

# Effiziente Antwort

Hochleistungs-Diodenbarren (HPDLs) mit Ausgangsleistung bis zu einigen hundert Watt und höchster Effizienz sind jetzt kommerziell erhältlich

Es ist hinreichend bekannt, dass Hochleistungs-Diodenlaser kompakt, portabel und äußerst zuverlässig sind. Neueste Entwicklungen, die zum Beispiel aus den Erkenntnissen des SHEDS-Programms (Super High Efficient Diode Sources) hervorgegangen sind – und weiter voran getrieben werden – steigern die Ausgangsleistung, die Effizienz und die elektrisch zu optische Leistungskonversion (>50 %). Deshalb werden sie für eine große Anzahl von anspruchsvollen industriellen Anwendungen in zunehmender Weise immer attraktiver. Heute beträgt die im Labor nachgewiesene Effizienz bei HPDLs >70%. Das Ziel des SHEDS-Programms ist die Steigerung der Effizienz auf 80% bis zum September 2006. Dieses Ziel ist definitiv erreichbar und wird mit der kommerziellen Umsetzung der neuen Technologie einen Meilenstein bei der Fertigung von HPDLs darstellen.

**Hauptaugenmerk** dieses Artikels sind Diodenlaserbarren, die aus kantenemittierenden Breitstreifenchips gefertigt werden. Sie liefern Ausgangsleistungen, sowohl im Dauerstrich (CW) als auch im Quasi-Dauerstrich (QCW). Ziel ist es, Interessenten und Anwendern von HPDLs mit dem Grundverständnis für die technischen Aspekte, sowie den entsprechenden Rahmenbedingungen bei der Spezifizierung und Auswahl der Barren auszustatten.

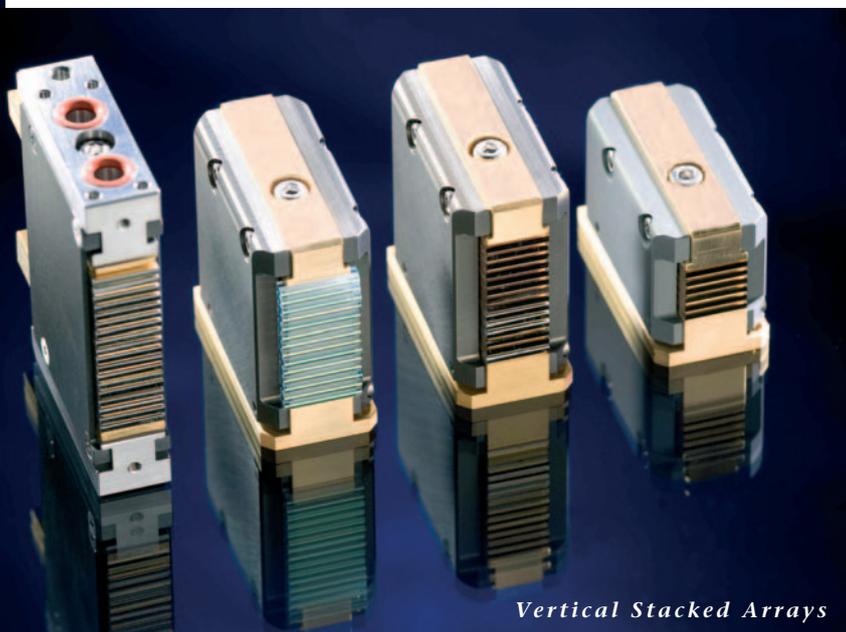
## Erläuterung der Grundlagen

HPDLs sind für drei wesentliche Betriebsarten konstruiert: Klassisches CW, Quasi-CW, dem Pulsbetrieb – oder zur Erzeugung von hohen Spitzenleistung. Ihre typischen Betriebscharaktere sind in der Tabelle dargestellt. HPDLs können als Single-Emitter (SE), 1D-Diodenlaser-Reihe (Array's), oder 2D-Stapel (Stack's) konstruiert werden.

Ein HPDL-Barren besteht aus einem dünnen Halbleiter-Material mit einer Vielzahl von Breitstreifen-Emittern. Diese sind in einer Linie angeordnet und durch ein schmales Band unterbrochen. Typische Maße eines solchen Barrens sind 140 µm Höhe, 1 mm Tiefe und 10 mm Breite. Er enthält zwischen 10 und 60 Emitters, die sehr präzise entlang des Barrens angeordnet sind.

