

**Tabelle 3.3** Parameter ausgewählter fasergeführter Diodenlasersysteme "LDF-Serie" /*laserline2012/*

Maximale Ausgangsleistung [W]	2 000	4 000	6 000	10 000	15 000
Strahlqualität ( <i>SPP</i> ) [mm·mrad]	20	30	40	60	100
Faserführung (erforderliche Durchmesser) [ $\mu\text{m}$ ]	400	600	400	600	1 000
Numerische Apertur	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Minimaler Fokus (bei $f = 150$ mm) [ $\mu\text{m}$ ]	300	450	600	900	1 500

(Schwingungsrichtung der Polarisation in der Wellenleiterebene) und TM-Anteiles (senkrecht zur Wellenleiterebene) führen zu einer Erhöhung der Strahlungsleistung unter Beibehaltung der Strahleigenschaften. Bei der Wellenlängenkopplung werden mehrere Stacks mit verschiedenen Wellenlängen (z. B. 940 nm, 980 nm und 1 030 nm) überlagert. Die Zusammenführung der beiden Teilstrahlen kann bspw. über dichroitische optische Bauelemente quasi verlustfrei (bis auf geringe Absorptionsverluste des optischen Bauelementes) erfolgen. Mit diesen und weiteren Skalierungsmaßnahmen werden aktuell Diodenlasersysteme bis 15 kW aufgebaut /*laserline2012/*.

Die **Lebensdauer** von Dioden ist für die industrielle Anwendung entscheidend. Werte von 30 000 Stunden und mehr werden heute zugesichert. In Bild 3.17 ist der Lebensdauertest eines passiv gekühlten Diodenlasers bei einer maximalen Stromstärke von  $I = 133$  A dargestellt. Der Laserhersteller garantiert i. d. R., dass die Laserausgangsleistung nach 10 000 Stunden nur um max. 10 % sinkt.

Diodenlaser zeichnen sich durch extrem kleine Abmessungen und einen sehr hohen elektrisch-optischen Wirkungsgrad (60 % und größer) aus. In den letzten Jahren wurden vermehrt Anstrengungen unternommen, die Brillanz dieser Strahlungsquellen zu verbessern. Unter **Brillanz** ist eine Charakterisierung der Güte von Laserstrahlung zu verstehen, wobei neben dem Strahlparameterprodukt auch die ausgekoppelte Laserleistung Berücksichtigung findet /*Bach2007/* (vgl. Kapitel 4). Die effizienten Diodenlaser sind sowohl als **fasergekoppelte Module** sowie als **freistrahrende Module** verfügbar /*dilas2012/*, /*laserline2012/*, /*jenoptik2012/*. In Tabelle 3.3 sind exemplarisch erreichbare Werte für ausgewählte fasergeführte Systeme zusammengestellt.

## 3.3 Festkörperlaser

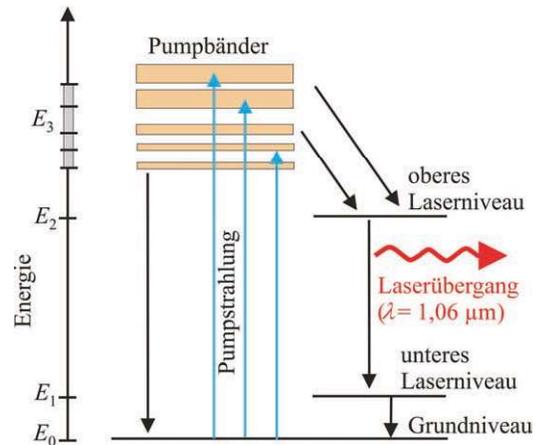
**Festkörperlaser (FK-Laser)** werden durch optisches Pumpen angeregt und erreichen ein sehr großes Pulsspektrum. Mithilfe der beschriebenen Modenkopplung lassen sich Pulslängen bis in den fs-Bereich erzielen. Andererseits können FK-Laser auch im Hochleistungsbereich im zweistelligen kW-Bereich kontinuierlich emittierend betrieben werden. Das Wellenlängenspektrum umfasst die Bereiche der UV-, VIS- sowie IR-Strahlung, wobei der UV-Bereich insbesondere durch die Möglichkeiten der Frequenzkonversion erreicht werden kann.

- UV-Bereich: frequenzverdreifachte Nd:YAG-Laser,
- VIS-Bereich: Rubinlaser, frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser,
- IR-Bereich: Ti:Saphir-Laser, Nd:Glas-Laser, Nd:YAG- und Yb:YAG-Laser, Faserlaser, Holmiumlaser, Erbiumlaser, Farbzentrenlaser.

Die für die LMB wichtigsten FK-Laser werden im Folgenden ausführlich beschrieben. Zusätzlich werden spezielle Laseranordnungen zur Erzeugung von ultrakurzen Impulsen vorgestellt.

