

VDI-Buch

Lasertechnik für die Fertigung

Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur

Bearbeitet von
Reinhart Poprawe

1. Auflage 2004. Buch. xviii, 526 S. Hardcover
ISBN 978 3 540 21406 9
Format (B x L): 15,2 x 22,9 cm
Gewicht: 2100 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Produktionstechnik > Werkzeugbau](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

15 Abtragen und Bohren

15.1 Einzelpulsbohren

Laserstrahlbohren ist definiert als das „Trennen durch thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl“ (DIN 8580 und 8590). Die Vorteile des Laserstrahlbohrens liegen in der hohen Flexibilität und der guten Automatisierbarkeit. Im Vergleich zu anderen Bohrverfahren hat die berührungslose Bearbeitung der Werkstoffe keinen Verschleiß des Werkzeuges zur Folge und ist auch bei harten Werkstoffen nicht von Bohrerbruch betroffen. Fein- und Mikrobohrungen in metallische (Stahl, Aluminium) und keramische (Siliziumcarbid, Aluminiumoxid, Siliziumnitrid) Werkstoffe sowie Kunststoffe (Teflon, Polyimid) werden für Anwendungen z. B. in der Automobilindustrie, Halbleitertechnik, Uhrenindustrie und der Medizintechnik gebohrt. Das Einzelpulsbohren mit Laserstrahlung wird eingesetzt, wenn eine große Anzahl von Bohrungen auf kleinem Raum, z. B. bei Filtern und Sieben, erzeugt werden soll. Die Bohrungsdurchmesser liegen bei 10–250 µm. Bei großen Durchmessern kann mit einem Puls bis zu 2 mm tief gebohrt werden. Die großen Bohrraten (>100 Bohrungen/Sekunde) beim Einzelpulsbohren werden durch ein „fliegendes“ Verfahren erreicht. Dabei wird das Werkstück kontinuierlich unter der gepulsten Laserstrahlung bewegt, so dass Positionierzeiten entfallen.

Zum Laserstrahlbohren alternative Bohrverfahren sind [15.24]:

- das Elektronenstrahlbohren – Abtragen des Werkstoffes mit fokussierter Elektronenstrahlung, vorwiegend Metalle werden bearbeitet, Durchmesser zwischen 0,1–1 mm, Aspektverhältnis 10:1, Bohrrate < 1000 Bohrungen/Sekunde, nur im evakuierten Raum möglich, da die Elektronen sonst bei Zusammenstößen mit Atomen gebremst und abgelenkt werden
- Funkenerosionsverfahren – Abtragen des Werkstoffes durch wiederholte Funkenentladung, nur elektrisch leitende Werkstoffe können bearbeitet werden, Durchmesser < 0,2 mm, sehr kleine Bohrgeschwindigkeit und somit bei großen Werkstoffdicken teuer
- Elektrochemisches Bohren – anodische Materialauflösung in einem flüssigen Elektrolyt, nur metallische Werkstoffe können bearbeitet werden, Durchmesser zwischen 150–500 µm, Aspektverhältnis bis 200:1, komplizierte Bohrungsgeometrien, Bohrungsoberflächen mit höchster Oberflächenqualität, restspannungsfreie Bohrungsumgebung, automatische Entgratung, kleine Bearbeitungsgeschwindigkeit
- Bohren mit Spiralbohrer – mechanisches Abtragen durch Zerspanung, Bearbeitung von nahezu allen industriell eingesetzten Werkstoffen, minimaler Durchmesser von 30 µm, je nach Werkzeug- und Zerspanungsbedingungen Aspektverhältnis

nisse zwischen 1–20:1, sehr begrenzte Lebensdauer der Bohrer bei Durchmessern < 1 mm

- Bohren mit Ultraschall – ein schwingendes Formwerkzeug bewirkt feinste Risse und Abplatzungen, nur für spröde Werkstoffe, wie Saphir, Granit und Keramiken geeignet, minimale Durchmesser etwa $150\ \mu\text{m}$ bei Werkstoffdicken von 0,1–50 mm, kleine Bearbeitungsgeschwindigkeit

15.1.1 Physikalische Grundlagen

Die komplexen Prozesse, die während des Laserstrahlbohrens ablaufen, können mit zwei einfachen physikalischen Modellen veranschaulicht werden:

- Startphase, vom Auftreffen der Laserstrahlung bis zum Erreichen der Verdampfungstemperatur
- Abtragsphase

Für die Startphase aller tiefenwirksamen Bearbeitungsverfahren mit Laserstrahlung, d.h. dem Laserstrahlbohren, -schneiden und -schweißen, sind die maßgeblichen Prozesse

- die Absorption der Strahlungsenergie (Grundlagenteil Kap. 3)
- und die Wärmetransport in den Werkstoff (Grundlagenteil Kap. 4.3).

In dieser Phase wird der Werkstoff aufgeschmolzen und bis zur Verdampfungstemperatur erwärmt. Die Dauer dieser Phase und somit die Zeit vom Auftreffen der Laserstrahlung auf den Werkstoff bis zum Beginn des Abtragens hängt im Wesentlichen von der Einwirkungsdauer ($t > t_V$) und der Intensität ($I_0 > I_V$) ab. Für die Oberflächentemperatur gilt

$$T(z = 0, t) \propto A \cdot I_0 \sqrt{t}. \quad (15.1)$$

Abhängig vom weiteren Prozessverlauf wird bei allen Laserstrahl-Bohrtechniken zwischen den beiden Verfahren Laserstrahl-Schmelzbohren und Laserstrahl-Sublimierbohren unterschieden.

Laserstrahl-Schmelzbohren. Das Abtragen kann mit dem Dampfkolbenmodell veranschaulicht werden. In der Startphase wird der Werkstoff so weit erwärmt, dass ein ausgeprägtes Schmelzbad entsteht. Sobald die Verdampfungstemperatur erreicht wird, entsteht Metaldampf. Dieser expandiert im Grenzfall mit Schallgeschwindigkeit. An der Bohrachse bildet sich eine für die Schmelze undurchlässige Dampfsäule über der Schmelzoberfläche aus. Aufgrund des Rückstoßdruckes des Dampfes wird die Schmelze während der Abtragsphase kontinuierlich am Bohrungsgrund beschleunigt und entlang der Bohrungswand nach oben ausgetrieben (Abb. 15.1, links).

Beim Laserstrahl-Schmelzbohren kann sich Schmelze, die beim Transport aus der Bohrung abkühlt, an der Bohrungswand ablagern. Das kann zum Verschluss der Bohrung führen. Insgesamt ist die Qualität der Bohrung, gemessen an der Bohrungsgeometrie und den Schmelzablagerungen an den Bohrungswänden und der Werkstoffoberfläche, beim Schmelzbohren geringer als beim Sublimierbohren. Dafür wird mit kleinerer Intensität gebohrt, so dass bei gleicher Pulsenergie mehr Werkstoff abgetragen werden kann und schneller große Bohrungstiefen erreicht werden können.

Laserstrahl-Sublimierbohren. Beim Laserstrahl-Sublimierbohren wird der Werkstoff in der Gasphase abgetragen. Die eingestrahlte Intensität I_0 muss sehr viel größer sein als beim Schmelzbohren. Die zum Verdampfen derselben Masse eines Werkstoffes mit ausgeprägter flüssiger Phase, wie z. B. Metall, erforderliche Energie ist bis zu einer Ordnung größer als zum Schmelzen.

Durch die große Intensität wird die Verdampfungstemperatur in einer kleinen Zeit t_V erreicht, und das Schmelzvolumen ist nahezu vernachlässigbar. Die Abschirmung der Laserstrahlung vom Bohrungsgrund durch laserinduziertes Plasma muss durch die entsprechende Wahl von Pulsdauer, Pulsenergie und Pulsfrequenz vermieden werden.

Im Gegensatz zum Schmelzbohren ist die Bohrungstiefe bei gleicher Pulsenergie $P_L \times t_L$ sehr viel kleiner. Dafür entstehen keine Schmelzablagerungen an den Bohrungswänden und definierte Bohrungsgeometrien werden exakt hergestellt. Beide Abtragverfahren sind in Abb. 15.1 zum Vergleich schematisch dargestellt.

Die Energie-, Massen- und Impulsbilanz sind im Grundlagenteil (Kap. 7) und im Anhang Kap. B für die Schmelzströmung dargestellt. Beim Bohren mit Laserstrahlung wird immer ein Teil des Werkstoffes verdampft (Grundlagenteil Kap. 8). Unter Vernachlässigung von Reflexions- und anderen Randeffekten ergibt sich mit der Energieerhaltung

$$E = \rho V(c \cdot \Delta T + H_M + H_V). \quad (15.2)$$

mit:	ρ	Dichte	[g/m ³]
	V	Bohrungsvolumen	[m ³]
	C	spezifische Wärmekapazität	[J/kg K]
	ΔT	Temperaturdifferenz von Umgebungs- und Verdampfungstemperatur	[K]
	H_M	Schmelzenthalpie	[J/kg]
	H_V	Verdampfungsenthalpie	[J/kg]

Neben der Energie zum Erwärmen des Werkstoffes auf Verdampfungstemperatur müssen die Schmelz- und/oder Verdampfungsenthalpie aufgebracht werden, um den auszutreibenden Werkstoff von der festen in die flüssige bzw. von der flüssigen in die gasförmige Phase zu überführen.

Nach dem Erreichen der Verdampfungstemperatur wird ein Teil der Laserstrahlung im Werkstoffdampf absorbiert und innerhalb einiger Nanosekunden bildet sich laserinduziertes Plasma (vgl. Grundlagenteil, Kap. 9). Dafür ist das Überschreiten einer Schwellintensität I_C nötig. Das Plasma dehnt sich oberhalb des Werkstückes aus und schirmt die Laserstrahlung ab. Die kleinere Intensität an der Verdampfungsfront führt zu einer Zunahme des Schmelzvolumens. Der aufgeschmolzene Werkstoff wird bei der Verlagerung des Plasmas in die Bohrung durch den Plasmadruck ausgetrieben.

Beim Bohren mit Laserstrahlung müssen verschiedene Teilprozesse berücksichtigt werden (siehe Abb. 15.2):

- Absorption, Reflexion und Vielfachreflexion von Strahlung an kondensierter Materie und Wärmeleitung

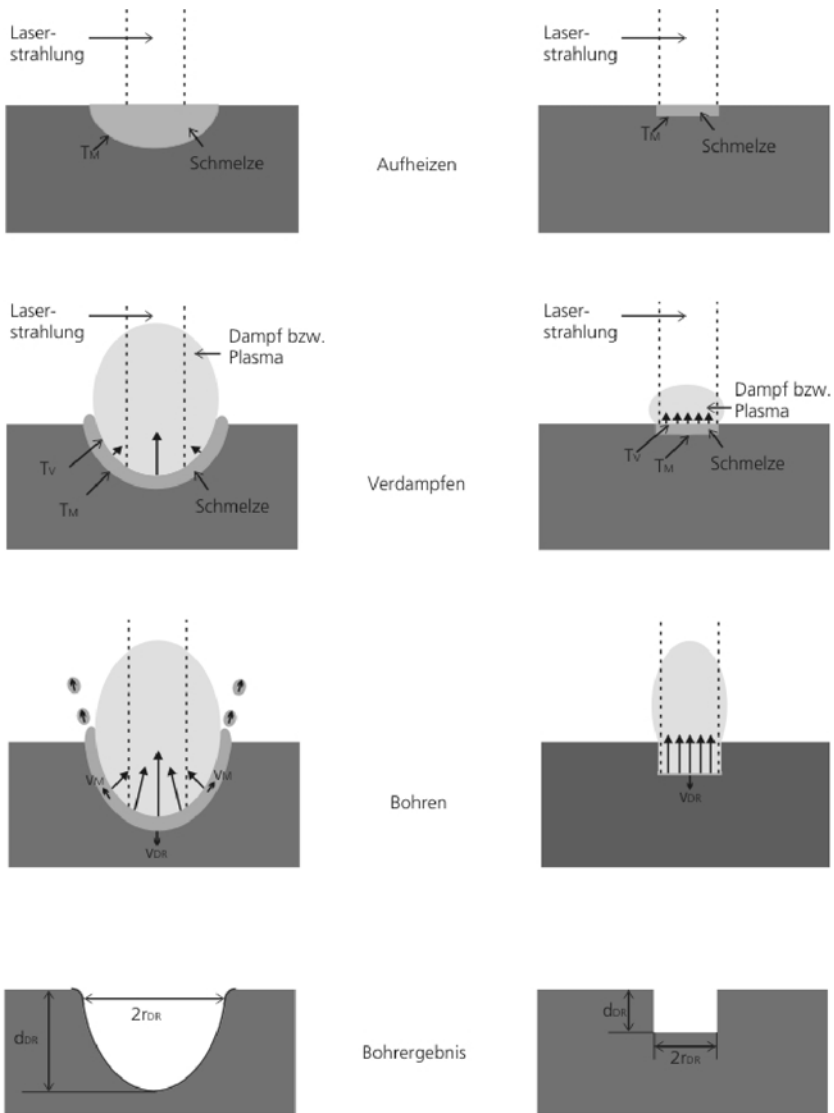


Abb. 15.1. Schematische Darstellung des Bohrprozesses beim Laserstrahl-Schmelzbohren (*links*) und beim Laserstrahl-Sublimierbohren (*rechts*)