Im Einzelemitter wird das Laserlicht innerhalb einer schmalen (<1 µm Höhe und 150 µm Breite) aktiven Region – dem sogenannten Diodenübergang – erzeugt. Es verlässt das Halbleitermaterial an der Kante jedes einzelnen Lasers. Das Ergebnis ist eine Reihe von schmalen, parallelen Lichtbündeln – den sogenannten „Beamlets“ – die vom Barren weg abstrahlen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Barrenentwicklung ist der Füllfaktor. Er beschreibt den prozentualen Anteil des mit vielen Emittern besetzten Barrens. Man berechnet ihn, indem man die Breite eines Emitters durch den Zentrums-Abstand zwischen den Emittern teilt. Ein typischer Barren mit 19 Emittern hat je



*Vertical Stacked Arrays*

Emitter 150  $\mu\text{m}$  Breite und einen Zentrums-Abstand von 500  $\mu\text{m}$ . Damit ergibt sich ein Füllfaktor von 30 %. Kommerziell verfügbare, konvektionsgekühlte Barren mit 30 % Füllfaktor und 1 mm langer Kavität erreichen bis zu 40 W CW-Ausgangsleistung. Wassergekühlte Versionen mit 80 % Füllfaktor hingegen liefern bis zu 100 W CW.

Werden Laserleistungen von mehr als 100 W benötigt, so können die Barren in 2D-Anordnungen gestapelt werden. Unter dem Barren-Pitch versteht man den zentralen Abstand zwischen den Barren, entlang des horizontalen Abstands oder der vertikalen Stapelrichtung. Solche 2D-Arrays sind in der Lage, eine sehr hohe CW-Leistung aus äußerst kompakten Dimensionen bereitzustellen. Ein vertikaler 2D-Stapel aus 10 Barren und einem Pitch von 1,8 mm kann eine Emissionsfläche von 16,2 x 10 mm aufweisen. Wenn jeder Barren aus 64 Emittern von jeweils 100 W besteht, ergibt sich eine Gesamtleistung von 1 KW im Dauerstrichbetrieb.

### Strahleigenschaften

Um die Strahleigenschaften eines Laserbarrens zu verstehen, muss man sich vorstellen, dass sich der Laserstrahl in Richtung der z-Achse ausbreitet. Die Höhe der aktiven Region befindet sich entlang der y-Achse (senkrecht zum Laserbarren) und die Breite entlang der x-Achse. Aufgrund der asymmetrischen Form der aktiven Emitterregion (typisch 1  $\mu\text{m}$  Höhe x 150  $\mu\text{m}$  Breite) – ist der Ausgangsstrahl eines Barrens sowohl elliptisch als auch astigmatisch. Die Strahltaile entsteht also an unterschiedlichen Stellen in der x- und y-Achse.

In transversaler Richtung (z-Achse) verlässt das Licht den schmalen Wellenleiter nahezu beugungsbegrenzt unter hoher Divergenz (schnell divergierende Achse = „fast-axis“). Die Halbwertsbreite des Vollwinkels beträgt bis zu 30–40 Grad („full-angle at half-maximum power points“ = FWHM). Deshalb spricht man oft von einer „Fast-Axis“-Strahldivergenz. Das Intensitätsprofil des Fast-Axis-Nahfeldes ist annähernd gaussförmig.

Im Gegensatz hierzu treten in lateraler Richtung (x-Achse), die Modenprofile der einzelnen Emitterstreifen auf, die nur langsam divergieren (langsam divergierende Achse = slow axis) und ist hoch-gradig Multimode (annähernd diffus). Dies bedeutet, dass sie viele transversale Moden mit einer kleineren Strahldivergenz von ca. 10 Grad FWHM auf-

weist. Die Divergenz ist reduziert, weil die Breite der aktiven Region viel größer ist, als deren Höhe. Man spricht hierbei oft von einer „Slow-Axis“-Strahldivergenz.

### Wie spezifiziert man HPDLs?

**Wellenlänge:** Eine der ersten Fragen, die bei der Kaufentscheidung einer HPDL zu berücksichtigen sind, betrifft die Betriebswellenlänge. Kommerziell sind Dioden im Bereich von 635–1600 nm erhältlich, allerdings durchzogen von einigen Lücken. Halbleitermaterialien sind: AlGaInP/GaAs (635-700 nm), AlInGaAsP/GaAs (780-1000 nm) und InGaAsP/InP (1250-1700 nm).

