

Immer mehr Anwendungen für Hochleistungs-Diodenlaser

War der Laser schon eine der außergewöhnlichsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts, so ist unter seinen vielen Arten der Halbleiterlaser der eigentliche Star. Leistungen bis in den kW-Bereich und gegenüber früher sehr viel schärfere Fokussierbarkeit eröffnen jetzt immer mehr Einsatzmöglichkeiten, vor allem in der Materialbearbeitung.

Seitdem im Jahre 1962 der allererste Gallium-Arsenid-Kristall kohärentes Licht ausstrahlte, haben ganze Generationen von Halbleiterlasern einander abgelöst – mit immer komplexeren Strukturen und immer besseren Eigenschaften. Massen Anwendungen in optischer Nachrichtenübertragung und CD-/DVD-Laufwerken ließen die Preise in den Keller fallen; damit finden sich immer neue Einsatzfelder, die vorher entweder überhaupt nicht denkbar oder aber anderen Laserarten vorbehalten waren. Die technologischen Fortschritte zeigen sich in ständig steigenden Leistungen, verbesserter Strahlqualität und vor allem längerer Lebensdauer. Hier ist eine Schlüsseltechnologie entstanden, entsprechend viele Firmen sind weltweit auf diesem Gebiet tätig. Zahllose verschiedene Bautypen haben sich herausgebildet, meist optimiert auf spezielle Anwendungen. Die Innovationen kommen Schlag auf Schlag, die deutsche Forschung und Industrie kann dabei im internationalen Wettbewerb gut mithalten. Hier sind einige Entwicklungen der letzten Zeit zusammengestellt.

Der Weltmarkt kam 2003 auf rund 3 Mrd. \$, die Zuwachsrate liegt bei etwa 10 % jährlich. Wegen des rapiden Preisverfalls steigen die Stückzahlen noch schneller, in diesem Jahr dürften es etwa 500 Mio. werden. Die weitaus größten Umsätze (knapp zwei Drittel) werden im Bereich der CD-/DVD-Laufwerke gemacht, an zweiter Stelle (knapp ein Drittel) steht die optische Nachrichtentechnik. Der Rest verteilt sich auf viele kleinere Anwendungen, darunter Pumplaser, Materialbearbeitung, Medizin, Kassen-Scanner, Sensorik und vieles mehr.

In der Anfangszeit blieben die Ausgangsleistungen im Milliwattbereich. Noch relativ jung sind die Hochleistungstypen, ihr Aufschwung verlief dafür um so schneller. Schon Einzeldioden geben heute bis zu einigen zig Watt an Lichtleistung ab; Stapel kommen auf Gesamtleistungen bis zu einigen kW, die früher nur aus klobigen, energiehungrigen Großlasern zu erhalten waren. Damit können Diodenlaser in vielen Fällen an deren Stelle treten. Ihre Überlegenheit zeigt sich in den sehr viel kleineren Abmessungen, im geringeren Gewicht, im Betrieb mit Niederspannung und im sehr viel höheren elektrisch/optischen Umwandlungs-Wirkungsgrad – oft über 60 %.

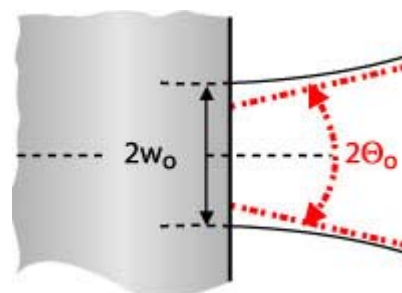


Bild 1. Definition des Strahl-Parameter-Produkts: $SPP = w_0 \times \theta_0$.
(Quelle: Rofin)

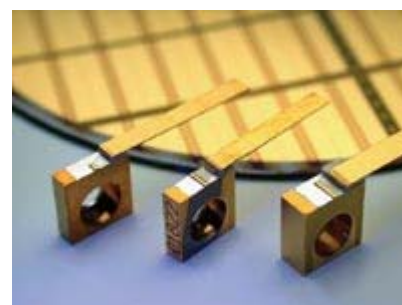


Bild 2. Drei verschiedene



Vielschichtige Strukturen

Aus den anfänglichen einfachen PN-Dioden, eingeschlossen in einen optischen Resonator, sind nach mehr als 40 Jahren Entwicklungszeit überaus komplexe Bauelemente geworden, bestehend aus einer Vielzahl von Schichten mit unterschiedlicher Dotierung und Halbleiterzusammensetzung. Das Spektrum der verschiedenen Varianten ist nur noch schwer zu überblicken. Die Bauform der Hochleistungstypen ist immer ein Kantenemitter, bei dem der Strahl an der Seite austritt. Die vertikal emittierenden VCSELS erreichen bisher keine hohen Leistungen.