- Absorption im Dampf und im Plasma, Rekondensation und Rekombination
- Strömung des Dampfes und Plasmas, der Schmelze und des Prozessgases
- Wärmetransport in der Schmelze
- Austreiben des Werkstoffes als Dampf, Plasma und Schmelze
- Erstarrung der Schmelze und Schmelzablagerungen in Gebieten mit festen Rändern

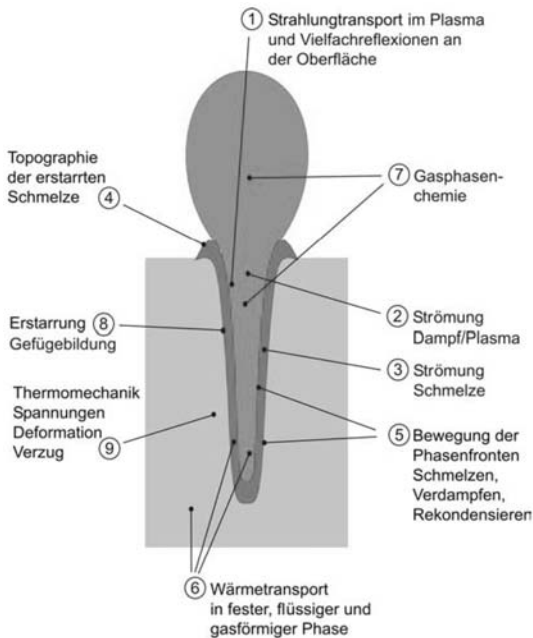


Abb. 15.2. Schematische Darstellung der physikalischen Teilprozesse beim Bohren mit Laserstrahlung und resultierende Bohrungsgeometrie

Die physikalischen Zusammenhänge dieser Prozesse sind im Grundlagenteil ausführlich erläutert.

15.1.2 Verfahrensbeschreibung

Als Strahlquelle zum Einzelpulsbohren werden in der Regel Nd:YAG-Lasersysteme verwendet. Mit Pulsdauern im Mikrosekundenbereich und Pulsleistungen $> 1 \text{ MW/cm}^2$ können Bohrungstiefen bis zu 2 mm mit einem Puls erreicht werden.

Beim Einzelpulsbohren ist eine große Puls-zu-Puls-Stabilität der Laserstrahlung nötig, da sich Schwankungen nicht statistisch ausmitteln können. Eine sehr gute Strahlqualität (M^2 möglichst klein) ist erforderlich, da der Strahldurchmesser den minimal möglichen Bohrungsdurchmesser bestimmt. Eine annähernd zylindrische Bohrung kann nur für Bohrungstiefen erreicht werden, die der doppelten Rayleighlänge entsprechen. Das Aspektverhältnis (Bohrungstiefe: Bohrungsdurchmesser) und die Konizität der Bohrung (Kap. 15.1.3) sind ein Maß für die Qualität der Bohrung.

Die maximale Fokussierbarkeit der Laserstrahlung wird im Grundmodebetrieb (TEM_{00}) erreicht. Die Laserstrahlung wird mit einer Sammellinse fokussiert (Abb. 15.3). Die Lage des Fokus bezüglich der Werkstoffoberfläche kann variiert werden (Kap. 15.1.3).

Zu Beginn des Bohrprozesses kann die Werkstoffdicke als unendlich angenommen werden. Die thermische Eindringtiefe δ_w ist zu diesem Zeitpunkt sehr viel

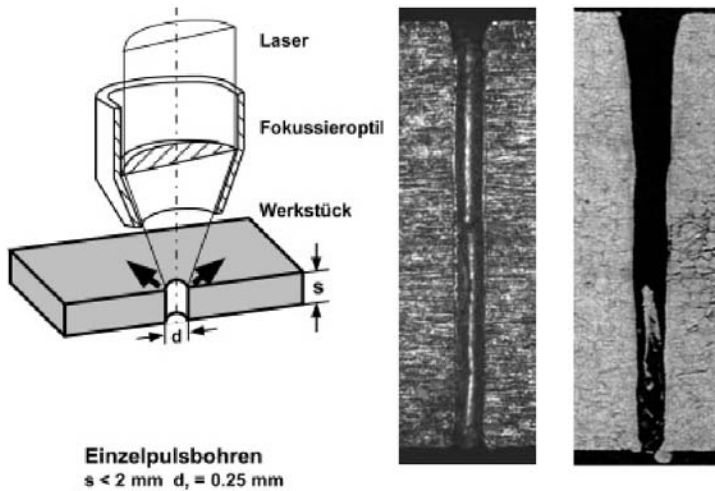


Abb. 15.3. Links: Bohrtechnik Einzelimpulsbohren; mitte: Einzelimpulsbohrung (Edelstahl, 1 mm); rechts: Querschliff, Verengung am Bohrungsaustritt und rekrystallisierte Schmelze [15.26]

kleiner als die Werkstoffdicke s . Kurz vor dem Durchbohren des Werkstoffes nähert sich die verbleibende Werkstoffdicke der thermischen Eindringtiefe an. Die Rückseite des Werkstückes beginnt zu schmelzen, bevor die Abtragsfront diese erreicht hat. Der aufgeschmolzene Werkstoff wird nach unten ausgetrieben und kann Unterseite des Werkstoffes rekrystallisieren (Durchbrenneffekt, Abb. 15.3). Im unteren Teil der Bohrung tritt eine Verengung auf, die in etwa die Größe der thermischen Eindringtiefe hat. Dieser Effekt wird durch den Dampfdruck innerhalb der Bohrung, der wesentlich größer ist als der Prozessgas- und der Umgebungsdruck, verstärkt. Durch Hinterlegen mit einem Zusatzwerkstoff („Backer-Material“, z.B. Aluminiumoxid) kann das Durchbrennen vermieden werden. Die Austrittsöffnung wird kreisförmig und scharfkantig.

15.1.3 Anwendungen

Die Konizität k

$$k = (d_E + d_A)/2s \quad (15.3)$$

mit: d_E Eintrittsdurchmesser [mm]
 d_A Austrittsdurchmesser [mm]
 s Werkstoffdicke [mm]

ist ein Maß für die Qualität von Bohrungen. Diese wird durch die räumliche Intensitätsverteilung (Kaustik, Divergenz, Rayleighlänge) bestimmt. Eine zylindrische Bohrungsgeometrie kann mit großen Intensitäten nur bei Bohrungstiefen innerhalb

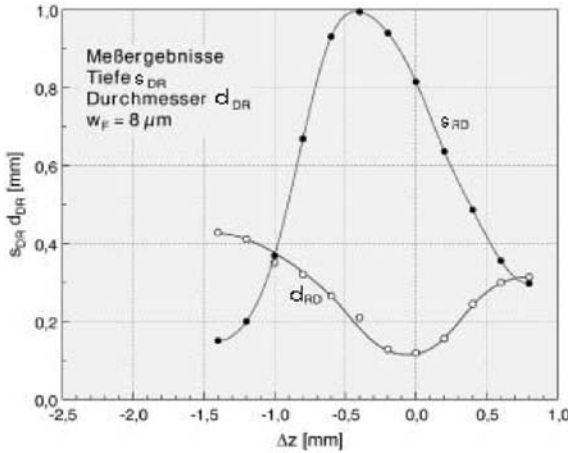


Abb. 15.4. Bohrungstiefe und -durchmesser in Abhängigkeit der Fokusposition relativ zur Werkstückoberfläche (+ Δz : oberhalb, - Δz : unterhalb)

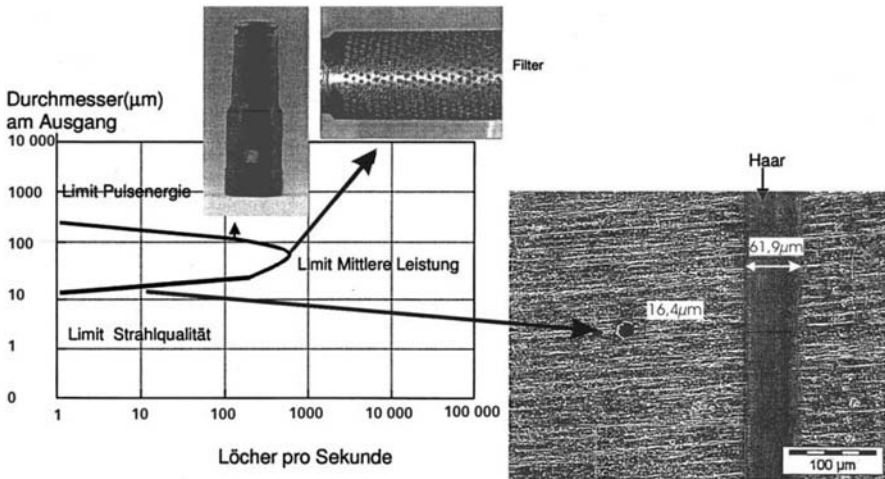


Abb. 15.5. Durchgangsbohrung: Produktivität mit μs -Pulsen (Aspektverhältnis 10:1) [15.7]

der doppelten Rayleighlänge erreicht werden, da in diesem Bereich die Intensitätsänderungen aufgrund der Kaustik vernachlässigt werden können.

Die Bohrungstiefe und der -durchmesser verändern sich mit der Fokusslage (Abb. 15.4). Die größten Tiefen werden bei einer Fokusslage knapp unter der Werkstoffoberfläche erreicht. Der kleinste Durchmesser am Bohrungseintritt wird bei einer Fokusslage auf der Werkstoffoberfläche erreicht.

Die begrenzenden Faktoren des Lasersystems für die maximal mögliche Anzahl von Bohrungen pro Sekunde sind die Pulsenergie, die mittlere Leistung und die Strahlqualität (Abb. 15.5). Untersuchungen der Strahlqualität eines Nd:YAG-

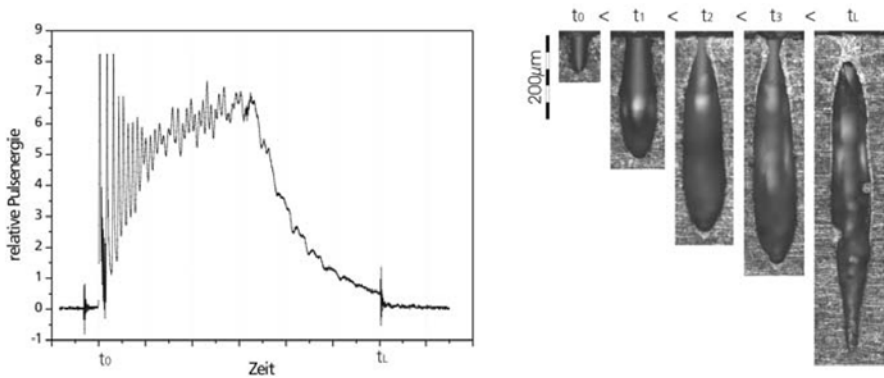


Abb. 15.6. Entwicklung der Bohrungsgeometrie während eines Pulses ohne Prozessangepasste Strahlformung in Raum und Zeit (Werkstoff: Edelstahl)

Lasers haben ergeben, dass die räumliche Intensitätsverteilung mit zunehmender Laserleistung von einer gaußförmigen Intensitätsverteilung abweicht und unsymmetrisch wird. Zum Bohren zylindrischer Löcher kann die maximale Pulsenergie nicht ausgenutzt werden.

Abbildung 15.6 zeigt die zeitliche Intensitätsverteilung eines Pulses für einen Nd:YAG-Laser mit der für Einzelpulsbohrungen erforderlichen Strahlqualität ($M^2 < 2$) und die Entwicklung der Bohrungsgeometrie während eines Pulses. Der Strahlfokus liegt auf der Werkstoffoberfläche. Am Bohrungseintritt treten Schmelzablagerungen auf, die bei großen Pulsdauern zum Verschluss der Bohrung führen. Durch geeignete Parameterwahl muss dies vermieden werden, um eine hohe Qualität der Bohrung zu erhalten.

