

Effiziente Bearbeitung mit Pikosekundenlasern

WER GIBT HIER DEN TAKT VOR?

Technologisch sind Pikosekundenlaser reif für die industrielle Produktion. Aber sind sie es auch wirtschaftlich? Da das ablatierte Volumen pro Puls beschränkt ist, lassen sich hohe Abtragsraten letztlich nur über schnelle Puls-Wiederholraten erreichen. Diese liefert der neue ›PicoBlade‹ von Time-Bandwidth Products, aber der Laser kann noch viel mehr.

**HUBERT AMMANN
ANDREAS OEHLER**

Die industrielle Verwendung von Pikosekundenlasern in der Mikromaterialbearbeitung hat in den letzten fünf Jahren eine fulminante Entwicklung erlebt. Als vor knapp zehn Jahren die ersten geeigneten Laser auf den Markt kamen, hat sich das Interesse hauptsächlich auf die Forschung und Entwicklung an wissenschaftlichen Instituten beschränkt. In der Zwischenzeit haben sich diese und weitere ›Ultrafast‹-Lasersysteme weiterentwickelt und sind von der Industrie als verlässliche Werkzeuge anerkannt. Parallel dazu konnte ein breites Prozesswissen generiert werden, was eine signifikante Verbreitung dieser innovativen Technologie erst möglich machte.

Ist der Einsatz von UKP-Lasern wirtschaftlich?

Eine der Hürden für den Einsatz innovativer Fertigungsverfahren sind die erheb-

lichen Investitionskosten: Anschaffungskosten für den Laser und die Bearbeitungsmaschine sowie Entwicklungskosten für einen sicheren und effizienten Produktionsprozess.

Diese Investitionen sind in der Regel nur dann gerechtfertigt, wenn die geforderte Bearbeitungsqualität mit den etablierten Produktionsmethoden nicht erreicht werden kann beziehungsweise neue Prozesse durch den Einsatz von UKP-Lasern überhaupt erst ermöglicht werden oder wenn die Produktion wirtschaftlicher wird. Letzteres ist zum Beispiel dann der Fall, wenn Nachbearbeitungsschritte wegfallen oder der Durchsatz gegenüber herkömmlichen Methoden erhöht, der Verschleiß der Produktionsanlagen gesenkt und/oder die Produktionsausbeute gesteigert werden kann. Es ist die primäre Aufgabe der Prozessentwicklung, diese Potenziale auszuloten.

Prozesse werden üblicherweise in einem Trial-and-Error-Verfahren optimiert. Dabei werden sowohl unterschiedliche Laserparameter als auch Strahlführungsstrategien untersucht. Entscheidend ist dabei, dass

die Anlage die höchstmögliche Flexibilität bietet. Während das optimale Strahlführungssystem in hohem Maße anwendungsspezifisch ist und es somit keine ›universelle, beste Bearbeitungsmaschine‹ gibt, ist diese Abhängigkeit von der Anwendung bei den Lasern weit weniger ausgeprägt.

Ein Vergleich zeigt, dass es bei den Strahlquellen durchaus ›Alleskönner‹ wie den ›PicoBlade‹ (Bild 1) gibt. Laser von Time-Bandwidth Products bieten mit Wiederholraten bis zu 8 MHz (bei Bedarf auch höher), der proprietären ›FlexBurst‹-Technologie und den hochdynamischen digitalen und analogen Leistungsmodulationsmöglichkeiten eine Ausstattung und Flexibilität, die auf dem UKP-Lasermarkt einzigartig ist.

Produktionseffizienz: ja gerne – aber wie?

Bei den meisten Prozessen wird mit UKP-Lasern im wesentlichen Material abgetragen. Ein einzelner optischer Puls entfernt dabei nur ein dünnes Scheibchen mit einer Dicke von ungefähr $0,1 \mu\text{m}$, was bei einer Strahlgröße von $20 \mu\text{m}$ einem abgetragenen Volumen von circa 10^{-8}mm^3 entspricht. Es werden also etwa 100 Millionen Pulse benötigt, um 1mm^3 Material zu entfernen.

