. hohe Photonenflussdichten. Bei Intensitäten im Bereich  $\text{TW}/\text{cm}^2$  besteht die Möglichkeit einer simultanen Absorption von mehreren NIR-Photonen (Multiphotonenabsorption) [F7]. Die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband erfordert zur Erzeugung freier Elektronen bei dielektrischen Werkstoffen die gleichzeitige Absorption mehrerer Photonen mit geringerer Energie. Die durch Multiphotonenabsorption erzeugten freien Elektronen werden im hochintensiven Laserfeld weiter beschleunigt bevor es zu einer lawinenartigen Vermehrung durch Stoßprozesse (Avalanche-Effekt) und zum optischen Durchbruch mit der Bildung eines Mikroplasmas kommt. Dieses Mikroplasma dehnt sich aus und erzeugt dadurch eine Abtragsgeometrie an der Oberfläche. Durch die Multiphotonenabsorption ergibt sich, dass nicht die einfache Intensität für die Abtragsgeometrie ursächlich ist, sondern vielmehr  $I^q$ , wobei  $q$  in diesem Fall die minimale Anzahl der Photonen darstellt, die zur Überwindung der Bandlücke notwendig sind. Die entstehende Strukturgröße ergibt sich bei einfacher Fokussierung entsprechend der Beugungsbegrenzung durch

$$d = \frac{1}{\sqrt{q}} \cdot k \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (6).$$

Die exponentielle Abhängigkeit der effektiv wirkenden Intensität von der Anzahl der notwendigen gleichzeitig wirkenden Photonen führt zu einer effektiven Einschnürung der Kaustik mit zunehmender Photonenanzahl. Dies bewirkt insbesondere, dass für Werkstücke mit zunehmender Bandlücke die erzeugbaren minimalen Strukturgrößen abnehmen. Die Bearbeitung von halbleitenden Werkstoffen mit nur geringem Bandabstand bedingt einen 1- oder 2-Photonenprozess, so dass hierbei in der Regel nur eine klassische Mikrobearbeitung – gleichwohl mit sehr hoher Präzision und Reproduzierbarkeit im Vergleich zu längeren Laserpulsen – möglich ist [E40, E41, E42]. Bei einem 9-Photonen-Prozeß ergeben sich hingegen dreimal kleinere Strukturen als bei einfacher Fokussierung mit Beugungsbegrenzung. Da mit zunehmender Anzahl von Photonen auch der Absorptionsquerschnitt abnimmt, tritt

dieser Effekt nur bei ausreichend hohen Intensitäten, d. h. extrem kurzen Pulsen ein. Mit diesem Ansatz konnten laterale Strukturabmessungen bis zu 250 nm gefertigt werden [E43]. Die erzielbaren Strukturen sind damit bei diesem Prozess sehr stark werkstoffabhängig. Laser- und Werkstoffparameter müssen bei dieser Methode der Submikrometer-Strukturierung wesentlich besser aufeinander abgestimmt werden, verglichen mit der Mikrostrukturierung bei längeren Pulsdauern (Abb. 6) [E44].

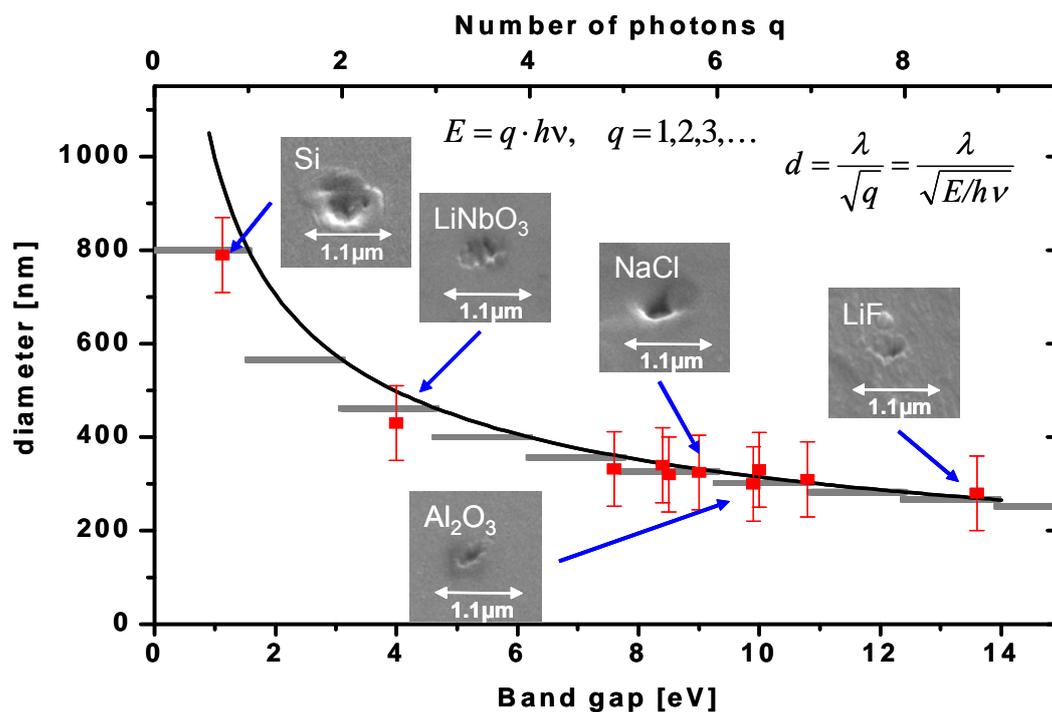


Abbildung 6: Erzielbare Lochdurchmesser bei Multi-Photonenabsorption in Abhängigkeit des Bandabstandes verschiedener Werkstoffe

