

Prof. Dr. Rolf Clasen  
Lehrstuhl für Pulvertechnologie von Glas und Keramik  
Campus C6 3, D-66123 Saarbrücken



**UNIVERSITÄT  
DES  
SAARLANDES**

**Praktikum Materialwissenschaft und  
Werkstofftechnik PR11-2 (WS 2011/12)**

Leitung (0681) 302 – 5008  
Sekretariat (0681) 302 – 5007  
Fax (0681) 302 5227  
Bearbeiter Dr.-Ing. G. Falk  
Durchwahl 5062  
e-mail [g.falk@nanotech.uni-saarland.de](mailto:g.falk@nanotech.uni-saarland.de)

<http://www.uni-saarland.de/fak8/powdertech>

Laserstrukturierung von Kieselglasgrünkörpern

**1. Kurzbeschreibung**

Inhalt des Versuches:

Auf der apparativen Grundlage einer CO<sub>2</sub>-Laser-Sinterapparatur sollen mikrostrukturierte Kieselglasgrünkörper hergestellt werden.

Durchführung des Versuches:

Die aus Excelica SE15 Pulver (Tokuyama, Japan) und OX 50 (Evonik, Degusaa) im Verhältnis 90:10 gegossenen Kieselglasgrünkörper liegen als Versuchsproben vor. Für die Laserbearbeitung der Proben wird ein CO<sub>2</sub>-Lasersystem mit einem Slab-Laser verwendet. Dieser verfügt über eine Ausgangsleistung von 100 W bei einer Pulsfrequenz von bis zu 20 kHz und einer Leistungsstabilität von  $\pm 7$  %. Die emittierte Laserstrahlung verfügt über eine Wellenlänge von 10,6  $\mu\text{m}$ . Die dem Laser nachgeschaltete Scannereinheit ermöglicht es, den Weg des Laserstrahls über die Probenoberfläche genau vorzugeben. So lässt sich auf einer Fläche von 100 mm x 100 mm jeder beliebige Punkt ansteuern. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Laserstrahl über diese Fläche geführt wird, lässt sich hierbei auf bis zu 7477 mm/s festlegen. Durch die Verwendung der Scannereinheit erfolgt eine Fokussierung des Laserstrahls in einem gewissen Abstand von der Scannereinheit. Daher lässt sich mit Hilfe eines höhenverstellbaren Tisches der Brennfleckdurchmesser auf der Probenoberfläche zwischen 350  $\mu\text{m}$  und 7,5 mm variieren.

Um die thermischen Spannungen während des Laserbearbeitungsprozesses zu reduzieren, wird auf dem höhenverstellbaren Tisch eine Heizplatte installiert. Mit Hilfe dieser Heizplatte können die Proben bis auf eine Temperatur von 540 °C vorgeheizt werden.

Die Laserbearbeitung kann durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst werden. Um die Variablenanzahl überschaubar zu halten, werden während des Versuches jedoch nicht alle Parameter variiert. Zu den wichtigsten Parametern gehören der Durchmesser des Laserstrahls an der Probenoberfläche und die Laserleistung. Aus diesen beiden Parametern ergibt sich die jeweilige Leistungsdichte.

Für die Laserablation erfolgt die Bearbeitung der Proben im Brennpunkt des die Scannereinheit verlassenden Laserstrahls bei einem Strahldurchmesser von 350  $\mu\text{m}$ .

Bei der Laser-Strukturierung von Kieselglasgrünkörpern werden für die grundlegenden Untersuchungen zunächst einfache Linien mit dem Laserstrahl abgescannt.

Zunächst wird bestimmt, welchen Einfluss die Parameter Scangeschwindigkeit und Leistungsdichte haben. Daher wird der Laserstrahl mit Hilfe des Scanners in geraden Linien über die Grünkörperoberfläche geführt. Die Laserleistung wird hierbei konstant bei 90 W gehalten. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Geschwindigkeit, mit welcher der Laserstrahl über die Probenoberfläche geführt wird, die so genannte Scangeschwindigkeit. Die Scangeschwindigkeit wird zwischen 50 und 400 mm/s variiert.

Die Pulsfrequenz des CO<sub>2</sub>-Lasers wird bei allen Versuchen unverändert auf 20 kHz belassen. Auch die Rückstellgeschwindigkeit des abstrahierenden Laserstrahles wird nicht verändert. Sie wird bei der Werkseinstellung von 7477 mm/s gehalten.

Die absorbierte Laserenergie führt zu einem Materialabtrag entlang der gescannten Linie. Die Probe wird in einem Lichtmikroskop untersucht und ausgewertet. Vermessen wurden die Linientiefe, von der interpolierten Oberfläche bis zum tiefsten Punkt des Ablationskraters, und die Linienbreite, der maximale Abstand der beiden gegenüberliegenden Flanken.