Im Wesentlichen erfüllen effiziente Prozesse zwei Bedingungen:

- Das abgetragene Volumen pro eingebrachter Pulsenergie [$\text{mm}^3/\mu\text{J}$] ist maximal, und
- die Bearbeitung auf dem Werkstück erfolgt mit der höchstmöglichen Wiederholrate.



1 Der ›PicoBlade‹ von Time-Bandwidth Products

Es ist sowohl theoretisch als auch in experimentellen Testreihen verifiziert worden, dass bei vorgegebener Strahlgröße eine optimale Pulsenergie existiert, bei der das abgetragene Volumen pro Energieeinheit maximal wird [1]. Diese relativ moderate Energie garantiert nicht nur den effizientesten Ablationsprozess, sondern auch die beste Bearbeitungsqualität, da höhere Energien den Wärmeeintrag verstärken. Unter diesen optimalen Bedingungen ergibt sich eine Ablationstiefe, die im Wesentlichen der Eindringtiefe des Materials entspricht. Mehr Material lässt sich pro Puls nicht effizient entfernen.

unabhängig vom Energiebedarf der Applikation die volle optische Leistung genutzt werden.

Als zentrale Größe für Effizienzsteigerungen bleibt nur die Wiederholrate, mit der die Pulse auf dem Werkstück appliziert werden. Solange »Bearbeitungs-Totzeiten« aufgrund von Scannerbeschleunigungen und Werkstückpositionierung nicht allzu sehr ins Gewicht fallen, überträgt sich eine Erhöhung der Wiederholrate praktisch 1:1 auf den Durchsatz der Anlage. Der Laser wird damit zum eigentlichen Taktgeber in den Fertigungshallen und bestimmt so maßgeblich deren Produktivität.



2 Linien- beziehungsweise Polygon-Scanner. 4000 Punkte pro Linie, Zeitbedarf pro Linie = 2 ms

(Quelle: Next Scan Technology)

Eine signifikante Einschränkung vieler UKP-Laser auf dem Markt ist, dass die Pulsenergie nicht oder nur mittels optischer Abschwächung eingestellt werden kann. Nicht selten ist die maximale Pulsenergie des Lasers bis zu zehnmal höher als vom Prozess gefordert, womit ein 50-W-Laser effektiv auf 5 W reduziert werden muss, da die überschüssige Pulsenergie ansonsten zu ungewollten thermischen Effekten führen kann. Der neue »PicoBlade« von Time-Bandwidth Products hingegen erlaubt eine Anpassung der Energie über die Wiederholrate, also ohne Abschwächung. Damit kann