Das aktive Medium von Festkörperlasern besteht aus **Kristallen oder Gläsern**, die mit Metallionen der Seltenen Erden dotiert sind. Die Dotierung ist meist sehr gering und beträgt nur wenige Gewichtsprozent. Die FK-Laser verfügen aber dennoch über eine höhere Dichte an laseraktiven Ionen im Vergleich zur Dichte eines Gaslasers. Die Anregung erfolgt ausschließlich durch **optisches Pumpen** mit geeigneten Pumpquellen – Blitzlampen, Bogenlampen, Diodenlaser – und speziellen Pumplichtanordnungen zur effektiven Strahleinkopplung in das

aktive Medium. Damit kann ein relativ langlebiges (metastabiles) Niveau angeregt werden, das als Ausgangsniveau der Laserübergänge gilt. FK-Laser sind i. Allg. durch einen einfachen und kompakten Aufbau gekennzeichnet, mit welchem hohe Laserleistungen und Impulsenergien erzeugt werden können. Zu den wichtigsten FK-Lasern zählt der **Nd:YAG-Laser**, dessen vereinfachtes Termschema Bild 3.18 veranschaulicht. Der Wirtskristall besteht aus YAG (Yttrium-Aluminium-Granat), der mit Neodymionen dotiert ist. Typische Konzentrationen betragen zwischen 0,5 und 1,5 Gewichtsprozent. Nd:YAG-Laser können auf mehreren Wellenlängen bzw. Linien emittieren, jedoch liegt der stärkste und am häufigsten genutzte Übergang bei **1,06  $\mu\text{m}$** . Durch das Pumpen erfolgt eine Anregung in die verbreiterten Bänder. Von dort finden strahlungslose Übergänge in das obere Laserniveau statt. Die freiwerdende Energie wird in Form von Wärme an den Kristall abgegeben. Dieser Wert ist nicht unerheblich (vgl. Bild 3.20) und erfordert eine direkte Kühlung des aktiven Mediums. Die mittlere Verweilzeit im oberen Laserniveau ist mit etwa 230  $\mu\text{s}$  sehr groß und ist die Voraussetzung, um eine starke Besetzungsin-



**Bild 3.18** Vereinfachtes Termschema für den Nd:YAG-Laser /Eich2010/

version mit hohem Verstärkungsfaktor zu erzielen. Begünstigt werden diese sehr guten Laservoraussetzungen durch den schnellen, innerhalb von 30 ns ablaufenden, strahlungslosen Übergang vom unteren Laserniveau in das Grundniveau. Mit diesem

**Tabelle 3.4** Unterteilung wichtiger FK-Laser für die LMB

Aktives Medium	Pumpquelle	Pumpanordnung	Bemerkung
Stab (rod)	Blitzlampe	transversal (elliptische oder doppelelliptische Kavität)	maximale Leistung der Kavität ist begrenzt durch thermische Linsenwirkung
	Bogenlampe		
	Diodenlaser	longitudinal (end-pumped)	Einkopplung der Pumpstrahlung über die Stirnfläche des Laserstabes
transversal (side-pumped)		Pumpquellen längs zur Laserstabachse angeordnet (Pumpen erfolgt senkrecht zur Achse des aktiven Mediums)	
Quader (slab)	Blitzlampen	transversal (side-pumped)	zickzackförmige Ausbreitung des Laserstrahles durch Totalreflexion an den Quaderwänden
	Diodenlaser	transversal (side-pumped)	
	Diodenlaser	longitudinal (end-pumped)	Einkopplung der Pumpstrahlung über die Stirnfläche des Quaders
Scheibe	Diodenlaser	Mehrfachpumpanordnung	Einkopplung der Pumpstrahlung von der Scheibenvorderseite, mehrfacher Pumpstrahldurchgang
Faser	Diodenlaser	longitudinal (end-pumped)	Ausbreitung des Pumpstrahles über Totalreflexion im Pumpkern mit wiederholtem Durchlauf des aktiven Kerns
		Y-gepumpt	

**4-Niveau-System** verfügt der Nd:YAG-Laser über eine relativ geringe Laserschwelle und kann sowohl gepulst als auch kontinuierlich bei hohen Ausgangsleistungen betrieben werden. /Eich2010/

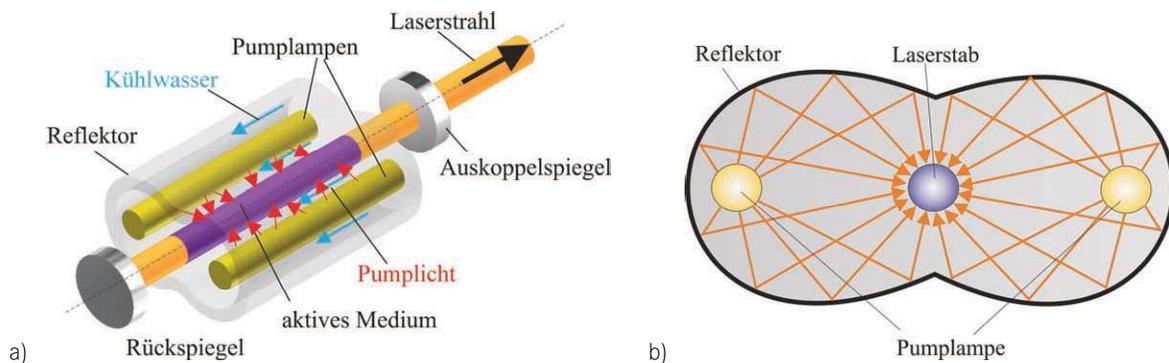
Neben der Dotierung des Wirtskristalls mit Neodymionen wird auch **Ytterbium** als Dotierungsmaterial eingesetzt. Dies betrifft vorrangig die leistungsstarken Scheibenlaser, aber auch die Faserlaser, bei welchen die Dotierung direkt im Faserkern einer Quarzglasfaser erfolgt. Die Einteilung der verschiedenen FK-Laser der LMB kann nach der Geometrie des aktiven Mediums sowie der optischen Pumpenanordnung vorgenommen werden (Tabelle 3.4).