## **2. Vorbereitung**

### **2.1 Grundlagen**

Die Bezeichnung LASER ist die Abkürzung für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Das der Lasertechnologie zu Grunde liegende Prinzip der stimulierten Emission wurde 1917 erstmals von Albert Einstein beschrieben. Die theoretische Grundlage zur stimulierten Emission bilden quantenmechanische Systeme (wie z.B. Atome, Ionen oder Moleküle), welche sich im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Temperatur T befinden. Der Einfachheit halber sollen im Folgenden nur so genannte Zweiniveau-Systeme betrachtet werden, welche nur zwei Energieniveaus besitzen. Der Zustand des niedrigeren Energieniveaus  $E_1$  wird als Grundzustand bezeichnet, der Zustand des oberen Energieniveaus  $E_2 > E_1$  wird als angeregter Zustand bezeichnet.

Befindet sich ein Teil der Atome, Ionen oder Moleküle im angeregten Zustand mit der Energie  $E_2$ , so kehren diese unabhängig vom vorhandenen Strahlungsfeld nach einer Verweildauer  $\tau$  in den Grundzustand zurück. Gemäß der Planck'schen Beziehung

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (1)$$

wird ein Photon mit der Frequenz  $\nu$  spontan emittiert.

Ein Atom, Ion oder Molekül, welches sich im Grundzustand  $E_1$  befindet, kann unter Einwirkung eines Strahlungsfeldes durch Absorption eines Photons der Energie  $\nu = E_2 - E_1$  in den angeregten Zustand überführt werden. Dieser Prozess wird als induzierte Absorption bezeichnet.

Befindet sich ein Atom, Ion oder Molekül im angeregten Energiezustand  $E_2$  und erfährt die Einwirkung eines Strahlungsfeldes, so steht außer der spontanen Emission eine weitere Möglichkeit der Zustandsänderung zur Verfügung, die stimulierte Emission. Hierbei ändert das Atom, Ion oder Molekül unter Abgabe eines Photons  $\nu = E_2 - E_1$  seinen Zustand von  $E_2$  zu  $E_1$ .

Gelingt es mehrere Atome in einen angeregten Zustand zu überführen, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Photon emittiert wird, größer als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon absorbiert wird. Dadurch übersteigt die

induzierte Emission die spontane Emission. Den Vorgang, Atome in den angeregten Zustand zu bringen, nennt man Pumpen, die erforderliche Energie nennt man Pumpenergie. Das Pumpen kann durch Stoßanregung der Atome, Ionen oder Moleküle in Gasen oder Plasmen geschehen, durch Anregung mittels externer elektromagnetische Strahlung (optisches Pumpen), durch Stromdurchgang oder durch chemische Reaktionen.

Die technische Umsetzung dieses Pumpprinzips erfolgt mit Hilfe eines Resonators. Dieser besteht aus zwei Spiegeln, zwischen denen das Licht in einem laseraktiven Medium hin- und herläuft und dabei verstärkt wird, während von außen die notwendige Pumpenergie zugeführt wird. Mindestens einer der Spiegel ist teildurchlässig, so dass der Laserstrahl ausgekoppelt werden kann.

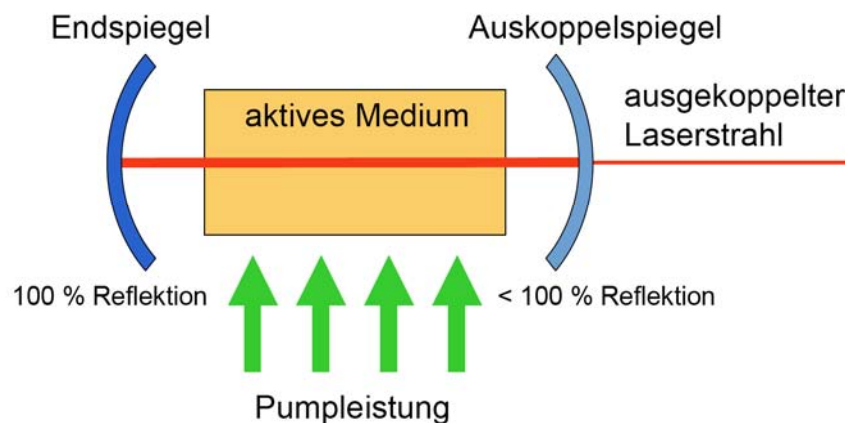


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Resonators

Um möglichst hohe Ausgangsleistungen zu erzielen, werden Laser nicht nur kontinuierlich (*continuous wave, cw*), sondern auch gepulst betrieben. Im gepulsten Betrieb wird die erzeugte Laserstrahlung nur in zeitlich begrenzten Pulsen emittiert. Der Mittelwert der Ausgangsleistung bleibt dadurch zwar konstant, die Energie der einzelnen Pulse liegt aber weit darüber. Durch eine Reduzierung der Pulsdauer lässt sich die maximale Pulsleistung steigern. Je nach zeitlicher Länge der Pulse spricht man von Kurz- oder Ultrakurzpulsen. Pulszeiten in der Größenordnung von Nanosekunden werden derzeit in kommerziell erhältlichen Lasern eingesetzt. Pulszeiten im Bereich von Piko- oder Femtosekunden können mit Hochleistungs-lasern erreicht werden.

