

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 4

Artikel: Materialbearbeitung mit Laserstrahlung

Autor: Herziger, G

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915663>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Materialbearbeitung mit Laserstrahlung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV über Laserstrahlung vom 9. November 1971 in Bern,
von G. Herziger, Bern

621.373.826.095.222

1. Einleitung

Anwendungen des Lasers auf dem Gebiet der Materialbearbeitung basieren auf den hohen Leistungsdichten, die bei Konzentration von Laser-Licht im Focus eines abbildenden Systems zu erreichen sind. Experimentell wurde gefunden, dass alle bekannten Stoffe in fokussiertem Laser-Licht geschmolzen und verdampft werden können. Damit ist die Voraussetzung gegeben, dass materialabtragende oder verformende Bearbeitung an sämtlichen metallischen oder dielektrischen Werkstoffen durchgeführt werden kann.

So geeignet der Laser zunächst vom Prinzip her für die Materialbearbeitung erschien, so viele Probleme traten bei seiner praktischen Anwendung auf. Die Gründe hierfür lagen einerseits in den speziellen Eigenschaften des Lasers, andererseits in der ungenügenden Kenntnis der Prozesse, die sich während der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung abspielen. Zwar konnten in Einzelfällen hervorragende Bearbeitungsbeispiele demonstriert werden, jedoch war die für eine Serienproduktion erforderliche Reproduzierbarkeit selten zu erreichen. Ursache war in den meisten Fällen die ungenügende innere Stabilität des Lasers, speziell des Laser-Resonators. Bei Festkörper-Lasern trat als weitere Störung die thermische Ausdehnung des Laserkristalles in Erscheinung. Diese und weitere Fehlerquellen wurden in den Anfangsjahren der Lasertechnik gar nicht oder zu wenig berücksichtigt. Erst heute ist die Entwicklung soweit, dass die meisten Fehlerquellen weitgehend eliminiert werden können und in Einzelfällen Lasergeräte bereitstehen, die für die Serienproduktion geeignet sind.

Schwierigkeiten traten auch auf der Materialseite auf. Unabhängig von der Art der Bearbeitung — Bohren, Schweißen oder Schneiden — wurde das Material häufig thermisch überlastet, was zu unerwünschten Materialveränderungen in der Umgebung der Arbeitsstelle führte. Diese unerwünschten Phänomene wurden vor allem bei Metallen und dielektrischen Werkstoffen beobachtet, die unter Normalbedingungen nur wenig Laserstrahlung absorbieren. Auch diese Erscheinungen können heute als weitgehend geklärt angesehen werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl auf der Laser- wie auf der Materialseite die wichtigsten Probleme gelöst sind und der Laser sein Debut in Serienproduktion und Automation erfolgreich bestanden hat.

2. Fokussierung von Laserlicht

Die wichtigsten Gründe für die hervorragende Eignung des Lasers zur Materialbearbeitung sind:

1. Hohe Intensität;
2. Bequeme zeitliche Steuerung der Intensität;
3. Gute zeitliche und örtliche Kohärenz.

Eine Anordnung zur Bearbeitung eines Werkstückes ist in Fig. 1 in stark vereinfachter Form dargestellt. Das Werkstück

wird im allgemeinen in die Brennebene eines optischen Systems gelegt. In speziellen Fällen — vor allem beim Schweißen von Kunststoffen — kann auch der unfokussierte Laserstrahl verwendet werden. Die Art des optischen Systems richtet sich nach dem jeweiligen Verwendungszweck: Für einfache, punktförmige Materialabtragung oder Bohrungen ist die Verwendung von sphärischen Linsen- oder Spiegelsystemen zweckmäßig. Für komplizierte Strukturen wie Kreise, Ellipsen, Netzwerke, Kreuzmuster oder spezielle Krümmungen sind holographische Abbildungssysteme vorteilhaft. In speziellen Fällen ist die Anwendung geeignet geformter Blenden innerhalb oder ausserhalb des Resonators möglich, jedoch wird dann — vor allem bei Blendenanordnungen ausserhalb des Resonators — nur ein Bruchteil der Laserenergie ausgenutzt. Die Bearbeitungsoptik ist sorgfältig an die Resonatorkonfiguration anzupassen. Außerdem ist darauf zu achten, dass kein Licht am Werkstück reflektiert wird und in den Laser zurückgelangt, da dann die Eigenschaften des Lasers weitgehend verändert werden können.

Infolge der hohen Leistungsdichten im Fokalbereich der Bearbeitungsoptik wird das Material durch Absorption stark erwärmt, geschmolzen und verdampft. Der Transport des abzutragenden Materials erfolgt in der Dampfphase. Insgesamt ergibt sich folgende Energiebilanz:

$$E_A = E_T + E_V + E_D + E_{WL}$$

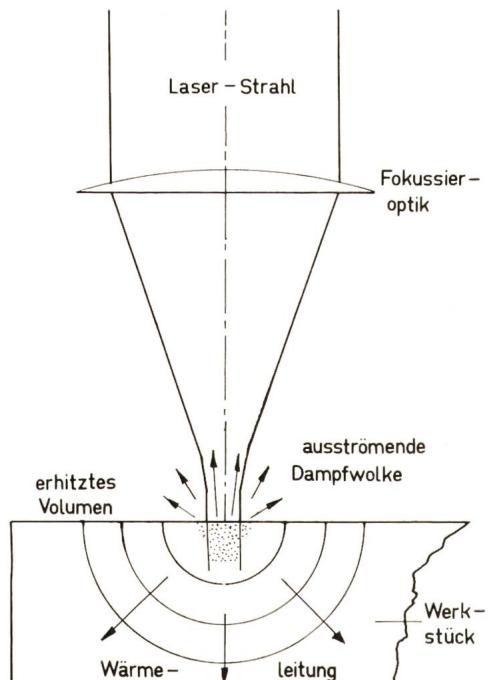


Fig. 1
Schematische Anordnung zur Bearbeitung von Werkstücken mit Laser-Strahlung