### 3.3.1 Stablasers

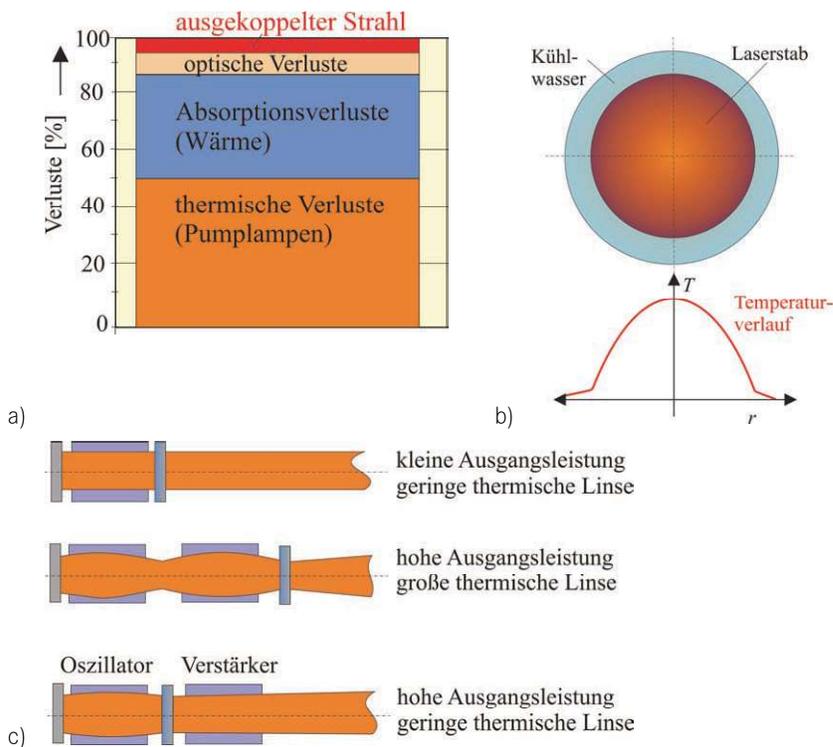
Eine sehr weitverbreitete und ausgereifte Resonatoranordnung ist der **Stablasers (engl. rod)**. Das optische Pumpen kann sowohl mit der Strahlung von Lampen als auch mit Diodenlasern erfolgen. Die Resonatoranordnung eines lampengepumpten Systems illustriert Bild 3.19 a. Während für den Pulsbetrieb **Xenon-Blitzlampen** verwendet werden, kommen für den kontinuierlichen Pumpbetrieb mit Krypton gefüllte **Bogenlampen** zum Einsatz. Die Lampen werden in der Kavität parallel zum Laserstab angeordnet. Das Licht strahlt mit einem großen Abstrahlwinkel in die Kavität und wird über die gewählte Reflektorgeometrie auf das aktive Medium abgebildet. Diese Geometrie stellt in den meisten Fällen eine elliptische (1 Anregungslampe) bzw.

eine doppelelliptische Form (2 Anregungslampen) dar, wobei Laserstab und Lampe in den Brennpunkten der Ellipse angeordnet werden. Dies hat den großen Vorteil, dass theoretisch alle ausgesendeten Anregungsstrahlen nach einer oder mehreren Umlenkungen am Reflektor den Laserstab treffen. Bild 3.19 b veranschaulicht diesen Sachverhalt.

Die Anregung mit Lampen ist nicht sehr effizient, weil diese sehr breitbandig emittieren und nur ein Teil davon für die Anregung der Pumpbänder genutzt werden kann. Der erzielbare **Wirkungsgrad** liegt im Bereich zwischen 3 und 5 % (Bild 3.20 a). Die thermischen Verluste bei einer Anregung mit Blitz- oder Bogenlampen liegen in etwa bei 50 %. Damit sich die Kavität und das aktive Medium nicht zu stark erwärmen, muss während des Laserprozesses intensiv gekühlt werden. Die entsprechende Kühlung erfolgt durch einen geschlossenen Wasserkreislauf (mit Wärmetauscher) koaxial zum Laserstab und den Lampen. Dies stellt die effektivste Kühlung für diesen Lasertyp dar. Dennoch bildet sich aufgrund der Stabgeometrie ein **Temperaturgradient** über den Stabquerschnitt aus (Bild 3.20 b). Dadurch entsteht eine sogenannte **thermische Linse**, die großen Einfluss auf die Strahlqualität hat und einen **Fokushift** verursachen kann. Die maximale Ausgangsleistung wird letztendlich durch die auftretende Verlustwärme und realisierbare Kühlwirkung an den Stabaußenflächen begrenzt. Typische Stabgeometrien haben Längen bis 200 mm und Durchmesser von 4 – 8 mm. Sie erreichen maximale Ausgangsleistungen bis 800 W und Strahlparameterprodukte



**Bild 3.19** Lampengepumpter Nd:YAG-Laser. a) Resonatoranordnung, b) Schnittansicht einer doppelelliptischen Kavität



**Bild 3.20** Eigenschaften lampengepumpter Systeme. a) Wirkungsgradbetrachtungen, b) Temperaturverteilung, c) Resonatoranordnungen /Hodg1992/

zwischen 5 und 50 mm·mrad /Rofin2004/. Höhere Strahlleistungen lassen sich durch das Anordnen mehrerer Pumpkavitäten (Reihenanordnung) zwischen den Resonatorspiegeln auskoppeln. Allerdings wird hier das Problem der thermischen Linse verstärkt (Bild 3.20 c). Eine Lösung bieten **Oszillator-Verstärker-Anordnungen**, die das aktive Medium thermisch weniger belasten.