Ebenso wichtig ist es allerdings, nicht nur die gewünschte Zentralwellenlänge, sondern auch den Akzeptanzbereich (Toleranz) zu spezifizieren. Dies beeinflusst den Preis entscheidend. Als Daumenregel gilt: Je größer die Toleranz der Zentralwellenlänge, desto niedriger der Preis des HPDL, da die Ausbeute bei der Produktion größer ist. Als Standard-Toleranz gilt:

$\pm 3$  nm für 800-nm-Dioden-Laser,

$\pm 5$  nm für 900-980-nm-Laser und rote Diodenlaser,

$\pm 10$  nm für 1400 nm oder Diodenlaser mit größerer Wellenlänge.

Falls die Emissionsbandbreite wichtig ist, wird man die Halbwertsbreite des Ausgangsstrahles spezifizieren, FWHM. Darunter versteht man die spektrale Breite des Lasers – gemessen in Nanometer – bei 50 % des Spitzenwertes. Alternativ kann man auch die volle Breite bei 10 % des Spitzenwertes oder den  $1/e^2$ -Punkt spezifizieren – dieser entspricht der vollen Breite bei 13,4 % des Spitzenwertes.

Hochleistungs-Barren bei 6xx, 8xx, und 9xx nm besitzen normalerweise spektrale Breiten von 2-3 nm FWHM, während sie bei 14xx nm und längere Wellenlängen wesentlich breiter sind, manchmal bis zu einem Faktor 5-8.

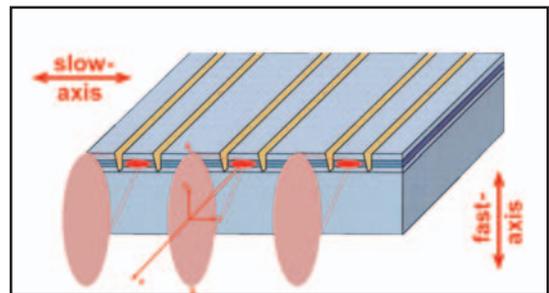
**Lebensdauer:** Ein weiterer, wichtiger Faktor ist die Lebensdauer von Laserdioden. Sie ist ebenfalls ein Ausdruck der Zuverlässigkeit und beschreibt, wie lange eine typische Laserdiode betrieben werden kann, bevor sie ausfällt.

Neueste Fertigungsverfahren stellen jetzt höchste Qualität sicher. Aus diesem Grund geben die meisten Lieferanten über 10.000 Stunden Lebensdauer an. Allerdings ist es von entscheidender Bedeutung, dass diese Lebensdauerdaten nur eingehalten werden können, wenn bestimmte Rahmendaten und Betriebsbedingungen sichergestellt, bzw. eingehalten werden, beispielsweise den speziellen Betriebsstrom, die angegebene Betriebstemperatur sowie die angegebene optische Ausgangsleistung. Die Größe der Abweichung von diesen spezifizierten Daten ist verantwortlich für die entsprechend reduzierte Lebensdauer. Als Daumenregel gilt: die Diodenlebensdauer halbiert sich für jeweils 10 °C Erhöhung der Gehäusetemperatur über Raumtemperatur. Umgekehrt erhöht sich die Lebensdauer bei reduziertem Betriebsstrom, niedrigerer Ausgangsleistung und bei geringerer Betriebstemperatur der Diode.

**Ausgangsleistung:** Grundsätzlich erhöht sich die Ausgangsleistung linear mit der konstruktiven Verbreiterung des Emitters. Für Halbleitermaterial, welches Laserlicht bei 800 und 900 nm erzeugt, liegt die typische Facettendichte der optischen Ausgangsleistung bei 20–30 mW/ $\mu\text{m}$ . Rote Diodenlaser erreichen ca. 5 mW/ $\mu\text{m}$  und Laser mit

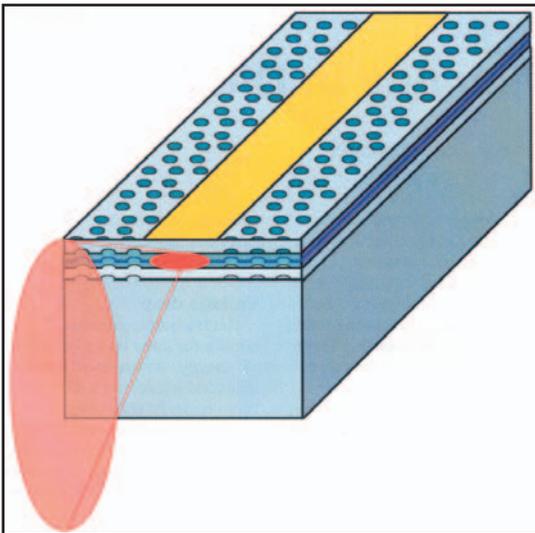
## Operational characteristics

Mode of operation	CW	Quasi-CW	Pulsed
Pulse width	n/a	hundreds of $\mu\text{s}$	hundreds of ns
Duty cycle	100%	less than 5%	1 kHz
Rated output power from a conduction-cooled package	50 W	100 W peak power/bar	30–50W peak-power device