Eine weitere und für Femtosekundenpulse einzigartige Möglichkeit ergibt sich bei einer Fokussierung des Strahls im Volumen, z. B. bei Glaswerkstoffen. An der Oberfläche ist die Intensität bei einer Wellenlänge um 800 nm dabei noch zu gering um eine Modifikation zu erzielen. Erst im Fokusbereich im Innern des Glases ergibt sich eine ausreichend hohe Intensität für eine nichtlineare Absorption mit nachfolgender Materialschädigung. Bei moderaten Pulsenergien um einige μJ kommt es dabei nicht zur Ausbildung von Volumenrissen, sondern lediglich zu einer Erhöhung des Brechungsindex. Dies wird verursacht durch die Bildung von Farbzentren und durch die Wirkung thermomechanischer Spannungen. Die Änderung des

Brechungsindex kann Werte bis  $\Delta n=10^{-2}$  annehmen [F8]. Wird dieses Phänomen als schreibendes Verfahren umgesetzt, lassen sich dreidimensionale Wellenleiter im Volumen des Materials erzeugen. Dieses Verfahren eröffnet damit neue Perspektiven für die Fertigung integrierter Optiken [E45].

- ***Nahfeld-Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen***

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Strukturgrößen weit unterhalb der Beugungsbegrenzung stellt die Übertragung mittels optischem Rasternahfeldmikroskop dar [E46]. Bei dieser Methode werden die Vorteile hochintensiver Strahlung, die sich aus der ultrakurzen Pulsdauer ergeben, kombiniert mit einer gezwungenen örtlichen hohen Auflösung. Im sogenannten Beleuchtungsmodus werden Femtosekundenpulse in die spitz zulaufende Rastersonden-Hohlfaser eingekoppelt, die dann im Nahfeldabstand über die Werkstückoberfläche bewegt wird (Abb. 7). Vorteilhaft wie bei allen Abtragsverfahren mit Femtosekunden-Laserpulsen ist, dass dieser Prozess im Gegensatz zum Beispiel zur Elektronenstrahlolithographie bei moderaten Pulsenergien an Umgebungsluft ablaufen kann. Die verwendete Hohlfaser weist für kürzere Wellenlängen eine bessere Transmission auf, so dass bei Verwendung eines Ti:Saphir-Lasers die frequenzverdoppelte oder – verdreifachte Wellenlänge vorzuziehen ist. Bei Energiedichten, die ungefähr 50% über der Ablationsschwelle liegen, konnten in 100 nm dicken Chromschichten Strukturen bis zu einer minimalen Breite von 200 nm erzeugt werden [E47]. Aufgrund der kleinen bestrahlten Fläche reicht es trotz der Verluste in der Hohlfaser aus, Pulse mit einer geringen Energie von max. 5  $\mu\text{J}$  in die Hohlfaserspitze einzukoppeln.

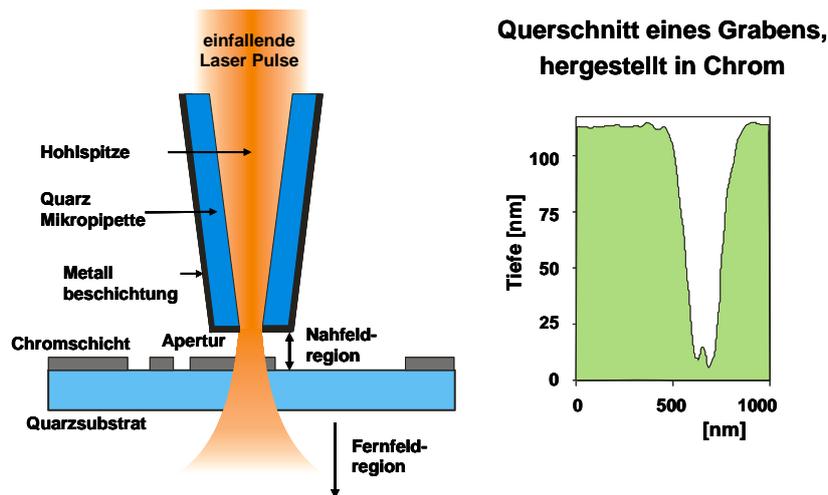


Abbildung 7: Nahfeldbearbeitung: Anordnung (links) und Querschnitt durch eine nanoskalige Grabenstruktur (rechts)

- **2-Photonen-Polymerisation**

Ein alternativer Ansatz zur Fertigung komplexer dreidimensionaler nanoskaliger Strukturen basiert auf dem Prinzip der Stereolithographie. Die Stereolithographie gehört zu den etablierten Verfahren des Rapid Prototyping und wurde 1987 durch das Unternehmen 3D Systems Inc. erstmals vorgestellt.

