

Bild 3.2 Energieniveauschema des CO₂-Lasers. a) Termschema /Eich2010/, b) Darstellung der Laserübergänge /Kneu2008/

Der CO₂-Laser benötigt neben dem CO₂-Molekül auch noch die Gase N₂ und He. Die Anregung des CO₂-Moleküls erfolgt nicht allein durch inelastische Stöße mit niederenergetischen Elektronen, sondern ebenfalls durch schwingungsangeregte N₂-Moleküle. Dies zeigt Bild 3.2 a. /Eich2010/

Für die Anregung (elektronische Stoßanregung) des oberen Laserniveaus (00¹) reicht bereits ein Quant $h \cdot \nu_3$ aus und wird für den CO₂-Laser durch eine Gasentladung realisiert. Das in Bild 3.2 dargestellte obere Laserniveau entspricht genau der Energie der asymmetrischen Streckschwingung des CO₂-Moleküls aus Bild 3.1. Dieses Niveau ist sehr langlebig und reicht je nach Gasdruck, -temperatur und -zusammensetzung von wenigen µs bis zu 1 ms. Damit können sich viele Moleküle ansammeln, die eine relativ starke Besetzungsinversion bilden.

Im oberen Laserniveau erfolgt auch die bereits angesprochene Stoßanregung der CO₂-Moleküle mit den schwingungsangeregten N₂-Molekülen (**Stöße 2. Art**, vgl. Kapitel 2). In Bild 3.2 a ist ebenfalls veranschaulicht, dass zwei Laserübergänge aus dem oberen Laserniveau (00¹) in das (10⁰)-Niveau und das (02⁰)-Niveau möglich sind. Im erst genannten Fall basiert dies auf dem Übergang der asymmetrischen in die symmetrische Streckschwingung und erzeugt Wellenlängen in dem Bereich um 10,6 µm. Währenddessen wird im zweiten Fall der Übergang aus der asymmetrischen Streckschwingung in die Knickschwingung stattfinden und eine Wellenlänge in einem Bereich um 9,6 µm emittieren. Diese Über-

gänge sind jedoch nicht spektral scharf auf eine Linie begrenzt, das resultierende Emissionsspektrum besteht aus vielen Linien. Dies begründet sich hauptsächlich durch die Aufspaltung der beteiligten Vibrationsniveaus in entsprechende Rotationszustände, wie in Bild 3.2 b dargestellt. Die Rotationsniveaus werden durch die **Quantenzahl J** beschrieben. Für die jeweiligen **Dipolübergänge** gilt für die Quantenzahl folgende Auswahlregel: $\Delta J = \pm 1$, wobei $\Delta J = 0$ verboten ist. Alle Übergänge für $\Delta J = +1$ werden zum **R-Zweig** zusammengefasst und diejenigen mit $\Delta J = -1$ zum **P-Zweig**. Die beiden in Bild 3.2 b eingezeichneten P20 Linien (10,6-µm- und 9,6-µm-Bereich) entsprechen dem Übergang zwischen dem Rotationszustand $J = 19$ des Niveaus (00¹) und dem $J = 20$ Zustandes des (10⁰)-Niveaus. Die Verstärkung der einzelnen Linien ist unterschiedlich und resultiert aus den verschiedenen Besetzungsdichten der Rotationsniveaus J . /Kneu2008/

Die Linie mit der höchsten erreichbaren Verstärkung ist die **P20 im 10,6-µm-Bereich**, wie in Bild 3.3 ersichtlich. Das entspricht der bekannten Wellenlänge des CO₂-Lasers bei $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. In den unterschiedlichen Laserkonfigurationen wird der Resonator so ausgelegt, dass er über eine wellenlänge-selektive Wirkung (z. B. mittels Spiegelbeschichtungen) verfügt und der Laser auf nur einer Linie **anschwingen** kann. Ohne diese Maßnahmen wäre auch ein sogenanntes **Linienwandern** (Linien-springen) des Lasers im Betrieb nicht auszuschließen, was zu einer unerwünschten Leistungsfluktuation