Der aktive (lichterzeugende) Streifen ist als Rippen-Wellenleiter („ridge“) ausgeführt – typisch etwa 0,5 bis 1 μm hoch. Bei den Versionen für niedrige Leistung ist er nur wenige μm breit; damit ist der abgegebene Strahl einmodig und hat eine sehr hohe Strahlqualität – in dem Sinne, dass der Intensitätsverlauf in horizontaler und vertikaler Richtung annähernd eine Gauss-förmige Verteilung hat. Dies erlaubt eine scharfe Bündelung. Die Ausgangsleistung hängt vom gepumpten Volumen und von der Facettenbelastbarkeit ab; damit bleibt sie bei Streifenbreiten von wenigen μm im mW-Bereich.

Um auf höhere Leistungen zu kommen, macht man den aktiven Streifen breiter – bis etwa 300 μm . Dabei wird allerdings die Qualität des Strahls deutlich schlechter. Er bekommt dann einen ovalen Querschnitt: In vertikaler Richtung („schnelle Achse“) ist er stark divergent, der Öffnungswinkel – gemessen bis zur halben Intensität – ist typisch einige zig Grad. In dieser Richtung ist er aber nach wie vor einmodig, so dass er sich mit geeigneten Mikrolinsen gut bündeln lässt. In horizontaler Richtung („langsame Achse“) ist er weniger divergent (Öffnungswinkel typisch einige Grad), dafür bilden sich jedoch sehr viele Schwingungsmoden aus. Die Intensitätsverteilung ist nicht mehr Gauss-förmig, sondern der Querschnitt des Strahls zeigt starke Intensitätsschwankungen und -spitzen („Filamente“). Hier ist eine gute Bündelung prinzipiell nicht möglich; so bleibt die erreichbare Leistungsdichte weit unterhalb der Werte, die konventionelle Großlaser bieten können. Das übliche Maß für die Strahlqualität ist das „Strahl-Parameter-Produkt“ (SPP), definiert als $w_0 \times \theta_0$ (Bild 1), gemessen in mm x mrad. Je kleiner dieser Wert, desto schärfer lässt sich der Strahl fokussieren.

Derartige Diodenlaser sind heute Standardbauelemente, die von zahllosen Herstellern in Europa, Nordamerika und Fernost in großen Stückzahlen produziert werden. In Bild 2 sind einige

Breitstreifen-Diodenlaser, montiert auf passiven Wärmesenken. (Foto: Fraunhofer-IAF)

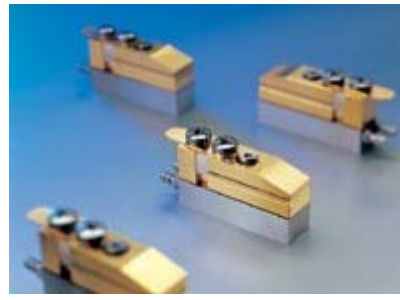


Bild 3. Industrielle Ausführungen von Diodenlaser-Barren mit einigen zig Watt optischer Leistung. (Foto: JOLD)

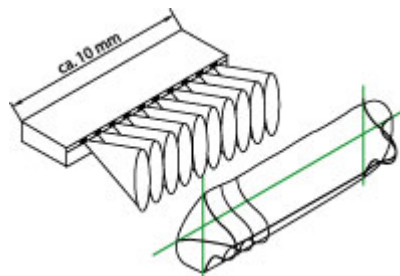


Bild 4. In dieser Form kommen die Strahlen aus einem Barren. Mit Mikrolinsen lassen sie sich besser bündeln als bei einem Breitstreifenlaser. (Quelle: Myos Lasertechnology)

Entwicklungen des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik in Freiburg (IAF) gezeigt. Viele Ausführungen sind vorzugsweise für Dauerbetrieb ausgelegt, andere mehr für Pulsbetrieb. Die typischen Ausgangs-Aperturen liegen zwischen 100 und 200 μm , die Resonatorlängen bei 1 bis 2 mm, die Ausgangsleistungen bei einigen Watt.