Durch die geeignete Wahl der Laser- und Prozessparameter kann eine annähernd zylindrische Bohrungsgeometrie erreicht werden (Nd:YAG-Lasersystem) [15.24]:

- Durch eine zeitlich rechteckige Intensitätsverteilung des Laserpulses können der konische Einzug und die Schmelzablagerungen am Bohrungseintritt weitestgehend vermieden werden.
- Ein konstanter Wert der räumlichen Intensitätsverteilung im Laserpuls reduziert den Durchbrenneffekt (Oberflächentemperatur im Zentrum des Strahls ist um den Faktor 0,885 kleiner). Ein- und Austrittsdurchmesser der Bohrung sind dadurch etwa gleich groß.
- Kleiner Gasdruck ($\approx 0,6$ MPa) zu Beginn des Bohrens und großer Gasdruck kurz vor dem Durchbohrzeitpunkt ($> 1,6$ MPa) verringert die Bildung von Schmelztropfen am Bohrungsaustritt.
- Die optimale Fokuslage ist etwa $300 \mu\text{m}$ unter der Werkstoffoberfläche unabhängig von der Größe des Fokusbereichs und der Größe der Laserleistung.

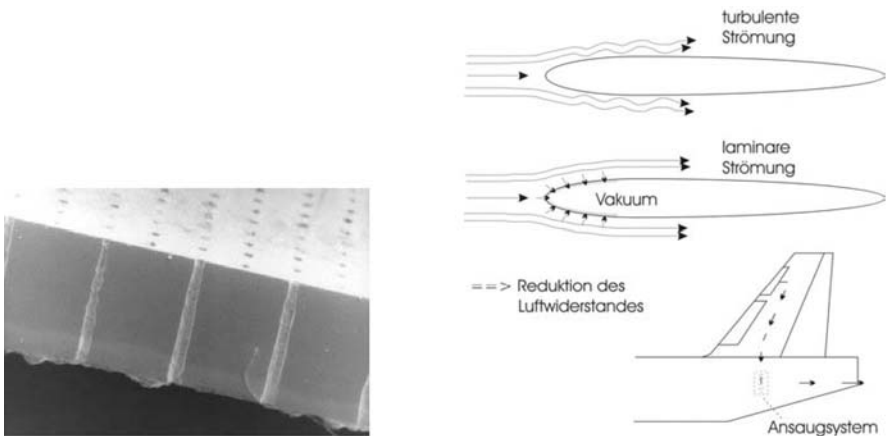


Abb. 15.7. Links: Querschliff von Einzelpulsbohrungen in Titan [15.23], rechts: Reduktion des Luftwiderstandes an Flugzeugleitwerken

15.1.4 Anwendungsbeispiele

Chirurgie-Nadeln. Für den Einsatz in der Medizin werden Chirurgie-Nadeln zur Fadenaufnahme mit der Einzelpulsbohrtechnik gefertigt. Der Bohrungseintritt hat einen Durchmesser von 50–600 μm und soll möglichst kreisförmig sein. Aspektverhältnisse von 4:1 bis 12:1 werden benötigt. Bis zu 6 Nadeln pro Sekunde werden gebohrt.

Potenzielle Anwendungen für Hochsatzbohrungen. Kraftstofffilter für die Automobilindustrie. In Kraftstofffiltern aus Edelstahl von 0,95 mm Dicke werden 120 Bohrungen pro Sekunde gebohrt (Abb. 15.8, s. Farbbildteil). Die Durchmesser der Bohrungen variieren von 50–100 μm . Die Anforderungen an die Qualität sind gering. Die Bohrungen müssen auf der Seite des Kraftstoffaustritts gratfrei und ohne Verschmutzungen sein. Zur Zeit gibt es kein anderes Herstellungsverfahren, mit dem vergleichbare Produktivität erreicht werden kann.

Seitenleitwerke von Verkehrsflugzeugen. Bei Verkehrsflugzeugen werden Bohrungen in die Außenhaut des Seitenleitwerks eingebracht, um die Luftverwirbelungen zu reduzieren und den Luftwiderstand zu verkleinern (Abb. 15.7). Man erreicht eine Kraftstoffreduzierung um 5–7%. Die Dichte der ca. 1 mm tiefen Bohrungen liegt bei 4 Mio. Bohrungen pro Quadratmeter mit Durchmessern von 30–80 μm . Mit einem Q-switch Nd:YAG-Lasersystem werden 50 Bohrungen pro Sekunde mit einer Pulsenergie von ca. 200 mJ erzeugt. In Zukunft soll durch Strahlteilung das zehnfache der Bohrungsanzahl pro Sekunde erreicht werden.

15.2 Perkussionsbohren

Die Qualität der Bohrungsgeometrie und die erreichbaren Aspektverhältnisse beim Einzelpulsbohren sind für viele Anwendungen nicht ausreichend. Bessere Ergebnisse erreicht man mit dem Perkussionsbohren, bei dem mit mehreren Pulsen hintereinander Werkstoff aus der Bohrung abgetragen wird. Typische Bohrungsdurchmesser liegen zwischen 100 μm und 1 mm. Dabei können Bohrungstiefen bis zu 20 mm erreicht werden.

Die Miniaturisierung von Komponenten und Bauteilen in den verschiedensten Bereichen, z.B. der Automobiltechnik, der Medizintechnik und der Kommunikationstechnik, schreitet immer weiter voran. So hat sich das Bauteilvolumen im Bereich des Maschinenbaus innerhalb von zehn Jahren um 80% verringert. Im Bereich der Elektrotechnik muss die Miniaturisierung in der Baugruppenfertigung den Fortschritten bei den Mikrochips standhalten. Ein Beispiel hierfür ist die Leiterplatte, die nicht nur als Bauteilträger dient, sondern auch ein wichtiges Verbindungselement ist. Hier werden Durchgangs- und Sackbohrungen mit Durchmessern $< 100 \mu\text{m}$ gefordert.

Mechanisch hergestellte Bohrungen in Leiterplatten (MikroBohrungen, Mikrovias) mit einem Durchmesser $< 0,1 \text{ mm}$ sind nur mit extrem hohem Aufwand herstellbar. Die wirtschaftliche Grenze liegt beim mechanischen Bohren derzeit bei 0,2 mm. Bohrungsdurchmesser von 0,1 mm bis über 6 mm und Fräsleistungen von 0,5–3 mm können nur kombinierte Bohr-/Fräsautomaten leisten bei Drehzahlen bis zu 150.000 Umdrehungen/Minute. Alternative Verfahren sind das Laserstrahlbohren, fotochemische Verfahren und das Plasmabohren (basierend trockenchemischem Ätzen).

Das Laserstrahlbohren ist bei der Herstellung von Mikrovias weltweit das am häufigsten eingesetzte Verfahren mit einem Anteil von ca. 75% des produzierten Volumens. Dabei wird überwiegend das Perkussionsbohren angewendet, aber auch Techniken wie das Trepanier- bzw. Wendelbohren.

15.2.1 Physikalische Grundlagen

Verschiedene mathematische Modelle beschäftigen sich mit dem Austreiben der Schmelze während des Bohrens. Die Dynamik der Schmelze kann für den komplexen dreidimensionalen Fall nur numerisch gelöst werden. Eine analytische Beschreibung der Schmelzströmung ist dennoch mit einem stark vereinfachten Modell möglich, z.B. mit dem stationären Dampfkolbenmodell [15.1] (Abb. 15.9).

Das Modell gilt für große Pulsdauern ($>$ mehrere 100 ns) und die Aufheizphase und Abkühlphase werden. Desweiteren wird eine zylindrische Bohrungsgeometrie angenommen, bei der die gesamte eingestrahlte Energie am ebenen Bohrungsgrund absorbiert wird. Dabei wird der Bohrungsdurchmesser gleich dem Durchmesser der Laserstrahlung $2r$ gesetzt. Durch die eindimensionale Betrachtung der Wärmeleitung können Wärmeverluste an den Bohrungswänden vernachlässigt. Desweiteren werden Reibung und Effekte, die durch Plasma entstehen, vernachlässigt. Die absorbierende Schicht bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v_{DR} axial zur Laserstrahlung

Symbol	Bedeutung
Φ	Eingestrahler Energiefluss [J/m ² s]
H_M	Spezifische Schmelzwärme [J/g]
H_V	Spezifische Verdampfungs- Wärme [J/g]
j_M	Massenfluss der Schmelze [g/m ² s]
j_V	Massenfluss des Dampfes [g/m ² s]
v_{DR}	Bohrgeschwindigkeit [m/s]
v_M	Geschw. der ausgetriebenen Schmelze [m/s]
T_O	Oberflächentemperatur [K]
T_M	Schmelztemperatur [K]
ρ	Dichte [g/m ³]
c_P	Spez. Wärmekapazität [J/g K]
κ	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]
m	Teilchenmasse [g]
m_{DR}	abgetragene Masse [g]
P_S	Sättigungsdampfdruck [Pa]
p	Druck [Pa]
d_M	Schmelzfilmdicke [m]
r	Strahlradius [m]
k	Boltzmannkonstante [J/K]
ζ_0	Normalenvektor in Richtung v_{DR} []
$\alpha \cong 0,2$	Reflexionskoeffizient []

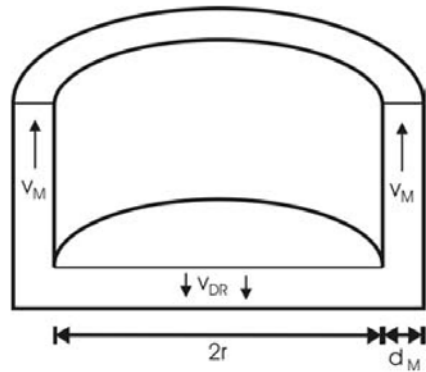


Abb. 15.9. Links: Verwendete Symbole, rechts: schematische Darstellung des Dampfkolbenmodells

in den Werkstoff hinein. Die eingestrahelte Energie ist zeitlich und räumlich konstant und die Energieerhaltung (15.2) gilt.

Die Energiebilanz für den Energiefluss ist

$$\Phi = j_M H_M + j_V H_V. \quad (15.4)$$

Die Massenbilanz für den gesamten Massenfluss j_{DR} ist

$$j_{DR} = j_M + j_V \quad (15.5)$$

und für die abzutragende Masse gilt

$$m_{DR} = \pi (r + d_M)^2 \rho v_{DR}. \quad (15.6)$$

Die Bohrgeschwindigkeit ergibt sich als

$$v_{DR} = \frac{1}{\rho} (j_M + j_V) \quad (15.7)$$

Der Massenfluss der Schmelze und des Dampfes ist von der Oberflächentemperatur an der Abtragsfront T_O ($\zeta_0 = 0$) des Werkstoffes abhängig:

$$T_O(v_{DR}, \zeta_0 = 0) = \frac{j_M H_M}{\rho c_P v_{DR}} \exp\left(-\frac{\zeta_0 v_{DR}}{\kappa}\right) = \frac{j_M H_M}{\rho c_P v_{DR}} \quad (15.8)$$

Der Massenfluss des Dampfes berechnet sich durch

$$j_V(T_O) = (1 - \alpha) P_S(T_O) \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_O}} \quad (15.9)$$

Durch den Druck p des Dampfes wird die Schmelze der Schmelzfilmdicke

$$d_M = \kappa / v_{DR} \ln(T_O T_M) \quad (15.10)$$

mit der Geschwindigkeit

$$v_{DR} = \sqrt{2p/\rho} \quad (15.11)$$

in radialer Richtung aus der Druckzone getrieben. Der Massenstrom der ausgetriebenen Schmelze bei einer bestrahlten Kreisoberfläche mit dem Radius r ist

$$j_M = \sqrt{\frac{2\kappa}{r} \ln \frac{T_O}{T_M}} \left(\frac{\rho^3}{P_S} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (15.12)$$

15.2.2 Verfahrensbeschreibung

Zum Perkussionsbohren werden verschiedene Lasersysteme eingesetzt. Entscheidend sind die gewünschten Bohrungsdurchmesser und Aspektverhältnisse. In der Flugzeugindustrie werden Nd:YAG-Lasersysteme eingesetzt, um beispielsweise Brennkammerplatten von Flugzeugturbinen zu bohren (Kap. 15.3.3). Dabei kann wie beim Einzelpulsbohren ein fliegendes Verfahren angewendet werden [15.11]. Die Umdrehungsrate, mit der das Werkstück bewegt wird, muss mit der Repetitionsrate des Lasers synchronisiert werden. Abhängig von den Werkstoffeigenschaften und der -dicke können 10–20 Bohrungen/s gebohrt werden. Zum Bohren von Leiterplatten werden abhängig vom zu erzielenden Bohrungsdurchmesser hauptsächlich zwei Bauarten von Lasern eingesetzt. Der CO₂-Gas-Laser deckt den Durchmesserbereich von 100–300 µm ab und der UV-Festkörperlaser ermöglicht wirtschaftliches Bohren von Löchern mit Durchmessern < 150 µm.