Bei der konventionellen Stereolithographie werden 3D-CAD-Daten (STL-Daten) in 2D-Querschnitte umgewandelt. Ein computergesteuerter UV-Laserstrahl bildet die jeweiligen Konturen der Schichten auf einem flüssigen Photopolymer ab. Dort, wo der Laserstrahl auf das Harz trifft, härtet dieses aus. Das entstehende Polymer-Modell wird um eine Schichtdicke in das Harz abgesenkt und die nächste, darüber liegende Schicht kann ausgehärtet werden.

Grundlage dieses Verfahrens ist die Photopolymerisation, d.h. die exotherme Reaktion von Monomer-Molekülen zu kettenförmigen Makromolekülen (Polymeren). Besondere Bedeutung kommt dabei den Initiatoren zu, die durch Absorption der einfallenden elektromagnetischen Strahlung in reaktive Einzelprodukte zerfallen und damit die Polymerisation starten. Die reaktionsfähigen Teilstücke des Photoiniators reagieren dann mit den im Monomer vorhandenen Kohlenstoff-Doppelbindungen bei Acrylat, Meth-Acrylat und Venylether bzw. bei Epoxid mit den reaktionsfähigen

Ringstrukturen. Nachteilig bei der Verwendung von radikalischen Initiatoren ist deren Affinität zu Sauerstoff, so dass Sauerstoff dem Prozess die Radikale entzieht und die Polymerisation behindert (Sauerstoffinhibierung). Für die Stereolithographie werden gegenwärtig UV-reaktive Photopolymere eingesetzt, die überdies vergleichsweise unempfindlich gegenüber künstlichem Umgebungslicht sind. Die Polymerisation findet aufgrund der Sauerstoffinhibierung bei diesem Verfahren immer an der gekapselten Oberfläche statt.

Konventionelle Stereolithographie-Prozesse verfügen über Genauigkeiten von min. 0,2 mm und sind damit nicht für die Mikrobearbeitung geeignet. Durch sukzessive Optimierungen konnte die Genauigkeit um einige Größenordnungen gesteigert (MIPRO Prozess) [E48, E49].

Im Gegensatz dazu findet bei der 2-Photonen-Polymerisation [F9] aufgrund des stark intensitätsabhängigen Prozesses die Polymerisation nur in einem kleinen Volumen in der Umgebung des Fokuspunktes statt. Bei sehr starker Fokussierung und einer Anpassung der Intensität an die Polymerisationsschwelle können mit diesem Verfahren komplexe dreidimensionale Strukturen im Submikrometerbereich generisch erzeugt werden. Grundlage des Verfahrens ist, dass beim Einsatz von ultrakurzen Pulsen im NIR-Bereich der flüssige Harzwerkstoff für diesen Spektralbereich transparent ist und dass der Absorptionsquerschnitt bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge im blauen Spektralbereich ausreichend hohe Werte besitzt. Mit diesem volumenbasierten Verfahren sind bereits photonische Kristalle, Mikromotoren, Mikrooszillatoren, Nanofedern, etc. gefertigt worden. Neben den Acrylat- und Epoxid-Harzen haben sich insbesondere wegen ihrer herausragenden optischen Eigenschaften auch multifunktionale anorganisch-organische Hybridpolymere für die 2-Photonen-Polymerisation bewährt. Ihre Eigenschaften können über einen großen Bereich von rein organischen Polymeren bis zu amorphen anorganischen Glasstrukturen eingestellt werden [F10].

Aufbauend auf den Hybridpolymeren wurden zahlreiche praktische und theoretische Untersuchungen durchgeführt. So konnte gezeigt werden, dass aufgrund der charakteristischen Schwelleigenschaften des Prozesses durch Einstellungen der Pulsenergie und der Anzahl applizierter Pulse Strukturgrößen jenseits der Beugungs-

grenze erreicht werden konnten. Um die minimale Strukturgröße für ein Volumenpixel (sog. Voxel) vorherzusagen, wurde ausgehend von der Ratengleichung für reaktive Photoinitiatoren, der Definition einer Mindestdichte für diese Teilchen zur Initiierung der Polymerisation sowie der Berücksichtigung der Strahlkaustik die zu erwartende Voxel-Länge sowie -Breite berechnet [E50]. Bei Verwendung eines 80 MHz-Femtosekundenoszillators mit einer zentralen Wellenlänge bei 780 nm und einem Gewichtsanteil der Photoinitiatoren von 2,5% konnte eine sehr gute Übereinstimmung von Theorie und Praxis beobachtet werden.

Mit Hilfe dieser Technologie konnten komplexe nanoskalige Strukturen wie z.B. photonische Kristalle, Nanokapseln für die Medizintechnik oder Skulpturen (z. B. eine Mikrovenus) mit einer Gesamtgröße von weniger als 50  $\mu\text{m}$  erzeugt werden [E51]. Das technologische Potenzial für dieses Verfahren ist sehr groß und verspricht für die Zukunft eine Reihe neuer Anwendungen und Submikrometer-Bauteile (Abb. 8).