Einige deutsche Firmen, die sich auf diesem Gebiet etabliert haben, sind z.B. Jenoptik Laserdiode GmbH in Jena (JOLD), DILAS in Mainz (Tochter von Rofin), Osram Opto Semiconductor in Regensburg, M2K in Freiburg, Laserline in Mülheim-Kärlich und mehrere weitere. Zu den führenden Forschungsstätten zählen die Fraunhofer-Institute für Angewandte Festkörperphysik in Freiburg (IAF) und für Lasertechnik in Aachen (ILT) sowie das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik in Berlin.

Die weitaus größte Auswahl an Hochleistungs-Diodenlasern besteht im Wellenlängenbereich von etwa 800 bis 1080 nm. Deren genauer Wert lässt sich über den Indium-Gehalt im InGaAs einstellen. Dünn gesät waren bisher solche mit Leistungen im Watt-Bereich bei größeren Wellenlängen. Auf diesem neuen Gebiet kann das IAF jetzt Erfolge vorweisen. Basis-Halbleiter ist Gallium-Antimonid (GaSb). Die damit aufgebauten Breitstreifenlaser sind 1 mm lang und 150 μm breit, sie geben bei 2 bis 3 μm Wellenlänge Dauerleistungen bis 1,7 W und Pulsleistungen bis 9 W ab und haben bisher eine Lebensdauer von 16 000 h erreicht. Anwendungen liegen in den Bereichen Spurengas-Analytik, Prozesskontrolle, Umwelt-Analytik, medizinische Diagnostik und Therapie.

Bessere Strahlqualität aus Barren

Um auch bei hohen optischen Leistungen eine gute Strahlqualität zu erzielen, setzt man viele schmale Streifen nebeneinander. Ein solcher „Barren“ ist ein monolithischer Kristall, typisch etwa 10 mm breit, mit einigen zehn bis einigen tausend optisch getrennten Einzellasern. Deren Strahlen werden extern vereinigt, wobei die Phasenlage erfahrungsgemäß keine Probleme bereitet. Die erzielten Leistungen reichen bis zu einigen zig Watt; *Bild 3* zeigt eine konkrete Ausführung. In *Bild 4* ist die Form der austretenden Strahlen verdeutlicht. Der Labor-Leistungsrekord aus einem 1-cm-Barren steht bei 267 W (IAF).

Noch sehr viel höhere Leistungen bis in den kW-Bereich erzielt man durch Übereinanderstapeln mehrerer solcher Barren zu einem „Stack“. *Bild 5* zeigt das Prinzip, *Bild 6* ein industrielles Produkt.

Forschungspreis für Trapezlaser

Ein ganz neuer, vielversprechender Weg zur

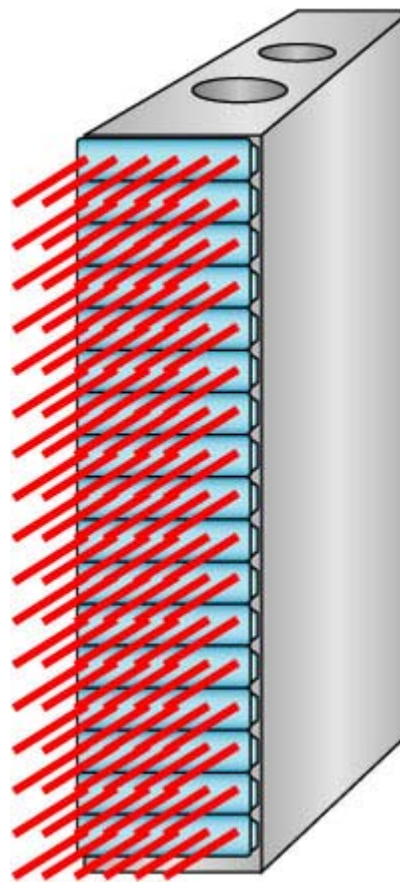


Bild 5. Prinzip eines Stacks aus mehreren aufeinander gestapelten Barren. (Quelle: Rofin)