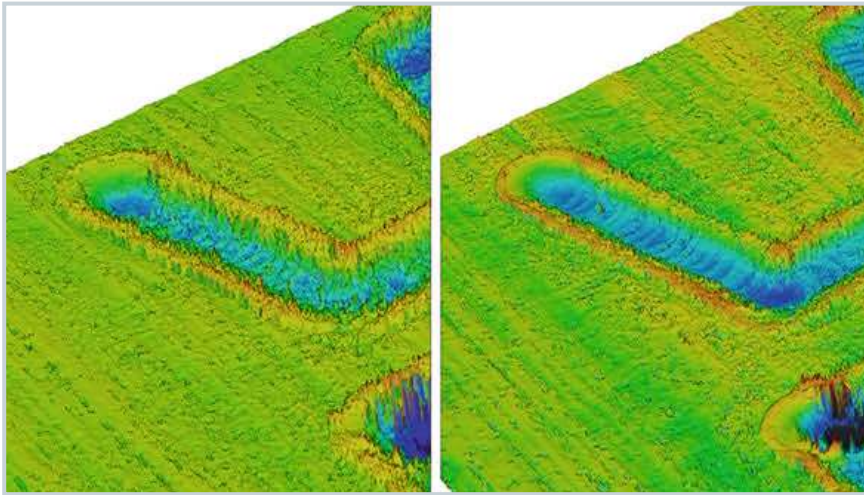
Flaschenhals Strahlführung

Die vielleicht wichtigste Aufgabe der Prozessentwicklung ist damit die Beantwortung der Frage nach der höchstmöglichen Wiederholrate, bei der ein Prozess ohne unerwünschte thermische Nebeneffekte gefahren werden kann.

Die oft allgemein gehaltene Aussage, dass ein Ablationsprozess mit Piko- oder Femtosekundenpulsen athermisch ist, gilt streng genommen nur für einzelne wenige Pulse. Fallen viele Tausend Pulse auf die gleiche Stelle einer Probe, akkumuliert sich im Material die Restenergie, welche nicht zum Ablationsprozess beiträgt, und es kommt zu einer Aufheizung. Dies kann nur vermieden werden, indem man den Überlapp einzelner Pulse gering hält und das Material bei Bedarf durch mehrere Überfahrten abträgt, was bei hohen Wiederholraten schnelle Scangeschwindigkeiten erfordert. Nimmt man als Beispiel einen ▶

KONTAKT

Time-Bandwidth Products AG
8952 Schlieren/Zürich, Schweiz
Tel. +41 44 501-1000
info@time-bandwidth.com
www.time-bandwidth.com



3 Einfluss des »Flex...« in »FlexBurst«. Linien in Edelstahl bei einmaliger Überfahrt. Vergleich zweier sehr ähnlicher Bursts. Links: Pulsintervall = 12 ns, rechts: Pulsintervall = 24 ns (Quelle: Lightmotif)

▶ Laserspotdurchmesser von 40 µm und einen lateralen Pulsüberlapp von 50 Prozent, so benötigt man bei einer Pulswiederholrate von 2 MHz eine Verfahrgeschwindigkeit auf dem Werkstück von 40 m/s.

Die mit Abstand häufigste Beschränkung für den Einsatz hoher Wiederholraten rührt daher aktuell nicht von den verfügbaren Lasersystemen, sondern vielmehr von der limitierten Dynamik der Strahlführung. Insbesondere konventionelle Scanner sind mit maximalen Verfahrgeschwindigkeiten auf dem Werkstück von circa 10 m/s eine Hürde für den Einsatz von Raten im Multi-MHz-Bereich. Ein möglicher Ansatz, die Wiederholrate einer Anlage künstlich zu erhöhen, liegt in der parallelen Bearbeitung, bei der die verfügbare Pulsenergie auf mehrere Arbeitsstationen verteilt wird, was jedoch die Komplexität und Kosten der Anlage deutlich erhöht. Die Parallelisierung eines Prozesses innerhalb einer einzelnen Arbeitsstation mittels sogenannter diffraktiver optischer Elemente umgeht dieses

Problem zwar, eignet sich aber nur für hochspezielle Nischen-Anwendungen.

Die Einschränkungen durch zu träge Strahlführungen wurden mittlerweile erkannt, und es wird aktiv an deutlich schnelleren Strahlableitungen gearbeitet. Vielversprechende Ansätze finden sich in der Verwendung von Polygon-Scannern (Bild 2, siehe Infokasten), akusto- und elektrooptischen Deflektoren, Piezoscannern, MEMS-Scannern beziehungsweise einer Kombination dieser Methoden [2].