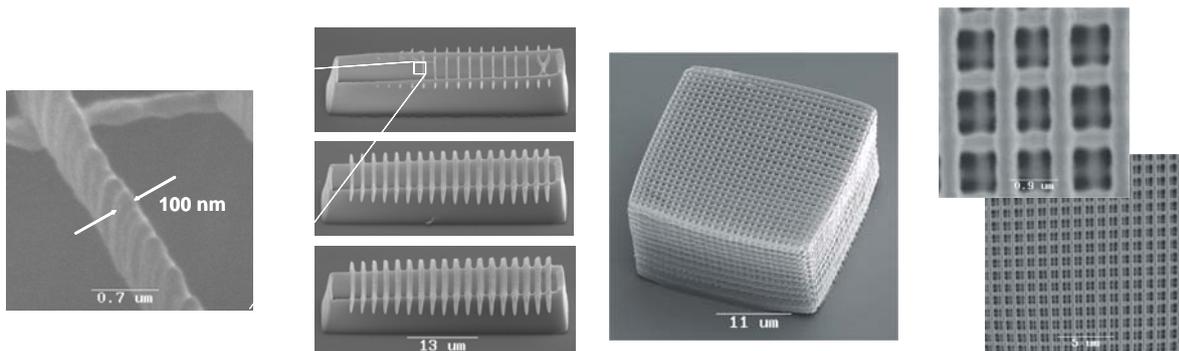


Abbildung 8: Freitragende Polymer-Nanostruktur (links) und photonische Kristallstruktur (rechts)

Aber auch für ebene Strukturen auf Wafern mit einem z. B. im Spincoating-Verfahren aufgebrachtem Flüssigmonomer stellt diese Form der nichtlinearen Belichtung ein sehr einfaches und flexibles Verfahren dar, um nm-Strukturen im Nachgang zu einer Entwicklung zu ätzen. Vorteil hierbei ist die Möglichkeit des Direktschreibens, d. h. es kann auf eine aufwändige Maske verzichtet werden. Bedenkt man, dass Maskensätze in der Halbleiterlithographie für 65 nm-Strukturen bis zu 3 Mio. US\$ kosten sollen, stellt diese Form der Belichtung mit sehr hohen Repetitionsraten durchaus eine sehr interessante Alternative für geringere Stückzahlen dar.

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Reihe von Methoden existieren, die eine Submikrometer-Bearbeitung mit Lasern und optischen Verfahren ermöglichen. Der für die Massenfertigung mikro- und nanoelektronischer deterministischer Strukturen gegenwärtig aussichtsreichste Ansatz ist die EUV-Lithographie. Für eine breite Umsetzung fehlen heute noch zuverlässige Strahlquellen mit ausreichend hoher Ausgangsleistung. Es wurde ein Ansatz auf Basis einer modifizierten Röntgenröhre aufgezeigt, wie zumindest für den unteren Leistungsbereich eine zeitlich und räumlich extrem stabile Quelle realisierbar ist. Im Gegensatz zu den Plasmaquellen besitzt diese zudem keine Debris-Problematik. Gegenwärtige Arbeiten befassen sich mit der Leistungsskalierung bis in den Watt-Bereich.

Ultrakurze Laserpulse besitzen bei der Wechselwirkung mit Materialien eine Vielzahl von Eigenschaften, die sie ebenfalls für die Bearbeitung jenseits des Beugungslimits qualifizieren. Bei der Bearbeitung metallischer Werkstoffe existieren für Femtosekundenpulse aufgrund des thermischen Ungleichgewichtes zwischen Elektronensystem und Gitter wohl definierte Schmelz- und Abtragsschwellen, die es ermöglichen, die Energie und das Strahlprofil des Lasers gezielt an die gewünschte Nanostruktur anzupassen. Bei dielektrischen oder transparenten Werkstoffen kommt zusätzlich begünstigend die nichtlineare Multiphotonenabsorption hinzu. Durch diese Verfahren können Strukturgrößen bis hinunter zu 100 nm erzeugt werden. Eine sehr interessante und mit großem Anwendungspotenzial behaftete Methode ist die 2-Photonen-Polymerisation. Mit diesem generischen Verfahren lassen sich in nahezu einzigartiger Weise dreidimensionale beliebig komplexe Strukturen mit Submikrometer-Auflösung produzieren.

Insgesamt ist der Laser damit ein sehr interessantes Verfahren für Strukturen bis hinunter zu 100 nm. Im Vergleich zu Alternativtechnologien ist der Laser vielmals auch das kostengünstigere Verfahren. Für kleinere Strukturen bis zu 50 nm wird als optisches Verfahren insbesondere in der Elektronik- und Halbleiterfertigung die EUV-Lithographie oder andere EUV-basierte Verfahren favorisiert. Für noch kleinere Strukturen ist gegenwärtig allerdings noch keine Lasertechnologie vorhanden, d.h.

dieses Gebiet von einigen bis einigen 10 nm wird nach gegenwärtigem Kenntnisstand voraussichtlich alternativen Verfahren vorbehalten bleiben.

Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich in den folgenden Thesen zusammenfassen, die bereits weitestgehend belegt sind:

1. These: Das Beugungslimit aus der klassischen Optik kann bei der nichtlinearen Wechselwirkung (Multiphotonenprozesse) von Laserstrahlung mit Werkstoffen prinzipiell überwunden werden.
2. These: Die Nutzung von nanooptischen Komponenten wie Nahfeldspitzen im Strahlengang eines Lasers ermöglicht die Umgehung der Abbildungsgrenzen der klassischen Optik.
3. These: Je größer der Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband im zu strukturierenden nichtleitenden Werkstoff, desto besser sind die Nanostrukturierungsmöglichkeiten, d. h. dielektrische Werkstoffe ermöglichen kleinere Strukturen wie Metalle oder Halbleiter. Infolgedessen müssen Werkstoff und Werkzeug deutlich besser aufeinander abgestimmt werden als dies bei der Mikrostrukturierung, die gerade bei fs-Lasern sehr universell ist, der Fall ist.
4. These: Kurzwellige Strahlung bis in den EUV-Bereich bietet hervorragende Möglichkeiten zur Nanostrukturierung an ebenen Oberflächen. Ultrakurzpuls-Laser ermöglichen eine darüber hinausgehende Erzeugung von 3D-Strukturen im Werkstoffvolumen.

## 7. Eigene Publikationen

- E1. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.: Laser-Based Manufacturing – Competition or Ideal Complement to Conventional Production Technologies. In: CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol. 28, No. 1, 1999, pp. 13-19
- E2. Ostendorf, A.: Lasertechnik – Mit neuen Strahlquellen und erweiterten Parametern zu innovativen Anwendungen, Akademie-Journal No. 1, 2004, pp. 12-18
- E3. Tönshoff, H.K.; Overmeyer, L.; Ostendorf, A.; Korthals, J.: Measurement of Macro and Micro Geometries by Laser Radiation, Production Engineering – Research and Development in Germany (Annalen der WGP), Vol. III, No. 1, 1996, pp. 141-145
- E4. Tönshoff, H.K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Hillers, O.: Online Quality Control of Laser Welding with Line-scanning IR-detection. In: Sheet Metal 1999, Proceedings of Intern. Conference SheMet 99, 1999, pp. 253-260
- E5. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Specker, W.; Stallmach, M.: Neue Entwicklungen in der Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. In: 4. Laser-Anwenderforum, Bremen, 12./13.09.2002, pp. 71-80
- E6. Tönshoff, H.K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Berndt, A.: Separation of Glass Tubing by Using Sealed-off CO<sub>2</sub> Lasers. Laser und Optoelektronik Vol. 29, No. 6, 1997, pp. 52-59
- E7. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Graumann, C.; Kral, V.; Thiessen, B.: Minimising thermal cracking for laser cutting of ceramics, by implementing a closed-loop control system, Proceedings European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT 1998, pp. 391 – 396
- E8. Ostendorf, A.; Körber, K.; Temme, T.; Bann, B.; Apte, P.; Haberzettl, H.; Budischewski, T.: Flexible Processing of Large Scale LCD Panels Using Scanner Deflected UV-Laser Radiation. In: *Micromachining and Microfabrication Process Technology VI*; J.M. Karam, J.A. Yasaitis; Eds., Proceedings of SPIE Vol. 4174, 2000, pp. 256-266
- E9. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Körber, K.; Kulik, K.; Kamlage, G.: Micro Material Processing using UV Laser and Femtosecond Laser. In: 10th International Conference on Precision Engineering (ICPE), 2001, pp. 62-66

- E10. Ostendorf, A.: High Precision Machining Using Ultrashort Pulsed Lasers – Status and Future Prospects in Europe. Proceedings of the 53rd Laser Materials Processing Conference, Japanese Laser Processing Society, July 2001, pp. 80 – 85
- E11. Tönshoff, H.K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Willmann, G.; Wagner, T.: Precision Machining using UV and Ultrashort Pulse Lasers. In: Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS, Bernard Courtois, Selden B. Crary, Wolfgang Ehrfeld, Hiroyuki Fujita, Jean Michel Karam, Karen Markus, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 3680, 1999, pp. 536-545
- E12. Ostendorf, A.; Bauer, T.; Korte, F.; Howorth, J.; Momma, C.; Rizvi, N.; Saviot, F.; Salin, F.: Development of an Industrial Femtosecondlaser Micro-machining System. In: *Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast and Free-Electron Lasers*, Glenn S. Edwards, Joseph Neev, Andreas Ostendorf, John C. Sutherland, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4633, 2002, pp. 128-135
- E13. Bärsch, N.; Körber, K.; Ostendorf, A.; Tönshoff, H.K.: Ablation and Cutting of Planar Silicon Devices Using Femtosecond Laser Pulses. *Appl. Phys. A*, Vol. 77, No. 2, 2003, pp. 237-242
- E14. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Schäfer, K.: Fiber Laser – Compact Source for Micro-Welding, Proceedings of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'98, Vol. 85, Section E, pp. 106-111
- E15. Ostendorf, A.: The Use of Vacuum UV Wavelengths and Ultrashort Laser Pulses for Micromachining of Dielectrics. In: Proceedings of ICALEO 2000, Vol. 90, 2000, pp. A1 – A11
- E16. Tönshoff, H.K.; Overmeyer, L.; Ostendorf, A.; Hesener, H.: New Machining Concept for Manufacturing Microstructures with Excimer Lasers, *Machining Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, 1997, pp. 153-162
- E17. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Wais, J.; Prieur, J.: Machining of Optical Materials by Deep UV Lasers, *Laser Assisted Net Shape Engineering 2*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Lane 97, M. Geiger, F. Vollertsen, Editor, 1997, pp. 835-844
- E18. Tönshoff, H.K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Kulik, C.: Advanced Micro Machining with Excimer Lasers. Precision engineering – nanotechnology: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International euspens Conference - Volume 2, 1999, pp. 48-51