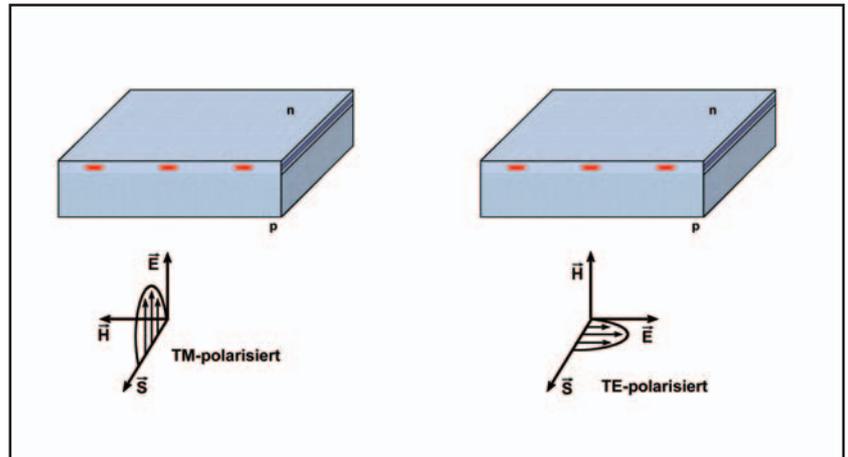


Mode of Operation: Typische Betriebscharakteristika

Single-Emitter



Strahlaustritt und Divergenz FA und SA



Polarisation TM und TE

1400 nm oder länger liegen bei 10–15 mW/ $\mu\text{m}$ . Eine Verlängerung der Kavität erhöht die Ausgangsleistung. Die typische Länge des Resonators liegt im Bereich von 0,6–1 mm. Ausnahmen sind 1,5 mm Länge.

**Polarisation:** Ein beim Kauf oft unbeachteter Parameter ist die Polarisation des Laserlichtes. Sie kann TE oder TM sein. Bei TE-polarisiertem Licht (Transversal-Elektrisch) schwingt der E-Vektor des elektromagnetischen Feldes in der Wellenleiterebene. Bei TM-polarisiertem Licht steht er senkrecht zur Wellenleiterebene in pn-Übergangsrichtung.

**Einbau und Kühlung:** Konvektionsgekühlte Diodenlaserbarren werden üblicherweise auf eine offene Wärmesenke montiert. Diese kann dann wiederum in ein gekapseltes Gehäuse integriert werden, um sie vor unsachgemäßer Handhabung zu schützen. Abhängig vom Integrationsfaktor und der Komplexität des Designs, können entsprechende Gehäuseformen z.B. TECs zur Kühlung und Thermistoren zur Überwachung der Betriebsdaten enthalten. Aktiv wassergekühlte Barren – auf sogenannte Mikro-

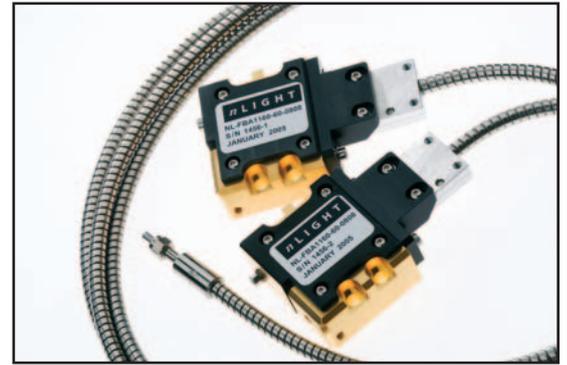
kanalkühler montiert – können ebenfalls in einem solchen Gehäuse untergebracht sein.