Die Realisierung der Pulsung geschah anfangs noch über mechanische Schalter, heute wird sie entweder mit elektrooptischen oder magnetooptischen Schaltern unter der Ausnutzung nichtlinearer optischer Effekte realisiert.

Laserstrahlung zeichnet sich im Vergleich zu elektromagnetischer Strahlung thermischer Quellen durch ihre hohe räumliche Kohärenz aus. Diese erlaubt es, die Laserstrahlung auf sehr kleine Radien zu fokussieren, die lediglich durch Beugungseffekte begrenzt werden. Der bei der Wellenlänge  $\lambda$  minimal mögliche Radius  $r_{\min}$  ergibt sich zu

$$r_{\min} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda \cdot f}{R_L} \quad (2)$$

wenn  $R_L$  den Radius des Laserstrahls vor der Fokussierung und  $f$  die Brennweite der Optik darstellt. Laserlicht kann als eine monochromatische, linear polarisierte, plane Welle, die sich in Richtung der so genannten optischen Achse ausbreitet, mathematisch beschrieben werden. Ein homogenes, nicht absorbierendes Ausbreitungsmedium vorausgesetzt, ergibt sich das elektrische Feld dieser Welle zu

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(2\pi z/\lambda - \omega t)} \quad (3)$$

mit  $z$  als Koordinate in Ausbreitungsrichtung, der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Wellenlänge  $\lambda$ . Die letzten beiden Größen sind durch die Phasengeschwindigkeit  $c/n_1$  miteinander verknüpft:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{c}{n_1} \quad (4)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit darstellt und  $n_1$  den Brechungsindex des Ausbreitungsmediums.

Der Energiefluss der Welle bezogen auf die Einheitsfläche definiert die Leistungsdichte oder auch Intensität

$$I = n_1 \epsilon_0 c \vec{E}_0^2 \quad (5)$$

Ausgehend von einer homogenen Intensitätsverteilung im Resonator, wird diese bei der Ausbreitung des Strahls von einem Resonatorspiegel zum anderen durch Beugungseffekte verändert. Nach vielen Umläufen stellt sich eine Intensitätsverteilung im Strahl ein, die sich von Umlauf zu Umlauf reproduziert. Die sich ausbildenden Intensitätsverteilungen entsprechen den Eigenlösungen des optischen Resonators und werden als transversal elektromagnetische Moden oder TEM-Moden bezeichnet. Welcher der Moden sich ausbildet, ist direkt abhängig von den Resonatorspiegeldurchmessern, deren Abstand und der Wellenlänge des Laserlichts

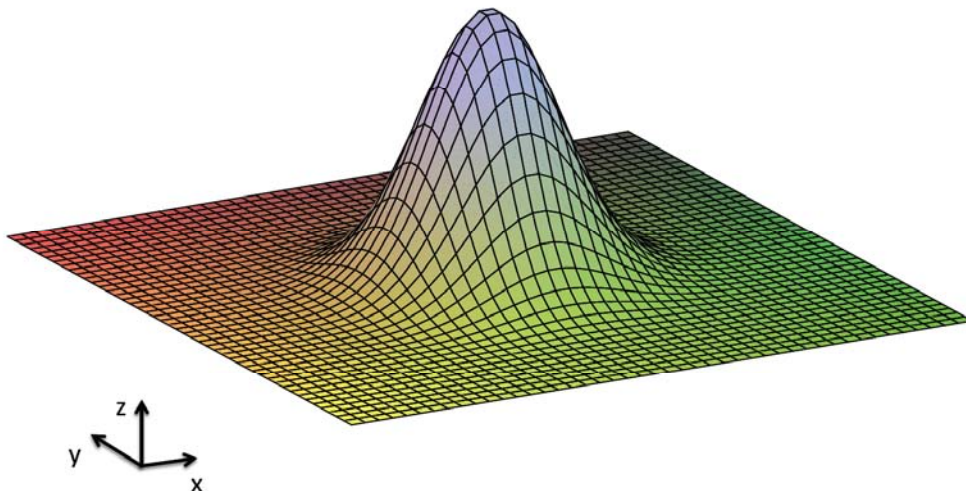


Abb. 2: Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt im Grundmode TEM<sub>00</sub>

Der wohl am häufigsten verwendete Mode ist der Grundmode TEM<sub>00</sub>. Er zeichnet sich durch eine gaußförmige Verteilung der Intensität über den Strahlquerschnitt aus (Gaußscher Strahl), die in Abbildung \ref{abb:Gaussverteilung} dargestellt ist und sich mathematisch wie folgt beschreiben lässt