Bild 6. Stack aus mehreren Hochleistungs-Diodenlaser-Barren, Ausgangsleistung einige kW. (Foto: JOLD)

Verbesserung der Strahlqualität ist der am IAF entwickelte Trapezlaser. Es handelt sich genau genommen um zwei optoelektronische Bauelemente, die zusammen auf einem Chip integriert sind. Das eine ist ein einmodiger Kleinleistungs-Diodenlaser, der als Strahlquelle dient. Das andere ist ein optischer Verstärker („Laser“ bedeutet ja „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“). Dessen aktiver Bereich beginnt schmal (3 μm) und verbreitert sich auf einer Länge von 2 mm bis auf 200 μm (Bild 7). Einzelausführungen erreichen Leistungen bis 5 W, damit aufgebaute Barren noch weit mehr. Die dabei erzielte Strahlqualität ist so gut wie die der einmodigen Quelle. Durch die schärfere Bündelbarkeit erreicht die Leistungsdichte den 25-fachen Wert von herkömmlichen Breitstreifen-Diodenlasern gleicher Ausgangsleistung. Auch die Einkoppelbarkeit des Strahls in eine Faser ist sehr viel besser. Diese hervorragenden Eigenschaften eröffnen dem Trapezlaser ein breites Spektrum neuer Anwendungen. Schon mehrere Firmen haben mit der Herstellung begonnen: M2K Laser GmbH in Freiburg – eine Ausgründung aus dem IAF, ferner DILAS – auch in Form von Barren mit vielen Einzellasern.

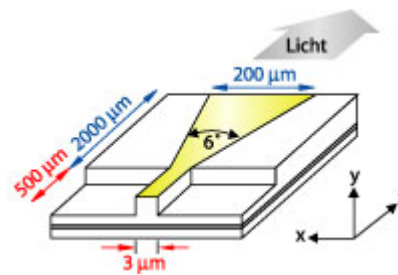


Bild 7. Prinzip des Trapezlasers: kleine Strahlungsquelle plus optischer Verstärker. (Quelle: Fraunhofer-IAF)

Der Trapezlaser wurde 2002 mit dem Landesforschungspreis für angewandte Forschung des Landes Baden-Württemberg ausgezeichnet. Entwicklungsleiter Marc Kelemen vom IAF erläutert, was das eigentlich Revolutionäre ist: „Er verbindet die starke Strahlleistung von Hochleistungs-Diodenlasern aus der Materialbearbeitung mit der genauen Fokussierbarkeit von Milliwatt-Diodenlasern aus der Computer- und Kommunikationstechnik.“ Dennoch ist er kostengünstig herzustellen, wartungsfrei und langlebig.

Herausforderung Wärmeableitung

Bemerkenswert hoch ist heute der elektrisch/optische Umwandlungs-Wirkungsgrad: Mit häufig über 60 % sind Diodenlaser die effizientesten Lichtquellen überhaupt. Dennoch ist bei hohen optischen Ausgangsleistungen eine erhebliche Verlustwärme abzuleiten, damit der Kristall nicht durch Überhitzung zerstört wird. Zwei Kühlmethoden stehen zur Auswahl: passive und aktive. Erstere verwenden als Wärmesenke einen massiven Kupferblock und erreichen minimale thermische Widerstände von etwa 0,7 K/W. Die Obergrenze der damit abführbaren Verlustleistung liegt bei etwa 50 W.