Diodenbarren mit niedriger Ausgangsleistung werden mittels sogenannten „CS-Mounts“ oder ähnlichen Montagehalterungen konvektionsgekühlt. Bei der CS-Halterung handelt es sich um einen bekannten Industriestandard. Ein einzelner Barren (1 cm x 1 mm) wird hier auf die Anode der Wärmesenke aufgelötet. Typische Maße einer CS-Halterung sind 2,54 x 2,54 x 0,635 cm (LxBxH).

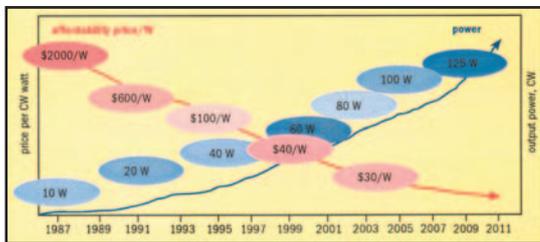
Werden Hochleistungsbarren mit mehr als 50 W Dauerstrich benötigt, wird Wasserkühlung erforderlich, um so die anfallende Verlustwärme abzuführen. Der solide Kupferblock des CS-Mounts wird dann durch eine Montagehalterung mit integrierten Wasserkanälen ersetzt. Der damit erzeugte, turbulente Wasserfluss in der Nähe der Diodenbarren-Übergänge leitet die Wärme effizient ab.

Wassergekühlte Wärmesenken sind zum Beispiel Makrokanalkühler aus Kupfer. Sie weisen einen thermischen Widerstand von  $\pm 0,5$  bis  $0,6$   $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  auf. Mikrokanalkühler aus Kupfer liegen bei  $0,2$ – $0,3$   $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Bislang noch nicht kommerziell erhältliche Mikrokanalkühler aus Silizium ersetzen das Kupfer durch eine Siliziumplatte mit eingezähten Mikrokanälen. Damit ist man in der Lage den Wasserfluss bis auf  $100$   $\mu\text{m}$  an die Dioden-Übergänge heranzuführen und erhält einen thermischen Widerstand von  $0,1$ – $0,15$   $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

Zur Erhöhung der Lebensdauer von Laserdioden kann es notwendig werden die Betriebstemperatur – und damit den Spitzenwert der Emissionswellenlänge – zu stabilisieren. Die Emissionswellenlänge verändert sich in Richtung längerer Wellenlänge, während die Temperatur ansteigt. Dieser Anstieg ist Materialabhängig.



Arrays mit Multimode-Faserbündeln  
Fiber Bundle Array (FBA)



Preis pro CW-Watt über die Zeit

Typische Werte sind:

0,18 nm/°C für rote Dioden-Laser,

0,28 nm/°C für 800-nm-Dioden,

0,34 nm/°C für 900-nm-Dioden,

0,4 nm/°C für 14xx-nm-Dioden.

#### Optiken/Optionen bei Diodenbarren

**Mikrolinsen:** Diodenbarren können mit einer Mikrolinse ausgestattet werden, welche die gleiche Länge hat wie der Barren selbst. Damit werden alle divergenten Einzelstrahlen in der „Fast-Axis“ gleichzeitig gebündelt. Der Durchmesser der kollimierten Emission gleicht ungefähr der Fokusslänge der Mikrolinse und beträgt gewöhnlich 300 bis 1000  $\mu\text{m}$  FWHM.

Nach erfolgter „Fast-Axis“ (FA) Kollimation beträgt die Divergenz normalerweise 0,2 bis 3 Grad FWHM, abhängig von der Art der verwendeten Mikrolinse und der Montagegenauigkeit. Mikrolinsen sind in vielen Formen und Variationen erhältlich, so z.B. mit zirkularem und asphärischem Querschnitt. Einige Hersteller liefern ebenfalls für die „Slow-Axis“ (SA) Diodenbarren mit Mikro-Optik zur Kollimation, allerdings ist das eher eine Ausnahme.

**Multimodefaser:** Diodenbarren sind auch mit angekoppelten Multimodefaserbündeln kom-

merziell erhältlich. Die Einzelfasern des Bündels sind am Eingang wie ein lineares Array angeordnet und ermöglichen somit direktes Einkoppeln der Einzel-Emitter in die jeweilige Faser. Ausgangsseitig sind die Fasern üblicherweise im Bündel in einer hexagonalen Konfiguration dicht gefasst. Damit kann der Ausgangsstrahl in eine einzelne Multimode-Faser, oder in eine zirkular geformte Blende, eingekoppelt werden. Das Faserbündel kann auch mittels SMA (oder einem anderem Faserstecker) abgeschlossen werden. Ausgehend von einem Faserbündel mit einem Durchmesser von 0,8 mm und einer numerischen Apertur (NA) von 0,12 ergibt sich eine Strahldivergenz von 14 Grad, bei vollem Winkel. Unter Verwendung einer geeigneten Sammellinse kann das Licht aus diesem Bündel in eine einzige Multimode-Faser mit einem Kerndurchmesser von 0,4 mm und einer numerischen Apertur von 0,25 eingekoppelt werden.