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{R_L^2}\right) \quad (6)$$

mit  $R_L$  als Strahlradius und  $I_0$  als Intensität entlang der z-Achse ( $r=0$ ). Da die so beschriebene Verteilungsfunktion keinen Nulldurchgang in x- und y-Richtung besitzt, wird der Strahldurchmesser  $R_L$  allgemein als der Abstand von der z-Achse definiert, bei dem das Intensitätsmaximum  $I_0$  auf einen Wert von  $I_0/e^2$  abgefallen ist. Die Gesamtleistung des Laserstrahls ergibt sich unter diesen Annahmen zu

$$P = 2\pi \int_0^\infty r I(r) dr = \pi R_L^2 I_0 \quad (7)$$

Um in der praktischen Anwendung des Lasers als Wärmequelle eine Vergleichbarkeit der verwendeten Laserparameter gewährleisten zu können, bezieht man sich im Allgemeinen aber auf die Leistungsdichte, da sie die Gesamtleistung  $P$  des Laserstrahls und den verwendeten Strahldurchmesser  $\varnothing$  zu einem Parameter zusammenfasst. Geht man nun in erster Näherung davon aus, dass die Laserenergie homogen über den Strahldurchmesser verteilt ist, dann ergibt sich die Leistungsdichte  $\rho$  zu

$$\rho = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi R_L^2} = \frac{4P}{\pi \varnothing^2} \quad (8)$$

wobei  $A$  die Querschnittsfläche des Laserstrahls ist. Die exakte Bestimmung des Strahlprofils und damit auch des Strahldurchmessers gestaltet sich in der Praxis als nicht trivial. Der Messaufwand und/oder die Kosten für die entsprechenden Diagnosegeräte sind entsprechend hoch. In der Literatur sind einige solcher Verfahren detailliert beschrieben, weshalb im Folgenden nicht näher darauf eingegangen werden soll.

Die Einkopplung von Laserenergie in einen Festkörper bei hohen Laserlichtintensitäten (Keramik, u.a.: Hartmetall, Keramik, Polymere, Glas, Diamant) ist infolge der Dampfphasenbildung mit einer Evaporation von Atomclustern, Molekülen, Ionen und Elektronen verbunden. Mit dem Verlassen der Materie von der Oberfläche wird dem Substrat somit kinetische und eventuell auch innere Energie entzogen.

Die aufzuwendende Energie zur Entfernung eines Atoms von der Oberfläche beträgt:

$$\Delta H^a \text{ (J/Atom)} = \Delta H \text{ (J/g)} / N_s \approx \Delta H_v \text{ (J/g)} / N_s \quad (9)$$

mit:

$\Delta H_v = \Delta H_v(T_b)$  : Verdampfungsenthalpie bei der Verdampfungstemperatur  $T_b$

$N_s = \rho \cdot L/M$  : Atomdichte

$L$  : Avogadro Konstante

$M$  : Atomgewicht pro mol

Kollektive Effekte, Tröpfchenbildung aufgrund hydrodynamischer Instabilitäten oder Ausbrüche von Fragmenten aufgrund innerer Spannungen reduzieren die Energie des Materialabtrages nur unwesentlich.

Die Thermalisierung der aus der Oberfläche austretenden Materie führt in einer Entfernung weniger freier Weglängen von der Oberfläche zur Ausbildung von Grenzflächen, der *Knudsen Schicht*, in denen starke Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewicht vorliegen. Es kommt dort zur Ausbildung eines starken Temperatur- und Druckgradienten in axialer Richtung, welche eine starke Beschleunigung der Dampf Wolke in axialer Richtung zur Oberfläche begründet. Vereinfacht kann die Expansion der Dampfphase jenseits des Knudsenbereiches mit der adiabaten Expansion eines idealen Gases beschrieben werden, wobei die Temperatur der Gaswolke mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche abnimmt. Im Vakuum nimmt die Gasgeschwindigkeit zunächst mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche bis zu einer Grenzgeschwindigkeit zu. Für den Fall eines umgebenden Gases nimmt die Gasgeschwindigkeit zunächst mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche zu und nimmt danach wieder ab. In diesem Fall weist die desorbierte Materie eine nicht-Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung auf. In allen Fällen erzeugt die austretende Materie einen Rückstoßdruck auf das Substrat. Bei Vorhandensein bereits geschmolzener Oberflächenschichten und fokussierter Laserbestrahlung führt dieser Rückstoßdruck zu einer teilweisen Emission von Materie (vgl. Abbildung 1). Das abgetragene Material kann ebenso Schockwellen erzeugen. Die Dampf Wolke absorbiert und streut ferner die einfallende Laserstrahlung.

