

**Tab. 3.1** (Fortsetzung)

Wellenlänge	Bezeichnung	Betriebsart, mittlere Leistung
0,351 $\mu\text{m}$	XeF-Excimerlaser	Pulse, einige 10 W
0,355 $\mu\text{m}$	Nd-Laser, verdreifacht	Pulse, einige 10 W
0,38 ... 0,55 $\mu\text{m}$	GaInN-Diodenlaser	Kont., 10 mW
0,3 ... 1,0 $\mu\text{m}$	Farbstofflaser	Pulse, einige 10 W
0,4 ... 0,9 $\mu\text{m}$	Farbstofflaser	Kont., einige W
0,442 $\mu\text{m}$	He-Cd-Laser	Kont., einige 10 mW
0,45 ... 0,52 $\mu\text{m}$	Ar <sup>+</sup> -Laser	Kont., mW bis 30 W
0,51 ... 0,58 $\mu\text{m}$	Cu-Laser	Pulse, einige 10 W
0,532 $\mu\text{m}$	Nd-Laser, verdoppelt	Pulse und kont., 100 W cw
0,543 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser, grün	Kont., einige 0,1 mW
0,632 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser, rot	Kont., bis zu 100 mW
0,63 ... 0,67 $\mu\text{m}$	InGaAsP-Diodenlaser	Kont., 10 mW
0,694 $\mu\text{m}$	Rubinlaser	Pulse, einige W
0,7 ... 0,8 $\mu\text{m}$	Alexandrit-Laser	Pulse, einige W
0,7 ... 1 $\mu\text{m}$	Titan-Saphir	Pulse und kont., einige W
0,75 ... 0,98 $\mu\text{m}$	GaAlAs-Diodenlaser	Kont. und Pulse, bis 1 W
0,8 ... 2,4 $\mu\text{m}$	Cr-LiSAF u. a. vibr. Laser	Kont., um 1 W
1,03 $\mu\text{m}$	Yb-Faser- oder Scheibenlaser	Kont. und Pulse, über 10 kW
1,06 $\mu\text{m}$	Nd-Laser und Faserlaser	Kont. und Pulse, über 1 kW cw
1,15 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser, infrarot NIR	Kont., mW
1,1 ... 1,6 $\mu\text{m}$	InGaAsP-Diodenlaser	Kont. und Pulse, mW cw
1,3 $\mu\text{m}$	Jodlaser	Pulse
1,32 $\mu\text{m}$	Nd-Laser	Kont. und Pulse, einige W cw
1,52 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	Kont., mW
1,54 $\mu\text{m}$	Er-Faserlaser	Kont., einige W
1,9 $\mu\text{m}$	Tm-Faserlaser	Kont., einige W
2 ... 4 $\mu\text{m}$	Xe-He-Laser	Kont., mW
2,06 $\mu\text{m}$	Ho-Laser und Faserlaser	Pulse
2,6 ... 3,0 $\mu\text{m}$	HF-Laser	Kont. und Pulse, bis 100 W cw
2,7 ... 30 $\mu\text{m}$	Bleisalz-Dioden-Laser	Kont., mW
3 ... 300 $\mu\text{m}$	Quantenkaskadenlaser	Kont., bis einige W
2,9 $\mu\text{m}$	Er-Laser	Pulse
3,39 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser, MIR	Kont., mW
3,6 ... 4 $\mu\text{m}$	DF-Laser	Kont. und Pulse, bis 100 W cw
5 ... 6 $\mu\text{m}$	CO-Laser	Kont., 10 W
9 ... 11 $\mu\text{m}$	CO <sub>2</sub> -Laser	Kont. u. Pulse, bis mehrere kW cw
40 ... 1000 $\mu\text{m}$	Ferninfrarot-Laser	Kont., bis 1 W

Die Laser können gepulst oder kontinuierlich betrieben werden. Statt „kontinuierlich“ wird auch oft die englische Abkürzung „cw“ für „continuous wave“ verwendet.