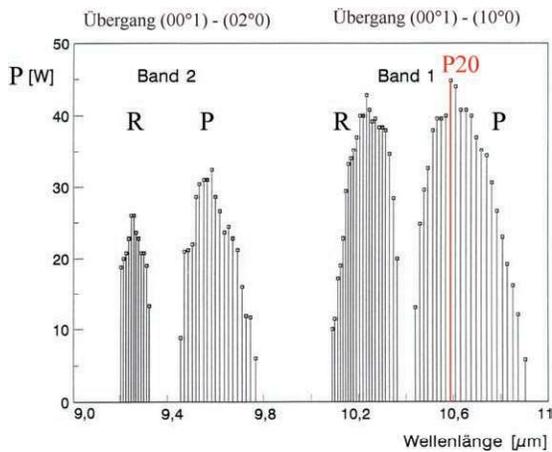


Bild 3.3 Gemessenes Linienspektrum eines 50-W-CO₂-Lasers /Blie1996/

führen würde. Andererseits lassen sich CO₂-Laser aber sehr gut über die dargestellten Wellenlängenbereiche durchstimmen. Mit der Integration eines Prismas (für kleine Leistungen) oder eines Reflexionsgitters (für höhere Leistungen) in den Resonator können die verschiedenen Linien diskret eingestellt werden (vgl. Bild 3.3). Für spezielle Aufgaben der LMB wird der Laser auch auf anderen Wellenlängen als der P20 zum Anschwingen gebracht. Dies ist insbesondere für die Kunststoffverarbeitung interessant, da viele Kunststoffe im 9,6-µm-Bereich eine erhöhte Absorption aufweisen (vgl. Kapitel 9).

Die Entleerung der unteren Laserniveaus (10⁰) bzw. (02⁰) erfolgt sehr schnell durch **Schwingungs-Schwingungs-Relaxationen** in den untersten Schwingungszustand (01⁰). Innerhalb von 0,1 µs kann ein Besetzungsausgleich der (10⁰)- und (02⁰)-Niveaus durch **Fermi-Resonanz** erfolgen. Ein Problem stellt allerdings die Entleerung des (01¹)-Schwingungszustandes in das Grundniveau dar. Dieser Prozess währt mehrere Größenordnungen länger als der gesamte Besetzungsaustausch. Man spricht hier auch von einem sogenannten **Flaschenhals**. Eine Lösung bildet die Verfügbarkeit zusätzlicher Stoßpartner, um die Entleerung zu beschleunigen und die Besetzungsinversion wieder schnell und ausreichend aufbauen zu können. Als **Stoßpartner** wird dem Gasgemisch **Helium** beige-

setzt, was zu einer schnellen Entleerung des Zustandes (01¹) führt, ohne die oberen Laserniveaus wesentlich zu beeinflussen. Darüber hinaus führt das Edelgas Helium aufgrund seiner guten Wärmeleitfähigkeit zu einer Kühlung und Reduzierung der thermischen Besetzung des unteren Energieniveaus.

Während des beschriebenen Prozesses der Strahlerzeugung treten **zwei Verlustprozesse** auf:

- **Dissoziation** der CO₂-Moleküle unter Bildung von Kohlenmonoxid und
- **Erhöhung der Gastemperatur**, bedingt durch höhere thermische Anregung des unteren und Stoßanregung des oberen Laserniveaus. /Brun1989/

Erstgenannter Verlustprozess wird bei geströmten Laseranordnungen durch einen Gasaustausch kompensiert. Schwieriger gestaltet sich dieses Problem für **stationäre Systeme**. Durch die Zugabe geeigneter Katalysatoren kann die Dissoziationsrate jedoch effektiv verringert werden, sodass lange Lebensdauern des Gasgemisches möglich werden. Für die Lösung des zweiten Verlustproblems haben sich zwei Kühlvarianten etabliert:

1. Diffusionskühlung

die Verlustwärme wird durch Diffusion an die Wände der Entladungsrohre bzw. -platten, die mit Wasser gekühlt sind, abgegeben.

2. Konvektionskühlung

die Verlustwärme wird durch einen schnellen und wiederholten Gasaustausch abgeführt.

Die **verschiedenen Laserkonzepte**, die für die LMB eingesetzt werden, lassen sich den Unterscheidungskriterien der Tabelle 3.1 zuordnen.

3.1.1.1 Geströmte Systeme

Die verschiedenen Lasersysteme mit geströmten Anordnungen sind in der LMB weit verbreitet. Gründe hierfür sind insbesondere in den ausgereiften und langjährig industriebewährten Systemen zu sehen, die eine gute Leistungsskalierung bis 20 kW erlauben und durch ihre sehr hohe Strahlqualität für den Einsatz in sehr vielen LMB-Verfahren geeignet sind. **Quergeströmte Laser** wurden viele Jahre zum Erzeugen hoher Strahlungsleistungen eingesetzt. Aufgrund ihrer relativ schlechten Strahlqualität haben sie aktuell jedoch weitgehend an Bedeutung verloren.

Tabelle 3.1 Unterteilung der CO₂-Laserarten

Gasflussrichtung	Gasflussgeschwindigkeit	Anregungsart
Quergeströmt Das Gas strömt quer zur Laserstrahlachse	Schnell geströmt Die Strömungsgeschwindigkeit hängt in erster Linie von der Förderleistung der Umwälzpumpe ab.	Gleichstrom Elektroden werden im Resonator über die Entladestrecke angeordnet. An die Elektroden wird eine hohe Gleichspannung angelegt (ca. 12 kV)
Längsgeströmt Das Gas strömt längs zur Laserstrahlachse	Langsam geströmt Die Strömungsgeschwindigkeit wird durch den Gasdruck, bzw. den Verbrauch des Gases bestimmt. Keine Pumpe für die Gasumwälzung erforderlich.	Elektrisch gepulst Elektrische Pulsung des Entladestromes, z. B. mit Schaltnetzteilen
	Stationär (Sealed-Off) Das Gas wird in einem abgeschlossenen Laserrohr bevorratet und strömt nicht.	Hochfrequent Die Elektroden befinden sich außerhalb des Resonators. Die hochfrequente Wechselspannung wird kapazitiv eingekoppelt (z. B. $\nu = 13,56$ MHz)

Langsam längsgeströimte Resonatoren

Der Aufbau von **langsam längsgeströimten Resonatoren** ermöglicht eine flexible Leistungsskalierung von wenigen Watt bis zu maximal 2000 W. Die erreichbaren Ausgangsleistungen korrelieren direkt mit der Resonatorlänge. Es können in etwa 120 W Laserleistung pro Meter Entladungsstrecke ausgekoppelt werden. Der Resonator kann trotz seiner großen erforderlichen Länge durch eine mehrfache Faltung kompakt aufgebaut werden. Hohe Anforderungen werden an die Resonatorstabilität und die Reflektivität der Umlenkspiegel (minimalste Absorptionsverluste) im Resonatorinneren gestellt. Durch die mehrfache Strahlumlenkung und die Beschichtung der Umlenkspiegel erhält der Strahl eine lineare Polarisation. Aufgrund der langen Resonatorstrecke in Verbindung mit einer speziellen winkelselektiven Wellrohrausführung des Resonators wird eine **hohe Strahlqualität** von $K > 0,8$ des Rohstrahles ohne zusätzliche optische Komponenten über den gesamten Leistungsbereich erzielt */feha2012/*. Langsam längsgeströimte Systeme sind **diffusionsgekühlt** und führen die Verlustwärme im doppelwandigen Resonatorrohr an das wassergekühlte Außenrohr ab. Der erforderliche Gasaustausch zur Entfernung der Dissoziationsprodukte der Gasentladung kann gleichzeitig über die Vaku-

umpumpeinheit erfolgen. Die elektrische Anregung mit koaxial zum Gasfluss angeordneten Elektroden ermöglicht eine **Gleichstromentladung (DC)**. Die Laserleistung kann direkt über den Entladestrom geregelt werden. Typische maximale Stromstärken betragen 120 mA bei einem Gasdruck von 20 mbar und einem Rohrdurchmesser von etwa 15 – 20 mm. Die Verwendung von Schaltnetzteilen erlaubt ferner ein elektrisches Pulsen der Gasentladung im Frequenzbereich von wenigen Hz bis zu maximal 1 kHz. In den letzten Jahren wurde die Gasentladung weiter optimiert und der Einsatz von PREMIX-Gasen mit H₂-Zusätzen realisiert. Dadurch ist ein sehr wirtschaftlicher Betrieb mit verringertem Gasverbrauch möglich geworden. */feha2012/*