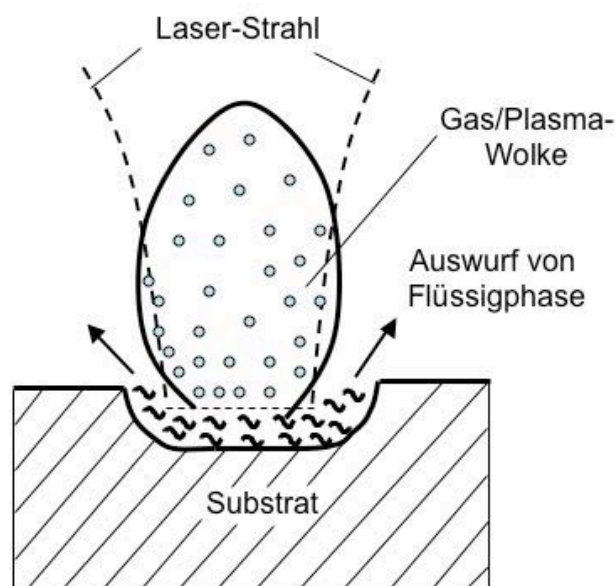


Abb. 3: Laserinduzierte oberflächliche Schmelzphasenbildung, Verdampfung und Auswurf der flüssigen Phase.

Zur Abschätzung der Verdampfungsraten soll modellhaft angenommen werden, dass die Substrate glatte Oberflächen aufweisen. Die Tiefe der Krater soll viel kleiner sein als ihr Durchmesser ( $h \ll d$ ). Die Zusammenhänge werden bei tiefen Kratern komplexer, insbesondere wenn  $h > d$ . Einige typische Querschnitte, die nach experimentellen Untersuchungen gefunden wurden, sind in der nachfolgenden Abbildung (vgl. Abbildung 2) dargestellt. Das Maß  $T = h/d$  wird als Aspektverhältnis bezeichnet. Bei tiefen Strukturen muss zusätzlich die laserinduzierte Temperaturverteilung berücksichtigt werden, die die geometrischen Parameter der Kraterbildungen während des Ablationsprozesses beeinflusst.

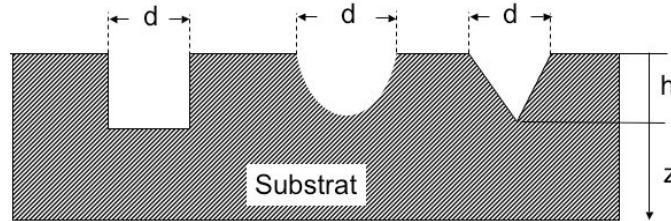


Abb. 4: Modellstruktur für tiefe Loch- und Kraterbildungen in orthogonaler Orientierung zur Substratoberfläche.  $d$  ist definiert als die Kraterbreite und  $h$  ist die maximale Kratertiefe.

Die einfachste näherungsweise Berechnung der Prozesszeiten zur Erzielung flacher und tiefer Strukturen basiert auf dem Energiegleichgewicht.

Unter der Annahme, dass der Materialabtrag größtenteils mittels Verdampfung erfolgt, kann die absorbierte Laserenergie aufgeteilt werden in Beiträge zur Festkörpererwärmung, Schmelzen und Verdampfung des Materials. Für Laserlichtintensitäten jenseits der Schwellenintensität für Ablation,  $I = P / F > I_{th}$ , mit Laserleistung  $P$  und der aufgeschmolzenen Fläche  $F$ , kann die abgetragene Materialtiefe,  $\Delta h$ , die während der Laserwirkdauer  $\tau_l$  wirksam ist, abgeschätzt werden mit:

$$\Delta h \approx \frac{A \cdot P - P_L}{F \cdot \rho [c_p (T - T_0) + \Delta H_m + \Delta H_V]} \cdot \tau_l \quad (10a)$$

$$\Delta h \approx \frac{A \phi - \phi_L}{\Delta H_V \cdot \rho} \quad (10b)$$

$\Delta h$ : ablatierte Schichtdicke

$A$ : Absorptionsmaß ( $A = \varepsilon \cdot b \cdot c$ )

$\varepsilon$ : molare Absorptivität ( $L / (m \cdot mol)$ )

$b$ : opt. Wegstrecke (m)

$c$ : Konzentration (mol/L)

$\Delta H_V$ : volumenbezogene Verdampfungsenthalpie des Substrates ( $kJ/m^3$ )

$\Delta H_m$ : volumenbezogene Schmelzenthalpie des Substrates ( $kJ/m^3$ )

$c_p$ : spezifische Wärmekapazität des Substrates ( $kJ / (kg \cdot K)$ )

$F$ : Fläche ( $m^2$ ) des einfallenden Laserspots

$\rho$ : Dichte ( $kg/m^3$ )

$\tau_l$ : Einwirkzeit der Laserstrahlung auf das Substrat (s)

- P: Laserleistung (W) oder (J/s)  
P<sub>L</sub>: Verlustleistung an Laserenergie durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung (W)  
φ<sub>L</sub>: Laserfluenzverlust (J/m<sup>2</sup>) oder (W·s/m<sup>2</sup>)  
φ: Laserfluenz (Energiedichte); φ = I<sub>0</sub> · τ<sub>l</sub> (J/m<sup>2</sup>) oder (W·s/m<sup>2</sup>); I<sub>0</sub> = P/F

In dieser Näherung werden die Abschirmung des einfallenden Laserlichtes durch die gebildete Dampfphase, die Rekondensation ablatierten Materials innerhalb der Bearbeitungszone und die Emission der Schmelzphase in Form von Atomclustern oder Fragmenten vernachlässigt.