Im cw-Betrieb gibt man die Leistung der Strahlung (in Watt) an. Bei gepulstem Laser gibt es mehrere charakteristische Größen: die Pulsenergie  $W$  (in Joule), die Pulsdauer  $\tau$  und den zeitlichen Abstand der Pulse  $T$ . Daraus kann die mittlere Pulsleistung  $P_m$  berechnet werden:

$$P_m = \frac{W}{\tau} \quad (3.1)$$

Für die mittlere Leistung  $P$  erhält man

$$P = \frac{W}{T} = W f_p, \quad (3.2)$$

wobei  $f_p$  die Pulswiederholfrequenz ist.

Die verschiedenen Laser sind in Tab. 3.2 entsprechend dem aktiven Medium in Gas-, Flüssigkeits- und Festkörperlaser eingeteilt. Die wichtigsten flüssigen Lasermaterialien sind Farbstofflösungen, so dass diese als repräsentativ für Flüssigkeitslaser in der Tab. 3.2 dargestellt sind.

Die *Gaslaser* werden hauptsächlich elektrisch in Gasentladungen betrieben bis auf die langwelligen Moleküllaser, die meist mit CO<sub>2</sub>-Lasern optisch angeregt werden.

**Tab. 3.2** Wellenlängen  $\lambda$ , erreichbare cw-Ausgangsleistungen  $P$ , Pulsenergien  $W$  und Pulsdauern  $\tau$  häufig benutzter und kommerzieller Laser

Bezeichnung	Material	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$P$ (Watt)	$W$ (J)	$\tau$
<i>Gaslaser</i>					
Excimerlaser	ArF	0,19		1	20 ns
	KrF	0,25 (Gasentladung)		1	10 ns
	XeCl	0,308	–	1	20 ns
Stickstofflaser	N <sub>2</sub>	0,34	–	0,1	1 ns
He-Cd-Laser	Cd	0,32...0,44	0,05	–	–
Edelgasionenlaser	Kr <sup>+</sup>	0,33...1,09	10	–	–
	Ar <sup>+</sup>	0,35...0,53	20	–	–
Kupferdampf.	Cu	0,51; 0,58	–	0,002	20 ns
He-Ne-Laser	Ne	0,63; 1,15; 3,39	0,05	–	–
HF-Laser	HF	2,5...4	10.000	1	1 $\mu\text{s}$
CO-Laser	CO	5...7	20	0,04	1 $\mu\text{s}$
CO <sub>2</sub> -Laser	CO <sub>2</sub>	9...11	15.000	10.000	10 ns
Optisch gepumpte Moleküllaser	H <sub>2</sub> O	28; 78; 118	0,01	10 <sup>-5</sup>	30 $\mu\text{s}$
	CH <sub>3</sub> OH	40...1200	0,1	0,001	100 $\mu\text{s}$
	HCN	331; 337	1	0,001	30 $\mu\text{s}$

**Tab. 3.2** (Fortsetzung)

Bezeichnung	Material	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$P$ (Watt)	$W$ (J)	$\tau$
<i>Festkörperlaser</i>					
Rubinlaser	Cr:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,69		400	10 ps
Alexandritlaser	Cr:BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,7...0,8		1	10 $\mu\text{s}$
Titan-Saphir-Laser	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7...1,0	50	–	6 fs
Vibronische Festkörper-Laser		0,8...2,5			
Glaslaser	Nd:Glas	1,06	1000		1 ps
		0,21; 0,27; 0,36; 0,53 (mit Frequenzvervielfachung)			
YAG-Laser	Nd:YAG	1,06	1000	400	10 ps
		1,05...1,32 (7 Linien mit Abstimmeelementen)			
Holmiumlaser	Ho:YLF	2,06	5	0,1	100 $\mu\text{s}$
Erbiumlaser	Er:YAG	2,94	1	1	100 $\mu\text{s}$
Farbzentrenlaser	KCl u. a.	1...3,3	0,1	–	–
<i>Farbstofflaser</i>		0,4...0,8	1	25	6 fs
		0,05...12 (mit Frequenzumsetzung)			
<i>Halbleiterinjektionslaser</i>					
Galliumnitridlaser	GaN	0,38...0,53	10		
Zinkselenidlaser	ZnSe	0,42...0,50			
	GaAlAs	0,65...0,88	10		5 ps
Galliumarsenidlaser	GaAs	0,904			
	InGaAsP	0,63...2			
Bleisalzlaser	PbCdS	2,8...4,2	0,001		
	PbSSe	4...8			
	PbSnTe	6,5...32			
Quanten-Kaskadenlaser		3...300			