- E19. Ostendorf, A.; Tönshoff, H.K.; Kulik, C.; Meyer, K.: Improved Machining Strategy for the Micro Drilling of Ceramics Using Excimer Lasers. In: Laser Assisted Net Shape Engineering 3, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> LANE 2001, M. Geiger, A. Otto, Editor, pp. 613-622
- E20. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Körber, K.; Temme, T.: Processing of Transparent and Dielectric Materials with Deep UV- and VUV Excimer Laser Radiation. International Journal of Electrical Machining (IJEM) No. 6, Januar 2001, pp. 27-32
- E21. Ostendorf, A.; Arens, W.; Kulik, C.; Temme, T.: Anlagen- und Prozesstechnik für die Mikrobearbeitung mit Vakuum-UV Excimer-Laser. In: Vakuum in Forschung und Praxis, Vol. 13, No. 2, 2001, pp. 96-101
- E22. Ostendorf, A.; Kulik, C.; Stute, U.: Production of Innovative Geometries with UV Lasers. In: *Photon Processing in Microelectronics and Photonics*, Koji Sugioka, Malcolm C. Gower, Richard F. Haglund, Alberto Pique, Frank Träger, Jan J. Dubowski, Willem Howing, Editors, SPIE Vol. 4637, 2002, pp. 280-290
- E23. Ostendorf, A.; Körber, K.; Meyer, F.: Micro-Structuring of Photo Resists by UV Laser Radiation. Proceedings of 21st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO 2002, CD-ROM compiled and produced by the Laser Institute of America LIA
- E24. Ostendorf, A.; Körber, K.; Temme, T.; Bann, B.; Apte, P.: High Speed Micro-Machining with Scanner Deflected UV Laser Radiation. In: Proceedings 19th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 2000, pp. A 49-58
- E25. Egbert, A.; Ostendorf, A.; Mißalla, T. Schürmann, M.C.; Gäbel, K.; Schriever, G.; Stamm, U.: Compact Electron-Driven EUV Source. Lambda Highlights No. 61, Nov. 2002, pp. 6-8
- E26. Egbert, A.; Chichkov, B.N.; Ostendorf, A.: Ultrashort X-ray Source Driven by Femtosecond Laser Pulses. In: Europhysics Letters, 56 (2), 2001, pp. 228-233
- E27. Egbert, A.; Mader, B.; Tkachenko, B.; Ostendorf, A.; Fallnich, C.; Chichkov, B.; Mißalla, T.; Schürmann, M.C.; Gäbel, K.; Schriever, G.; Stamm, U.: Compact Electron-based Extreme Ultraviolet Source at 13.5 nm. Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems JM3, No. 2, 2003, pp. 136-139

- E28. Meijer, J.; Du, K.; Gillner, A.; Hoffmann, D.; Kovalenko, V.S.; Masuzawa, T.; Ostendorf, A.; Poprawe, R.; Schulz, W.: Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons. In: Manufacturing Technology, Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 2, 2002, pp. 531-550
- E29. Lubatschowski, H.; Heisterkamp, A.; Will, F.; Singh, A.I.; Serbin, J.; Ostendorf, A.; Kermani, O.; Heermann, R.; Welling, H.; Ertmer, W: Medical and Biological Applications for Ultrafast Laser Pulses. In *Third International Symposium on Precision Microfabrication*, edited by Isamu Miyamoto, Kojiro F. Kobayashi, Koji Sugioka, Reinhard Poprawe, Henry Helvajian, SPIE Vol. 4830, 2003, pp. 537-543
- E30. Tönshoff, H.K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Kamlage, G.; Nolte, S.: Micromachining of Metals Using Ultrashort Laser Pulses. IJEM Review – International Journal of Electrical Machining, No. 4, January 1999, pp. 1-6
- E31. Tönshoff, H. K.; Momma, C.; Ostendorf, A.; Nolte, S.; Kamlage, G.: Microdrilling of Metals with Ultrashort Laser Pulses, Journal of Laser Applications, Vol. 12, No. 1, 2000, pp. 1-5
- E32. Nolte, S.; Momma, C.; Kamlage, G.; Ostendorf, A.; Fallnich, C.; von Alvensleben, F.; Welling, H.: Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling, Applied Physics A, Vol. 68, No. 5, 1999, pp. 563-567
- E33. Ostendorf, A.; Kamlage, G.; Chichkov, B.: Precise Deep Drilling of Metals by Femtosecond Laser Pulses. RIKEN Review No. 50, Jan. 2003, pp. 87-89
- E34. Kamlage, G.; Bauer, T.; Ostendorf, A.; Chichkov, B.N.: Deep Drilling of Metals by Femtosecond Laser Pulses. Appl. Phys. A, Vol. 77, No. 2, 2003, pp. 307-310
- E35. Ostendorf, A.: Precise Structuring Using Femtosecond Lasers. The Review of Laser Engineering, Vol. 30, No. 5, Edn: The Laser Society of Japan, May 2002, pp. 221-225
- E36. Tönshoff, H.K.; Kamlage, G.; Momma, C.; Nolte, S.; Ostendorf, A.: Microdrilling of Metals with Ultrashort Laser Pulses, Proceedings of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'98, Vol. 85, Section A, pp. 28-37
- E37. Korte, F.; Koch, J.; Nolte, S.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; Chichkov, B. N.: Nanostructuring of metal layers and transparent materials with femtosecond laser pulses, Proceedings of 21st International Congress on Applications of