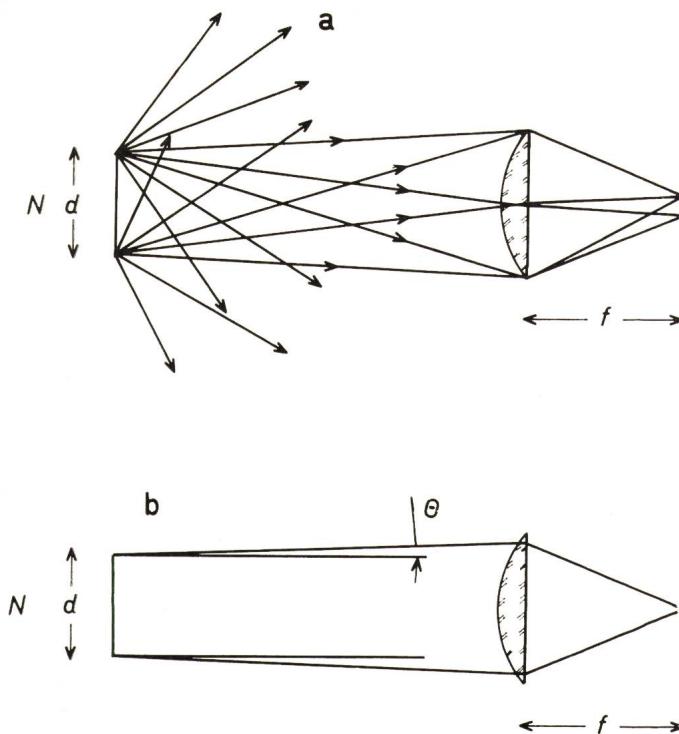


Fig. 2

Vergleich der Fokussierung von normalem Licht mit Laserstrahlung
 a thermische Lichtquelle
 b Laser

Bezeichnungen siehe im Text

- E_A absorbierte Laserenergie;
- E_T Energiebedarf zur Erwärmung der Bearbeitungszone bis zur Verdampfungstemperatur;
- E_D Energieverlust durch die Dampfphase;
- E_{WL} Energieverlust durch Wärmeleitung.

Als unmittelbare Folge der hohen Kohärenz der Laserstrahlung kann diese mit optischen Mitteln in idealer Weise verarbeitet werden. Zum Beispiel ist es möglich, die Laserstrahlung nahezu verlustlos auf den Durchmesser der halben Wellenlänge zu fokussieren. Die für die Materialbearbeitung erforderlichen hohen Leistungsdichten werden durch Fokussieren erreicht. Das ist bemerkenswert, da die Leistungsdichte normaler Lichtquellen durch Fokussierung bekanntlich nicht erhöht werden kann. Eine normale Lichtquelle gibt die Lichtintensität mehr oder weniger gleichmäßig in den gesamten Raumwinkel 4π ab, daher kann durch ein optisches System immer nur ein Bruchteil der Gesamtleistung empfangen und nutzbar gemacht werden. Die Leistungsdichte N_L (Gesamtleistung durch Fläche der Lichtquelle) einer normalen Lichtquelle ergibt sich unabhängig von der Brennweite der Linse bis auf unwesentliche Zahlenfaktoren zu:

$$N_f \approx N_L A^2 \quad (\text{normale Lichtquelle})$$

worin A die Apertur der Linse und N_f die fokussierte Leistungsdichte ist (Fig. 2).

Im Grenzfall eines idealen optischen Systems ist die fokussierte Leistungsdichte gleich der Leistungsdichte der Lichtquelle, sonst immer kleiner. Eine Vergrößerung der Lichtquelle hat keinen Einfluss auf die fokussierte Leistungsdichte.

Das Laser-Licht dagegen besitzt Öffnungswinkel Ω von $10^{-6} \dots 10^{-8}$ sterad und kann voll von einem optischen System verarbeitet werden. Diese geringen Öffnungswinkel entstehen

im Grenzfall durch die Beugung an der Laser-Begrenzung (Blenden oder Durchmesser des aktiven Mediums) und können durch Vergrößerung der begrenzenden Öffnung im Prinzip beliebig klein gemacht werden. Bei einem idealen Laser und entsprechend guter Linse kann das Laser-Licht auf einen Fleck vom Durchmesser $d \approx \lambda/A$ fokussiert werden. Die Leistungsdichte im Fokus ergibt sich zu

$$N_f \approx N_L \frac{FA^2}{\lambda^2} \quad (\text{idealer Laser})$$

und kann durch Vergrößerung des Laserquerschnitts F erhöht werden. Beim realen Laser und speziell beim Kristall-Laser verursachen die immer vorhandenen Inhomogenitäten des aktiven Mediums einen Öffnungswinkel Ω der grösser ist als der Beugungswinkel, so dass die tatsächlich erreichbare fokussierte Leistungsdichte kleiner sein kann als der obige Wert und sich zu

$$N_f \approx N_L \frac{F}{f^2 \Omega} \quad (\text{realer Laser})$$

ergibt, wobei f die Brennweite der benutzten Linse ist. Durch Fokussierung des Laser-Lichtes werden daher Strahlungsdichten erreicht, die die jeder andern Lichtquelle um Größenordnungen übersteigen. In Tabelle I sind die fokussierten Leistungsdichten verschiedener Lichtquellen angegeben. Diese Werte gelten für den Fall einer fehlerfreien 5-cm-Linse mit der Apertur eins. Zum Vergleich sind einige Energiequellen angegeben, die üblicherweise für die Materialbearbeitung (Schweißen und Schneiden) verwendet werden.

Nach Tabelle I erreicht das fokussierte Laser-Licht mit Abstand die höchsten Leistungsdichten. Allerdings werden diese Leistungsdichten nur auf relativ kleinen Flächen erreicht. Typische Werte für den Durchmesser eines fokussierten Laserstrahles liegen je nach Wellenlänge zwischen 0,1 und 2 mm. Mit diesen Werten ist auch schon der Anwendungsbereich der Laser-Strahlung umrissen: Infolge der relativ geringen Arbeitsdurchmesser ist die Laserbearbeitung auf den Bereich der Präzisions- und Feinwerktechnik beschränkt.

3. Absorption von Laserlicht

Bisher wurde angenommen, dass in der Bearbeitungszone genügend Energie absorbiert wird, um die gewünschte Bearbeitungstemperatur zu erhalten. Dieser Fall kann häufig durch

Vergleich der Leistungsdichten verschiedener Energiequellen

Tabelle I

Energiequelle	Leistungsdichte W/cm ²
Sonne	$5 \cdot 10^2$
Höchstdruckentladung	$3 \cdot 10^3$ ¹⁾
He-Ne-Laser	$4 \cdot 10^4$
Argon-Laser	$4 \cdot 10^8$
Rubin-Laser	$5 \cdot 10^{13}$
Neodym-Laser	$4 \cdot 10^{15}$
Elektronenstrahl	$5 \cdot 10^8$
Elektrischer Bogen	$1 \cdot 10^4$
Wasserstoff-Sauerstoff-Brenner	$3 \cdot 10^3$
Azetylen-Sauerstoff-Brenner	$1 \cdot 10^3$

¹⁾ Fokussierte Leistungsdichten, berechnet für eine fehlerfreie Linse mit 5 cm Brennweite und dem Öffnungsverhältnis eins. Durch kurzbrennweitigere Linsen kann die Strahlungsdichte des Laser-Lichtes noch weiter gesteigert werden.