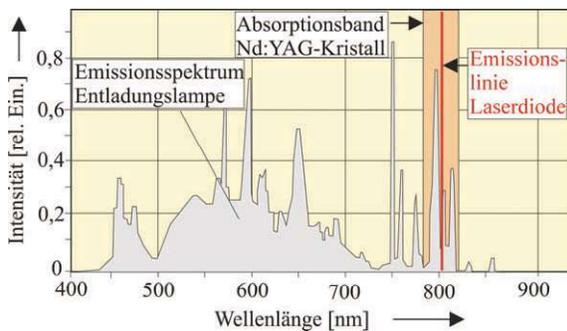
Der einfache **Resonatoraufbau** erlaubt eine Variation der Resonatorlänge, den Einsatz unterschiedlicher Resonatorspiegel oder aber das Einbringen von Modenblenden. Die **Modenblenden** ermöglichen eine Verbesserung des multimodigen Strahlprofils, indem die Randbereiche des Strahles ausgeblendet werden. Das Verlängern des Resonators wird häufig für Feinschneidanwendungen durchgeführt, um ebenfalls die Strahlqualität zu verbessern, was aber gleichzeitig eine Verringerung der mittleren Leistung nach sich zieht.

Die Verwendung von Bogenlampen mit einer kontinuierlichen Anregung des aktiven Mediums gestattet die **Güteschaltung** des Lasers in Kombination mit einem aktiven Güteschalter (vgl. Kapitel 2). In dieser Resonatoranordnung lassen sich Pulsfrequenzen bis 100 kHz mit Impulsspitzenleistungen von mehreren hundert Kilowatt erzeugen. Interessant sind diese Pulsparameter für das Laserstrahlbeschriften sowie die Mikromaterialbearbeitung.

Trotz der nachfolgend beschriebenen Vorteile von diodengepumpten FK-Lasern sind lampengepumpte Systeme nach wie vor relevant für eine Reihe von Anwendungsfeldern der LMB. Sie lassen sich relativ einfach und kostengünstig aufbauen. Hauptverschleißteile sind die Lampen, die jedoch nach einer bestimmten Betriebsdauer (auch integrierte Anzeige der Lampenstandzeit) mit geringem Aufwand gewechselt werden können.

Sehr große Bedeutung haben die **diodengepumpten Festkörperlaser** – DPSS (**d**iode **p**umped **s**olid state) erlangt, die in vielfältigen Resonatoranordnungen Anwendung finden. Nachfolgend werden ausgewählte Konzepte vorgestellt.

Mit der Verfügbarkeit von **Laserdioden** als **Pumplichtquellen** kann eine sehr effiziente Anregung des aktiven Mediums erfolgen. Ein ganz entscheidender Vorteil besteht in der schmalen Bandbreite dieser Anregungsquellen gegenüber lampengepumpten Systemen (Bild 3.21). Die Absorptionsbanden der verbreiterten Pumpbänder des Nd-Ions befinden sich im Wellenlängenbereich um die 800 nm. Dieser Bereich entspricht exakt dem Emissionsspektrum der **GaAlAs-Dioden**. Dadurch kann ein Großteil der Pumpenergie sehr effizient zur Erzeugung der Besetzungsinversion genutzt werden.

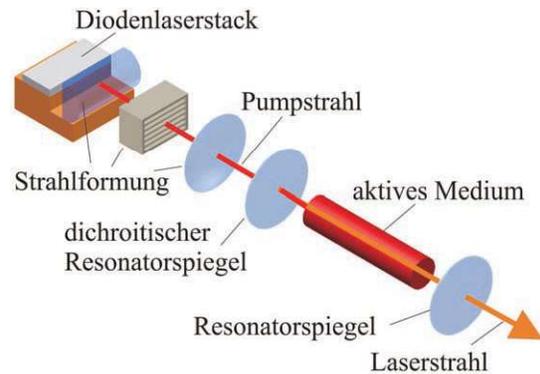


**Bild 3.21** Vergleich der Emissionsspektren von Entladungslampe und Laserdiode /Hodg1992/

Ein zweiter wesentlicher Effekt, die geringere thermische Belastung des aktiven Mediums, ermöglicht deutlich höhere Strahlqualitäten und höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu lampengepumpten Systemen. Mit elektrisch-optischen Wirkungsgraden der Pumpdioden  $> 50\%$  sind optische Einkoppelwirkungsgrade  $> 35\%$  möglich. Der Gesamtwirkungsgrad diodengepumpter Stablasers steigt dadurch auf  $10 - 20\%$ .

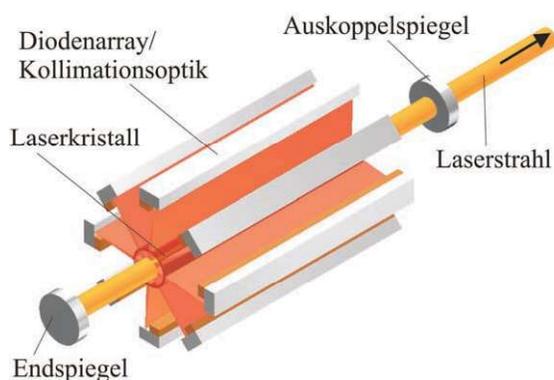
Das **Pumpen mit Laserdioden** lässt sich in zwei Grundanordnungen untergliedern:

- longitudinales Pumpen (end-pumped) und
- transversales Pumpen (side-pumped).