- Lasers & Electro-Optics ICALEO 2002, CD-ROM compiled and produced by the Laser Institute of America LIA
- E38. Korte, F.; Koch, J.; Nolte, S.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; Chichkov, B. N.: Towards nanostructuring with femtosecond laser pulses, In: Nanotechnology, edited by Robert Vajtai, Xavier Aymerich, Laszlo B. Kish, Angel Rubio Proceedings of SPIE Vol. 5118, 2003, pp. 93-100
- E39. Chichkov, B.N.; Ostendorf, A.; Korte, F.; Nolte, S.: Femtosecond Laser Ablation and Nanostructuring. In: Proceedings of 20th International Congress Applications of Lasers & Electro-Optics on ICALEO 2001
- E40. Ostendorf, A.; Bauer, T.; Temme, T.; Wagner, T.: Short-Pulse and Short-wavelength Ablation of Semiconductor Materials. In: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI*, Malcolm C. Gower, Henry Helvajian, Koji Sugioka, Jan J. Dubowski, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4274, 2001, pp. 116-124
- E41. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Wagner, T.: Structuring Silicon with Femtosecond Lasers. In: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI*, Malcolm C. Gower, Henry Helvajian, Koji Sugioka, Jan J. Dubowski, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4274, 2001, pp. 88-97
- E42. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Bärsch, N.: Processing of Semiconductors with Femtosecond Lasers. In: *High-Power Laser Ablation IV*, Claude R. Phipps, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4760, 2002, pp. 326-334
- E43. Chichkov, B.N.; Korte, F.; Koch, J.; Nolte, S.; Ostendorf, A.: Femtosecond laser ablation and nanostructuring. In: *High-Power Laser Ablation IV*, Claude R. Phipps, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4760, 2002, pp. 19-24
- E44. Ostendorf, A.; Koch, J.; Korte, F.; Chichkov, B.N.: Nanostructuring of solids with femtosecond laser pulses. In: *High-Power Laser Ablation V*, Claude R. Phipps, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 5448, 2004, pp. 1-6
- E45. Korte, F.; Adams, S.; Egbert, A.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; Nolte, S.; Will, M.; Ruske, J.-P.; Chichkov, B. N.; Tünnermann, A.: Sub-Diffraction Limited Structuring of Solid Targets with Femtosecond Laser Pulses. *Optics Express*, Vol. 7, No. 2, 2000, pp. 41-49

- E46. Nolte, S.; Kamlage, G.; Bauer, T.; Korte, F.; Wagner, T.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; Welling, H.: Precise Ablation with Femtosecond Lasers, *Nonlinear Optics*, Vol. 24, 2000, pp. 229-232
- E47. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Nolte, S.; Kamlage, G.; Wagner, T.; Korte, F.; Bauer, T.: New Applications of Femtosecond Lasers in Micromachining. In: *Proceedings of the 1st Euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology*, Vol. 1, 2000, pp. 10-17
- E48. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Körber, K.; Beil, A.: Flexible Machining System to Produce Micro Prototypes. In: *Micromachining and Microfabrication Process Technology VI*; J.M. Karam, J.A. Yasaitis; Eds., *Proceedings of SPIE Vol. 4174*, 2000, pp. 182-192
- E49. Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Körber, K.; Beil, A.: Production of Complex Micro-parts Using Layer-Based Manufacturing. *Proceedings of 20th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO 2001*, 2001, CD-ROM compiled and produced by the Laser Institute of America LIA
- E50. Korte, F.; Serbin, J.; Koch, J.; Egbert, A.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; Chichkov, B.N.: Towards Nanostructuring with Femtosecond Laser Pulses. *Appl. Phys. A*, Vol. 77, No.2, 2003, pp. 229-235
- E51. Serbin, J.; Egbert, A.; Ostendorf, A.; Chichkov, B.; Houbertz, R.; Domann, G.; Schulz, J.; Cronauer, C.; Fröhlich, L.; Popall, M.: Femtosecond Laser-induced Two-photon Polymerization of Inorganic-organic Hybrid Materials for Applications in Photonics. *Optics Letters*, Vol. 28, No. 5, 2003, pp. 301-303