Der Term P<sub>L</sub> trägt dabei dem Verlust an thermischer Strahlung und Energie Rechnung, die innerhalb des nicht ablatierten Materialvolumens (infolge Wärmeleitung, Konvektion, Absorption, chemischen Reaktionsenthalpien, etc.) verbleibt. T beschreibt die mittlere Temperatur, bei der die Evaporation des Materials stattfindet. Im Falle sehr kurzer Pulse kann die Verdampfungstemperatur signifikant überschritten werden. Nach dem obigen Ansatz wird ebenfalls angenommen, dass die Wärmekapazitäten des Festkörpers, der Flüssigphase sowie der Dampfphase gleich sind. Ferner wurde die Temperaturabhängigkeit aller Materialparameter nicht berücksichtigt. Die optimalen Ablationsbedingungen werden bei einer festen Laserleistung erreicht, wenn die absorbierte Laserlichtenergie so effizient wie möglich genutzt wird. Dies ist bei einer geringen Überhitzung des ablatierten Materials und bei kleinen P<sub>L</sub>-Werten der Fall. Im Fall der oberflächlichen Energieabsorption der Laserstrahlung

$$I_T \gg I_c \quad (11)$$

ist dies der Fall, solange in guter Näherung

$$\Delta h \approx I_T \quad (12)$$

erfüllt ist. Diese Bedingung erlaubt schließlich die Abschätzung der optimalen Pulsdauer. Sind die Energieverluste gegenüber der zur Evaporation aufgewendeten Energie klein, so kann

$$P_L \approx 0 \quad (13)$$

angenommen werden. Damit geht eine Zunahme der ablatierten Schichtdicke einher, die proportional zur eingestrahlt Laserfluenz ist:

$$\Delta h \approx \phi_a / \Delta H_V \quad (14)$$

Selbst bei Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie Metallen, bei denen φ<sub>L</sub> nicht vernachlässigt werden kann, nimmt Δh oftmals linear mit φ zu. Der Grund liegt in der annähernden Konstanz von φ<sub>L</sub>, solange τ<sub>l</sub> fest ist. Starke Nichtlinearitäten werden beobachtet, sobald Laser-Plasma-Festkörper-Wechselwirkungen bedeutsam werden. Innerhalb der keramischen Technologieentwicklungen kommt der Laser-Mikrobearbeitung keramischer Hochleistungswerkstoffe eine zunehmende Bedeutung zu.

Die Vorteile der lasergestützten Bearbeitung sind eine hohe Kantensteilheit, eine geringe Kantenrauigkeit, keine Mikrorissbildung und eine kontaktfreie Materialbearbeitung. Weitere Anwendungsbeispiele der Lasertechnologie betreffen

die Laserstrukturierung von Gläsern, das lasergestützte Mikrobohren von LTCC-Keramiken mit Lochdurchmessern kleiner 75  $\mu\text{m}$  sowie das lasergestützte Mikroritzen oder Laser-Schneiden hochfester Keramiken zum Trennen mit hoher Qualität und Genauigkeit.

## **2.2 Literatur**

### Grundlagen

- [1] F. K. Kneubühl and M. W. Sigrist, *Laser*. 6. Auflage ed. (2005), Wiesbaden: Teubner Verlag. 413.
- [2] C. Buerhop, *Glasbearbeitung mit Hochleistungslasern*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, (1994).
- [3] M. v. Allmen and A. Blatter, *Absorption of Laser Light*, in: *Laser-Beam Interactions with Materials - Physical Principles and Applications*. (1998), Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, S. 5-40.
- [4] D. Bäuerle, *Measurement Techniques*, in: *Laser Processing and Chemistry*. (2000), Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, S. 619-629.
- [5] D. Bäuerle, *Lasers, Experimental Aspects, Spatial Confinement*, in: *Laser Processing and Chemistry*. (2000), Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, S. 81-97.
- [6] I. W. Boyd, *Experimental Considerations*, in: *Laser Processing of Thin Films and Microstructures - Oxidation, Deposition and Etching of Insulators*. (1987), Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, S. 100-133.

### Weiterführende Literatur

- [7] G. Herziger and P. Loosen, *Diagnostik von Laserstrahlung*, in: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung: Grundlagen - Systeme - Verfahren*. (1993), Carl Hanser Verlag: München, Wien, S. 21-43.
- [8] I. W. Boyd, *Interactions and Kinetics*, in: *Laser Processing of Thin Films and Microstructures - Oxidation, Deposition and Etching of Insulators*. (1987), Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, S. 15-99.
- [9] D. Ganz, *Herstellung transparenter, leitfähiger antimon-dotierter Zinnoxid-Schichten nach dem Sol-Gel-Prozess mittels CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung*, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken (1998).