**Bild 3.22** Resonatoraufbau eines endgepumpten DPSS-Lasers

Bild 3.22 und Bild 3.23 illustrieren die Grundanordnungen beider Varianten. Für kleine Leistungen bis etwa 20 W werden **endgepumpte Anordnungen** aufgebaut. Man erzielt damit sehr gute Strahlqualitäten in der Grundmode  $TEM_{00}$ . Die Einkopplung der Pumpstrahlung erfolgt über die **Endfläche des Laserstabes** oder einen Spiegel. Diese polierte Stirnseite bzw. Spiegelfläche wird dichroitisch beschichtet, wodurch sie für die Strahlung des Diodenlasers (808 nm) hochtransmittiv ist, aber für die Emissionswellenlänge des laseraktiven Mediums (1064 nm) vollständig reflektierend wirkt. Die Endfläche des Stabes stellt in diesem Fall auch den Resonatorspiegel dar. Damit kann die Strahlungsrückkopplung im Resonator bei gleichzeitiger Pumpzufuhr ermöglicht werden. Wichtig ist die Kollimation und



**Bild 3.23** Transversal gepumpter Nd:YAG-Laser

Homogenisierung der divergenten Pumplichtstrahlung mithilfe entsprechender optischer Bauelemente, um den Pumpstrahl in den Laserstab einkoppeln zu können und diesen homogen anzuregen. Die **transversale Pumpenanordnung** gestattet den Aufbau von Nd:YAG-Lasern im kW-Bereich. Angeordnet werden die Diodenlaserbarren parallel zur Laserstabachse, somit pumpen sie das aktive Medium senkrecht zu Strahlachse (Bild 3.23).

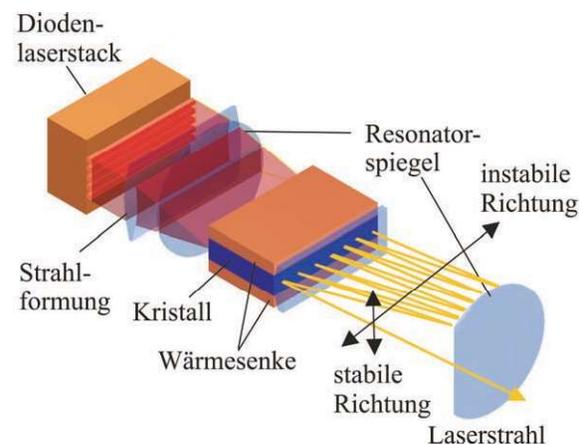
Mit der Anzahl und der Ausgangsleistung der Diodenlaserbarren lässt sich auch die erreichbare Nd:YAG-Laserleistung skalieren. Dafür werden die Barren symmetrisch um die Laserstabachse angeordnet. Durch den im Vergleich zu lampengepumpten Systemen deutlich geringeren Wärmeeintrag können höhere Pumpraten erzielt werden, wodurch die Wirkung einer thermischen Linse wesentlich geringer ist. In /Rofin2004/ wird angeführt, dass Strahlparameterprodukte von  $12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  erreichbar sind, und maximale Ausgangsleistungen bis  $4,4 \text{ kW}$  durch Hintereinanderschaltung der Laserstäbe erzielt werden können. Aktuell kann allerdings der kW-Bereich durch die Scheiben- und Faserlaser effizienter und mit höherer Strahlqualität abgedeckt werden.

### 3.3.2 Slablasers

Eine wesentliche Reduzierung der thermischen Linsenwirkung kann man durch den Übergang der Stabgeometrie auf die Slabgeometrie erreichen. Darunter ist eine plattenförmige (quaderförmige) Geometrie mit mehreren Millimetern Dicke zu verstehen. Der Laserstrahl breitet sich in der **Slabkavität** aufgrund der Totalreflexion zickzackförmig aus. Die Anregung kann sowohl mit Blitzlampen als auch mittels Diodenlaser erfolgen. Wesentlicher Vorteil von diodengepumpten Systemen ist das Erreichen höherer Strahlqualitäten im Vergleich zu lampengepumpten Nd:YAG-Laserstrahlungsquellen.

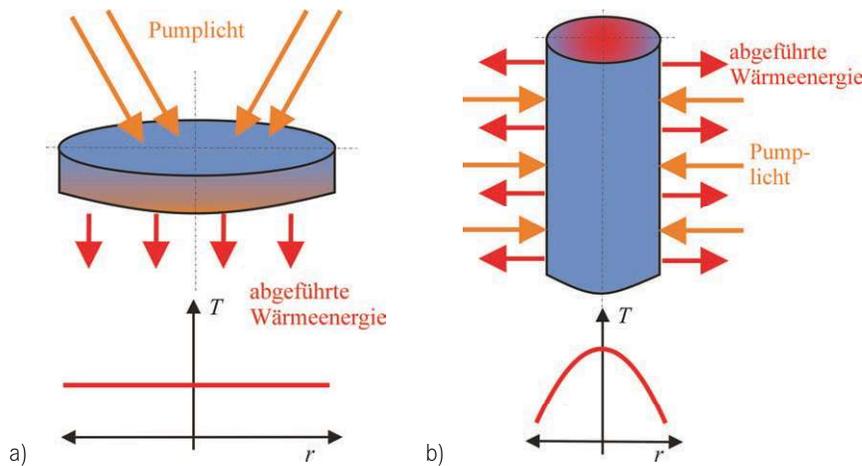
**Slablasers** können im cw- und pw-Betrieb arbeiten und sind in einem Leistungsbereich von  $50 \text{ W}$  bis  $1 \text{ kW}$  skalierbar. Bild 3.24 veranschaulicht exemplarisch die Resonatoranordnung eines endgepumpten Slablasers. Der eingesetzte Nd:YAG-Kristall hat eine Abmessung von  $(1 \times 10 \times 10) \text{ mm}^3$ , sodass das

Pumplicht des Diodenstacks auf eine Eintrittsfläche von  $(1 \times 10) \text{ mm}^2$  geformt werden muss. Zur **effektiven Strahleinkopplung** werden die beiden Flächen (Eintritts- und Austrittsfläche) mit einer AR-Schicht für die Wellenlängen  $808 \text{ nm}$  und  $1064 \text{ nm}$  beschichtet. Die Kühlung des aktiven Mediums (Kristall) erfolgt über die obere und untere Fläche. Die sphärisch geformten Resonatorspiegel bilden einen konfokalen **instabil** aufgebauten Resonator, der einen sehr kompakten Aufbau mit einer vergleichsweise hohen Verstärkung aufweist (vgl. Kapitel 2). Die Skalierung der Ausgangsleistung kann direkt durch die Vergrößerung des Modenvolumens bei annähernder Erhaltung der Strahlqualität vorgenommen werden. Um bspw.  $1 \text{ kW}$  Laserstrahlung auszukoppeln, muss der Nd:YAG-Kristall auf  $60 \text{ mm}$  verbreitert werden. /Gies2006/



**Bild 3.24** Anordnung eines endgepumpten Slablasers /Gies2006/

Die Anordnung des Lasers bietet sehr gute Voraussetzungen, um einen Laser mit kurzen Pulsdauern und hohen Pulsspitzenleistungen bei sehr guten Strahlqualitäten umzusetzen. Die Entwicklungen dieser diodengepumpten Slablasers sind auch als **Innoslab-Technologie** bekannt. Diese Resonatoren lassen sich ebenfalls sehr gut im Güteschaltungsbetrieb einsetzen. Hierfür wird nach dem kontaktgekühlten Laserkristall bspw. eine PÖCKELS-Zelle angeordnet. Diese elektrooptischen gütegeschalteten Kurzpulslaser erreichen Pulsdauern bis zu  $4 \text{ ns}$  /edgewave2011/.



**Bild 3.25** Vergleich der Kühlwirkung Scheiben- und Stabgeometrie /Gies2006/.  
a) Scheibengeometrie, b) Stabgeometrie

### 3.3.3 Scheibenlaser

Eine weitere Verbesserung der Kühlung des aktiven Mediums erreicht man, wenn der Kristall sehr flach und scheibenförmig gestaltet wird. Die untere Seite der Scheibengeometrie wird intensiv gekühlt und an der oberen Seite erfolgt die Einkopplung der Pumpstrahlung. Damit ist ein wesentlich größeres **Oberflächen-Volumen-Verhältnis** des **aktiven Mediums** gegeben. In dieser Konfiguration (quasi eindimensionale Wärmeableitung in Richtung der Laserachse) kann sich nahezu keine thermische Linse ausbilden. Sie bietet zugleich die Voraussetzung für das Erreichen sehr hoher Strahlqualitäten (Bild 3.25). Bei der **Scheibengeometrie** ist jedoch das Volumen des aktiven Mediums kleiner als bei der Stabform. Dieser Nachteil wird durch zwei Maßnahmen gelöst:

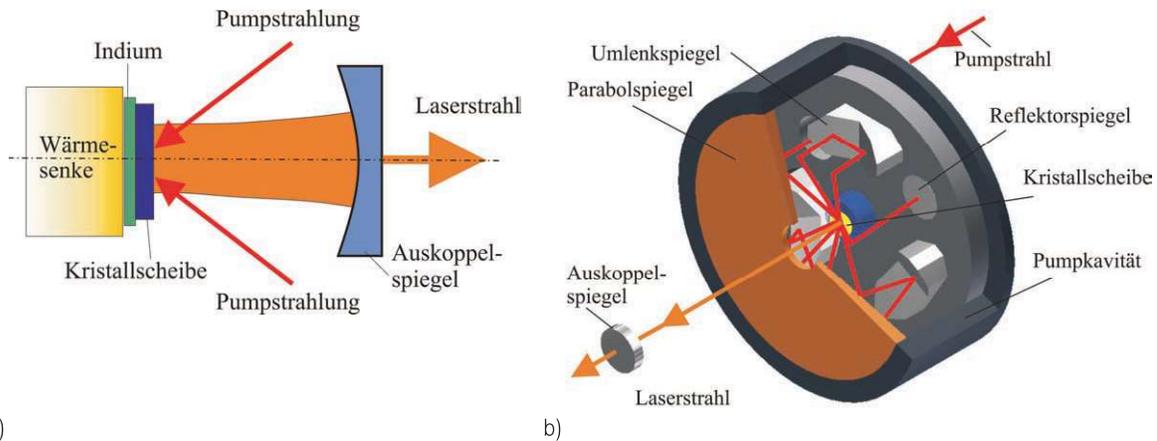
1. Erhöhung der Dotierung im Wirtskristall,
2. mehrfacher Durchgang der Pumpstrahlung durch das aktive Medium (Bild 3.26 b).