## 8. Fremde Literatur

- F1. Chou, S. Y. ; Keimel, C.; Gu, J.: Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon. *Nature* Vol. 417, No. 6891, 2002, pp. 835-837
- F2. Jersch, J.; Dickmann, K.: Nanostructure fabrication using laser field enhancement in the near field of a scanning tunneling microscope tip, *Applied Physics Letters*, Vol 68, No. 6, 1996, pp. 868-870
- F3. Huang, S. M.; Hong, M. H.; Lu, Y. F.; Luk`yanchuk, B. S.; Song, W. D.; Chong, T.C.: Pulsed Laser-Assisted Surface Structuring with Optical Nearfield Enhanced Effects, *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 5, 2002, pp. 2495-2500
- F4. Chimmalgi, A.; Choi, T.Y; Grigoropoulos, C. P.; Komvopoulos, K.: Femtosecond laser apertureless near-field nanomachining of metals assisted by scanning probe microscopy, *Applied Physics Letters*, Vol. 82, No. 8, 2003, pp. 1146–1148
- F5. Optech Consulting: Market Report: Laser Materials Processing - 2003 Edition, [www.optech-consulting.com](http://www.optech-consulting.com)
- F6. Stamm, U.; Schwoerer, H.; Lebert, R.: Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie. *Physik Journal 1*, No. 12, 2002, pp. 33-39
- F7. Stuart, B. C.; Feit, M. D.; Herman, S.; Rubenchick, A. M.; Shore, B. W.; Perry, M. D.: Optical ablation by high-power short-pulse lasers, *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 13, 1996, pp. 459-468
- F8. Will, M.; Nolte, S.; Chichkov, B.N., Tünnermann, A.: Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses, *Applied Optics*, Vol. 41, 2002, pp. 4360
- F9. Kawata, S.; Sun, H.-B.; Tanaka, T.; Takada, K.: Finer features for functional microdevices. *Nature*, 412, 2001, pp. 697 – 698
- F10. Houbertz, R.; Domann, G.; Cronauer, C.; Schmitt, A.; Martin, A.; Park, J. U.; Fröhlich, L.; Buestrich, R.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.: Inorganic-organic hybrid materials for application in optical devices. *Proc. 4th International Conference on Coatings on Glass (4th ICCG)*, Ed.: C. P. Klages, H. J. Gläser, M. A. Aegerter, 2002, pp. 605 – 615

## Lebenslauf

**Dr.-Ing. habil. Andreas Ostendorf**

Geburtsdatum: 06. Mai 1968 in Neuenkirchen, Ldkrs. Osnabrück  
verheiratet, 1 Kind

### **Wissenschaftliche Laufbahn**

- 2005            Habilitation an der Leibniz Universität Hannover “Laser als Werkzeug in der Mikro- und Nanostrukturierung”, Venia Legendi für Optische Technologien
- Seit 2001        Vorstandsmitglied und Geschäftsführer im Laser Zentrum Hannover e.V.
- 2000 - 2001    Geschäftsführer im Laser Zentrum Hannover e.V.
- 2000            Promotion an der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover, Dissertation “Untersuchungen zum Präzisionsabtrag mit VUV-Laserstrahlung und ultrakurzen Laserpulsen”
- 1997 – 2000    Leiter der Abteilung Produktions- & Systemtechnik im Laser Zentrum Hannover e.V.
- 1995 – 1997    Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Laser Zentrum Hannover e.V.
- 1989 – 1994    Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover

### **Berufliche Aktivitäten**

- Seit 2004        Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat der Forschungsgemeinschaft Feinmechanik, Optik, Medizintechnik e.V. (FOM), Berlin
- Seit 2004        Kuratorium der Forschungsgemeinschaft für Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW), Remscheid
- Seit 2004        Mitglied im Board of Directors und Executive Committee „Laser Institute of America“ LIA
- Seit 2003        Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik e.V. (WLT)
- Seit 2003        Mitglied im Sonderforschungsbereich 599 “Zukunftsfähige bioresorbierbare und permanente Implantate aus metallischen und keramischen Werkstoffen”
- Seit 2003        Mitglied der Forschergruppe 505 “Hochleistungsfügen von Hybridstrukturen”
- Seit 2001        Mitglied im Programmausschuss “Optische Technologien” im Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
- Seit 2001        Mitglied im Vorstand „Zentrum für biomedizinische Technik und Innovation e.V.“, Hannover
- Seit 2002        Mitglied im Sonderforschungsbereich 516 “Aktive Mikrosysteme”
- 2000-2001      Initiator und Gründungsgeschäftsführer des Kompetenznetzwerks für Optik und Photonik in Niedersachsen PhotonicNet GmbH

### **Preise, Auszeichnungen**

- 2003            Preis der Gottlieb-Daimler- und Carl Benz-Stiftung verliehen durch die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften