

# Was ist Licht?

## WAS NEWTON NOCH NICHT WUSSTE

Die Frage, was Licht ist, bewegt die Menschheit seit eh und je. Forscher, Philosophen und Mystiker aller Zeiten beschäftigten sich mit Lichtphänomenen und entwarfen unterschiedliche physikalische Modelle, um Licht zu beschreiben.

**Licht besteht aus Teilchen** | Die alten Griechen entwickelten bereits zwei widersprüchliche Theorien, mit denen sie Licht erklärten. Empedokles spricht von Augenstrahlen, die einen Gegenstand abtasten. Pythagoras stellte dagegen die These auf, dass Licht aus Teilchen besteht, die von einem Gegenstand ausgesandt werden.

Rund eineinhalb Jahrtausende später, im Jahr 1665, stellte Isaac Newton seine Korpuskulartheorie vor. Sie besagt ebenfalls, dass Licht aus Teilchen besteht. Einige Lichtphänomene lassen sich damit vollständig erklären, andere hingegen nur

teilweise. Was Newton damals noch nicht wissen konnte: Die Theorie des Lichts würde noch mehrmals verändert werden, bevor das Bild entstand, das heute anerkannt ist.

**Licht besteht aus Wellen** | Wenige Jahre nach dem Erscheinen der Korpuskulartheorie brachte der niederländische Astronom, Mathematiker und Physiker Christiaan Huygens eine neue Sichtweise ein. Huygens beschäftigte sich in seinen Forschungen unter anderem mit Wellen. Er studierte ihre Form und ihr Verhalten anhand von Wasserwellen und entwickelte daraus seine Wellentheorie und die Brechungsgesetze. Huygens schloss, dass auch Licht eine Welle sein muss.

Diese Sichtweise wurde von dem Schotten James Clerk Maxwell und dem Deutschen Heinrich Rudolf Hertz vervollständigt. Maxwell stellte 1871 die grundlegenden Gleichungen der Elektrodynamik auf. Hertz gelang 1888 der experimentelle Nachweis elektromagnetischer Wellen. Seither wissen wir, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist – wie Radiowellen und Röntgenstrahlen.

**Welle-Teilchen-Dualismus** | Zu Beginn des 20. Jahrhunderts postulierte der deutsche Physiker Max Planck, dass Energie in Form von elektromagnetischen Wellen nur in fest definierten Mengen – den so genannten Quanten – abgestrahlt werden kann. Albert Einstein führte kurz darauf den Begriff der Lichtquanten ein. Das Lichtquant wird auch als Photon bezeichnet.

Mit dieser Definition erklärte Einstein den Photoeffekt. Beim Photoeffekt lässt sich beobachten, dass Licht Elektronen aus einer Stahlplatte herausschlagen kann. Dabei zeigt Licht eine typische Teilcheneigenschaft: Das Photon muss eine genau definierte Energiemenge besitzen, um ein Elektron aus der Stahlplatte herausschlagen zu können. Andererseits

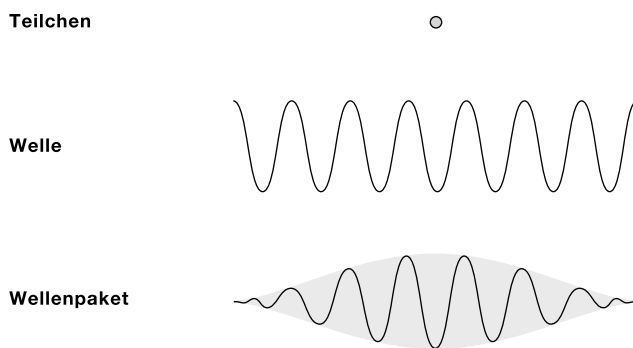


**Das Maß aller Dinge** Licht bewegt sich sehr schnell. Es flitzt mit rund 300 000 Kilometern pro Sekunde in der Luft von Ort zu Ort. Das entspricht etwa 7,5 Erdumrundungen. In gut einer Sekunde ist es beim Mond, und die Sonne erreicht es in etwa 500 Sekunden. Die Lichtgeschwindigkeit ist die höchste mögliche Geschwindigkeit.

zeigte Licht auch weiterhin typische Welleneigenschaften, etwa in Beugungs- und Interferenzmustern. So bildete sich der Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus. Für Berechnungen, die einzelne Photonen betrachteten, verwendete man die Formeln der Quantenmechanik. Wo Licht als Strahl vieler Photonen auftrat, mussten die Wellengleichungen erhalten.

**Wellenpakete** | Im heutigen Modell des Lichts sind die Gegensätze vereint. Das Modell beschreibt ein Photon als einen Wellenzug, auch Wellenpaket genannt. Wellenpakete sind elektromagnetische Wellen, die aber nicht unendlich fortlaufen, sondern räumlich geschlossen sind. Ihre Schwingungsamplitude beginnt bei null, wird dann immer größer und nimmt schließlich wieder ab.