Nach jedem Puls wird die Bohrungstiefe größer und mehr Kraft muss aufgewendet werden, um die Schmelze gegen die Reibungs- und Gravitationskraft nach oben aus der Bohrung auszutreiben. Die Schmelzfilmdicke an der Bohrungswand nimmt zu, bis die Schmelze zur Bohrungsschule ausbricht, zusammensackt und sich ein Verschluss bildet (Abb. 15.10). An einem solchen Verschluss aus rekristallisierter Schmelze bildet sich ein neuer Bohrungsgrund, an dem die Laserstrahlung absorbiert und der erneut aufgeschmolzen wird. Dieser Prozess wiederholt sich bei großen Bohrungstiefen und der Werkstoff wird stufenweise aus der Bohrung entfernt (lift-up). Die Entstehung von einem oder mehreren Verschlüssen kann schon während eines Pulses und somit beim Einzelpulsbohren auftreten. Die Absorption der Laserstrahlung an einem Verschluss aus rekristallisierter Schmelze kann lokale Bohrungsaufweitungen und somit die mangelnde Reproduzierbarkeit der Bohrungsgeometrie zur Folge haben. Deshalb ist für das vollständige Austreiben der Schmelze eine Anpassung der Laserparameter an die Bohrungstiefe erforderlich [15.8].

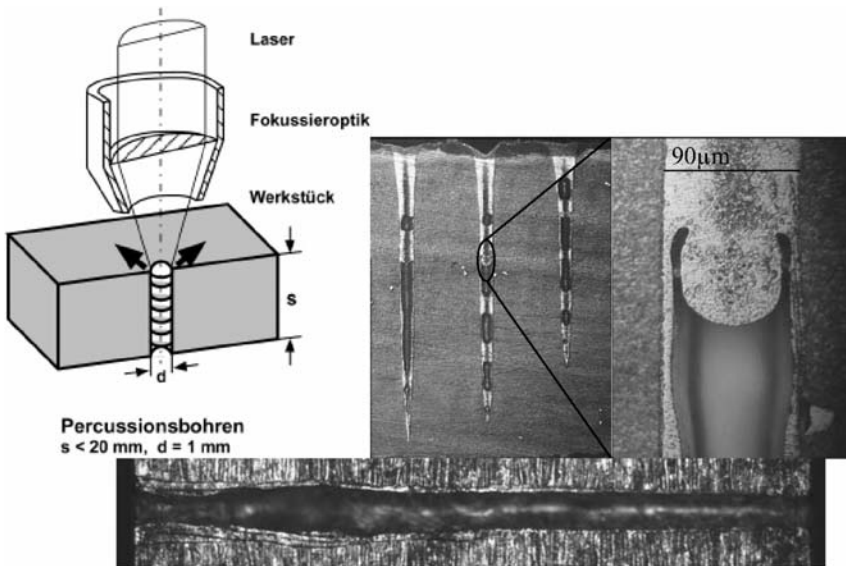


Abb. 15.10. Links: Bohrtechnik: Perkussionsbohren, rechts: Schmelzverschluß im Querschnitt einer Einzelpulsbohrung in CMSX-4 [15.8]; unten: Perkussionsbohrung (Edelstahl)

15.2.3 Anwendungen

Die Abtragsrate, die Bohrungstiefe pro Puls, ändert sich bei konstanten Prozessparametern abhängig von der Bohrungstiefe [15.16]. Drei Prozessbereiche können für die Änderung der Abtragsrate beim Bohren in verschiedenen Werkstoffen unterschieden werden (Abb. 15.11):

Die Abtragsrate, die zu Beginn des Bohrprozesses am größten ist, sinkt sehr schnell um bis zu zwei Größenordnungen.

Im zweiten Abschnitt bleibt die Rate stabil.

Zum Ende sinkt die Abtragsrate gegen Null.

Dieser Verlauf ist hauptsächlich auf die Teilprozesse Absorption der Laserstrahlung am Bohrungsgrund, Verluste durch Wärmeleitung, Plasmabildung und Absorption der Laserstrahlung im Plasma zurückzuführen.

Die Änderung der Abtragsrate lässt sich mit der sich ausbildenden konischen Bohrungsgeometrie erklären. Für die Absorption der Laserstrahlung am Bohrungsgrund bzw. an der Bohrungswand und die Wärmeleitung im Werkstoff ist nur der Normalenanteil I_n der Intensität (Abb. 15.11) wesentlich. Dieser unterscheidet sich vom ursprünglichen Gauß-Profil der Intensität. Ist der Krümmungsradius am Bohrungsgrund kleiner als die thermische Eindringtiefe, dann sind die Wärmeverluste größer und somit die minimale Intensität I_0 zum Abtragen größer. Wenn die absorbierte Intensität I_n kleiner ist als I_0 , dann wird kein Werkstoff mehr abgetragen.

Die Bohrungsgeometrie kann durch zeitliche Modulation der Laserstrahlung bei konstanter Pulsleistung und Pulsenergie beeinflusst werden (Abb. 15.12). Die In-

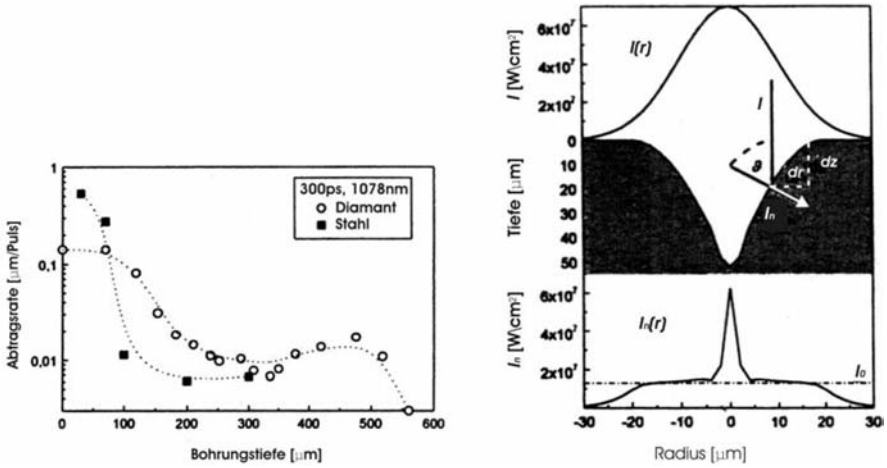


Abb. 15.11. Links: Abhängigkeit der Abtragsrate von der Bohrungstiefe, rechts oben: gaußförmiges Intensitätsprofil, rechts mitte: schematischer Querschnitt der Bohrung, rechts unten: Verteilung der Intensitätskomponente am Bohrungsgrund bzw. der -wand in Normalenrichtung [15.16]

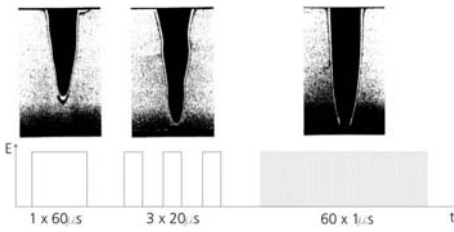


Abb. 15.12. Bohrungsgeometrien bei unterschiedlich modulierter Laserstrahlung und Intensitäten oberhalb der Plasmaschwelle I_C [15.28]

tensität I ist größer als die Schwellintensität I_C , die zur Ausbildung eines Plasmas überschritten werden muss. Das Plasma kann durch die Modulation kontrolliert werden, und verschiedene Bohrungsgeometrien werden erreicht.

15.2.4 Beispiel

Bei der Herstellung von Leiterplatten hat sich das Bohren von Mikrovias mit Laserstrahlung durchgesetzt (Abb. 15.13). Mikrovias sind sogenannte Durchkontaktierungen, d. h. gebohrte und anschließend metallisierte Bohrungen, die die einzelnen Signallagen miteinander verbinden. Die Herstellungskosten betragen 0,35\$ pro 1000 Mikrovias mit Durchmessern von 100 μm (4 mm Werkstoffdicke) und erhöhen sich beim mechanischen Bohren um einen Faktor 3–4.

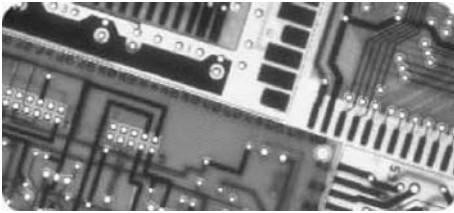


Abb. 15.13. Bohren von Mikrovias in Printed Circuit Boards (PCBs) [15.9]

15.3 Trepanierbohren

Beim Perkussionsbohren muss der überwiegende Teil des abzutragenen Werkstoffes nach oben aus der Bohrung ausgetrieben werden. Der kleinst mögliche Bohrungsdurchmesser ist gleich dem Strahldurchmesser. Allerdings wird die Bohrung durch die verschiedenen physikalischen Teilprozesse (Kap. 16.1) während des Bohrprozesses zusätzlich aufgeweitet, so dass der Bohrungsdurchmesser größer als der Strahldurchmesser ist. Das Trepanierbohren, eine kombinierte Bohr- und Schneidetechnik, wird ausgehend von einer mit Perkussionsbohren erstellten Durchgangsbohrung eine Bohrung mit dem gewünschten Durchmesser in den Werkstoff geschnitten. Die Bohrungen zeichnen sich durch ihre hohe Rundheit aus, deren Toleranzen hauptsächlich durch die Positioniergenauigkeit bestimmt werden.

Das Trepanierbohren wird für Bohrungen mit Durchmessern von 200 μm bis 5 mm eingesetzt und bietet somit eine Alternative zum mechanischen Bohren und zum Funkenerosionsverfahren (Kap. 16.1). Letzteres ist im Vergleich zum Laserstrahlbohren wesentlich langsamer und benötigt Bohrzeiten, die im Minutenbereich liegen. Die Bohrzeit beim Trepanierbohren wird im wesentlichen durch die Verfahrenszeit bestimmt und beträgt je nach Werkstoffdicke, Neigung, Durchmesser und mittlerer Laserleistung 1–20 s. Erodieren ist nur dann rentabel, wenn mehrere Bohrungen gleichzeitig in den Werkstoff eingebracht werden. Mechanisch können Bohrungen mit hoher Produktivität hergestellt werden, aber zu härten Bauteile müssen vor der Wärmebehandlung gebohrt werden. Ein weiterer Nachteil ist der Neigungswinkel $< 20^\circ$ mit dem Bohrungen in den Werkstoff eingebracht werden können. Beim Trepanierbohren sind Neigungswinkel $> 60^\circ$ möglich.

Eine weitere Bohrtechnik, bei dem der Werkstoff relativ zur Laserstrahlung während dem Bohren bewegt wird, ist das Wendelbohren (engl.: helical drilling). Diese Bohrtechnik unterscheidet sich vom Trepanierbohren insofern, dass beim Wendelbohren der Werkstoff schichtweise abgetragen wird und somit keine kombinierte Bohr- und Schneidetechnik vorliegt. Der Werkstoff wird in der Gasphase abgetragen. Dabei können in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser Bohrungen mit Durchmessern $< 100 \mu\text{m}$ gefertigt werden. Beim Bohren von Mikrovias ist das Wendelbohren eine konkurrierende Technik zum Perkussionsbohren. Zudem können mit speziellen Drehoptiken verschiedenste Querschnittsgeometrien der Bohrung erreicht werden (Laser-Erodieren). Beim Abtragen mit Laserstrahlung (Kap. 16.4) wird der Werkstoff ebenfalls schichtweise, aber von einer Fläche und nicht nur entlang einer Schnittfuge entfernt.