*Festkörper-* und *Farbstofflaser* werden optisch mit Gasentladungslampen oder anderen Lasern gepumpt. Der am häufigsten verwendete Festkörperlaser, der Nd:YAG-Laser, wird z. B. im kontinuierlichen Betrieb meist mit Krypton-Bogenlampen angeregt und im gepulsten Betrieb mit Xenonblitzlampen. *Farbstofflaser* werden oft mit Edelgasionenlasern oder Excimerlasern optisch gepumpt. *Halbleiterinjektionslaser*, die oft auch als *Halbleiterlaser* oder Diodenlaser bezeichnet werden, bilden eine besondere Klasse von Festkörperlasern. Hier erfolgt eine direkte elektrische Anregung, d. h. eine Umwandlung von elektrischer Energie in Licht ohne eine Gasentladung. Wegen der direkten Umwandlung haben diese Laser hohe Wirkungsgrade und sind außerdem sehr kompakt aufgebaut. Wie bei Gas- und Festkörperlasern werden inzwischen geringe Divergenz und spektrale Breite der emittierten Strahlung erreicht. Es gibt infrarote, rote, grüne, blaue und ultraviolette Diodenlaser. Für Anwendungen sind Diodenlaser daher wegen der Kompaktheit und des hohen Wirkungsgrades anderen Geräten vorzuziehen, wenn nicht besonders hohe Ausgangsleistungen, Frequenzstabilität und geringe Strahldivergenz gefordert sind.

### 3.2 Abstimmbare Laser

Alle Laser lassen sich in ihrer Frequenz über einen gewissen Bereich  $\Delta f$  abstimmen. Durch Differenzieren der Gleichung  $f = c/\lambda$  erhält man

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (3.3)$$

wobei  $\Delta \lambda$  der abstimmbare Wellenlängenbereich und  $f$  bzw.  $\lambda$  die mittlere Frequenz bzw. Wellenlänge angeben.

Bei dem klassischen He-Ne-Laser beträgt die Frequenzbreite etwa  $\Delta f = 10^9$  Hz bei einer Mittenfrequenz von etwa  $f = 5 \cdot 10^{14}$  Hz. Der relative Abstimmbereich ergibt sich also zu  $\Delta f/f = 2 \cdot 10^{-6}$ . Von einem abstimmbaren Laser im engeren Sinne spricht man allerdings nur, wenn  $\Delta f/f$  wesentlich größer ist:

$$\Delta f/f = |\Delta \lambda/\lambda| = 10^{-2} \quad \text{bis} \quad 10^{-1}.$$

Derartige abstimmbare Laser sind in Abb. 3.1 dargestellt. Die verschiedenen Systeme werden in den folgenden Kapiteln noch genauer beschrieben.