Ein Wellenpaket enthält also eine bestimmte Menge an Energie, wie es die Quantenmechanik fordert, hat aber gleichzeitig Welleneigenschaften. Viele Wellenzüge bilden einen Lichtstrahl, sie lassen sich aber auch einzeln betrachten.

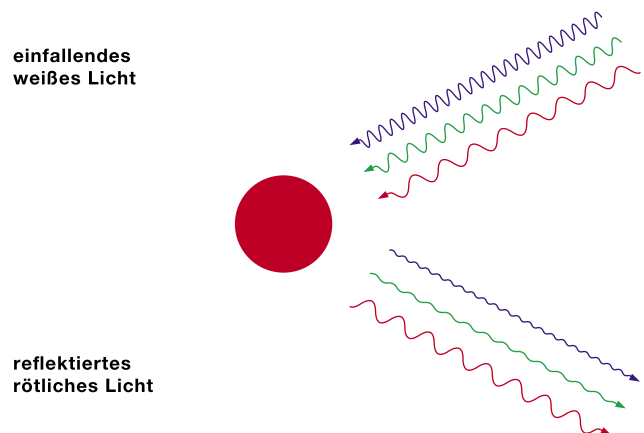


Lichtmodelle: Heute stellt man sich Photonen als Wellenpakete vor.

### LICHTPHÄNOMENE IM ALLTAG

Selbst wer sich noch nie gefragt hat, was Licht eigentlich ist, kennt seine wesentlichen Eigenschaften aus dem Alltag. Einige Lichtphänomene scheinen nicht weiter beachtenswert. Der Spiegel zeigt das Spiegelbild. Ja sicher, was sonst. Andere, wie der Regenbogen oder farbenprächtige Sonnenuntergänge, lassen einen entzückt staunen.

**Reflexion** | Wer sein Spiegelbild betrachtet, sich an glitzernden Wasserwellen erfreut oder feststellt, dass Tomaten rot sind, nimmt reflektiertes Licht wahr. Alles was nicht selbst leuchtet, wird erst dadurch sichtbar, dass es Licht reflektiert. Die Tomate ist also nur deshalb rot, weil sie aus dem weißen Sonnenlicht die roten Lichtanteile stärker reflektiert als die übrigen.



Ein rotes Objekt reflektiert die roten Lichtanteile stärker als die übrigen.

**Diamonds are a girl's best friend** Brechung und Reflexion – gäbe es diese Phänomene nicht, dann würden geschliffene Diamanten weder glitzern noch funkeln. Für die Damenwelt wären sie dann vermutlich kaum mehr von Interesse.

- 1 Nebelschwaden streuen das Scheinwerferlicht diffus.
- 2 Brechung: Der Löffel im Teeglas scheint einen Knick zu haben.
- 3 Interferenz: Schillernde Farben entstehen, wenn Licht gebeugt wird.
- 4 Dunkler Asphalt absorbiert das Sonnenlicht und heizt sich dadurch auf.



1

Bei der Reflexion entspricht der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel. Auch dies lässt sich intuitiv erfahren: Der Lichtpunkt, den ein Spiegel an die Wand wirft, bewegt sich, wenn der Spiegel bewegt wird. Denn dann verändert sich der Einfallswinkel des Lichts und damit auch der Ausfallswinkel. Aus diesem Grund verstellen wir auch die Rückspiegel im Auto, wenn vor uns eine größere oder kleinere Person auf dem Fahrersitz saß.

**Streuung** | Blaue Sommerhimmel, weiße Wolken und rote Sonnenuntergänge haben eines gemeinsam: Sie entstehen durch Streuung. Von Streuung spricht man, wenn Partikel Licht aufnehmen und es sofort wieder abgeben. Dabei spielen sowohl Wellenlänge als auch Schwingungsrichtung (Polarisation) eine Rolle. Das Licht setzt seinen Weg in anderer Richtung fort. Es wird zerstreut. Streuung zeigt sich auch im Lichtkegel, den ein Autoscheinwerfer in den Nebel wirft.

**Brechung** | Viele optische Bauteile nutzen die Gesetzmäßigkeiten der Brechung, um Lichtstrahlen abzulenken: Lupen und Brillengläser oder Linsen in Objektiven und Teleskopen sind nur einige Beispiele von vielen.

Gebrochen wird Licht immer dann, wenn es von einem Medium in ein anderes übergeht, das optisch dichter oder dünner ist, zum Beispiel aus der Luft in ein Wasserbecken. Im Wasser ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts kleiner als in der Luft, weil Wasser optisch dichter ist. Beim Übergang ins Wasser verändert der Lichtstrahl deshalb seine Richtung. Von außen betrachtet, bekommt der Strahl einen Knick. Man sagt, der Strahl wird gebrochen.

Wo Licht abgelenkt wird, lassen sich verschiedene Effekte beobachten: Kleines wird groß, Licht wird in seine Farben aufgefächert. Der Fotograf zoomt das Motiv heran. Der Zauberer lässt eine Münze im Wasserglas verschwinden, indem er den Betrachtungswinkel zum Publikum verändert.