FlexBurst

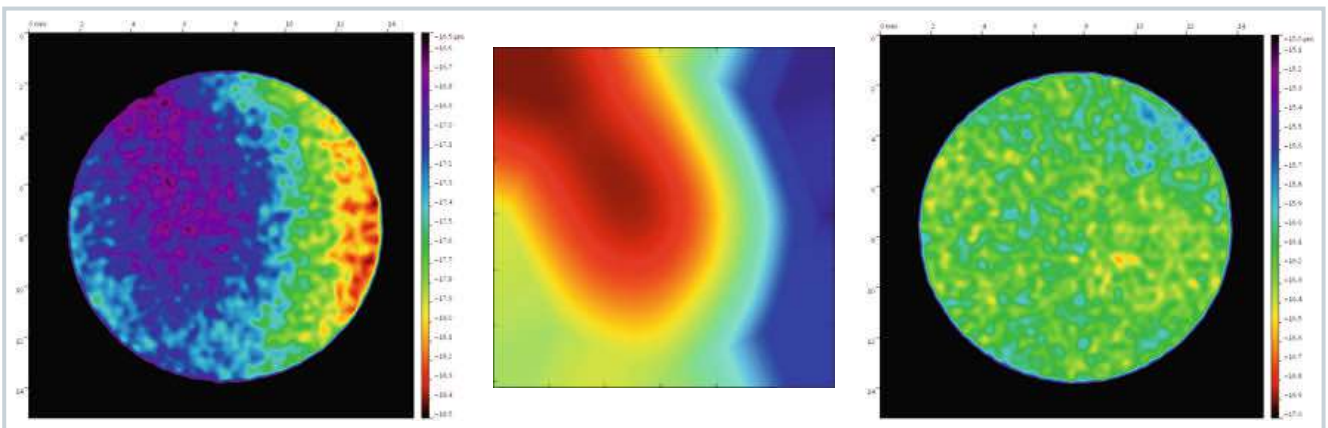
Puls-Bursts sind Gruppen von ultrakurzen Pulsen, die in einem Zeitfenster von typischerweise 100 ns konzentriert sind. Diese hochrepetitiven Bursts, mit Puls-zu-Puls-Abständen von circa 10 ns, können nur in linearen optischen Verstärkern erzeugt werden, stehen also bei den gängigen regenerativen Lasersystemen nicht zur Verfügung.

Es gibt etliche Studien, die zeigen, dass die Verwendung von solchen Pulsgruppen anstelle von Einzelpulsen bei bestimmten Anwendungen die Ablationsraten beziehungsweise die Bearbeitungsqualität deutlich erhöhen kann [3]. Einzigartig an den Lasern von Time-Bandwidth Products ist die Möglichkeit, die Energie jedes einzelnen Pulses innerhalb der Bursts beliebig einstellen zu können (»FlexBurst«-Technologie). Es ist zu erwarten, angenommen die Bursts bringen eine Verbesserung, dass diese von der Energieverteilung und den zeitlichen Abständen der einzelnen Pulse in der Gruppe abhängt.

Bei der Optimierung eines Prozesses zur Herstellung von »micro-molds« wird in einer einzigen Überfahrt eine Linie in Edelstahl geschrieben (Bild 3), wobei der Rauheit eine große Bedeutung zukommt. In einem Prozess-Optimierungsschritt werden zwei sehr ähnliche Bursts verglichen: Beide bestehen aus vier Pulsen mit identischen Energien. Der Unterschied der beiden Bursts liegt lediglich im zeitlichen Abstand der Pulse. Beim ersten beträgt er 12 ns, beim zweiten Burst-Typ ist der Abstand 24 ns. Das Resultat ist ein deutlich kontrollierter Prozess mit den 24-ns-Intervallen, wobei sowohl die Tiefenvariationen entlang der Linie halbiert als auch die lokale, mittlere Rauheit von $R_a=0,4$ auf $R_a=0,25$ verbessert werden konnte.

Leistungsanpassung »on the fly«

Eine zum Teil signifikante Einschränkung der Produktivität von scannerbasierten Anlagen sind die Beschleunigungsphasen der Scanner. Ändert sich die Verfahrgeschwindigkeit, beeinflusst dies den Pulsüberlapp und somit den Abtrag.