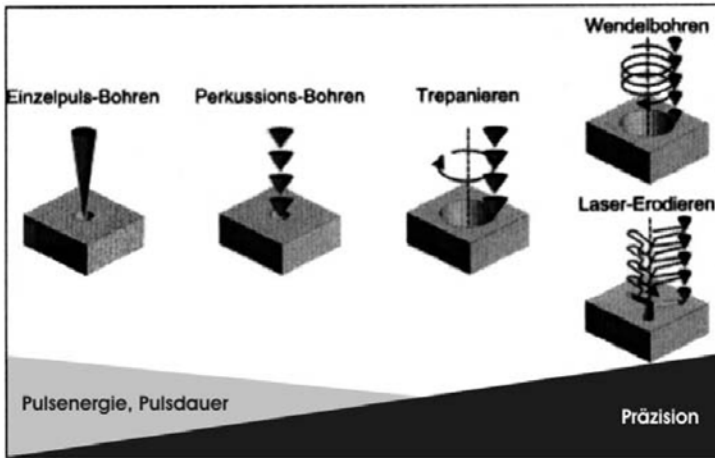


Abb. 15.14. Verfahren für das Laserstrahlbohren [15.5]

In Abb. 15.14 sind die Bohrtechniken gegenübergestellt. Die von links nach rechts größer werdende Präzision der Bohrungen wird mit kleineren Pulsenergien und Pulsdauern erreicht, wie man sie zum Laserstrahl-Sublimierbohren benötigt. Die Pulsleistung muss trotz kleiner werdender Pulsenergie ansteigen.

15.3.1 Verfahrensbeschreibung

Grundsätzlich gibt es zwei Techniken Trepanierbohrungen herzustellen:

- Die Laserstrahlung wird mit einem speziellen Linsensystem durch Rotation um die Symmetrieachse der Bohrung geführt.
- Das Werkstück wird mittels eines xy-Tisches kreisförmig unter der Laserstrahlung bewegt.

Durch mehrfaches Umfahren des Kreises kann die Bohrungsgeometrie bezüglich Zylindrizität und Rauheit der Bohrungswand verbessert werden [15.32].

Die Strahlquelle unterscheidet sich je nach Anwendung:

- Für (Trepanier-)Bohrungen mit mehreren 100 μm Durchmesser, wie Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln, werden Lasersysteme mit Pulsdauern im Mikrosekundenbereich eingesetzt.
- Mikroanwendungen, wie Einspritzdüsen für Dieselmotoren, werden mit Lasersystemen mit Pulsdauern von 100 fs bis zu einigen ns gebohrt.

15.3.2 Anwendungen

Wesentlicher Unterschied zwischen dem Trepanierbohren und den anderen Laserstrahl-Bohrtechniken (Kap. 15.1 und 15.2) ist das Austreiben der Schmelze

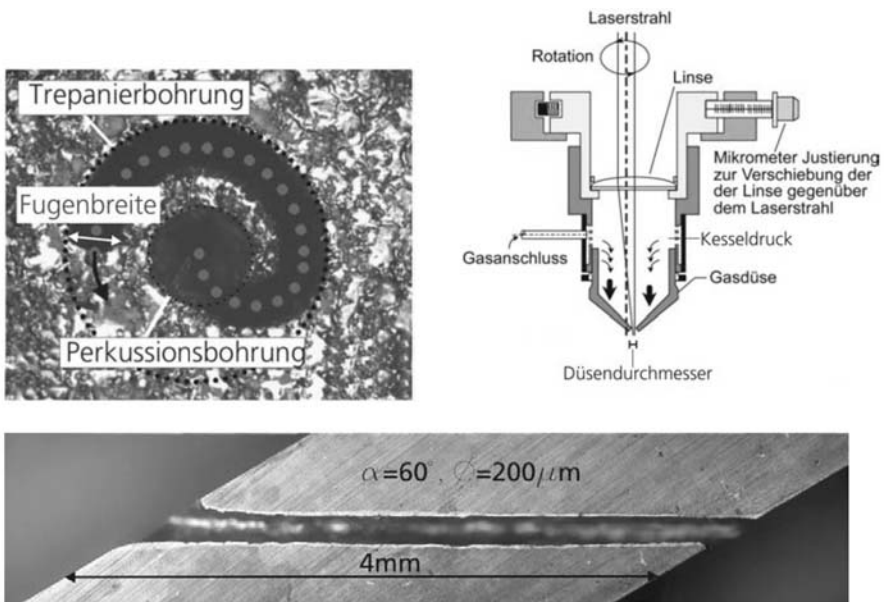


Abb. 15.15. Links: Schema des Trepanierbohrens in Aufsicht, rechts: Drehoptik; unten: Trepanierbohrung durch 60° geneigten Werkstoff (CMSX-4)

aus der Schnittfuge nach unten aus der Bohrung. Das Austreiben der Schmelze wird durch eine koaxial zur Laserstrahlung eingesetzte Prozessgasströmung unterstützt. Großer Druck oberhalb der Schnittfuge führt zu größeren Fugenbreiten und kleineren Dicken erstarrter Schmelze auf den Fugenwänden und somit zu einem verbesserten Austreiben [15.32].

Die Ergebnisse von Berechnungen des Gasdruckes oberhalb des Fugeneintritts für verschiedene Abstände zwischen Düse und Werkstück, Düsendurchmesser und Kesseldrücke (zur Begriffsdefinition vgl. Abb. 15.15) ergeben, dass mit kleineren Abständen und größeren Durchmessern und Kesseldrücken der Druck oberhalb der Fuge größer wird (Abb. 15.16).

Nach Berechnungen des Prozessgasdruckes liegt der maximale Druck (Staupunkt der Strömung) unter einer zentrisch oberhalb der Fuge eines 45° geneigten Werkstoffes angeordneten Düse seitlich oberhalb der Fugenöffnung (Abb. 15.16). Die Gasströmung der Düse wird an der geneigten Werkstoffoberfläche reflektiert und strömt über den Fugeneintritt. Nur ein Teil der Strömung wird in die Fuge reflektiert und erzeugt aufgrund der Reflexion in der Fuge Druckoszillationen auf den Wänden, die in Schmelzablagerungen an den Stellen von Druckminima resultieren. Durch den lateralen Versatz der Düse kann der Staupunkt der Strömung in den Fugeneintritt verlagert werden (Abb. 15.17, s. Farbbildteil). Die Druckverteilung auf den Fugenwänden ist gleichmäßig und die Dicke der an der Bohrungswand erstarrten Schmelze ist deutlich reduziert und gleichmäßig verteilt (Abb. 15.17, s. Farbbildteil).

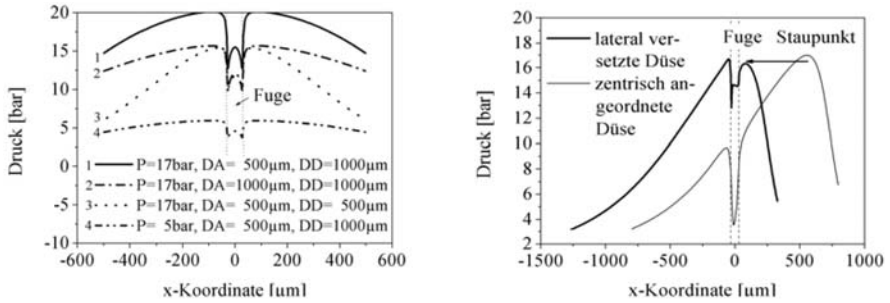


Abb. 15.16. Links: Druck in Abhängigkeit von der x-Koordinate bei Variation von Düsenabstand (DA), Düsendurchmesser (DD) und Kesseldruck (P), rechts: Druck in Abhängigkeit von der x-Koordinate bei 45° geneigter Werkstoffoberfläche bei Variation der Düsenanordnung zur Achse der Bohrung [15.32]

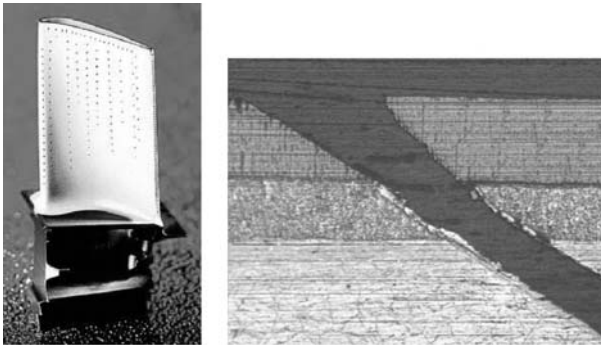


Abb. 15.18. Links: Schaufel einer Flugzeugturbine [15.36], rechts: Mehrschichtsystem einer Brennkammerplatte

15.3.3 Anwendungsbeispiele

Trepanierbohren. Eine Anwendung für das Trepanierbohren ist die Herstellung von Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln sowie Brennkammerplatten [15.33, 15.34]. Das in Abb. 15.18 abgebildete Mehrschichtsystem einer Brennkammerplatte besteht aus der Nickel-Superlegierung CMSX-4 ($d = 2,5$ mm), der Antioxidationsschicht MCrAlY ($d = 0,15$ mm) und der EB-PVD-Wärmedämmschicht ($d = 0,25$ mm). Bohrungen mit einem Durchmesser von 200 μm und einem Neigungswinkel von 60° zur Oberflächennormalen werden durch das Mehrschichtsystem in Prozesszeiten von 2 Sekunden ohne ein Abplatzen der Schichten trepaniert.

Wendelbohren. In der Einspritztechnik werden Bohrungen mit Durchmessern < 150 μm für Einspritzdüsen gefordert. Eine zylindrische Bohrungsgeometrie und wenig Schmelzablagerungen in der Bohrung und am Bohrungseintritt und -austritt wird gefordert. Das Perkussionsbohren ist deshalb für diese Anwendung nicht geeignet. Das Wendelbohren ermöglicht Bohrungen mit Toleranzen von einigen Mikrometern. Mit Kurzpuls-Laserstrahlquellen ($T_P = 50\text{--}150$ fs, $E = 1\text{--}3$ μJ , $f = 1$ kHz)

wird der Werkstoff verdampft und somit Schmelzablagerungen vermieden. Die neuen Diesel-Direkteinspritzmotoren (große Leitsungsdichte, geringe Emission, geringer Kraftstoffverbrauch) brauchen extrem genaue Bohrungen mit Durchmessern von weniger als $150\ \mu\text{m}$ für Einspritzdüsen und Drosselventile. Hier liegt ein Anwendungsbereich, wenn die Technik den Stand der industriellen Serienfertigung erreicht hat.

15.4 Mikrostrukturieren

15.4.1 Einleitung

Die Mikrostrukturierung wird in drei Arbeitsgenauigkeiten Δ eingeteilt:

- konventionelle Bearbeitung ($\Delta > 8\ \mu\text{m}$)
- Präzisionsbearbeitung ($0.8\ \mu\text{m} < \Delta < 8\ \mu\text{m}$)
- Ultrapräzisionsbearbeitung ($0.1\ \mu\text{m} < \Delta < 8\ \mu\text{m}$)

Der Einsatz von Laserstrahlung ermöglicht die Erweiterung der Arbeitsgenauigkeit im Submikrometerbereich bis zur Ultrapräzisionsbearbeitung und hat sich dort weitestgehend etabliert. Die Miniaturisierung wird in vielen Bereichen der industriellen Produktion und Konsumindustrie eingesetzt. Insbesondere in der Elektroindustrie und der Medizintechnik sind in Zukunft noch deutlich größere Märkte zu erwarten. Die meisten Produkte mit großem Wachstum werden nicht als monolytische, d.h. aus einem Werkstoff aufgebaute Bauteile erstellt werden, sondern als Hybride zusammengesetzt.

Mikrostrukturen werden mit Laserstrahlung in unterschiedlichen Werkstoffen durch Modifizieren und Abtragen hergestellt. Unterschieden wird das Mikrostrukturieren mit Laserstrahlung in **abbildende** und **schreibende** Verfahren.

Das abbildende Verfahren nutzt die Maskenabbildung aus und wird z.B. in der Lithographietechnik und der Herstellung von Mikroreaktoren eingesetzt. Das schreibende Verfahren wird zur Herstellung 3D-Bauteilen eingesetzt und kann z.B. mit dem mechanischen Fräsen verglichen werden.

15.4.2 Strahlformung für die Mikrostrukturierung

Abbilden der Laserstrahlung. Als in der Lithographie der Chipindustrie standardmäßig eingesetztes Verfahren, werden mit Mikrostrukturierung durch die Abbildung von Masken Strukturen mit Abmessungen $> 1\ \mu\text{m}$ möglich. Für die transversale Verkleinerung m gilt die aus der geometrischen Optik bekannte Formel

$$|m| = \frac{f}{g - f}, \quad (15.13)$$

mit der Brennweite f der Linse und Abstand g der Maske vor der Linse (Abb. 15.19). In Gegensatz zur Lithographie wird Material abgetragen, wodurch die theoretische Auflösung von abbildenden Systemen Δx , welche als

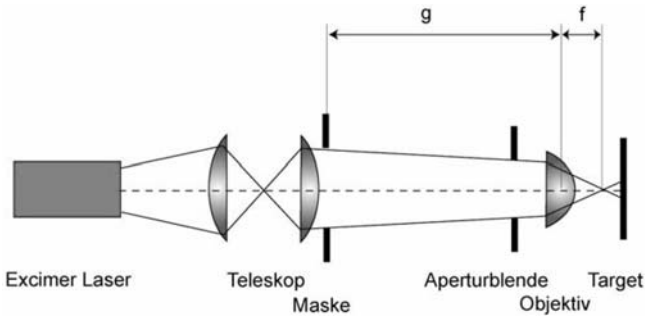


Abb. 15.19. Schema der Maskenabbildung. Laserstrahlung wird mit einem Teleskop kollimiert, auf eine Maske abgebildet. Die Maske wird mit einem Objektiv auf das Target abgebildet

$$\Delta x = 1.22 \frac{\lambda f}{D_L} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (15.14)$$

definiert ist, selten erreicht wird. D_L ist der Objektivdurchmesser und NA die Numerische Apertur des Objektivs.