## **2.3 Fragen zur Vertiefung der Vorbereitung**

1. Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Gaslasers am Beispiel des CO<sub>2</sub>-Lasers.
2. Wie funktioniert ein Feststoff-Laser?
3. Stellen Sie das Spektrum verschiedener Laserquellen im Wellenlängenbereich von 193 nm bis 10,6  $\mu\text{m}$  dar.
4. Welche Vorteile ergeben sich für den Laserstrahl als thermisches Werkzeug?
5. Welche Parameter bestimmen die Strahlqualität eines Lasers? Wie hängen Strahlqualität und Fokussierbarkeit zusammen?
6. Welche Aktiven Medien tragen zur Erzeugung von Laserlicht bei. Nennen Sie

jeweils Beispiele kommerzieller Lasersysteme.

7. Welche Anwendungen zur Materialbearbeitung mit einem Laser kennen Sie?

8. Wie ist ein Scheibenlaser aufgebaut, wie ein Faserlaser?

9. Was versteht man unter Freie-Elektronen-Laser?

10. Welche Besonderheiten weist ein Halbleiter-Diodenlaser auf? Welche Zusammenhänge ergeben sich zur Leuchtdiode?

### **3. Durchführung:**

#### **3.1 Versuchsaufbau:**

Der Versuchsaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

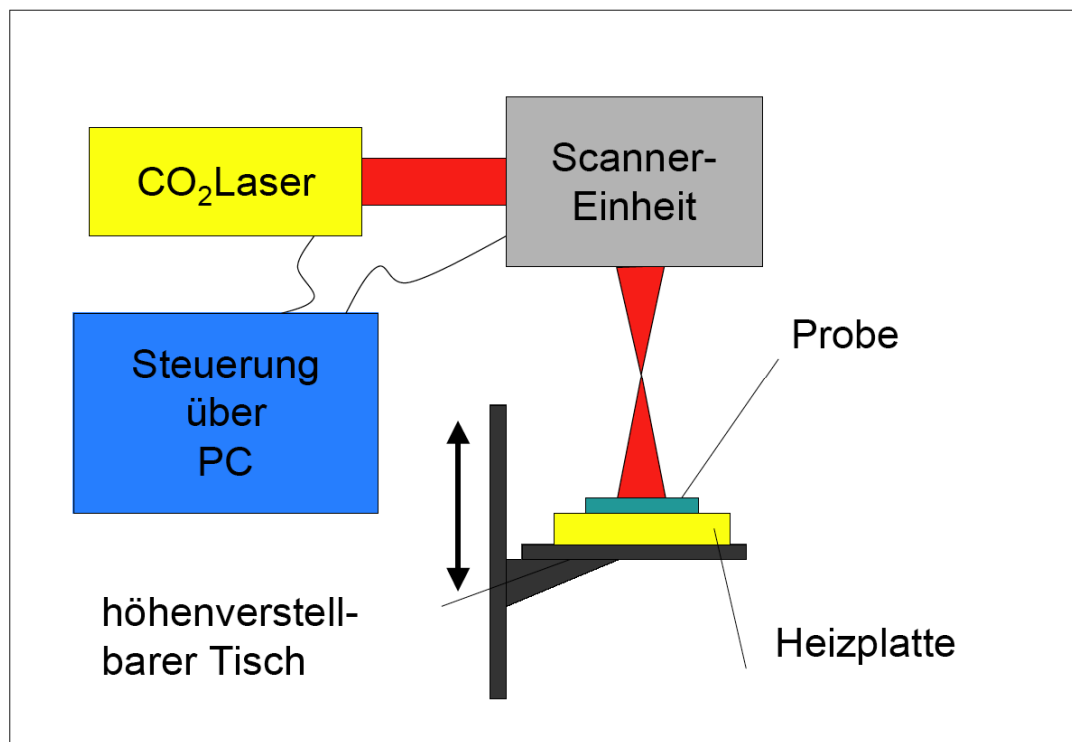


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Laseranlage

#### **3.2 Versuchsdurchführung:**

Für das Einbringen komplexerer Geometrien in die Probenoberfläche bietet die Scannersoftware zwei verschiedene Möglichkeiten: Zum einen können eigens erstellte oder importierte Vektorgrafiken als Vorlage verwendet werden, zum anderen können beliebige Grafiken importiert und in ein so genanntes Scannerbitmap konvertiert werden. Die Konvertierung ist notwendig, da mit dem Laser auf der Probenoberfläche keine Graustufen dargestellt werden können. Optimal sind daher Grafikvorlagen im Duplex-Format, das heißt Grafiken, die nur aus schwarzen und weißen Pixeln zusammengesetzt sind. Bei Vorlagen im JPEG- oder BMP-Format sind in der Regel die Kanten der dargestellten Objekte mit Hilfe von Graustufen geglättet.