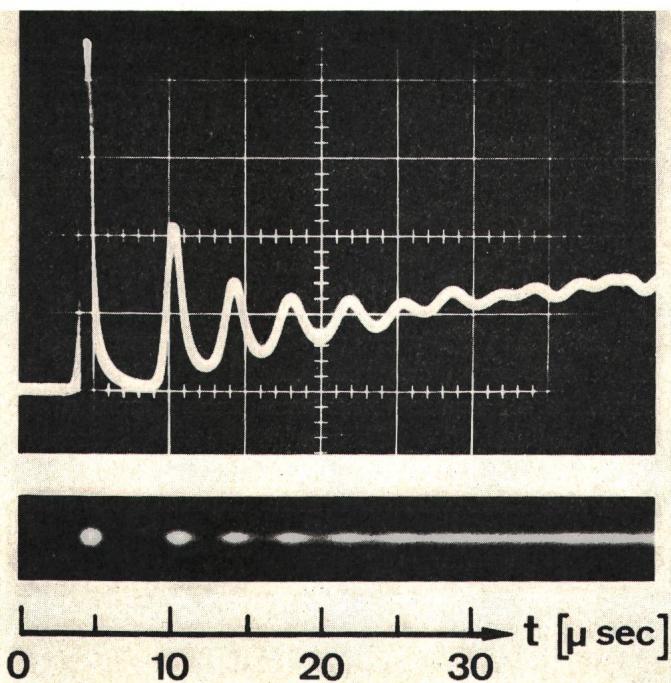


Fig. 3
Beispiel für das zeitliche Emissionsverhalten eines
Neodym-YAG-Lasers (gedämpftes Spiking)

Abstimmung von Laserwellenlänge und Absorptionseigenschaften des Werkstückes realisiert werden. Leider ist diese Abstimmung gerade für diejenigen Werkstoffe nicht möglich, die die grösste Bedeutung in der Praxis besitzen. Hierzu gehören die Metalle, Gläser, Keramiken, bestimmte Kunststoffe und Kristalle. Alle diese Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur wenig Licht absorbieren, und es wurde zunächst vermutet, dass sie für die Laserbearbeitung weitgehend ungeeignet sind. Metalle z. B. reflektieren 80...99,9 % des einfallenden Lichts und nur wenige Prozente oder Bruchteile davon werden in einer extrem dünnen Schicht, der sog. Eindringtiefe, absorbiert. Noch ungünstiger ist die Situation bei dielektrischen Werkstoffen, die häufig nur Bruchteile von Promille des einfallenden Lichtes absorbieren. Zwar kann die absorbierte Energie durch Steigerung der Laser-Leistung vergrössert werden, jedoch treten dann in den meisten Fällen die Wärmeleitung und die durch sie verursachten Sekundärprozesse als störende Nebeneffekte auf.

Den Ausweg aus dieser scheinbar aussichtslosen Situation zeigt wiederum die Laserphysik. Experimentell wurde festgestellt, dass die Gesetze der klassischen Optik, in denen Absorption und Transmission intensitätsabhängige Größen sind, bei hohen Laserintensitäten ihre Gültigkeit verlieren und dafür die Gesetze der nichtlinearen Optik an ihre Stelle treten. Auch die absorbierte Energie folgt von einer bestimmten Intensität ab nicht mehr den klassischen Gesetzen, sondern nimmt wesentlich grössere Werte an, was im folgenden als anomales Absorptionsverhalten bezeichnet werden soll.

Die anomale Absorption tritt besonders deutlich bei dielektrischen Werkstoffen wie Glas, Diamant und Korund in Erscheinung, die im sichtbaren Bereich praktisch absorptionsfrei sind. Waren zum Beispiel entsprechend eingestrahlter Energie und Absorptionsgrad nach der klassischen Vorstellung Temperaturerhöhungen von wenigen Graden zu erwarten, dann treten tatsächlich Temperaturen von mehreren tausend Grad auf, die die Verdampfungstemperatur weit überschreiten.

Ähnliche Verhältnisse können auch bei Metallen mit hohen Reflexionsgraden beobachtet werden. Auch in diesem Fall wird die Laser-Strahlung stärker absorbiert, als dem Reflexionsgrad entsprechend zu erwarten wäre. Der Grund für die anomale Absorption liegt in den hohen Leistungsdichten der Laser-Strahlung, bei denen eine Folge von nichtlinearen Wechselwirkungsprozessen zwischen Licht und bestrahlter Zone auftritt. Sobald nichtlineare Prozesse mit merklicher Häufigkeit auftreten, verlieren die bekannten klassischen Gesetze für Absorption und Reflexion ihre Gültigkeit.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch geeignete Anpassung der Laserintensität an die Materialeigenschaften vollständige Absorption der Laserstrahlung erreicht werden kann. Im Vergleich zu früheren Stadien der Laser-Materialbearbeitung bedeutet der Zustand der vollständigen Absorption eine wesentliche Verbesserung des Bearbeitungswirkungsgrades, da Reflexions- oder Transmissionsverluste praktisch entfallen.

4. Vorgänge bei der Materialbearbeitung

Im allgemeinen ist die Intensität der Laserstrahlung, bei der vollständige Absorption erreicht wird, wesentlich höher als die zur Bearbeitung oder Materialabtragung benötigte Intensität. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, ist es zweckmäßig, den Startprozess, bei dem vollständige Absorption erreicht werden muss, mit hoher Intensität zu beginnen und den anschliessenden Bearbeitungsprozess mit geringer Intensität durchzuführen. Ein zeitlicher Verlauf der Laser-Intensität, der

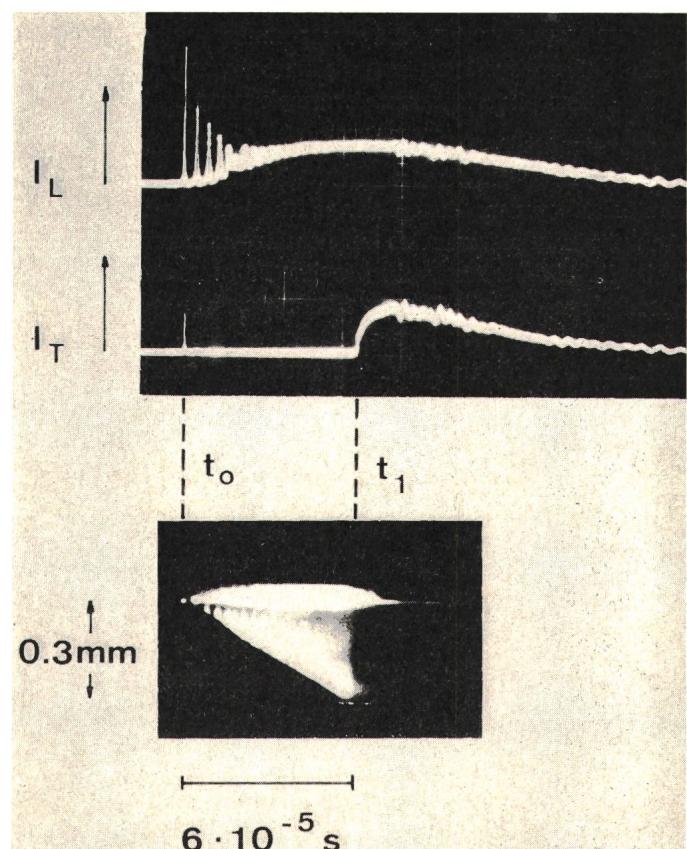


Fig. 4
Zeitlicher Ablauf einer Bohrung in transparentem Material mit
Laser-Strahlung
oben: zeitlicher Verlauf der Laserstrahlung
Mitte: zeitlicher Verlauf des durchgehenden Lichtes
unten: Streak-Aufnahme des Bohrvorganges

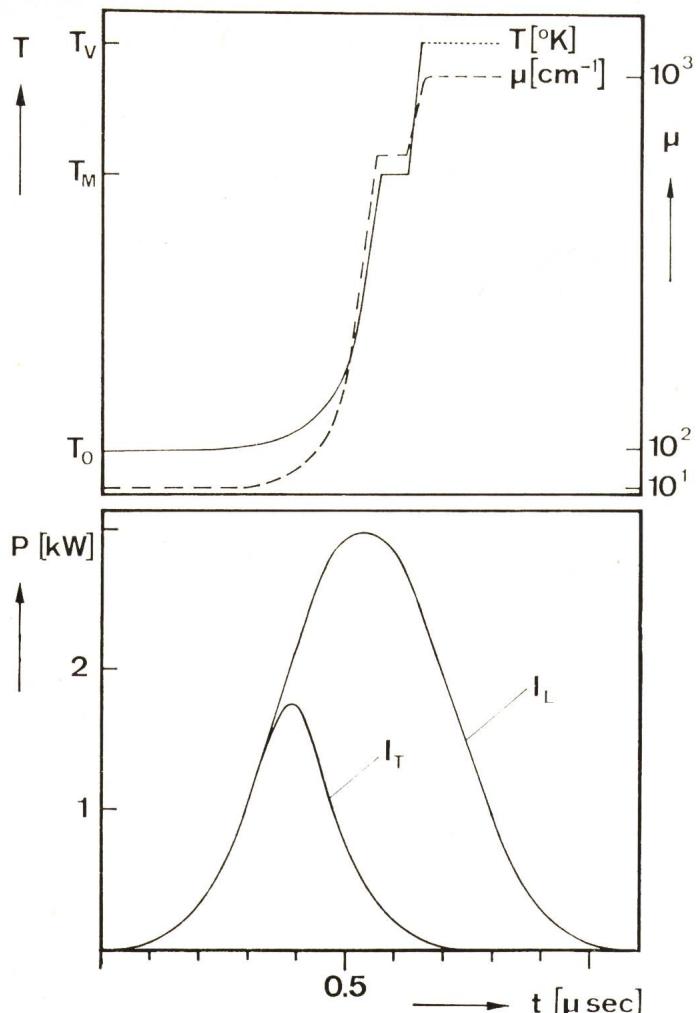


Fig. 5
Zeitablauf der Startphase von Fig. 4 in vergrösserter Zeitauflösung
Bezeichnungen siehe im Text

dieser Forderung entspricht, ist in Fig. 3 dargestellt. Das erste Maximum des zeitlichen Intensitätsablaufes, die sog. Startphase, ist gerade so dimensioniert, dass das Material in den Zustand der vollständigen Absorption überführt wird.

Nach Abschluss der Startphase, die in sehr kurzen Zeiten (10^{-7} s) durchlaufen werden kann, befindet sich das Material im allgemeinen auf einer relativ hohen Temperatur, die bereits in der Umgebung der Schmelztemperatur liegen kann. In diesem Temperaturbereich absorbieren viele Stoffe wie graue Körper. Das bedeutet, dass ein merklicher Bruchteil der Strahlung von der flüssigen Phase absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Bei konstanter Energieinstrahlung beginnt die Temperatur schnell zu steigen.

Das Beispiel in Fig. 4 zeigt den zeitlichen Ablauf einer Bohrung in einem praktisch absorptionsfreien Saphir-Kristall. Im oberen Oszillogramm ist der Zeitverlauf der Laserintensität (I_L) dargestellt. Im Oszillogramm darunter ist die durch den Kristall durchgehende Laserintensität (I_T) wiedergegeben. Der Intensitätsmaßstab ist für beide Oszillogramme derselbe. Es ist deutlich zu erkennen, dass von einer bestimmten Intensität ab das Laserlicht vollständig absorbiert wird. Die durchgehende Intensität strebt gegen Null. Erst dann, wenn die Probe durchbohrt ist, registriert der Photodetektor wieder eine Intensität. Der zeitliche Ablauf der Bohrung kann aus dem unteren Bild entnommen werden. Es handelt sich hierbei um eine Streak-

Aufnahme, die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erhalten wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bohrung mit nahezu konstanter Geschwindigkeit vorangetrieben wird.

Der zeitliche Ablauf der Startphase ist in Fig. 5 mit vergrösserter Zeitauflösung dargestellt. Die durchgehende Intensität I_T entspricht zunächst genau der Laser-Intensität I_L , bis zu einem bestimmten Wert von I_L , von dem ab die durchgehende I_T schnell abnimmt und gegen Null strebt. In der Darstellung darüber ist zu erkennen, wie sich der Absorptionskoeffizient μ in weniger als 10^{-7} s um mehrere Zehnerpotenzen ändert. Als Folge steigt die Temperatur in der Bearbeitungszone in derselben Zeit von Raumtemperatur auf Werte, die weit über der Verdampfungstemperatur T_V liegen. In dem in die Dampfphase überführten Material treten bei genügend hoher Leistungsdichte Drucke bis zu 5000 kg/cm^2 auf, die das dampfförmige Material mit hoher Geschwindigkeit aus der Bearbeitungszone treiben.

Während der Startphase steigt der Absorptionskoeffizient nach Fig. 5 auf Werte von 10^3 cm^{-1} . Das bedeutet, dass das gesamte eingestrahlte Laserlicht in einer Schicht von ca. $10 \mu\text{m}$ absorbiert wird. Nach den bisher vorliegenden Beobachtungen ist dieser Wert der «Eindringtiefe» weitgehend unabhängig von der Art des Materials. Als Folge wird das Material zeitlich nacheinander in einzelnen Volumenelementen entfernt (Fig. 6). Dabei wird jedes Volumenelement von der festen in die flüssige und anschliessend in die dampfförmige Phase überführt. Um diesen Vorgang deutlicher hervorzuheben, ist in Fig. 6 ein Bohrvorgang wiedergegeben, bei dem die Laserenergie in einzelnen kurzen Pulsen von ca. 10^{-6} s Dauer, den sog. Spikes, zugeführt wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass jeder Spike ein Volumenelement von ca. $10 \mu\text{m}$ Dicke abträgt. Die Bohrung wird demnach diskontinuierlich mit Schrittweiten von $10 \mu\text{m}$ vorangetrieben.

Durch geeignet dimensionierte Einstrahlung von Laserlicht wird die innere Energie der Dampfphase soweit erhöht, bis ein homogener Dampfstrahl mit hoher Geschwindigkeit austritt und den Abtransport des Materials in kürzester Zeit vornimmt. Infolge der hohen Leistungsdichten der Laserstrahlung wird der Zyklus Erwärmen–Verdampfen in ausserordentlich kurzer Zeit (ca. 10^{-6} s) durchlaufen. Bohrungen zum Beispiel können deshalb mit einer relativ hohen Geschwindigkeit V_B vorgetrieben werden.

$$V_B \approx \frac{I_L}{E_V + E_E}$$

I_L mittlere absorbierte Laserintensität;
 E_V Verdampfungsenergie;



Fig. 6
Zeitlicher Ablauf des Bohrvorganges mit vergrösserter Zeitauflösung zur Demonstration des elementweisen Fortschritts der Bohrung

E_E Überschussergie, bzw. Energie der Dampfphase;
 V Volumen der Bearbeitungszone.

Typische Werte der Vortriebsgeschwindigkeit liegen zwischen 3 und 300 m/s.

Die Experimente zeigen, dass die Vortriebsgeschwindigkeit V_B weitgehend unabhängig von der absorbierten Laserleistung ist. Zur Demonstration dieses Effektes ist in Fig. 7 der zeitliche Ablauf des Bohrvorganges für drei verschiedene Laser-Intensitäten bzw. -Energien wiedergegeben. Die höhere Laserintensität macht sich lediglich in einer höheren Temperatur der Dampfwolke und einem geringfügig vergrößerten Durchmesser des Bohrloches bemerkbar.

Von entscheidender Bedeutung für den richtigen Ablauf des Bearbeitungsprozesses ist die genaue zeitliche Dosierung der

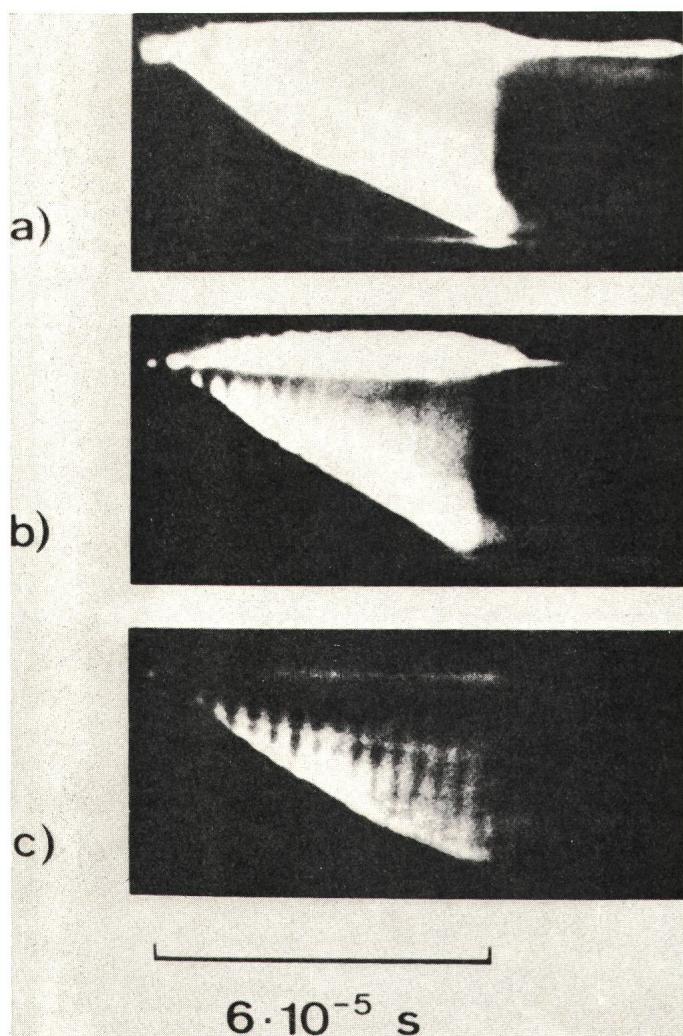


Fig. 7
Demonstration der Konstanz der Bohrgeschwindigkeit bei verschiedenen Laserleistungen

zugeführten Laserleistung, die für jedes Material geeignet abgestimmt werden muss: Wird dem Volumenelement zuviel Strahlungsenergie zugeführt, dann treten in verstärktem Maße nichtlineare Prozesse auf, die zu unerwünschten und unkontrollierbaren Zerstörungen des Werkstoffes führen. Die stark erhitze Dampfwolke kann Störungen des fokussierten Strahlenganges verursachen, oder lokale Überhitzung führt zum explosionsartigen Auswurf von flüssigem Material. Die dabei auftretenden Rückstossimpulse können ebenfalls unerwünschte Veränderungen des Werkstoffes verursachen (Riss- und Spal-

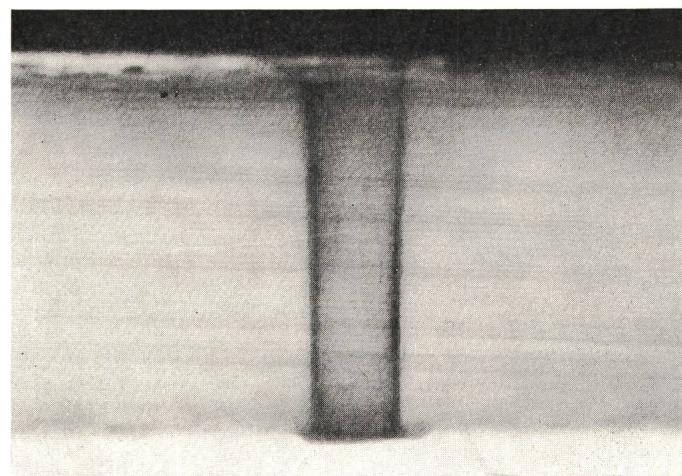


Fig. 8
Längsschnitt durch ein Bohrloch in Saphir (Bohrdurchmesser ca. 40 μm)
Aufnahme in Immersionsflüssigkeit

tenbildung). Wird dem Volumenelement zu wenig Strahlungsenergie zugeführt, dann bleibt die Bearbeitungszone zu lange in der erhielten festen oder flüssigen Phase. Die Umgebung der Bearbeitungszone wird durch Wärmeleitung aufgeheizt und infolge thermischer Überlastung entstehen Mikrorisse und -sprünge. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die zur Bearbeitung notwendige materialspezifische Laserleistung ziemlich eng nach oben und unten begrenzt ist. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Abweichungen von 20 % von der optimalen Bearbeitungsleistung bereits zu Störungen in den angrenzenden Bereichen führen können.

Die zuvor diskutierten idealen Arbeitsbedingungen: Vollständige Absorption der Laserenergie, maximale Arbeitsgeschwindigkeit und minimale Wärmeverbelastung der Umgebung können zur Zeit nur mit Lasern im Pulsbetrieb erreicht werden. Kontinuierliche Laser besitzen noch nicht die erforderlichen Leistungsdichten, so dass Reflexionsverluste und Wärmeleitung eine entscheidende Rolle spielen. Häufig ist — wie bei den Metallen — gute Wärmeleitung mit geringen Absorptionsvermögen verknüpft. Der geringe Anteil der absorbierten Energie wird schnell abtransportiert, die Umgebung der Bearbeitungszone wird stark aufgeheizt und als Folge kann die notwendige Arbeitstemperatur nur bei relativ dünnen Blechen erreicht werden.

5. Bearbeitungsbeispiele

Die physikalischen Prozesse, die während der Bearbeitung mit Laserstrahlung auftreten, wurden bisher überwiegend am

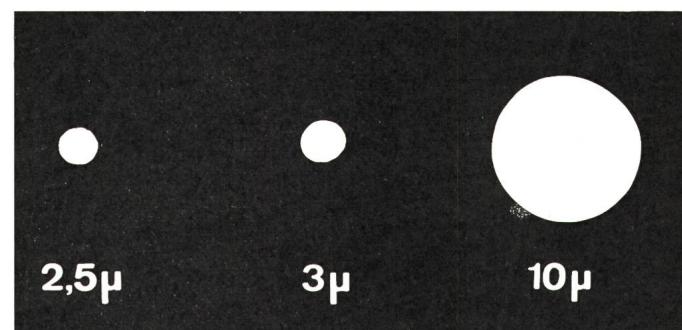
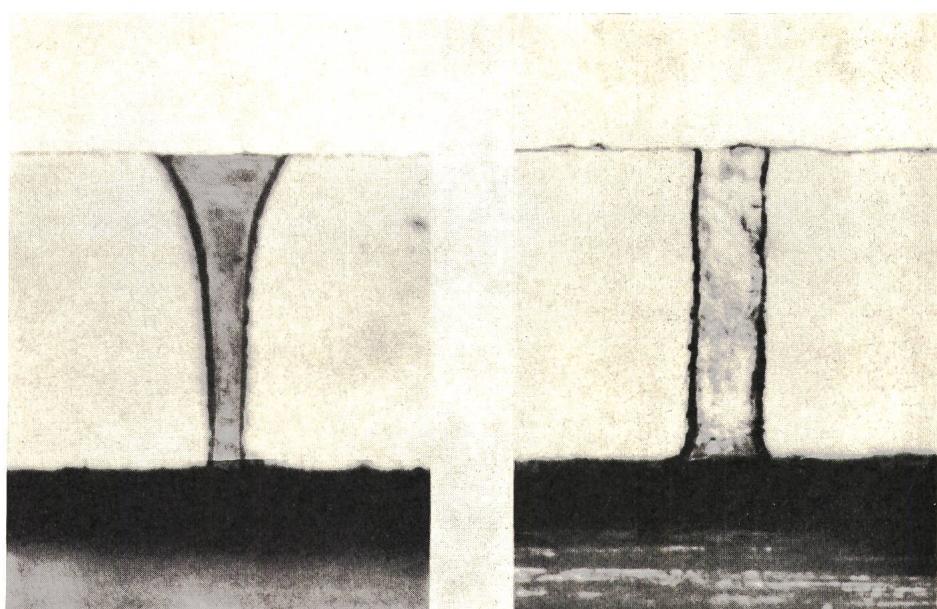


Fig. 9
Beispiele für Mikrobohrungen in Metall (Platinfolien)
Elektronenmikroskopische Aufnahme bei den 2,5- bzw. 3- μm -Bohrungen, Auflichtaufnahmen bei der 10- μm -Bohrung

Fig. 10

Längsschnitt durch zwei Bohrlöcher zur Demonstration der Beeinflussung der Lochgeometrie durch zeitliche Steuerung der Laserleistung



Beispiel der Bohrung diskutiert. Dieses Beispiel wurde gewählt, da alle übrigen Bearbeitungsvorgänge, für die der Laser erfolgreich eingesetzt werden kann, sich hievon leicht ableiten lassen.

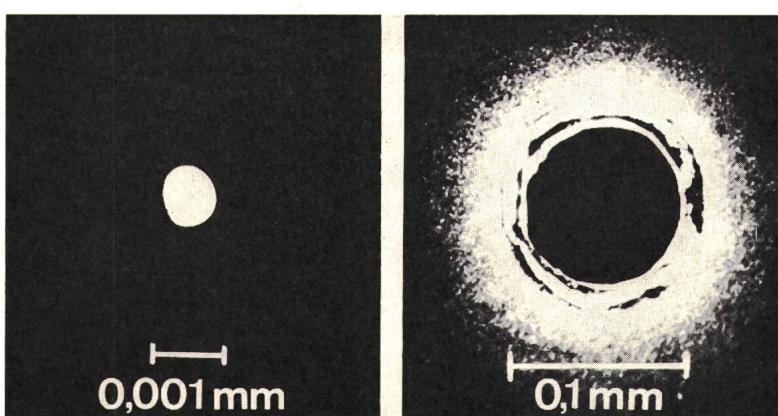
5.1 Bohrungen

Fig. 8 zeigt als Beispiel einen Längsschnitt durch ein 40- μm -Bohrloch in Saphir. Bohrungen in harte dielektrische Werkstoffe stellen die höchsten Anforderungen an die Qualität der Laserstrahlung. Bohrungen in Metallen, auch in Hartmetallen, sind wegen der günstigeren Festigkeitseigenschaften einfacher durchzuführen. In Fig. 9 sind einige Beispiele von Mikrobohrungen wiedergegeben. Richtig durchgeführte Laserbohrungen weisen bis zu grossen Bohrlängen eine nahezu ideale Zylinderform auf. Erst bei Bohrlängen, die den Bohrdurchmesser um das zwanzigfache übersteigen, können messbare Abweichungen von der idealen Zylinderform auftreten. Bohrlängen von hundertfachem Bohrdurchmesser können theoretisch mit Abweichungen von ca. 5 % von der Idealgeometrie hergestellt werden. In den Fällen, in denen Abweichungen von der Zylinderform gewünscht werden, können auch trichter- oder tonnenförmige Bohrungen oder solche mit exponentiellem Verlauf durch geeignete zeitliche Steuerung der Laser-Leistung hergestellt werden (Fig. 10).