Um deutlich höhere Dotierungsgrade im Wirtskristall zu erzielen, werden anstelle der Neodym-Ionen (Volumenanteil nur bis 1 %) Ytterbium-Ionen mit einem Volumenanteil von bis zu 30 % in den YAG-Kristall eingebracht.

Des Weiteren bietet Ytterbium den Vorteil einer sehr hohen **Quantenausbeute** (nahe 100 %), wo-

raus eine geringere Wärmebelastung des aktiven Mediums resultiert. Das obere Laserniveau ist mit Lebensdauern von mehreren 100  $\mu\text{s}$  sehr langlebig (metastabil). Das untere Laserniveau und das Grundniveau liegen allerdings sehr eng beieinander, sodass eine sehr effektive Kühlung des Mediums erfolgen muss, um eine thermische Besetzung zu vermeiden. Bei Stabgeometrien für die LMB wird u. a. aus diesem Grund Yb:YAG nicht verwendet. /Kneu2008/

In Bild 3.26 ist das Grundprinzip des Scheibenlasers dargestellt. Der Resonator wird aus der Kristallscheibe, einem Parabolspiegel und dem Auskoppelspiegel gebildet. Die Rückseite der Kristallscheibe (HR-Seite = high reflection) ist für beide Wellenlängen (Pump- und Laserwellenlänge) hochreflektierend beschichtet und verkörpert den 100 %-Spiegel der Resonatoranordnung. Die Scheibeneintrittsseite wird als AR-Seite bezeichnet und ist für beide Wellenlängen mit einer Antireflexionschicht bedampft. Die HR-Seite der Scheibe bringt man über eine Wärmeleitschicht (hier Indium) in Kontakt zu einer Wärmesenke, um eine **effiziente Wärmeabfuhr** aus dem Kristall zu ermöglichen. Die Pumpstrahlung wird aus einem oder mehreren Diodenlaserstacks über Strahlformungselemente auf die AR-Seite der Scheibe gelenkt (Bild 3.26 a). Da die Strahlung bei einem Durchgang nicht komplett absorbiert werden kann, reflektiert der Restanteil von



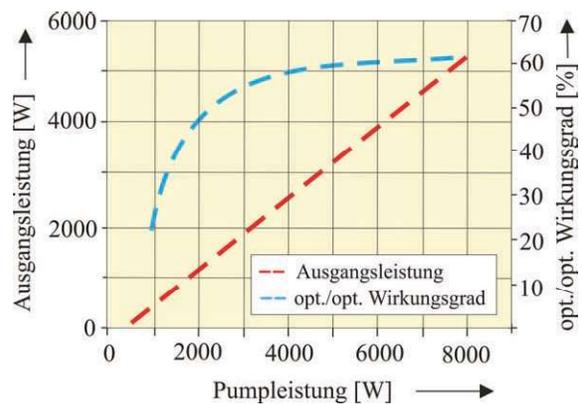
**Bild 3.26** Anordnung und Aufbau eines Scheibenlasers. a) prinzipieller Aufbau /Kneu2008/, b) Strahlführung in einer Pumpkavität /Trumpf2006/

der HR-Seite zurück durch den Kristall auf einen parabolischen Lochspiegel. Von dort aus durchläuft die geschwächte Pumpstrahlung erneut die Kristallscheibe und steht für die Anregung wiederholt zur Verfügung. Bis zu 16-mal oder 24-mal durchläuft der Pumpstrahl die Scheibe. Die Anzahl der Durchgänge wird im Wesentlichen durch die Abbildungsoptiken in der Pumpkavität, den Eigenschaften der Pumpdioden (Leistungsdichte, SPP und Brillanz) sowie der Pumpfleckgeometrie bestimmt. /Erha2002/

Eine detaillierte Darstellung einer solchen **Pumpkavität** ist Bild 3.26 b zu entnehmen. Der kollimierte Pumpstrahl trifft mit Versatz zur Laserstrahlachse auf den parabolischen Lochspiegel. Die **Kristallscheibe** wird in der Brennebene des Spiegels angeordnet, wodurch der auseinanderlaufende Pumpstrahl nach jedem Umlauf wieder auf die Scheibe fokussiert werden kann. Umlenkelemente (auch Retrooptiken genannt) lenken den Strahl von einem Bereich des Parabolspiegels auf einen benachbarten Bereich. Nach mehrmaligem Umlenken des Pumpstrahles gelangt dieser auf den Reflektorspiegel, von wo aus der Strahl noch einmal den Strahlweg zurückgeschickt wird. Am Ende der Gesamtumläufe ist der Pumpstrahl nahezu vollständig absorbiert. Zwischen der Laserscheibe und der Auskoppeloptik, die außerhalb der Pumpkavität angeordnet ist, baut sich das Strahlungsfeld auf. Weist der Pumpstrahl eine Wellenlänge von  $\lambda = 940 \text{ nm}$

auf, emittiert der Yb:YAG-Laser bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ . Durch die Vergrößerung des gepumpten Strahldurchmessers können bei konstant gehaltener Leistungsdichte aus einer Scheibe sehr hohe Ausgangsleistungen generiert werden, die im Wesentlichen von der **Leistung** und **Brillanz** der Diodenlaser-Pumpquelle abhängen. /Trumpf2006/