Beugungsbegrenztes Fokussieren mit Gaußscher Laserstrahlung. Die räumliche Intensitätsverteilung der Laserstrahlung ist je nach Resonatortyp des Lasers unterschiedlich. Besonders wichtig für die Mikrostrukturierung bezüglich der Fokussierbarkeit ist die Gaußsche Intensitätsverteilung.

Die Mikrostrukturierung mit Laserstrahlung nutzt die Eigenschaft aus, dass Gaußsche Strahlung beugungsbegrenzt fokussiert werden kann:

$$w_0 \approx \frac{\lambda f}{D} \approx \frac{\lambda}{NA} \quad (15.15)$$

mit w_0 der Strahltaillenradius, λ die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung, f die Brennweite des Objektivs, D der Strahldurchmesser der Laserstrahlung vor dem Objektiv. Die numerische Apertur sei hier definiert zu: $NA = D/f$. Zur Herstellung von Mikrostrukturen wird die Laserstrahlung relativ zur Werkstückoberfläche mit der Geschwindigkeit v mäanderförmig bewegt und dabei durch Abtragen eine Lage eines Gesenks erzeugt. Die Abtragsrate pro Lage hängt vom Quotienten Intensität der Laserstrahlung zur Schwellintensität und dem Überlappungsgrad o ab, welcher als

$$o = 1 - \frac{v}{2 v w_b} \quad (15.16)$$

definiert ist.

Dabei ist w_b der Bearbeitungsdurchmesser. Der Bearbeitungsdurchmesser wird beim mechanischen Abtragen (z.B. Fräsen) durch den Durchmesser des Werkzeugs bestimmt. Wird Laserstrahlung zum Mikrostrukturieren in der Ultrapräzisionsbearbeitung eingesetzt, lässt sich der Bearbeitungsdurchmesser durch Verkleinern der Wellenlänge und der Brennweite oder durch Vergrößern des Strahldurchmessers vor dem Objektiv reduzieren (Beispiel: $\lambda = 355 \text{ nm}$; $NA = 0.5 \Rightarrow w_0 \approx 0.7 \mu\text{m}$).

Oft werden Mikroskopobjektive zum Fokussieren der Laserstrahlung eingesetzt. Der Bearbeitungsdurchmesser kann durch Wechseln des Objektivs oder durch Verändern des Strahldurchmessers während der Bearbeitung verändert werden. Im Unterschied zur mechanischen Bearbeitung ist der Einsatz von Laserstrahlung berührungsfrei, so dass keine Zeitverzögerungen durch Aus- und Einfahren des Werkzeugs zur Bearbeitungszone entsteht. Bei Mikrofräsanlagen mit Werkzeugdurchmessern $< 100 \mu\text{m}$ sind die Ein- und Ausfahrzeiten einige Minuten.

15.4.3 Absorption der Laserstrahlung

Lineare Absorption. Der Bearbeitungsdurchmesser ist nicht nur vom Strahltailenradius w_0 , sondern auch von den Werkstoffeigenschaften, wie z.B. Reflektions- und Absorptionsgrad, Schmelz- und Verdampfungstemperatur abhängig. Der Bearbeitungsdurchmesser wird durch Anpassen der Eigenschaften der Laserstrahlung (z.B. Pulsdauer, Intensität und Wellenlänge) verändert: z.B. für BK7-Glas ist der Absorptionsgrad bei Grundwellenlänge der Nd:YAG Laserstrahlung ($\lambda = 1064 \text{ nm}$: Photonenenergie $E_\gamma = 1 \text{ eV}$) kleiner 5%. Die Laserstrahlung wird in einem Volumen absorbiert (s. Volumenquelle, Kap. 15.4) und führt zum unkontrollierten Zerstören des Glases. Durch Frequenzkonversion der Laserstrahlung wird die Wellenlänge der Laserstrahlung zu 266 nm verkleinert. Der Absorptionsgrad α von BK7 Glas ist bei der UV-Wellenlänge $> 80\%$ und die Laserstrahlung wird in einem Volumen mit kleiner Tiefe bzgl. der Wellenlänge absorbiert (s. Oberflächenquelle, Grundlagenteil Kap. 4.3). Dadurch wird ein Grossteil der Pulsenergie in den Werkstoff eingekoppelt.

Werkstoffe, welche ein Absorptionsband bei der Laserwellenlänge haben, z.B. für IR-Laserstrahlung durch freie und quasi-freie Elektronen in Metallen oder nicht-gesättigten Verbindungen des Graphits absorbieren Laserstrahlung linear. D.h. dass bei einem Absorptionsgrad gleich 1 jedes Photon absorbiert wird. Beschrieben wird dies durch das Lambert–Beersche Gesetz (s. Grundlagenteil Kap. 4.3):

$$I(x) = 1 - (1 - R)I_0 e^{-\alpha x}, \quad (15.17)$$

wobei R der Reflexionsgrad, α der Absorptionskoeffizient [cm^{-1}] und I_0 die Schwellintensität [W/cm^2] ist. Ausgehend von diesem Gesetz wird eine logarithmische Abhängigkeit der Abtragstiefe h [cm] von der Intensität beobachtet:

$$h = \alpha^{-1} \ln(I/I_0). \quad (15.18)$$

Durch die räumlich gaußförmige Intensitätsverteilung wird der Bearbeitungsdurchmesser durch Verändern der Intensität bzgl. einer Schwellintensität steuerbar. Für homogene Werkstoffe werden Schwellintensitäten für das Schmelzen I_s und Abtragen I_a definiert (Abb. 15.20). Die Enthalpie zum Schmelzen ist für Festkörper kleiner als für das Abtragen, so dass der Bearbeitungsdurchmesser zum Schmelzen immer größer ist (Abb. 15.20b) in der Abbildung beträgt $I_s = I_a/2$.

Der Bearbeitungsdurchmesser kann durch asymptotisches Nähern an die Schwellintensität für das Abtragen kleiner als der Strahldurchmessers w_0 sein (Abb. 15.20c).

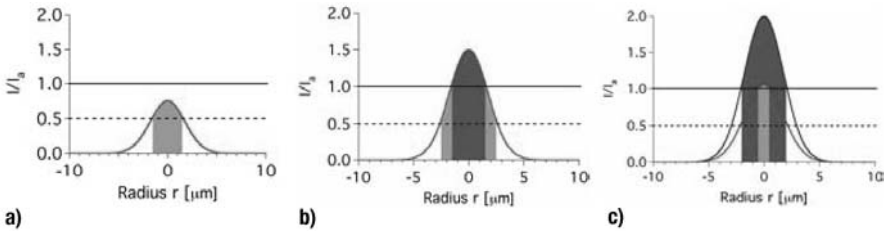


Abb. 15.20. Ausdehnung der Schmelze und des Abtrags für Intensitäten kleiner (a), größer (b) als I_a . Unterschied der Abtragsausdehnung für $I \approx I_a$ und $I > I_a$ (c)

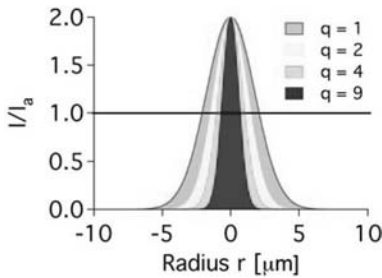


Abb. 15.21. Räumliche Intensitätsverteilung im Fokus für unterschiedliche Multiphoton-Koeffizienten q

Multiphotonen Absorption. Dielektrika, welche Absorptionsbanden im ultravioletten Bereich des Spektrums haben ($E_{\text{band}} > 3 \text{ eV}$), absorbieren IR-Laserstrahlung nicht. Für die Absorption von Laserstrahlung wird in der Quantenmechanik der Begriff der Wahrscheinlichkeit der Absorption angegeben: dies bedeutet, dass die lineare Absorption eine Wahrscheinlichkeit von 1 besitzt. Bei Dielektrika, die UV-Licht absorbieren, ist die Wahrscheinlichkeit der linearen Absorption, also der Absorption eines Photons null. Die Multi-Photon-Absorption, also die Absorption von mehreren Photonen gleichzeitig, ist abhängig von der Photonendichte, also von der Intensität (Anzahl Photonen pro Zeiteinheit und Fläche = Anzahl Photonen pro Volumen). Ist die Intensität der Laserstrahlung für Multi-Photonen-Absorption groß genug, so wird optische Energie im Dielektrikum deponiert. Wird mit Gaußscher Laserstrahlung fokussiert, so reduziert sich der Bearbeitungsdurchmesser entsprechend dem Multiphoton-Koeffizienten q um den Faktor $q^{0.5}$ (Abb. 15.21):

$$w = w_{\text{linear}} / \sqrt{q} \tag{15.19}$$

Pulsdauer. Die Pulsdauer steuert die Wirkung der eingebrachten optischen Energie in den Werkstoff. Für Werkstoffe mit linearer Absorption, wie z.B. Metalle, werden vier Prozesse bei der Absorption der optischen Energie beobachtet:

- Absorption der optischen Energie durch freie Elektronen ($t_{ye} < 10 \text{ fs}$)
- Thermalisierung der Elektronen zum Elektronen-System ($t_{ee} < 100 \text{ ps}$)
- Wechselwirkung des Elektronen-Systems mit dem Phonon-System ($t_{ep} < 10 \text{ ps}$)
- Thermalisierung des Phonon-Systems ($t_{pp} < 100 \text{ ps}$)

Die Dauer jedes einzelnen Prozesses ist beispielhaft für Kupfer in Klammern angegeben worden. Zwei Grenzfälle werden hier betrachtet:

$$\tau > t_{pp}$$

Ist die Pulsdauer der Laserstrahlung größer als die Thermalisierungsdauer des Phononen-Systems t_{pp} , so ist die Absorption der Laserstrahlung, die Thermalisierung der Elektronen und die Wechselwirkung des Elektronen- mit dem Phononen-System ein gleichzeitig (instantan) ablaufender Gesamtprozess. Die Schwellfluenz (Energie pro Fläche) skaliert mit der Wurzel der Pulsdauer. Entsprechend der Wärmeleitungseigenschaften des Werkstoffs definiert man eine Wärmeeindringtiefe

$$\delta_{\text{therm}} = 2 \sqrt{\frac{\kappa t_p}{c_p \rho}} \quad (15.20)$$

mit κ die thermische Leitfähigkeit, c_p die Wärmekapazität, ρ die Dichte und t_p die Pulsdauer der Laserstrahlung.

$$\tau < t_{ep}$$

Für Pulsdauern der Laserstrahlung kleiner ist als die Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit t_{ep} entkoppeln sich die Prozesse des Elektronen-Systems und des Phononensystems und werden durch das Zwei-Temperatur-Modell mit zwei gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben:

$$\begin{aligned} C_e \frac{dT_e}{dt} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + S - \mu (T_e - T_p) \\ C_p \frac{dT_p}{dt} &= \mu (T_e - T_p) \end{aligned} \quad (15.21)$$

C_e und C_p sind die Wärmekapazitäten des Elektronen- und des Phononen-System, κ_e die Leitfähigkeit des Elektronensystem, S die eingebrachte optische Energie, μ die Elektron-Phonon-Kopplungskonstante und T_e und T_p die Temperaturen der zwei Systeme. Das Abtragen zeichnet sich durch kleine Schmelzfilmdicken und geringe mechanische Belastungen des Werkstoffs aus.

15.4.4 Beispiele

Mikrostrukturen aus mechanisch schwer bearbeitbaren Werkstoffen werden durch Abtragen mit Laserstrahlung für die Prototypenherstellung generiert. Dabei werden z.B. 2^{1/2}-dimensionale Mikrostrukturen als Prägwerkstück eingesetzt oder durch Laserdrehen Mikroschnecken hergestellt (Abb. 15.22). Hierbei wird das schreibende Verfahren verwendet.