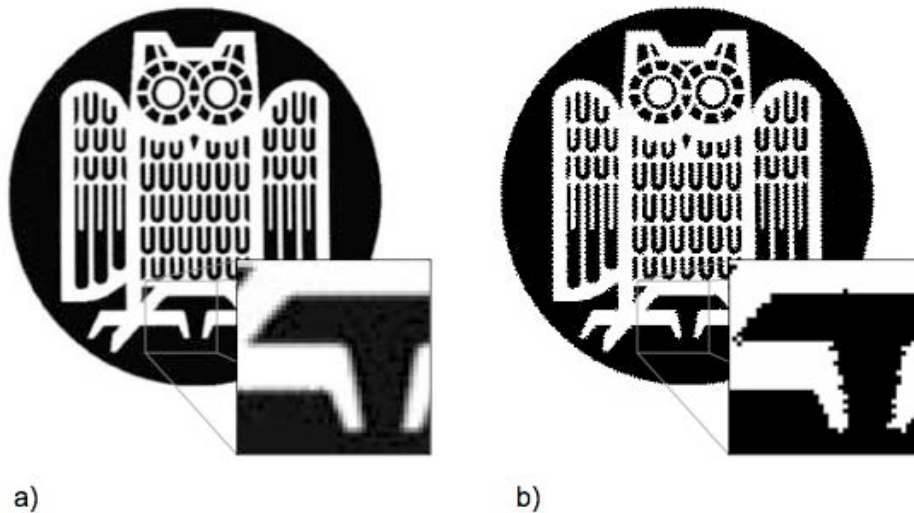


Abb. 6: Entstehung von Artefakten bei der Umwandlung einer Grafikvorlage in ein Scannerbitmap: a) Vorlage b) umgewandeltes Bitmap

Bei einer solchen Vorlage entstehen durch die Umwandlung in ein Scannerbitmap die in Abbildung 1b sichtbaren Artefakte. Die Stärke der Artefaktbildung hängt auch mit der Größe der vorgegebenen Pixel zusammen. Je kleiner die Pixel sind, desto schwächer fällt die Artefaktbildung ins Gewicht. Die Pixelgröße wird jedoch durch die Breite des Brennflecks auf der Probenoberfläche nach unten hin limitiert: Ist die Pixelgröße kleiner als der Brennfleckdurchmesser, kommt es zu einer Mehrfachbestrahlung des entsprechenden Oberflächenbereichs und damit zu einem überhöhten Materialabtrag

Nach der Umwandlung in ein Scannerbitmap werden die Scangeschwindigkeit und die Laserleistung eingestellt. Der Linienabstand wird nun jedoch durch die Pixelgröße festgelegt. Der Scanner steuert zeilenweise die einzelnen Bildpunkte an und belichtet je nach Voreinstellung die schwarzen oder die weißen Bildpunkte. Die Strukturen werden nach der Laserbehandlung mit Hilfe des Lichtmikroskopes untersucht und ausgewertet.

## **4. Auswertung und Protokoll**

### **4.1 Auswertung:**

1. Erzeugen Sie Linienstrukturen auf einem Kieselgrünkörper bei definierten, vorgegebenen Parametereinstellungen. Bestimmen Sie mittels Lichtmikroskopie die Linienbreite und Linientiefe als Funktion der Scangeschwindigkeit. Welche Schlussfolgerungen können Sie ziehen?
2. Ermitteln Sie die theoretische Linientiefe auf der Grundlage der Gleichungen (10a) und (10b) und der beigefügten Annahmen und Parameter. Diskutieren Sie die Abweichungen von den gemessenen Linientiefen.

Legen Sie dazu die folgenden Parameter zugrunde:

Zu 1) a)

Laserleistung (W): 90  
Scangeschwindigkeit (mm/s) 100 / 150 / 200 / 250 / 300

Zu 1) b)

Laserleistung (W): 50  
Scangeschwindigkeit (mm/s) 100 / 150 / 200 / 250 / 300

Zu 2)

A: Absorptionsmaß von SiO<sub>2</sub>: 96 %  
P<sub>L</sub>: angenähert null aufgrund der schlechten Wärmeleitung  
ρ: Gründichte der Grünkörper x 2,2 g/cm<sup>3</sup>  
c<sub>p</sub> (SiO<sub>2</sub>) = 0,72 J/(g·K)  
T = T<sub>b</sub>(SiO<sub>2</sub>) = 2503 K  
T<sub>0</sub> = Raumtemperatur  
ΔH<sub>m</sub> (SiO<sub>2</sub>) = 0,14 · 10<sup>3</sup> J/g  
ΔH<sub>v</sub> (SiO<sub>2</sub>) = 12,3 · 10<sup>3</sup> J/g

τ<sub>S</sub> und F werden vereinfacht wie folgt angenommen:  
Quadratische Einwirkfläche F = (Spotbreite s)<sup>2</sup>

$$\tau_S = s / v_{\text{scan}}$$

$$s = 100 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$$

$$F = 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$\tau_S (v_{\text{scan}} = 100 \text{ mm/s}) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

#### **4.2 Protokoll:**

Im Protokoll sind die Fragen schriftlich zu beantworten, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind zu beschreiben und die Auswertung mit den daraus gewonnen Erkenntnissen **handschriftlich** festzuhalten.