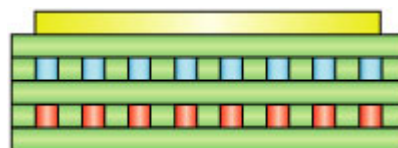
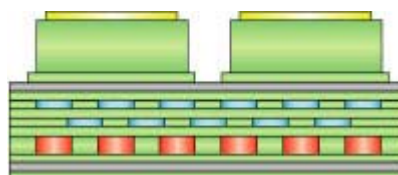


Bild 8. Mikrokanal-Wärmesenke im Querschnitt (blau = Kaltwasserzufluss, rot = Warmwasserabfluss, gelb = Laser-Chip). (Quelle: JOLD)

Aktive Kühler enthalten Mikrokanäle, durch die eine Kühlflüssigkeit gepumpt wird – meist deionisiertes, d.h. nicht leitfähiges Wasser. Durch die große innere Oberfläche ist die Kühlwirkung weitaus stärker. Hergestellt werden sie aus einer Vielzahl von Kupferlagen mit eingätzteten Strukturen (Bild 8). Wesentliche Innovationen auf dem Gebiet der Mikrokanal-Wärmesenken (MKWS) stammen vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen (ILT) und von JOLD. Der thermische Widerstand konnte damit bis auf 0,29 K/W abgesenkt werden.

Lebensdauer wesentlich verlängert

Probleme bereitete lange Zeit die immer noch unzureichende Lebensdauer. Deren Ende ist als die Betriebszeit bei 20 °C definiert, zu der die optische Ausgangsleistung um 20 % gegenüber dem Ausgangswert abgefallen ist. (Aus messtechnischen Gründen führt man eine beschleunigte Alterung bei



50 °C durch und extrapoliert dann.) Bis vor wenigen Jahren lag sie meist in der Größenordnung von 10 000 Stunden; seitdem man die Degradationsvorgänge besser verstanden und einige bahnbrechende technologische Neuerungen eingeführt hat, konnte man sie deutlich verlängern. Wichtige Arbeiten auf diesem Gebiet wurden z.B. bei JOLD geleistet. Die Verbesserungen bei den Halbleitermaterialien haben dann zu der überraschenden Situation geführt, dass nicht mehr dies der Lebensdauer-bestimmende Faktor ist, sondern die Mikrokanal-Wärmesenke, die häufig eher ihren Geist aufgibt als der Chip selbst – typisch nach etwa 15 000 Stunden. Die Ursache sind Erosions- und Korrosionsvorgänge, verursacht durch Kühlwasser und Stromfluss. Da der Halbleiterbarren mit der Anode direkt auf der Wärmesenke aufgelötet ist, liegt an dieser ein elektrisches Potential von ca. 2 V an. Bei Verwendung von Leitungswasser würden mehrere Wärmesenken über dessen Leitfähigkeit kurzgeschlossen. Deionisiertes Wasser verhält sich aber zu einer Reihe von Materialien sehr aggressiv. Zusätzlich führen die hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu einer mechanischen Erosion in den Mikrokanälen; sie werden mit der Zeit ausgewaschen, wodurch sich die Effizienz der Wärmeableitung verschlechtert.

Bild 9. Prinzip des horizontalen Stacks (blau = Kaltwasserzufluss, rot = Warmwasserabfluss, gelb = Laser-Chips). (Quelle: JOLD)



Bild 10. Konkrete Ausführung eines horizontalen Stacks nach Bild 9. (Foto: JOLD)

Eine neue Konstruktion von JOLD mit „horizontalem Stack“ kombiniert die Vorteile und vermeidet die Nachteile von beiden, dadurch hält sie deutlich länger. Die Barren (in *Bild 9* gelb) sind auf einer passiven Wärmesenke montiert. Die elektrischen Anschlüsse sind durch eine keramische Schicht (grau) vom Wasserkreislauf isoliert (blau = Kaltwasserzulauf, rot = Warmwasserrücklauf). Dadurch können keine elektrochemischen Reaktionen mehr ablaufen. Für die Kühlung ist normales Brauchwasser zulässig, durch den Zusatz von Korrosions- und Frostschutzmitteln wird ein problemloser Betrieb über viele 10 000 Betriebsstunden erreicht. Durch Vergrößerung der Kanäle reduzieren sich die Strömungsgeschwindigkeiten, so dass die Erosion keine Probleme mehr bereitet. *Bild 10* zeigt die praktische Realisierung eines solchen horizontalen Stacks.