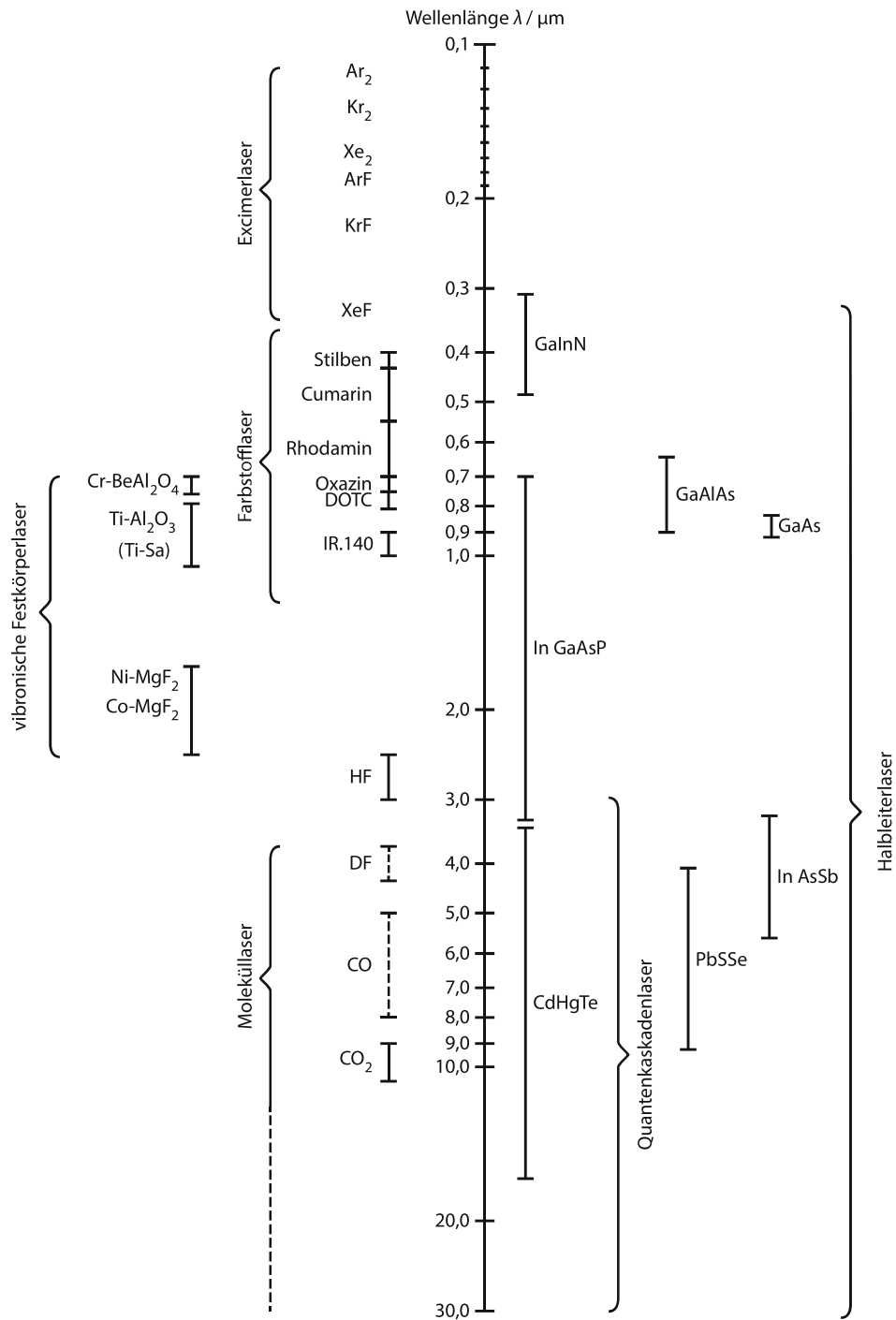
Die früher am häufigsten verwendeten abstimmbaren Systeme sind die *Farbstofflaser*. Mit verschiedenen Farbstofflösungen kann ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht mit 0,3 bis 1,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge erzeugt werden. Die Abstimmbereiche liegen bei  $\Delta f/f = 5 \dots 15\%$ . Die Farbstofflaser können mit Blitzlampen optisch gepumpt werden. Bessere Strahlqualitäten ergeben sich jedoch bei Anregung mit Festkörper- oder Gaslasern.

Ähnlich aufgebaut sind die *F-Zentren-* oder *Farbzentrenlaser*, die vor allem für das nahe Infrarot bis 3  $\mu\text{m}$  geeignet sind. Als Lasermedien werden dabei Kochsalz und andere Alkalihalogenidkristalle mit verschiedenen Störstellen benutzt.

Da die Farbstoffe und F-Zentren als Lasermaterialien teilweise nicht sehr stabil sind, wurden die *vibronischen Festkörperlaser* entwickelt, bei denen Oxid- und Fluoridkristalle verwendet werden, die mit verschiedenen Metallionen dotiert sind. Der bekannteste ist der Titan-Saphir-Laser ( $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ ), der einen breiten Abstimmbereich von 700 bis 1050 nm und einen höheren Wirkungsgrad als Farbstofflaser besitzt. Im nahen Infrarotbereich oberhalb 700 nm haben die vibronischen Festkörperlaser die Farbstofflaser und F-Zentren-Laser verdrängt. Durch Frequenzverdopplung ergibt sich Strahlung für den sichtbaren Bereich.