Schnell längsgeströimte Resonatoren

Die Bauformen des **schnell längsgeströimten Lasers** bieten die Möglichkeit, sehr hohe Strahlleistungen auszukoppeln. Bei diesem Gasentladungslaser erfolgt ein **schneller Gasaustausch**, sodass die Kühlung des Gases im Unterschied zu den langsam geströimten Systemen über eine **Wärmekonvektion** in einem Wärmetauscher stattfindet. Das heiße Gas wird mittels eines Turboradialgebläses einer Kühlstrecke außerhalb des Resonators zugeführt, wo es einen wassergekühlten Wärmetauscher umströmt

und abkühlt. Entscheidender Vorteil dieser Bauform ist, dass pro Meter Resonatorweg wesentlich mehr Laserleistung bereitgestellt werden kann. Diese Art der Konvektionskühlung kann sowohl in axialer (längsgeströmt) als auch transversaler (quergeströmt) Richtung zur optischen Achse erfolgen.

Ein Beispiel für eine schnell längsgeströmte Resonatoranordnung illustriert Bild 3.4. Die Resonatorstrecke wird aus Quarzglasrohren gebildet und ist quadratisch gefaltet angeordnet. Eine optische Verbindung der Entladungsstrecken erfolgt über hochreflektierende Umlenkspiegel. Rück- und Auskop-

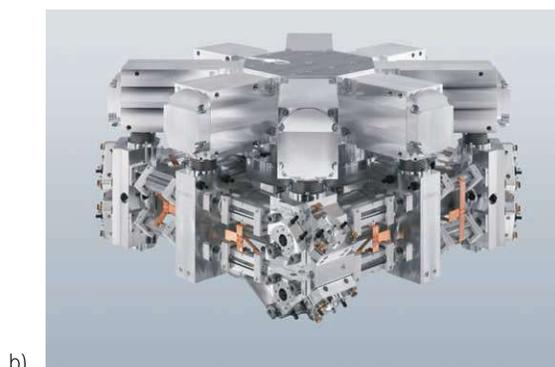
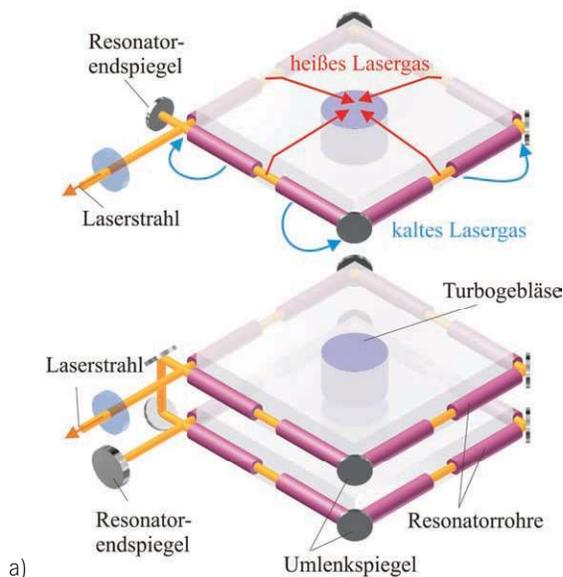


Bild 3.4 Schnell längsgeströmt System /Trumpf2012/. a) Prinzip der Resonatoranordnung, b) Aufbau TruFlow-Resonator

pelspiegel sind bei dieser Bauweise in unmittelbarer Nähe angeordnet, um die Strahljustage zu erleichtern. Die Laserleistung lässt sich über die Anzahl der Entladungsstrecken skalieren. Im Bild 3.4 a erfolgt die Skalierung in Z-Richtung über eine zusätzliche Etage (untere Darstellung). Für den Aufbau eines 20-kW-Lasers werden insgesamt 16 Entladungsstrecken benötigt. Diese Resonatoranordnung koppelt ein rotationssymmetrisches, linear polarisiertes Strahlprofil in der Grundmode aus. /Trumpf2012/