Wachsende Zahl von Anwendungen

Die schnell gestiegenen Leistungen, die immer weiter verbesserte Strahlqualität und die gesunkenen Preise haben das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten in den letzten Jahren schnell wachsen lassen:

- Materialbearbeitung ist der mit Abstand wichtigste Bereich – Schneiden, Schweißen, Löten, Bohren, Härten, Beschriften und vieles mehr. Hier kommen immer wieder neue Technologien auf, sie werden auf einschlägigen Fachsymposien präsentiert, die zum Teil hunderte von Teilnehmern verzeichnen – etwa beim Bayerischen Laserzentrum in Erlangen und bei den Fraunhofer-Instituten für Lasertechnik in Aachen (ILT) und für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden (IWS). Die *Bilder 11 bis 13* zeigen einige Beispiele aus der Praxis. Um die Entwicklung auf diesem zukunftssträchtigen Gebiet zu beschleunigen und die internationale Konkurrenzfähigkeit der deutschen Industrie zu verbessern, hat das



Bild 11. Schweißen eines NiCr-Stahlbehälters mit Hilfe eines 2,5-kW-Diodenlasers. (Foto: Fraunhofer-IWS)

BMBF im Zeitraum von Juli 1998 bis Dezember 2003 das Projekt „MDS – Modulare Diodenlaser-Strahlwerkzeuge“ gefördert. Ziel war es, die spezifischen Eigenschaften von Diodenlasern dahingehend weiterzuentwickeln, dass sie optimal in industriellen Bearbeitungsprozessen eingesetzt werden können. An dem Projekt waren zahlreiche Laserhersteller, Laseranwender und F&E-Einrichtungen beteiligt, die Koordination lag bei der Rofin Sinar GmbH, Hamburg, und beim Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen (ILT).



Bild 12. Härten einer Greiferkurve mit einem Hochleistungs-Diodenlaser. (Foto: Fraunhofer-IWS)

- Optisches Pumpen von Festkörperlasern (Neodym-YAG und ähnlichen). Bisher dienen dazu optisch breitbandige Gasentladungsröhren – mit schlechtem Wirkungsgrad und enormer Abwärme. „Diode Pumped Solid State“-Laser (DPSS) – in Stab-, Scheiben- oder Faserform – haben viele Vorteile: Indem zum Pumpen nur genau die benötigte Wellenlänge von 808 nm erzeugt wird und keine anderen nutzlosen, steigt der System-Wirkungsgrad auf das Dreifache. Die Strahlqualität ist weit besser als bei den Diodenlasern selbst. So lässt sich – bei Ausgangsleistungen bis in den kW-Bereich – eine sehr viel höhere Leistungsdichte erreichen, was die Möglichkeiten bei der Materialbearbeitung erweitert. Durch den verringerten Energieverbrauch und durch die (laut Fa. Lambda Physik) rund 20-mal längeren Wartungsintervalle lassen sich die Betriebskosten deutlich senken.
- Direktes Laserformen – ein Verfahren, mit dem metallische Körper direkt aus 3D-CAD-Daten aufgebaut werden können. Beim „Selective Laser Melting“ (SLM) wird zunächst eine Lage Pulver auf ein Substrat geschichtet, die anschließend durch Abscannen mit Laserstrahlung lokal aufgeschmolzen wird [7]. Damit lassen sich nahezu beliebige dreidimensionale Strukturen herstellen. Das Verfahren steht an der Schwelle zur industriellen Praxis. Potentielle Anwendungsfelder sind insbesondere im Ultra-Leichtbau und der Medizintechnik (Implantate) zu finden.
- Laserprojektion: Das schon vielfach vorgeführte, ursprünglich von Schneider/LDT entwickelte System wurde von Jenoptik übernommen und weiterentwickelt. Die bisherigen Prototypen verwenden noch Festkörperlaser – teuer und unhandlich, auf dem Weg zur Marktreife ein Hindernis. Dazu ist ein Übergang auf Diodenlaser nötig. Aber deren Leistung reicht bisher nicht aus, allenfalls bei Rot. Blaue sind nur mit viel zu geringer Leistung verfügbar, grüne gibt es – wenn überhaupt – nur in einigen Forschungslabors. So geht man vorläufig den Umweg über die Frequenzvervielfachung in optisch-nichtlinearen Kristallen. So lassen sich beispielsweise aus einer Ausgangs-Wellenlänge von 1064 nm (Nd:YAG) die Wellenlängen 532 nm und 355 nm erzeugen. Diodenlaser, die direkt in diesen Bereichen mit hoher Leistung strahlen, wären aber eine wesentliche Verbesserung.
- Weitere Anwendungen finden sich in der Medizin (Laserchirurgie, Augenheilkunde, Tumorbehandlung), in Spektroskopie, Analytik und sonstiger Messtechnik.