Als abstimmbare Quellen für den ultravioletten Spektralbereich stehen die *Excimerlaser* zur Verfügung, die allerdings nur kleine relative Abstimmbereiche bis zu 1% besitzen. Um breite Bereiche zu erhalten, kann man von langwelligeren abstimmbaren Lasern ausgehen, die frequenzverdoppelt werden. Auch höhere Summenfrequenzbildungen und andere Techniken der *Frequenzumsetzung* werden eingesetzt.

Für das mittlere und ferne Infrarot stehen die *Moleküllaser* zur Verfügung. Diese besitzen zahlreiche Linien und ermöglichen damit eine diskontinuierliche Abstimmung von einer Linie zur benachbarten. Bei hohen Drucken ergibt sich eine starke Verbreiterung der Linien, so dass sich diese überlagern, und damit eine kontinuierliche Abstimmung möglich wird.



**Abb. 3.1** Kontinuierlich abstimmbare Laser. Rubin-, Nd:YAG- und andere klassische Festkörperlaser sind nur etwa über  $1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m}$  abstimmbare

*Halbleiterlaser* können durch Änderung des Anregungsstromes oder Variation der Temperatur abgestimmt werden, wobei Abstimmbereiche von 0,1 bis 1 % möglich sind. Mit Laserdioden aus verschiedenen Materialien bzw. Mischkristallsystemen kann der Bereich von 0,38 bis 30  $\mu\text{m}$  überdeckt werden. Für 3 bis 300  $\mu\text{m}$  setzen sich Quantenkaskadenlaser durch.

---

### 3.3 Frequenzstabile Laser

Laser fester Frequenz können mit nichtlinear-optischen Methoden in der Frequenz verändert werden. Frequenzverdopplung und -vervielfachung ist z. B. mit geeigneten nichtlinearen Kristallen möglich. Mit *parametrischen Oszillatoren* kann eine kontinuierliche Frequenzabstimmung erreicht werden, wie in Abschn. 19.4 dargestellt.

Für Anwendungen beispielsweise in der interferometrischen Messtechnik und Holographie werden besonders wellenlängen- bzw. frequenzstabile Laser benötigt. Die theoretisch erreichbare Frequenzstabilität wird in Kap. 20 diskutiert. Im Prinzip kann jeder Laser bezüglich seiner Emissionsfrequenz mehr oder weniger stabilisiert werden. Häufig verwendet werden He-Ne- und Argonionenlaser, deren Spiegelabstand geregelt wird, so dass sich eine konstante Emissionsfrequenz ergibt. Auch die Frequenz bzw. Wellenlänge von Diodenlasern lässt sich stabilisieren.

Die Stabilisierungstechniken sind weit entwickelt, so dass es möglich ist, die Frequenz von Lasern an die  $^{133}\text{Cs}$ -Atomuhr anzuschließen. Diese besitzt eine relative Unsicherheit von nur  $\Delta f/f = \pm 10^{-14}$ , so dass die Frequenz eines entsprechend stabilisierten Lasers mit der gleichen kleinen Genauigkeit angegeben werden kann. Da die Lichtgeschwindigkeit seit dem Jahre 1983 auf  $c = 299.792.458 \text{ m/s}$  „festgelegt“ ist, kann auch die Wellenlänge im besten Fall mit einer Unsicherheit von nur  $\pm 10^{-14}$  bestimmt werden. Diese Unsicherheit bezieht sich auf die absoluten Werte von Frequenz und Wellenlänge. Die Frequenz von Lasern kann mit noch höherer Genauigkeit stabilisiert werden, jedoch lässt sich dann nicht mehr angeben, welchen absoluten Wert sie besitzt. In diesem relativen Sinn sind Frequenzstabilitäten von  $10^{15}$  und besser erreichbar. Ein roter Laser mit einer Wellenlänge von 600 nm und Frequenz von  $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  kann auf weniger als 0,5 Hz stabilisiert werden.