Durch Maskenabbildung werden mit Excimer Laserstrahlung planare Wellenleiter in Polyimid strukturiert (Abb. 15.23, s. Farbbildteil). Die Rauheit der Seitenwände ist klein, so dass die Wellenleiter eine kleine Dämpfung besitzen. Beim Abtragen von Kunststoffen wird die UV-Laserstrahlung an Chromophoren absorbiert und durch photochemische Prozesse ohne Schmelzbildung das Material abgetragen [15.28].

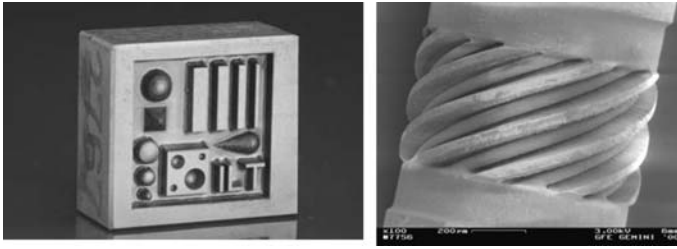


Abb. 15.22. Mikrostrukturen mit schreibenden Verfahren in Stahl (*links*) und Siliziumcarbid (*rechts*)

15.5 Reinigen

Beim Reinigen/Abtragen werden lokal oder großflächig Deckschichten bzw. Verunreinigungen von einem Grundmaterial abgetragen. Die Anzahl der vorkommenden Materialkombinationen (Deckschicht/Grundmaterial) ist sehr vielfältig. Zum Reinigen stehen beispielsweise die folgenden konventionellen Verfahren zur Verfügung:

- mechanische Verfahren, z.B. Bürsten, Schaber oder Strahlverfahren mit verschiedenen Strahlmitteln, wie z.B. das Sandstrahlen
- chemische Verfahren, z.B. Ätzen, Beizen oder Reinigen mit Lösungsmittel, teilweise in Kombination mit Ultraschall
- thermische Verfahren, z.B. Abbrennen, Pyrolyse

In den letzten Jahren hat das Laserstrahl-Reinigen neben den chemischen, mechanischen und thermischen Verfahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Dafür gibt es im wesentlichen drei Gründe:

- die verfahrensspezifischen Vorteile (z. B. berührungslos, hohe Präzision, geringe Wärmebeeinflussung des Grundwerkstoffs), die zu einer Steigerung der Reinigungsqualität führen können
- der Trend zu steigender Automatisierung und dadurch auch zu verbesserter Wirtschaftlichkeit
- die strenger werdenden Regelungen des Gesetzgebers bezüglich Hygiene-Einhaltung und Abfall- bzw. Schadstoffvermeidung (z. B. Vermeidung von kontaminierten Reinigungsmitteln)

15.5.1 Verfahrensbeschreibung

Das Abtragen/Reinigen mit Laserstrahlung beruht auf einem lokal begrenzten, berührungslosen Einwirken von gepulster oder kontinuierlicher Laserstrahlung. In Abhängigkeit von der Deckschichtzusammensetzung und -dicke und den Verfahrensparametern treten verschiedene Abtragmechanismen auf. Die für das Reinigen wichtigsten Mechanismen sind:

- Abtrag durch Verdampfung oder Zersetzung der Deckschicht (Sublimationsabtrag)

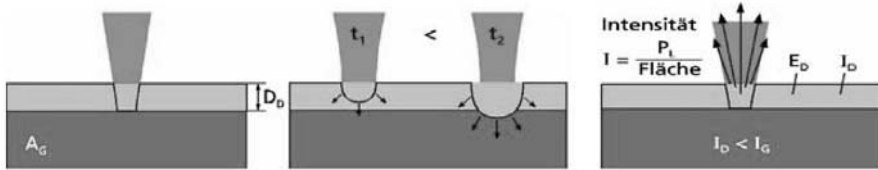


Abb. 15.24. Schematische Darstellung des Abtragprozesses. *Links:* Absorption, *Mitte:* Wärmeleitung, *Rechts:* Zersetzung, bzw. Sublimation

- Abtrag durch thermisch induzierte Spannungen oder durch laserstrahlinduzierte Schockwellen

Vielfach wirken bei technischen Deckschichtsystemen mehrere Mechanismen gleichzeitig, wobei der jeweilige Anteil von den Werkstoffeigenschaften und den Verfahrensparametern, insbesondere den Laserstrahlparametern Wellenlänge, Leistungsdichte und Wechselwirkungszeit abhängt.

Absorbiert die Deckschicht die Laserstrahlung der ausgewählten Wellenlänge gut und weist das darunterliegende Grundmaterial einen geringen Absorptionsgrad auf ($A_G \ll A_D$), so ist der Abtragprozess selbstbegrenzend. Zu Beginn des Prozesses (Abb. 15.24, links) wird ein großer Teil der eingestrahlenen Laserstrahlung absorbiert und in thermische Energie umgewandelt. Um eine Schädigung des Grundmaterials zu vermeiden wird bei der Laserstrahl-Reinigung im allgemeinen mit kurzen Wechselwirkungszeiten, bzw. Pulsdauern gearbeitet (Abb. 15.24, Mitte). Wird die Schwellleistungsdichte zum Erreichen der Verdampfungstemperatur der Deckschicht überschritten ($I > I_D$), führt dies zum Verdampfen der Deckschicht (Abb. 15.24, rechts). Ist die Deckschicht abgetragen, trifft die Laserstrahlung auf das Grundmaterial und wird weitgehend reflektiert, so dass der Abtrag beendet wird und keine Schädigung des Grundmaterials auftritt.

Kann die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung nicht so ausgewählt werden, dass der Prozess selbstbegrenzend abläuft, so ist entweder die Prozessführung exakt anzupassen oder eine Prozesskontrolle bzw. -regelung erforderlich, um eine Schädigung des Grundmaterials zu vermeiden.

Zum Reinigen größerer Flächen wird entweder das Maskenabbildungsverfahren oder das Strahlableitverfahren eingesetzt (Abb. 15.25).

Beim Maskenabbildungsverfahren wird eine Maske, mit dem abzubildenden Muster mit Hilfe einer Linse auf die Werkstückoberfläche projiziert. In Abhängigkeit von den erforderlichen Leistungsdichten wird mit unterschiedlichen Abbildungsverhältnissen gearbeitet. Beim Strahlableitverfahren wird der Laserstrahl mit Hilfe von beweglichen Spiegeln (Galvoscaner) abgelenkt und mit einer Flachfeldlinse auf die Oberfläche fokussiert. Meistens sind zwei senkrecht zueinander stehende Spiegel in einem Bearbeitungskopf (X-Y-Scankopf) integriert. Damit kann der Laserstrahl mäanderförmig über die Oberfläche geführt werden, wobei Verfah-, bzw. Scangeschwindigkeiten v_s von einigen m/s erreicht werden können. Typische Fokussdurchmesser liegen im Bereich von 0,1–0,3 mm.

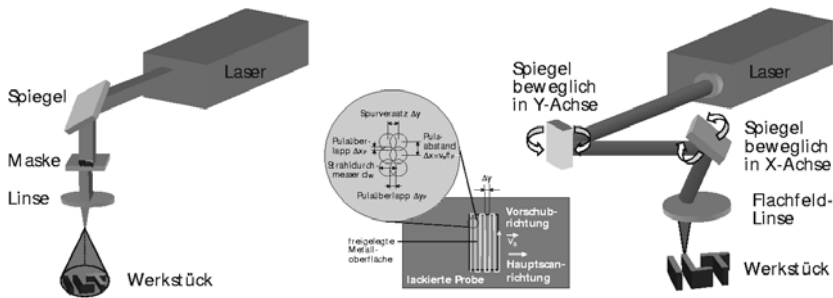


Abb. 15.25. Links: Schematische Darstellung der Maskenabbildung, Rechts: Schematische Darstellung des Strahlablekverfahren

15.5.2 Anwendungsbeispiele

Mikrotechnische Anwendungen. Mit der zunehmenden Miniaturisierung und Integrationsdichte vieler mikrotechnischer Produkte werden auch an die Reinigungsverfahren höhere Ansprüche gestellt. Tendenzen sind eine Verkleinerung der zu reinigenden Flächen bis in den μm^2 -Bereich, die Zunahme von empfindlichen Funktionsflächen, die steigenden Anforderungen an die Reinigungsqualität (Restschichten bzw. Restpartikel mit immer kleiner werdenden Abmessungen bzw. in immer geringeren Konzentrationen müssen entfernt werden) und die Qualitätskontrolle. Sowohl bei der Herstellung als auch bei der Weiterverarbeitung bzw. Endmontage dieser Bauteile und Baugruppen sind eine Vielzahl von Reinigungs- und Aktivierungsprozessen erforderlich. Dabei müssen z. B. Lötstoplacke, Kontaminationen, Reste von Kunststoffen, Lacke und Oxidschichten entfernt werden. Insbesondere für nachfolgende Fügeprozesse (Schweißen, Löten, Kleben) und Beschichtungsprozesse (z. B. Galvanisieren) müssen die entsprechenden Bauteilflächen die erforderliche Reinheit aufweisen.

Bei der Reinigung mikrotechnischer Bauteile kommen überwiegend Kurzpulslaser mit Wellenlängen von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (CO_2), $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ (Nd:YAG), $\lambda = 532 \text{ nm}$, 355 nm (frequenzkonvertierte Nd:YAG), $\lambda = 248, 193 \text{ nm}$ (Excimer) und Pulsdauern zwischen 5 und 250 ns zur Anwendung. Aufgrund der hohen Leistungsdichten und der kurzen Wechselwirkungszeiten werden die Deckschichten ohne Schädigung des Grundwerkstoffes vollständig abgetragen.

Ein Beispiel aus der Mikrotechnik ist das Reinigen von Formeinsätzen, die in der Mikrosystemtechnik als Werkzeug zur Herstellung von mikrostrukturierten Bauelementen eingesetzt werden. Die Formeinsätze werden durch galvanisches Auffüllen der in Kunststoff gefertigten Negativform hergestellt. Nach dem galvanischen Aufbau der Formeinsätze wird die Negativform durch TEA- CO_2 - oder cw- CO_2 -Laserstrahlung abgetragen. Das Alternativverfahren, die Entschichtung durch chemisches Ätzen, führt zur Zerstörung der Mikrostrukturen, die als Einzelstruktur bei Aspektverhältnissen (Verhältnis von Höhe zu Breite der Strukturen) von mehr als 10 mit lateralen Abmessungen von weniger als $20 \mu\text{m}$ vorliegen. Deshalb wird das Ätzen lediglich zur Nachbehandlung eingesetzt.

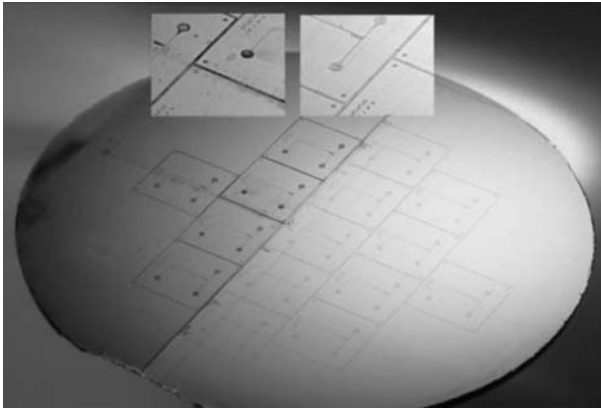


Abb. 15.26. Mikrostrukturierter Formeinsatz der mit Laserstrahlung gereinigt wurde. *Links:* Vorreinigung mit CO₂-Laserstrahlung, *rechts:* Nachreinigung mit Excimer-Laserstrahlung

Die Reinigung wird flächig mit einem cw-CO₂-Laser in Kombination mit einem X–Y Scanner durchgeführt. Dabei werden Kunststoffschichten von ca. 300 µm Dicke abgetragen. Nach diesem Reinigungsschritt verbleiben Restverschmutzungen mit einer Dicke von weniger als 1 µm auf der Oberfläche. Diese können in einem zweiten Reinigungsschritt mit Excimer-Laserstrahlung entfernt werden (Abb. 15.26).