4 Tiefenprofil einer zylindrischen Abtragung (Durchmesser=12,5 mm) in einer Al₂O₃-Platte. Links: Profil mit konstanter Laserleistung. Mitte: »Leistungskorrektur-Landkarte«. Rechts: Profil mit Leistungskorrektur (Quelle: Lightmotif)

© 2013 Carl Hanser Verlag, Munich, Germany www.laser-photonics.eu Not for use in internet or intranet sites. Not for electronic distribution.

INFO: Polygon-Scanner

Die aktuell wohl am weitesten entwickelte und bereits kommerziell verfügbare Technologie zur schnellen **Strahlableitung** ist der Polygon-Scanner (**Bild 2**), welcher Spot-Geschwindigkeiten auf dem Werkstück von über 100 m/s ermöglicht. Bei diesem Scannertyp wird ein einfallender Laserstrahl mithilfe eines Polygon-Spiegels und einer f -Theta-Optik auf eine fixe Linie mit konstanter Länge abgelenkt. Eine zweite, senkrechte Achse, welche beispielsweise durch ein Verfahren des Werkstücks realisiert werden kann, sorgt für ein zweidimensionales Bearbeitungsfeld. Die Bearbeitungsdaten werden im Allgemeinen als Bitmap im Rasterverfahren auf den Laserpuls zug aufmoduliert.

Der Polygon-Scanner eignet sich für spezielle Anwendungen wie beispielsweise lineares Schneiden oder Ritzen von dünnen Halbleitern und amorphen Substraten (>dicing<), aber auch für ein großflächiges Abtragen dünner Schichten oder komplexer, zweidimensionaler Strukturen. Auch weniger offensichtliche Anwendungen wie beispielsweise das Perkussionsbohren einer großen Loch-Matrix können von Polygon-Scannern profitieren. Beim sogenannten $\text{>multi-pulse drilling on-the-fly<}$ wird in einem einzelnen Scandurchgang nur ein Puls pro Position appliziert. Eine spezielle Synchronisation sorgt dafür, dass bei jedem Durchgang jede Position wieder genau getroffen wird. Das Ergebnis sind Bohrungen maximaler Qualität ohne thermische Nebeneffekte, trotz hoher Laserwiederholraten.

Eine nahe liegende Möglichkeit, solche Phasen zumindest teilweise nutzen zu können, besteht darin, die Laserleistung kontinuierlich an die momentane Geschwindigkeit des Scanners anzupassen. Die UKP-Laser von Time-Bandwidth Products können über ein analoges elektrisches Kontrollsignal quasi on the fly (unterhalb einer μs) angepasst werden, ohne dabei die anderen Strahlparameter zu beeinflussen.

Dieses Merkmal wird in einer Anwendung ausgenutzt, die von der Firma Lightmotif in den Niederlanden entwickelt worden ist. Es sollen zylinderförmige Vertiefungen in eine Al_2O_3 -Platte geschrieben werden, die später als > mold < benutzt wird. Die Anforderung an die Ebenheit dieser Vertiefungen über eine Kreisfläche mit 12,5 mm Durchmesser ist sehr hoch ($< 1 \mu\text{m}$). Kleinste inhärente Fehler im Strahlengang, beispielsweise Aberrationen der f -Theta-Linse oder eine inhomogene Reflektivität der Scannerspiegel können einen signifikanten Effekt auf die Tiefe haben. Die entsprechenden Abweichungen treten systematisch auf, sind also bei jeder Mulde gleich (**Bild 4a**).