Welche Moden letztendlich anschwingen, hängt vom Röhrendurchmesser und der Wahl der Spiegel ab /Trumpf2006/. Die Anregung erfolgt ausschließlich über die **HF-Einkopplung**. Von Vorteil ist die kapazitive Einkopplung der elektrischen Energie, da hierdurch die Anordnung von Elektroden im Resonatorinneren entfallen kann. Die HF-Anregung liefert eine sehr homogene Gasentladung und gestattet den Impulsbetrieb zwischen 10 Hz und 100 kHz (vgl. Kapitel 2). Auch schnelllängsgeströmte Systeme erzielen somit einen sehr kompakten und stabilen Resonatoraufbau. Die hohe Modularität des Resonatorkonzeptes gestattet die Bereitstellung einer großen Anzahl von Laserleistungsklassen.

3.1.1.2 Quasistationäre Systeme

Die Bezeichnung **quasistationär** trifft für Laserstrahlungsquellen zu, bei denen kein direkter Gasfluss stattfindet, die aber im Unterschied zu den in Kapitel 3.1.1.3 diskutierten Sealed-Off-Systemen einen Gasaustausch lediglich in größeren Abständen benötigen. Die Kühlung des Lasergases erfolgt über Diffusion an den großflächigen Resonatorwänden, man spricht auch von **diffusionsgekühlten CO₂-Lasern**. Diese Systeme haben sich für industrielle Anwendungen sehr stark etablieren können, nicht zuletzt weil sie einen sehr geringen Gasbedarf (ein kompletter Gasaustausch erfolgt nach etwa 24 – 72 Betriebsstunden) und eine kompakte Bauform aufweisen. Bei dem in Bild 3.5 a dargestellten Slab-laser findet die HF-Gasentladung zwischen zwei großflächigen Kupferelektroden statt. Dabei bildet das Elektrodenpaar einen Wellenleiter für die sich ausbreitende Strahlung. Diese Laseranordnung gestattet eine besonders effektive Diffusionskühlung zwischen dem Entladungsraum und den wassergekühlten Elektroden. Verwendet wird ein **instabiler**

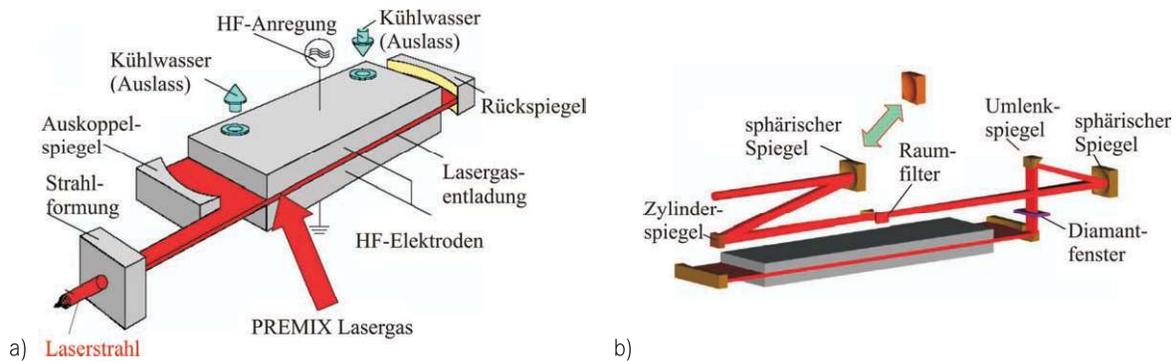


Bild 3.5 CO₂-Slablaser /Rofin2011-4/. a) Resonatoranordnung, b) Darstellung optischer Strahlengang