In-line Reinigung. Ein zunehmend wichtiger werdendes Einsatzgebiet für das Laserstrahl-Reinigen ist die Integration des Verfahrens in Fertigungslinien für die Großserienproduktion. Eine bedeutende Branche ist dabei die Automobil- bzw. Automobilzulieferindustrie, mit folgenden potenziellen Anwendungen:

- Lokale Vorbehandlung von vorbeschichteten Werkstoffen. Die Schichten bestehen aus Wasserbasislacken, Pulverlacken oder anderen Kunststoffbeschichtungen
- Entschichten von Crack- und Ölrückständen
- Vorbereitung von Klebeflächen durch Abtrag von Oxiden und Fetten
- Partielle Entlackung von verzinkten Stahlblechen zur Massekontaktierung ohne Schädigung der Zinkschicht

Andere Anwendungen sind die in-line Reinigung von Walzen oder von Transportsieben. In diesen Anwendungsfällen wird die Laserstrahlreinigung simultan zum Produktionsprozess durchgeführt. Exemplarisch zeigt Abb. 15.27 (s. Farbbildteil) das Reinigen von Tiefdruckzylindern bei denen Farbreste aus den Nöpfchen entfernt werden müssen. Die Reinigung mit Excimer-Laserstrahlung (Wellenlänge $\lambda = 248 \text{ nm}$) hat sich für die relativ dünnen Farbschichten (wenige Mikrometer) aufgrund der hohen Absorption der ultravioletten Laserstrahlung als geeignet erwiesen. Dabei wird die Chromschicht und die Gravur des Tiefdruckzylinders bei der Einstellung geeigneter Laserstrahlparameter nicht zerstört. Das Strahlführungs- und -formungssystem beinhaltet ein Zylinderlinsenteleskop zur Strahlformung, ein reflektiver bzw. transmittiver Strahlhomogenisierer (homogene Energiedichteverteilung) sowie ein Zoomobjektiv zur Einstellung der Größe des quadratischen Strahlflecks. Der Laserstrahl

wird so geführt, dass er in einer zur Zylinderachse parallelen Richtung verläuft. Innerhalb einer Verfahreinheit bewirkt ein Umlenkmodul die Ablenkung des Laserstrahls senkrecht zur Zylinderoberfläche. Die Verfahreinheit kann über die gesamte Länge des Druckzylinders verfahren werden („fliegende Optik“). Auf diese Weise ist bei rotierendem Druckzylinder eine flächige Bearbeitung möglich.

Abbildung 15.27 (s. Farbbildteil) zeigt im linken Teil den Bettschlitten mit Zoomobjektiv und Absaugung und eine zu reinigende Tiefdruckwalze, im rechten Teil ist ein teilweise gereinigtes Tiefdruckblech dargestellt. Die Lackreste sind vollständig aus den Näpfchen entfernt.

Bauwerks- und Großbauteilreinigung. Neben der lokal begrenzten Reinigung von Bauteilen ergeben sich auch für die großflächige Reinigung zunehmend neue Anwendungen für den Laser. Das wohl bekannteste Anwendungsgebiet ist die Reinigung kulturhistorischer Denkmäler. Die Aufgabenstellungen in diesem Bereich sind sehr vielfältig und zeigen das große Potenzial des Verfahrens. Anwendungsbeispiele sind [15.4]:

- Reinigen von Holzoberflächen von Kalk-, Gips-, Farb-, Tapeten- und Schmutzschichten ohne Schädigung der originalen Holzsubstanz
- Abtragen von Krusten und Filmen von Steinen, um steinschädigende Ablagerungen zu entfernen und die Poren zu öffnen
- Abtragen von Korrosionskrusten bei Erhaltung der natürlichen Patina auf Bronzeoberflächen
- Abtragen von Verschmutzungen und Pilzbefall, z. B. auf Papier
- Freilegung und Abtrag von Farbfassungen, z. B. auf Holz.

Bei der großflächigen Reinigung von technischen Bauteilen und Bauwerken spielt das Entlacken eine dominante Rolle. Bei vielen Aufgabenstellungen müssen Lackschichten unterschiedlichster Zusammensetzung und Schichtdicke auf empfindlichen Substraten abgetragen werden. Eine der bisher am intensivsten untersuchten Anwendungen ist das Entlacken von Flugzeugkomponenten, die regelmäßigen Wartungen unterzogen werden. Bei chemischen Verfahren oder bei Strahlverfahren fallen große Mengen von Sondermüll an. Das Verfahren wird insbesondere für Faserverbundwerkstoffe angewendet, wobei eine selektive Entschichtung bis zum Primer oder eine vollständige Entschichtung möglich sind. Beispiele sind die robotergestützte Entlackung von Radom (Verschalung der Flugzeugspitze) und Triebwerksverkleidungen der Fa. SLCR [15.13].

Während bei den o.g. Anwendungen der schonende Abtrag ohne Schädigung des Grundwerkstoffs im Vordergrund steht, kommt es bei der Vorbehandlung von Hochspannungsmasten insbesondere auf die Handhabung und Robustheit der Komponenten, auf die möglichst vollständige Erfassung der Abtragprodukte aus Umweltschutzgründen und auf hohe Flächenraten an. Diese Anforderungen können mit einem mobilen Laserstrahlreinigungssystem (Abb. 15.28, s. Farbbildteil) erfüllt werden, so dass auch in der Bauwerksreinigung neue Anwendungen (z.B. Reinigen von Schiffen, Brücken, Großbehältern) erschlossen werden können. Der handgeführte Bearbeitungskopf ist mit einer 50 m langen Lichtleitfaser an die Laserstrahlquelle gekoppelt.

Literatur

- [15.1] M. von Allmen: Laser drilling velocity in metals, *J. Appl. Phys.* **47**, No. 12, 5460 (1976)
- [15.2] J. Bahnmüller, T. Herzinger, F. Dausinger, M. Beck, A. Giering: Characterization of pulsed Nd:YAG-laser beams as an optimization tool in laser drilling applications. In: ICALEO, 2000, pp. E82–E91
- [15.3] H. Brüninghoff: Reinigen von Hochspannungsmasten. In: Konferenzbericht AKL 2002, pp. 517–528
- [15.4] E. Büchter, W. Barkhausen: Reinigen und Entschichten mit Laserstrahlung. Internetdarstellung der Fa. Clean Lasersysteme GmbH, www.cleanlaser.com
- [15.5] F. Dausinger: Laserverfahren für Tieflochbohrungen im Mikrometerbereich, *Wt Werkstattstechnik* **91**, H. 1, 20 (2001)
- [15.6] J.-C. Diels: *Ultrashort Laser Pulse Phenomena* (Academic Press, Boston 1996)
- [15.7] U. Dürr: Bohren mit Nd:YAG-Lasern: Möglichkeiten und Grenzen in der Bohrqualität. In: Bayrische Laserseminare, Vortrag C, 2003, p. 15
- [15.8] Ergebnisbericht der zweiten Phase (2001–2004) des Sonderforschungsbereiches 561, Thermisch hochbelastete, offenporige und gekühlte Mehrschichtsysteme für Kombikraftwerke, Teilprojekt B.2.2, 2003, RWTH Aachen
- [15.9] GSI Lumonics, PCB Micro Via Drilling with GSI Lumonics, http://www.gsilumonics.com/electronics/expertise_application_notes/apps_pcb_micro_drill.html, 1.11.2003
- [15.10] H. te Heesen: Dynamik der Abtragsfront beim Bohren. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Lasertechnik (2003)
- [15.11] T. Heston: Laser drilling pushes the envelope, *Fabricating & Metalworking*, July 2002
- [15.12] Internetdarstellung der Fa. Jet Lasersysteme GmbH, www.jetlaser.com
- [15.13] Internetdarstellung der Fa. SLCR Lasertechnik, www.slcr.de
- [15.14] J. Jandeleit: Materialabtrag mit intensiven, ultrakurzen Laserpulsen für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik, Dissertation RWTH-Aachen (1997)
- [15.15] M. Kauf: Microvia formation, technology and cost comparison. In: IPC Expo, 2001
- [15.16] T.V. Kononenko, S.M. Klimentov, S.V. Garnov, V.I. Konov, D. Breitling, C. Föhl, A. Ruf, J. Radtke, F. Dausinger: Hole formation process in laser deep drilling with short and ultrashort pulses, *SPIE* **4426**, 108 (2002)
- [15.17] F. Korte: *Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen*, Dissertation Universität Hannover (Cuvillier Verlag, Göttingen, 2003)
- [15.18] S.S. Kudesia, P. Solana, W.S.O. Rodden, D.P. Hand, J.D.C. Jones: Appropriate regimes of laser drilling models containing melt eject mechanisms, *J. Laser Appl.* **14**, No. 3, 159 (2002)
- [15.19] *Präzises Oberflächenreinigen von technischen und natürlichen Werkstoffen*, Präzisionsabtragen mit Lasern, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12 (VDI-Herstellung und Druck 2000) p. 25, Düsseldorf
- [15.20] R. Lotze, J. Birkel, K. Wissenbach: Entlacken mit Laserstrahlung – Neue industrielle Anwendungen, *JOT* **8**, 44 (1999)
- [15.21] R. Lotze, J. Stollenwerk, K. Wissenbach: Selektives, präzises Abtragen von Deckschichten mit Laserstrahlung auf kompliziert geformten Werkstückgeometrien. In: *Präzises Oberflächenreinigen von technischen und natürlichen Werkstoffen, Präzisionsabtragen mit Lasern*, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12 (VDI-Herstellung und Druck 2000), VDI Technologiezentrum, Düsseldorf
- [15.22] J. Rapp: The laser with Bosch – A flexible tool in serial production of an automotive supplier, *SPIE* **4831**, 390 (2003)
- [15.23] W.S. Rodden, S.S. Kudesia, D.P. Hand, J.D.J. Jones: A parametric study of laser drilling in aluminium and Titanium. In: ICALEO, 2000, pp. B21–B30

- [15.24] H. Rohde: Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser, Dissertation, Universität Stuttgart (1999)
- [15.25] R. Schmidt-Hebbel: *Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher*, Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (Carl Hanser Verlag, München 1993)
- [15.26] J. Smolenski, D. Hashim: *Laser Cleaning and Surface Preparation* Informations- und Bildmaterial der Fa. Quantel, Frankreich, 2002
- [15.27] J. Stollenwerk, H.-D. Hoffmann, J. Ortman, G. Schmidt, K. Wissenbach, R. Poprawe: High speed removal and structuring of surfaces in the automotive industry with a new diode pumped solid state laser source. In: *Proceedings of the ICALEO 1999*, San Diego, CA, 1999
- [15.28] H G. Treusch: Geometrie und Reproduzierbarkeit einer plasmaunterstützten Materialabtragung durch Laserstrahlung, Dissertation, TH Darmstadt (1985)
- [15.29] M. Wehner: *Excimer Laser Technology*, Edt.: D. Basting (Lambda Physik AG, Göttingen 2001)
- [15.30] G. Wiedemann: Laserabtragen dünner Deckschichten – Eine alternative Reinigungsmethode für die Restaurierung und Denkmalpflege – Möglichkeiten und Grenzen, Sonderdruck Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 2, (2001), pp. 69–102
- [15.31] G. Wiedemann: Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Diodenlasern zum Abtragen von Oberflächenschichten. In: *Präzises Oberflächenreinigen von technischen und natürlichen Werkstoffen, Präzisionsabtragen mit Lasern*, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12 (VDI-Herstellung und Druck 2000), VDI Technologiezentrum Physikalische Technologie, Düsseldorf
- [15.32] J. Willach, A. Horn, E. W. Kreutz, R. Poprawe: Melt expulsion by a coaxial gas jet in trepanning of CMSX-4 with microsecond Nd:YAG laser radiation. In: *4th International Symposium on Laser Precision Microfabrication „LPM“*, München, 2003, vorbereitet zur Veröffentlichung
- [15.33] J. Willach, A. Horn, E.W. Kreutz: Drilling of cooling holes and shaping of blow-out facilities in turbine blades by laser radiation. In: *Proceedings of the 7th Liège Conference on „Materials for advanced power engineering 2002“*, Part II, ed. by J. Lecomte-Beckers, M. Carton, F. Schubert, P. J. Ennis, Liège, 2002, pp. 743–750
- [15.34] J. Willach, A. Horn, E.W. Kreutz: Shaping of zirconia by laser radiation for blow-out facilities of cooling holes in turbine blades. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on „Shaping of Advanced Ceramics“*, Gent, 2002, pp. 233–238
- [15.35] J. Willach, J. Michel, A. Horn, W. Schulz, E. W. Kreutz, R. Poprawe: Approximate model for trepanning with microsecond Nd:YAG laser radiation. In: *7th International Conference on Laser Ablation*, Hersonissos, Crete, Greece, 2003, vorbereitet zur Veröffentlichung in Applied Physics A, Springer Verlag, Berlin
- [15.36] G. Zenzinger: Thermographie – Neue Möglichkeiten in der ZfP, <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach63/zenzing/zenzing.htm>, 7.11.2003