Die häufigsten Fehler, die bei Laserbohrungen auftreten, sind entweder auf örtliche oder zeitliche Abweichungen von der idealen Laser-Emission zurückzuführen. Speziell bei sehr kleinen Locheindrücken im μm -Bereich führt ein geringer Astigmatismus oder Schwankungen der Modenstruktur zu erheblichen Abweichungen von der idealen Lochgeometrie (Fig. 11). Bei grossen Locheindrücken verursachen geringe Abweichungen von dem idealen Zeitablauf eine Abkühlung der Gasphase, die zu Materialablagerungen am Rande des Bohrloches führt (Fig. 11).

5.2 Schneiden und Trennen

Das Trennen und Schneiden von Werkstoffen kann zum Beispiel als eine Folge von dicht aneinandergesetzten Bohrungen bezeichnet werden. Entweder wird die Materialdicke so stark abgetragen, dass es zu einem Bruch kommt, oder es wird die Materialfestigkeit so stark herabgesetzt, dass es zu einer Rissbildung kommt.



gen bezeichnet werden. Entsprechend ist die maximal erreichbare Schnittgeschwindigkeit V_S im wesentlichen durch die Vortriebsgeschwindigkeit V_B festgelegt:

$$V_S \approx \frac{d}{D} V_B$$

d Durchmesser des Laserstrahls;
 D Materialstärke.

Bei genügend hoher Laser-Leistung könnten nach dieser Beziehung Stahlbleche von 1 mm Dicke mit Geschwindigkeiten von einigen m/s geschnitten werden. Derartige Schnittgeschwindigkeiten können zur Zeit nur kurzzeitig mit Pulslasern erhalten werden. Bei kommerziellen Lasern im Dauerbetrieb liegen die Schnittgeschwindigkeiten bei vergleichbaren Umständen wegen der wesentlich geringeren Leistung bei Bruchteilen von m/min. Durch zusätzliche Gasspülung der bearbeiteten Stelle wird Oxydationsenergie freigesetzt, die den vom Laser-Strahl induzierten Bearbeitungsprozess unterstützt. Zum Beispiel können mit Sauerstoffzufuhr drei- bis zehnmal dicke Bleche getrennt werden. Mit einem 200-W-CO₂-Laser können unter diesen Umständen millimeterdicke Stahlbleche mit Schnittgeschwindigkeiten bis zu 1 m/min geschnitten werden.

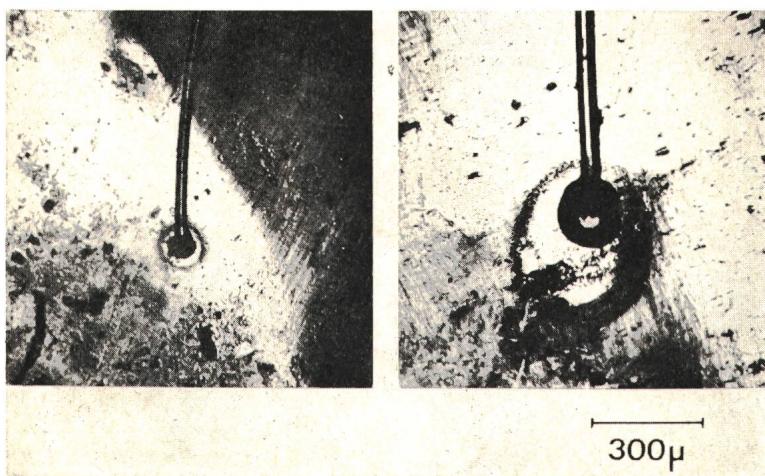
5.3 Materialabtragung und Härtung

Materialabtragung in allgemeiner Form, wie sie unter anderem bei der Glättung oder Politur von Oberflächen auftritt, kann als verlängerte Startphase der Bohrung angesehen werden, d. h. als eine Bohrung, die unmittelbar nach Beginn wieder abgebrochen wird. Hierzu bedarf es einer präzisen zeitlichen Steuerung oder Modulation der Laserstrahlung.

Fig. 11
Typische Beispiele für fehlerhafte Bohrungen
links: unrunde Bohrung infolge ungleichmässiger örtlicher Verteilung der Laserintensität, verursacht durch thermische Störungen im Laserkristall
rechts: Ablagerungen am Rand des Bohrloches als Folge von Überhitzung der flüssigen Phase oder Unterkühlung der Dampfphase während des Bohrprozesses

Fig. 12

Beispiele für Schweisungen von Gold- und Wolframdrähten auf Platinfolie



Auch die Härtung von Oberflächen ist auf die Startphase der Bohrung beschränkt. Hier ist die zeitliche Steuerung der Laserleistung gerade so durchzuführen, dass die Übergangsphase festflüssig nicht überschritten wird. Einschränkend ist zu bemerken, dass zwar Härtungseffekte im Auftreffbereich der Laserstrahlung festgestellt wurden, dass jedoch der physikalische Mechanismus der Laser-Härtung noch wenig verstanden wird. Grob vereinfacht kann zwischen zwei Härtungsprozessen unterschieden werden: Der erste entspricht weitgehend dem klassischen Härtungsverfahren, der zweite Prozess beruht vermutlich auf einer Materialverdichtung an der Oberfläche als Folge der Wirkung einer laserinduzierten Schockwelle.