In Bild 3.27 ist die erreichbare Ausgangsleistung einer Scheibe in Abhängigkeit von der Pumpleistung dargestellt. Mit einer Pumpleistung von rund  $P_{\text{pum}} = 8 \text{ kW}$  können aus einer Scheibe maximale Ausgangsleistungen bis  $P_{\text{max}} = 5,5 \text{ kW}$  mit einem



**Bild 3.27** Ausgangsleistung und Wirkungsgrad eines Scheibenlasers /Gies2006/

Strahlparameterprodukt von  $SPP = 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  erzielt werden. Damit wird ein **optisch-optischer Wirkungsgrad** von über 60 % und ein elektrisch-optischer (Steckdosenwirkungsgrad) von 25 % erreicht. /Gies2006/

Werden mehrere Scheiben in einem Resonator angeordnet, kann die Leistung des Scheibenlasers weiter erhöht werden. Da die Scheiben thermisch nur gering belastet werden, bleibt die sehr gute Strahlqualität auch bei einer Leistungsskalierung hin zu höheren Leistungen weitestgehend erhalten. Bild 3.28 verdeutlicht das Prinzip einer **W-Anordnung** mit 2 Scheiben in einem Resonator. Die Kombination mehrerer Scheiben wird in unterschiedlichen Resonatorkonfigurationen genutzt (auch in Verstärkeranordnungen). Leistungsstarke cw-Laser für die LMB sind heute bis zu 16 kW mit hohen Strahlqualitäten verfügbar. Hohe Strahlqualitäten sind gleichzeitig auch die Voraussetzung, um die ausgekoppelte Leistung mit **Prozessfasern** kleiner Kerndurchmesser zu führen. Es gelingt, die 16 kW Laserleistung in einer Faser mit einem Kerndurchmesser von nur 200  $\mu\text{m}$  zu übertragen. Ein Vorteil des Scheibenlasers besteht darin, dass die Anforderungen an die Strahlqualität der Pumpstrahlung nicht sehr hoch sein müssen, da der Pumpstrahl nur auf einige Millimeter Fleckdurchmesser fokussiert werden muss.

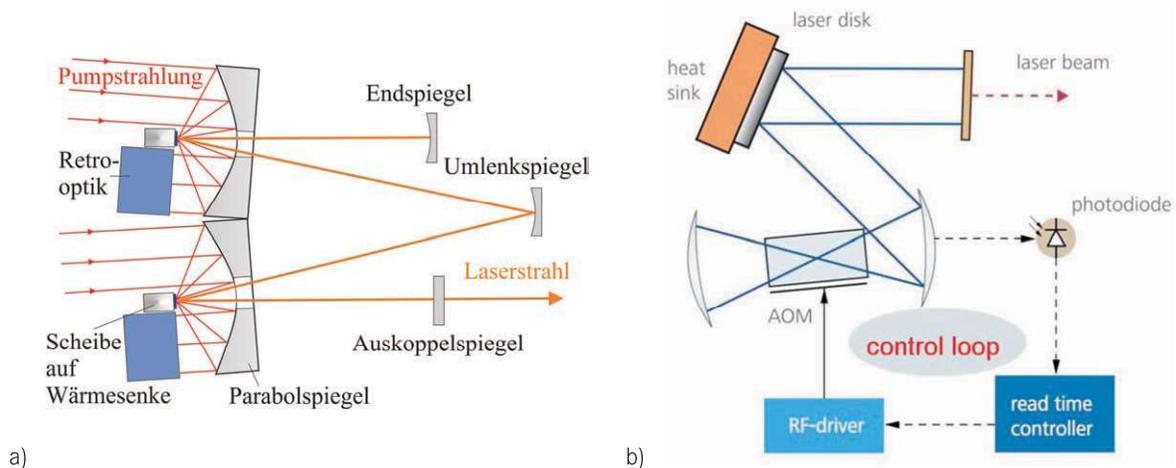
Typischerweise reicht ein SPP der Diodenlaserstrahlung von etwa 350  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$  aus. /Trumpf2006/

Scheibenlaserkonzepte eignen sich nicht nur für den kontinuierlichen Betrieb, sondern sind auch für den **gepulsten Betrieb** mit hohen mittleren Leistungen prädestiniert. Eingesetzt werden sie sowohl für Pulsdauern im ns- als auch im fs-Bereich. Durch die Integration eines **AOMs** (Akustooptischer Modulator, vgl. Kapitel 2) können die Pulsparameter variabel gewählt werden und eine schnelle Leistungsregelung erfolgen (Bild 3.28 b) /Jenoptik2012-1/.

Kurze Pulsdauern mit hohen Impulsspitzenleistungen lassen sich in Oszillator-Verstärker-Anordnungen generieren (vgl. Kapitel 3.3.5). In dieser Anordnung können Pulse gezielt im Oszillator erzeugt und in einem Scheibenverstärker bis zur gewünschten Energie nachverstärkt werden. Die einlaufenden Impulse, deren Wellenlänge im Verstärkungsbereich der Scheibe liegen, werden im Verstärker energetisch erhöht.

### 3.3.4 Faserlaser

Faserlaser gestatten, die Vorteile von diodengepumpten Festkörperlasern mit denen von Lichtwellenleitern sehr gut zu kombinieren. Prinzipiell



**Bild 3.28** Ausgewählte Scheibenlaserkonzepte. a) zwei Scheiben in W-Anordnung /Trumpf2011/, b) gepulster Scheibenlaser mit AOM /Jenoptik2012-1/