Resonator, der mit rotationsparabolisch geformten Spiegeln aufgebaut ist. Den vakuumseitigen Abschluss zum Resonator bildet ein Diamantfenster, welches hohen Leistungsdichten sehr gut standhalten kann. Durch diese Anordnung entsteht zunächst ein rechteckförmiges Strahlprofil, resultierend aus den geometrischen Abmessungen des Resonators. Mithilfe **externer Strahlformungskomponenten** kann dieser Rohstrahl in ein rotationssymmetrisches Strahlprofil transformiert werden. Der in Bild 3.5 b dargestellte Strahlengang integriert zusätzlich einen Raumfilter, der das Auskoppeln einer Grundmode mit hoher Strahlqualität sicherstellt. Aufgrund der HF-Anregung solcher Systeme kann die Laserleistung in weiten Grenzen variiert und mit hohen Wiederholraten gepulst werden. Moderne HF-Generatoren sind als sogenannte Selbstschwinger aufgebaut und bestehen aus einer HF-Verstärkerröhre /Rofin2004/. Einen entscheidenden Vorteil der diskutierten Resonatoranordnung stellt die Möglichkeit der Leistungsskalierung über die Elektrodenfläche dar. Dies führt zu einer vergleichsweise geringen Vergrößerung der Abmessung des Gesamtresonators.

3.1.1.3 Stationäre Systeme (Sealed-Off)

CO₂-Laser, bei denen das Gas nicht strömt und auch nicht in gewissen Abständen gewechselt werden muss, sind **stationäre oder sogenannte abgeschlossene Systeme** (Sealed-Off). Das Gasgemisch befindet sich mit dem erforderlichen Arbeitsdruck in einem abgeschlossenen Resonatorrohr. Daraus

resultiert die Notwendigkeit der Rekombination der **Dissoziationsprodukte im Gasgemisch**. Der Durchbruch dieser sehr effizienten Laserresonatoren gelang erst mit dem entscheidenden Prozessschritt der **Rückführung der Dissoziationsprodukte** CO und O₂ in das vibratorisch angeregte CO₂-Molekül. Dies wird durch die Zugabe von H₂ bzw. H₂ und O₂ zum eigentlichen Gasgemisch ermöglicht. Diese Elemente reduzieren den CO-Gehalt entsprechend der chemischen Gleichung



Es kann davon ausgegangen werden, dass die geringen Mengen Wasser durch die angelegte Hochspannung sich wiederum elektrolytisch in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufspalten. Des Weiteren bewirken die Elektroden durch ihren kontinuierlichen Abbrand das Freisetzen von Fremdstoffen in das laseraktive Medium, was zu einer Leistungsreduzierung führt. Zur Lösung dieser Problematik wird Elektrodenmaterial aus Platin eingesetzt, das bei Freisetzung als Katalysator wirkt und den chemischen Prozess wie folgt zur CO₂-Rückgewinnung unterstützt /Kneu2008/:



Die verwendeten Gasspezies und die exakten Mischungsverhältnisse sind das Knowhow der Laserhersteller und für die unterschiedlichen abgeschlossenen Systeme leicht verschieden. Typischerweise

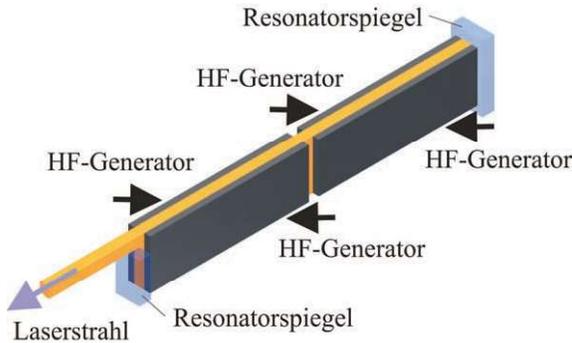
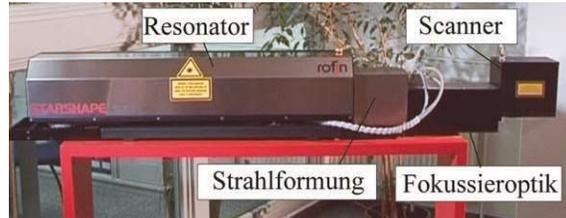


Bild 3.6 Grundanordnung eines Sealed-Off-CO₂-Lasers nach /synrad2012/



P_{\max} (cw): 600 W; Leistungsstabilität: $\pm 5\%$
 Polarisierung: linear; Strahlungsmodus: TEM₀₀; $M^2 \leq 1,2$
 Abmessungen (mit Scanner): (2 239 × 385 × 663,5) mm³