5.4 Schweissungen

Tiefschweissungen, bei denen Material grösserer Dicke (0,5...5 cm) stumpf aneinander geschweisst wird, können als Bohrung mit anschliessender Verschmelzung des Materials erläutert werden. Untersuchungen mit 15-kW-CO₂-Lasern im Dauerbetrieb ergaben, dass Laser-Tiefschweissungen eine höhere Festigkeit als konventionell durchgeföhrte Schweissungen aufweisen. Die Materialstärken lagen bei diesen Versuchen zwischen 1 und 1,5 cm. Beispiele für einfache Stumpfschweissungen sind in Fig. 12 wiedergegeben. Ein 30-μm-Golddraht und ein 50-μm-Wolframdraht wurden stumpf auf eine Platinfolie aufgeschweisst. Allgemein ist festzustellen, dass sich der Laser für Schweissprozesse insbesondere im Mikrobereich sehr gut bewährt hat. Im allgemeinen — und im speziellen bei Kunststoffen — wiesen die Laserschweissungen höhere Festigkeiten als Normalschweissungen auf. Bei Schweissvorgängen werden besondere Anforderungen an die zeitliche Steuerung der Laserleistung gestellt. Nach Abschluss der Startphase darf nur noch soviel Energie zugeführt werden, dass die Schweissverbindung ihre optimale Festigkeit erhält. In grober Näherung muss die Laser-Energie im Gleichgewicht mit den beim Schweissen auftretenden Wärmeleistungsverlusten stehen. Wird die optimale Leistung unterschritten, dann treten Versprödungsscheinungen in der Schweisszone infolge von Abkühlungseffekten auf. Beim Überschreiten der optimalen Leistung besteht die Gefahr, dass das Material verdampft wird.

Alle Beispiele stammen aus dem Mikro- oder Feinbearbeitungsbereich, den wichtigsten Anwendungsgebieten des Lasers. Günstig für die Mikrobearbeitungstechnik ist die exakte Positionierungskontrolle, die mit optischen Mitteln ohne Schwierigkeiten zu realisieren ist. Hervorzuheben ist die Reproduzierbarkeit auch komplizierter Bearbeitungsvorgänge.

Der besondere Vorteil der Laser-Bearbeitung liegt in den ausserordentlich engen Toleranzen (wenige μm), die bei hohen Stückzahlen (150000 pro Schicht) über lange Zeiten aufrechterhalten werden kann. Bei allen konventionellen Bearbeitungsverfahren treten infolge Werkzeugabnutzung typische Toleranzschwankungen auf, die hier entfallen. Die mit der Lasertechnik erreichbare Herstellungsgenauigkeit entzieht sich häufig einer Kontrollmöglichkeit durch konventionelle Verfahren. In solchen Fällen ist mit Hilfe von Laserstrahlung — insbesondere durch Anwendung holographischer Verfahren — eine Gütekontrolle möglich.

6. Laser für Materialbearbeitung

Aus der Vielzahl der kommerziell erhältlichen Lasersysteme sind nur wenige zur Materialbearbeitung geeignet: Der CO₂-Laser, der Neodym-YAG-Laser, in Spezialfällen der Argonlaser und der Rubinlaser. Die wichtigsten Kenndaten dieser Laser sind in Tabelle II zusammengestellt.

Mit Abstand die grösste Bedeutung für die Materialbearbeitung hat heute der CO₂-Laser, der sowohl im Puls- wie im Dauerbetrieb arbeiten kann. Bedingt durch die Wellenlänge von 10 μm und die speziellen Probleme der Infrarotoptik sind die kleinsten zu bearbeitenden Strukturen auf ca. 25 μm beschränkt. Für Strukturen im μm-Bereich können Neodym-YAG- und Argonlaser eingesetzt werden.

Laser für Materialbearbeitung müssen besonders stabil konzipiert sein. In der Praxis werden häufig Winkelgenauigkeiten unter 10⁻⁴ rad gefordert, wodurch sich spezielle Forderungen an die Resonatorkonstruktion ergeben. Für extreme Genauigkeit und Reproduzierbarkeit muss der Resonator in der Wellenform niedrigster Ordnung, der sogenannten Grund-Mode oder TEM₀₀-Mode betrieben werden. Diese Wellenform zeichnet sich durch eine homogene Intensitätsverteilung und durch hohe Stabilität gegenüber äusseren und inneren Störungen aus. Leider zeichnen sich Resonatoren mit unkritischer Justierung durch ein sehr kleines Volumen des Grund-Mode und damit durch eine schlechte Ausnutzung des aktiven Mediums aus. Resonatoren mit gutem Wirkungsgrad weisen da-

Laser für Materialbearbeitung

Tabelle II

Bezeichnung	Wellenlänge μm	Leistung W		Anwendungen
		Puls	Dauer	
CO ₂ -Laser	10 · 6	10 ⁵	10 ³	Allgemeine Bearbeitung
Neodym-YAG-Laser	1 · 0	5 · 10 ⁷	1...10 ²	
Rubin-Laser	0 · 7	5 · 10 ⁷	1	Präzisions- und Feinbearbeitung
Argon-Laser	0 · 5	10 ⁴	1...10 ²	

gegen im allgemeinen kritische Ansprüche an Justierung und Stabilität auf. Einen Laser-Resonator mit gutem Wirkungsgrad im Grund-Mode zu betreiben, läuft daher auf das Problem hinaus, den optimalen Kompromiss zwischen Stabilität und Wirkungsgrad zu finden. Als zusätzliche Komplikation ist bei Festkörperlasern die thermische Veränderung des Laserstabes durch den Pumpprozess zu berücksichtigen.

Derartige thermische Veränderungen führen zu einer Abnahme der Laserintensität in Verbindung mit der Anregung höherer Moden. Hierdurch ändern sich die Abbildungsverhältnisse im Fokalbereich der Bearbeitungsoptik weitgehend, und die Folge ist eine Abweichung von der vorgeschriebenen Geometrie des Arbeitsvorganges.

Die unerwünschten Auswirkungen der thermischen Veränderungen des Laser-Kristalls konnten durch Entwicklung spezieller Pumpgehäuse und Resonator-Konfigurationen weitgehend eliminiert werden.

7. Zusammenfassung

Aus den vorangehenden Beispielen kann entnommen werden, dass die Laser-Technik für die materialabtragende Bearbeitung im weitesten Sinne angewendet werden kann. Besondere Vorteile liegen in der kurzen Bearbeitungsdauer und der hohen Fertigungsgenauigkeit. In einzelnen Fällen wurde der Laser bereits erfolgreich für die Serienproduktion eingesetzt. Hohe Bearbeitungsgenauigkeit in der Serienproduktion erfordert spezielle Laser-Konstruktionen, deren Emissionseigenschaften sich durch gute örtliche und zeitliche Reproduzierbarkeit auszeichnen. Für optimale Bearbeitungsqualität und minimale thermische Belastung der Umgebung der Bearbeitungszone ist die Laser-Intensität an die Materialeigenschaften und den Bearbeitungsvorgang anzupassen.

Adresse des Autors:

Prof. G. Herziger, Institut für angewandte Physik der Universität Bern,
Sidlerstrasse 5, 3000 Bern.