**Quasi-CW-Betrieb:** Obwohl Diodenbarren sowohl CW als auch quasi-CW betrieben werden können, wird der Ausdruck quasi-CW meist im Zusammenhang mit 2D-Arrays verwendet. Für eine Quasi-CW Emission wird der Treiberstrom zum Dioden-Array in einer repetitiven An/Aus Betriebsart moduliert. In diesem Fall folgt jedem Ein-Intervall ein Aus-Intervall. Der Nutzfaktor einer Quasi-CW Emission entspricht der prozentualen „Ein“-Zeit.

Beispiel: Ist die „on-time“ 1 ms und die „off-time“ 4 ms, so beträgt der Nutzfaktor 20 %. Die Spitzenleistung bezieht sich auf den Wert, bei dem die Emission „Ein“ ist. Die mittlere Leistung hingegen wird über viele Ein/Aus-Zyklen gemittelt. Man berechnet die mittlere Leistung indem man einfach die Spitzenleistung mit dem Nutzfaktor multipliziert.

2D-Diodenlaser-Arrays, die für den Quasi-CW Betrieb entwickelt wurden, können eine viel höhere Spitzenleistung erreichen als diejenigen, die für den Dauerstrich-Betrieb entwickelt wurden. Erreicht wird das durch die Verwendung von Barren mit viel höherem Füllfaktor (FF), zum Beispiel 80–90 % anstelle von 30–50 % FF bei CW-Barren. Der höhere Füllfaktor verdoppelt annähernd die Spitzenleistung im Vergleich mit einem CW Array, unter Verwendung der gleichen Anzahl von Barren.

**Kosten und Preise:** Faktoren, die den Preis von HPDLs bestimmen, sind die erforderliche Lebensdauer, Ausgangsleistung und Leistungsdichte

(W pro Emissionsfläche und Divergenzwinkel), Wellenlänge und Wellenlängen-Toleranz sowie der Bedarf an Wasserkühlung. Ein weiterer, äußerst wichtiger Kostenfaktor ist die Bestellmenge. Bei einem Volumen von 100 bis 1000 Einheiten kann der Stückpreis im günstigsten Fall um bis zu 30–50 % gesenkt werden.

Verpackte Diodenbarren liegen preislich heute bei etwa 770 bis 2300 Euro (ca. \$ 1000 –3000), und zwar abhängig von Ausgangsleistung, Gehäusedesign und Lieferant. Ein 40-Watt-Barren kostet normalerweise zwischen \$1500–2500, abhängig von Menge und Spezifikation. Während eine Faserkopplung leicht zu einer Preiserhöhung von 50–100 % führen kann.

Bei den 2D-Arrays erhöht sich der Preis mit steigender Anzahl von Barren. Kupfer-Mikrokanal Arrays liegen bei ca. \$1000–2000/Barren. Die gute Nachricht für den Anwender ist, dass sich über die letzte Dekade – in der sich Fertigungsprozesse stabilisiert und die Anzahl von Mitbewerbern erhöht haben – die Preise für Diodenlaser stetig verringert haben.

Heute gibt es viele Optionen bei der Entwicklung und der Spezifizierung von Dioden-Barren. Obwohl es schon einige Standardisierungen innerhalb der HPDL-Industrie gibt, ist dies eher eine Ausnahme als die Regel. Zum größten Teil liefert jeder Hersteller ein etwas abweichendes Produkt, was in der Regel im ersten Moment für den Anwender nicht zu erkennen ist. Potenzielle Käufer müssen sicherstellen, dass sie verstehen wie Spezifikationen definiert – und vor allem deren Werte gemessen werden – damit sie die beste Auswahl für ihre spezielle Industrieanwendung treffen können.

#### **Die Autoren:**

Merrill Apter ist Vice President Sales & Marketing bei nLight Corporation, einem Lieferanten von Hochleistungs-OEM Laserdioden, mit Sitz in Vancouver/WA – USA. Ingolf Dueckminor ist Repräsentant der nLight Corporation mit Sitz in Eching/München.