Das Problem kann mithilfe der schnellen Leistungsregelung gelöst werden. Die Tiefenabweichungen werden vermessen und daraus eine $\text{> Leistungskorrektur-Landkarte <}$ erstellt, wobei zu große Tiefen mit einer Verminderung der Leistung kompensiert werden sollen. **Bild 4b** zeigt die Korrektur der Laserleistung, die für jede

Stelle den Faktor angibt, mit dem die Leistung skaliert wird – diese Möglichkeit ist in die Steuerungssoftware von Lightmotif eingebunden worden. Wie in **Bild 4c** gezeigt, kann dadurch die Konstanz der Tiefe auf weniger als $1 \mu\text{m}$ > peak-to-peak < über das ganze Feld deutlich verbessert werden. Diese Option der On-the-fly-Leistungssteuerung bietet zudem die Möglichkeit, Tiefenprofile durch eine Modulation der Laserleistung in den Abtrag einzuarbeiten.

Der neue > PicoBlade < kann (fast) alles

Die Entwicklung sicherer und effizienter Prozesse ist oft komplex und langwierig. Dabei ist am Anfang immer unklar, mit welchen Laserparametern die geforderte Qualität und der höchstmögliche Durchsatz erreicht werden kann. Es ist gerade in dieser Entwicklungsphase entscheidend, dass der verwendete UKP-Laser möglichst wenige Einschränkungen mit sich bringt.

Der auf der Laser World of Photonics 2013 in München vorgestellte PicoBlade spiegelt zehn Jahre Erfahrung in der Produktion und der Anwendung von UKP-Lasern in der Materialbearbeitung wider. Es wird weiterhin auf das bewährte MOPA-Konzept (das heißt lineare Verstärkung) gesetzt, was dem Laser die außergewöhnliche Vielfalt an Pulsformaten verleiht und gleichzeitig sowohl schnelle Wiederholraten mit moderaten Pulsenergien als auch

langsamere Raten mit hohen Energien ermöglicht. Die Systemarchitektur des PicoBlade ist zugeschnitten auf die spezifischen Bedürfnisse von Maschinenbauern und bietet unter anderem ein komplett trennbares Versorgungskabel zwischen Laserkopf und Kontrolleinheit sowie die Möglichkeit zum horizontalen und/oder vertikalen Einbau. Das robuste Unibody-Gehäuse verspricht eine reibungslose Integration in die Maschine und eine ausgezeichnete Langzeitstabilität aller optisch relevanten Parameter.

Fazit

Die maximale Wiederholrate des Lasers ist gleichzeitig die maximale Taktrate in den Produktionshallen. Wird bereits bei der Prozessentwicklung auf schnelle Wiederholraten verzichtet, werden mögliche und signifikante Effizienzsteigerungen von vornherein ausgeschlossen. Dies kann dazu führen, dass der Erfolg des hergestellten Produkts vermindert wird, oder sogar dazu, dass UKP-Laser gar nicht erst in die Produktion gelangen, weil der Prozess als nicht wirtschaftlich eingestuft wird. Die wirksamsten Mittel gegen einen solchen $\text{> Entwicklungs-Flop <}$ sind Kreativität und ein ausgezeichnetes technisches Verständnis der Entwickler sowie ein Laser, der durch seine Möglichkeiten innovative Prozesse fördert.

LITERATUR

1. B. Neuenschwander et al.: $\text{> Processing of industrially relevant non-metals with laser pulses in the range between 10 ps and 50 ps <}$, Proceedings ICALAO 2011, Paper M103 (2011)
2. Bayern Photonics Workshop: $\text{> Schnelle Strahlableitung für Laseranwendungen <}$, Nürnberg (D), April 2013
3. W. Hu, Y. C. Shin, G. King: $\text{> Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate <}$, Appl Phys A 98, 2010, S. 407–415

AUTOREN

Dr. HUBERT AMMANN ist $\text{> VP Product Manager Industrial Laser Systems <}$ bei Time-Bandwidth Products.

Dr. ANDREAS OEHLER ist $\text{> Head Application <}$ bei Time-Bandwidth Products in Schlieren/Zürich.

■ www.laser-photonik.de/LP110221