Bild 3.7 Kompakter Resonatoraufbau mit Strahlformung, Scanner und Fokussieroptik //Jena2011-3.1/

betragen die Gasgemischanteile 20 % CO₂, 20 % N₂ und 60 % Helium, wobei wenige Volumenprozent Sauerstoff und Wasserstoff beigemischt sind. Der Wasserstoff wird benötigt, um den Katalysator im Resonatorvolumen dauerhaft zu aktivieren. Der Fülldruck des Resonators beträgt in etwa $10^3 - 2,5 \cdot 10^3$ Pa. /Eich2010/

Die Ausgangsleistung von abgeschlossenen Systemen ist durch die Erwärmung des Gasgemisches, die zu einer thermischen Besetzung des unteren Laserniveaus führt, begrenzt. Effiziente Diffusionskühlkonzepte mit einem Wasserkühlkreislauf erlauben dennoch, Laserleistungen bis 1000 W bereit-

zustellen /Coherent2011/. Für Laserleistungen bis etwa 30 W können Resonatoren auch luftgekühlt mit Lüfteranordnungen betrieben werden. Mit optimierten Kühlkonzepten (z.B. axiale Gebläsekühlung) ist man in der Lage, die Luftkühlung noch bis zu Ausgangsleistungen von etwa 50 W erfolgreich einzusetzen. In Bild 3.6 ist der generelle Aufbau eines Sealed-Off-Lasers verdeutlicht. Das Beispiel zeigt einen instabilen Resonatoraufbau mit hybrider Wellenleiteranordnung. Die metallische Ausführung gestattet, ähnlich der in Bild 3.5 dargestellten Konfiguration, eine sehr gute Wärmeabfuhr der Verlustleistung und eine hohe Lebensdauer der Laser-

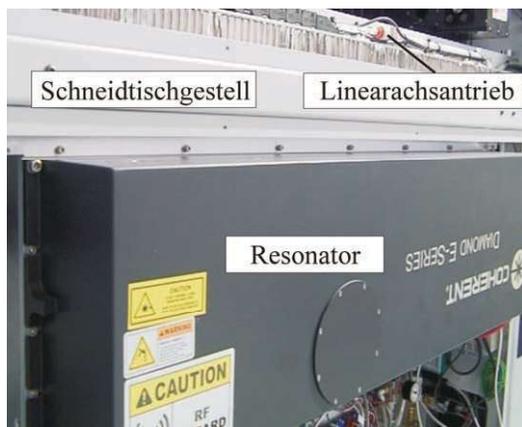


Bild 3.8 CO₂-Lasersystemintegration in eine Schneidanlage //Jena2011-3.2/

Parameter

P_{\max} (cw): 1 000 W, (pw): 2 500 W
 Leistungsstabilität: $\pm 5\%$
 Polarisierung: linear
 Strahlungsmodus: TEM₀₀
 $M^2 \leq 1,2$
 Divergenz: $< 1,5$ mrad
 Strahldurchmesser: 12 mm
 Pulsmodulation: bis 200 kHz
 Abmessungen: (1 497 × 384 × 471) mm³

gase. Die Einspeisung der benötigten elektrischen Leistung erfolgt über vier HF-Module.

Die optischen Komponenten des Resonators werden durch die beiden Endspiegel sowie ein Auskoppelfenster gebildet. Das ausgekoppelte rechteckförmige Strahlprofil wird durch Strahlformungselemente in einen rotationssymmetrischen Strahldurchmesser von 6 mm umgewandelt. Die erreichbaren Strahlqualitäten liegen im Bereich von $M^2 < 1,2$. /synrad2012/

Die hohe Kompaktheit und sehr gute Systemintegration solcher Sealed-Off-Systeme veranschaulichen Bild 3.7 und Bild 3.8. Der modulare Aufbau und die Reihenanordnung der Elemente Strahlformung, Fokussieroptik und Scanner sichern einen justierunanfälligen Strahlengang und erzielen einen hohen Integrationsgrad (Bild 3.7). Die komplette Lasereinheit erlaubt somit eine universelle Systemintegration in Flexible Fertigungs-Systeme (FFS).