Für die meisten Anwendungen sind derartig hohe Frequenzstabilitäten, die einen großen technischen Aufwand erfordern, meist nicht erforderlich. Durch verschiedene vereinfachte Maßnahmen zur Stabilisierung kann aber praktisch jede gewünschte Frequenzgenauigkeit bis zu den angegebenen Grenzen erreicht werden.

---

### 3.4 Hochleistungslaser

Bei Leistungsangaben sind kontinuierliche und gepulste Systeme zu unterscheiden, wobei im Pulsbetrieb kurzzeitig bedeutend höhere Leistungen erreicht werden können.

Häufig eingesetzte Hochleistungslaser sind die  $\text{CO}_2$ - und *Festkörperlaser*, besonders *Nd:YAG-Laser*, die zur Materialbearbeitung und bei geringerer Leistung in der Chirurgie

viel verwendet werden. Kommerzielle, kontinuierliche CO<sub>2</sub>-Laser mit 10,6 μm Wellenlänge nähern sich dem Leistungsbereich von 100 kW, während Nd:YAG-Laser mit 1,06 μm und Faserlaser mit Leistungen bis etwa 10–20 kW angeboten werden. Die Strahlung dieser Festkörperlaser lässt sich durch Glasfasern übertragen, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber den CO<sub>2</sub>-Lasern ist.

Mit *Nd:Glas-Pulslasern* lassen sich z. B. Leistungen von etwa

$$10 \text{ Terawatt} = 10^{13} \text{ W}$$

erzielen mit Emissionsdauern von etwa  $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ .

Derartige große Leistungen werden zu Voruntersuchungen zur laserinduzierten Kernfusion benötigt und können nur in wenigen Laboratorien auf der Welt realisiert werden, da dafür große Anlagen erforderlich sind. Noch höhere Pulsleistungen erhält man mit *Ultrakurzpulslasern* (z. B. Titan-Saphir-Laser) bei Pulsdauern im ps- und fs-Bereich.

Mit normalen Tischaufbauten lassen sich mit Festkörperlasern Leistungen von einigen

$$\text{Gigawatt} = 10^9 \text{ W}$$

im Pulsbetrieb realisieren.

*Excimerlaser* sind in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt worden, so dass heute ähnliche mittlere Leistungen wie mit Festkörperlasern erreichbar sind. Zu beachten ist, dass bisher nur Pulsbetrieb möglich ist. Von Vorteil kann die erheblich kürzere Wellenlänge sein, wodurch die Mechanismen der Wechselwirkung des Laserlichtes mit Materialien stark beeinflusst werden. Während z. B. in der Materialbearbeitung mit Festkörper- und CO<sub>2</sub>-Lasern hauptsächlich thermische Prozesse eine Rolle spielen, ist mit Excimerlasern das direkte Aufbrechen chemischer Bindungen möglich. Dadurch gelingt es, in Kunststoffen oder am Auge sehr scharfe Schnitte durchzuführen, ohne thermische Veränderung von Material, das der Schnittkante benachbart ist.

Die größten kontinuierlichen Leistungen von einigen

$$\text{Megawatt} = 10^6 \text{ W}$$

wurden mit chemischen HF- oder DF-*Lasern* erreicht. Derartige Anlagen sind für militärische Untersuchungen zur Raketenabwehr gebaut worden, finden aber wenig praktische Anwendungen. Auch andere Lasersysteme, z. B. *Freie-Elektronenlaser*, sind im Rahmen dieses Programms mit hohen Leistungen projektiert worden, haben aber bisher keine weitere Verbreitung erlangt.

Vielfältige Anwendung könnten in Zukunft *Hochleistungs-Diodenlasersysteme* finden, wegen des kompakten Aufbaus, hohen Wirkungsgrades und einer Wellenlänge von etwa 800 bis 1000 nm, die sich gut zur Übertragung mit Glasfasern eignet. Es werden Leistungen über 10 kW erzielt. Die dabei erzielten Strahldivergenzen sind noch relativ hoch, d. h. die Strahlqualitäten entsprechend niedrig; jedoch sind weitere Fortschritte zu erwarten.