Bild 13. Mit einem Hochleistungs-Diodenlaser ohne Zusatzwerkstoff hergestellte Schweißnaht an einen Stahlgehäuse. (Foto: Fraunhofer-IWS)

Beste Aussichten

„Die langfristigen Wachstumsperspektiven des Lasermarktes sind ausgezeichnet“, kommentierte Arnold Mayer vom Marktforschungsunternehmen Optech Consulting

AG auf dem „Laser-Business-Tag“ im April 2004 in Aachen. Der Weltmarkt für Lasersysteme zur Materialbearbeitung erreichte im Jahre 2003 ein Volumen von 3,65 Milliarden Euro. Bei gegebenen positiven weltwirtschaftlichen Rahmenbedingungen kann laut Mayer im Jahre 2010 die 10-Mrd.-Euro-Grenze erreicht und überschritten werden. Dies entspräche einer durchschnittlichen jährlichen Zuwachsrate von 13 % für den Zeitraum 2004 bis 2010.

Obwohl die Barrieren des stark technologisch getriebenen Marktes hoch sind, riskiert Jahr für Jahr eine Vielzahl von Start-up-Unternehmen den Einstieg. Um ein vorzeitiges Ausscheiden aus dem Wettbewerb zu vermeiden, kommen sie dabei um eine solide Finanzierung und sorgfältige Planung in der Start- und Wachstumsphase nicht herum.

Norbert Thiel von Jenoptik äußerte auf dem Aachener Kolloquium für Lasertechnik (AKL) im April 2004 in seinem Vortrag „Herausforderungen und Chancen der deutschen optischen Industrie im internationalen Wettbewerb“ sowohl Lob als auch Kritik für den Standort Deutschland: „Deutschland besitzt eine gute Infrastruktur und leistungsstarke Anbieter für optische Technologien, aber die klein- und mittelständischen Unternehmen wachsen zu langsam und die Global Player investieren zu wenig.“ Er empfiehlt gegen die Standortschwächen den Ausbau von Netzwerken zwischen Systemanbietern, Zulieferern und Anwendern: „Das notwendige Wechselspiel zwischen Market Pull und Technology Push muss beherrscht werden, auch über Firmengrenzen hinweg. Oft mussten gerade deutsche Firmen schmerzhaft erfahren, dass Technologieführerschaft nicht automatisch Marktführerschaft bedeutet.“

Literatur

- [1] Laser-Seminar 11. 2. 2004. Bayerisches Laserzentrum Erlangen, www.blz.org
- [2] 4. Workshop „Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern“. Fraunhofer-IWS Dresden, www.iws.fraunhofer.de
- [3] Tagungsband Aachener Kolloquium für Lasertechnik, April 2004. Fraunhofer-ILT Aachen, www.ilt.fraunhofer.de
- [4] Informationen vom Fraunhofer-IAF Freiburg, www.iaf-fraunhofer.de
- [5] Lemme, H.: 1 kW aus der Streichholzsachtel. *Elektronik* 1997, H. 15, S. 58.
- [6] Lemme, H.: Mehr Licht! *Elektronik* 2003, H. 13, S. 72.
- [7] Lemme, H.: Keine Kompromisse beim Werkstoff. *Elektronik* 2003, H. 18, S. 40.

Ferner Unterlagen von folgenden Firmen:

- Jenoptik Laserdiode GmbH, <http://www.jold.de>
- DILAS, <http://www.dilas.de>
- ROFIN, <http://www.rofin.de>
- Osram Opto Semiconductor, <http://www.osram-os.com>
- Laserline, <http://www.laserline.de>

Helmut Lemme, *Elektronik* 24/2004