Das Beispiel in Bild 3.8 stellt die Systemintegration in einer Anlage zum Schneiden metallischer und nichtmetallischer Materialien vor. Der 1000-W-Sealed-Off-Laser ist direkt in das Maschinensystem aufgenommen und erfordert keinen zusätzlichen Platzbedarf. Die Einbaulage gestattet kurze Wege zum Laserschneidkopf und hält die Anzahl zusätzlicher optischer Strahlführungselemente und den Justieraufwand sehr gering. Die zur Verfügung stehende Strahlleistung erlaubt das Bearbeiten einer breiten Palette an Materialien, z. B. Holz, Kunststoffe und metallische Werkstoffe (vgl. Kapitel 7.4).

3.1.2 Excimerlaser

Excimerlaser sind die leistungsstärksten UV-Impuls laser mit sehr großen Einzelimpulsenergien, bei großer Impulsbreite und relativ hohen Folgefrequenzen. Es sind Gasentladungslaser, die nur im Impulsregime betrieben werden können. Als aktives Medium werden Edelgas-Halogen-Verbindungen (z. B. ArF*, KrF*, XeCl*) und Edelgasdimere (z. B. Ar₂*, Kr₂*) verwendet. Unterstützend werden dem Gasgemisch auch Puffergase (He, Ne) zugemischt. Der Name **Excimer** ist auf die Abkürzung **Excited Dimer** zurückzuführen, wobei **Dimer** für ein zweiatomiges Molekül steht und **Excited** den angeregten Zustand bezeichnet. Diese speziellen Moleküle (Edelgase und Edelgas-Halogenide) können nur im angeregten Zustand existieren bzw. sind dort nur kurzzeitig stabil (Kennzeichnung *). Bei Rückfall in den Grundzustand zerfallen die Dimere wieder in die Atome und geben die charakteristische UV-Strahlung ab. Bild 3.9 stellt zwei verschiedene Energieschemata für das Edelgashalogenid KrF* dar. In Bild a) ist die Energie der Moleküle bzw. das Potenzial vom Abstand beider Atome dargestellt. Der Potenzialverlauf in Abhängigkeit von den Kernabständen nimmt mit zunehmendem Abstand kontinuierlich ab. Es zeigt auch, dass das Grundniveau von einer Instabilität geprägt ist. Die Potenzialkurve ist hier relativ flach, sodass die Moleküle thermisch instabil sind und spontan dissoziieren /Eich2010/. Aufgrund der kurzen Dissoziationszeit der Moleküle

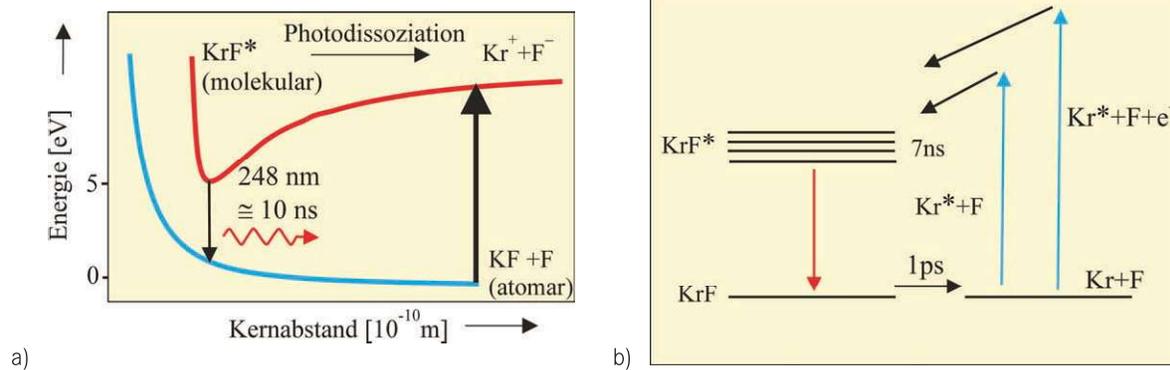


Bild 3.9 Energieniveauschemata des KrF*-Lasers /Eich2010/. a) Potenzialverlauf in Abhängigkeit von den Kernabständen, b) vereinfachtes Termschema