2

**Interferenz zwischen Zeige- und Mittelfinger** Wer sofort erfahren möchte, wie ein Interferenzmuster aussieht, braucht dazu nur seine Hand und eine helle Lichtquelle – zum Beispiel eine Glühbirne. Man lege Zeige- und Mittelfinger so aneinander, dass sie sich fast berühren und halte sie nahe vor das Auge. Nun beobachte man das Licht durch den Spalt. Statt eines gleichmäßigen Verlaufes zeigen sich dort helle und dunkle Streifen. Die Streifen verlaufen parallel zu den Fingern und sind symmetrisch angeordnet. Ein Interferenzmuster!

**Beugung und Interferenz** | Beugungs- und Interferenzmuster entstehen dort, wo sich Lichtstrahlen überlagern. Zum Beispiel zeigen sich helle und dunkle Streifen auf einem Schirm hinter einem Spalt, auf dem man eigentlich eine einheitliche Lichtverteilung erwarten würde. Die Oberflächen von dünnen Schichten schimmern farbig, obwohl die Substanz selbst farblos ist, wie bei Seifenblasen. Kerzenflammen und Autoscheinwerfer werden zu Mustern aus hellen Punkten mit Farbverläufen, wenn man sie durch einen feinen Vorhang oder ein gespanntes Seidentuch betrachtet. In all diesen Mustern zeigt Licht seine Welleneigenschaften.

Schillernde Schmetterlinge, Kolibris und Pfauenfedern bekommen ihre leuchtenden Farben ebenfalls nicht durch besondere Farbpigmente. Die Federn oder Schuppen haben eine so fein strukturierte Oberfläche, dass das Licht an ihr gebeugt wird. Für den Betrachter schillert der Flügel oder das Gefieder dann in den schönsten Farben.



3

**Absorption** | Bei der Absorption werden Lichtstrahlen aufgenommen. Meist wird ihre Energie dabei in Wärme umgewandelt. Wie viel Licht und welche Wellenlängen absorbiert werden, hängt von der Beschaffenheit und der Farbe des Gegenstandes ab. Jeder kennt das: Dunkle Kleidung ist wärmer als helle. Träger schwarzer Anzüge kommen im Hochsommer ins Schwitzen, während Träger weißer Anzüge einen kühlen Kopf bewahren. Die Ursache: Schwarze Gegenstände absorbieren alle Farben des sichtbaren Lichtes; weiße Gegenstände reflektieren das Licht fast vollständig.

**Emission** | Die Emission ist das Gegenteil der Absorption. Sie beschreibt das grundlegende Lichtphänomen: die Aussendung von Licht, zum Beispiel bei Energieübergängen in Atomen. Hierbei entsteht das Strahlen, Leuchten, Schimmern, das uns durch den Tag folgt. Es kommt aus unzähligen Lichtquellen, die die Welt erhellen.



4

# CO<sub>2</sub>-Gaslaser

CO<sub>2</sub>-Laser haben sich als zuverlässige und belastbare Strahlquellen ihren festen Platz in der Materialbearbeitung erobert. Weltweit sind einige zehntausend Strahlquellen im Einsatz. Die meisten davon werden zum Schneiden und Schweißen genutzt. Die Wellenlänge des CO<sub>2</sub>-Laserstrahls liegt im fernen Infrarot und beträgt 10,6 Mikrometer.

Die Merkmale von CO<sub>2</sub>-Lasern auf einen Blick:

- großer Leistungsbereich, von unter 10 Watt bis über 20 000 Watt
- hohe Strahlqualitäten, M<sup>2</sup> von 1,1 bis 5,0 (K-Werte von 0,9 bis 0,2; Strahlparameterprodukt von 4 bis 17 Millimeter Milliradian)
- Betriebsart wählbar: Dauerstrichbetrieb oder gepulst

**Geschichte** | Die ersten CO<sub>2</sub>-Laser kamen in den 1970er Jahren aus den USA. Sie lieferten 500 Watt mit Strahlqualitäten im Bereich von M<sup>2</sup> gleich 5 (K gleich 0,2). Diese ersten Laseraggregate waren jedoch noch nicht sehr zuverlässig: Bei langer Betriebsdauer nahm ihre Leistung ab. Wer sich einen solchen Laser in die Fertigungshalle stellte, benötigte außerdem viel Platz. Kein Wunder, dass CO<sub>2</sub>-Laser in dieser Form kaum beachtet wurden und ein Nischendasein fristeten.



Das änderte sich Anfang der 1980er Jahre, als Maschinenbauer in Deutschland begannen, eigene Laser zu entwickeln. In enger Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten entstanden damals die ersten industrietauglichen CO<sub>2</sub>-Laser mit mehr als 1 Kilowatt Leistung. Seit dieser Zeit verzeichnet der CO<sub>2</sub>-Laser einen kontinuierlichen Aufstieg – sowohl in den Verkaufszahlen als auch in der Leistung.

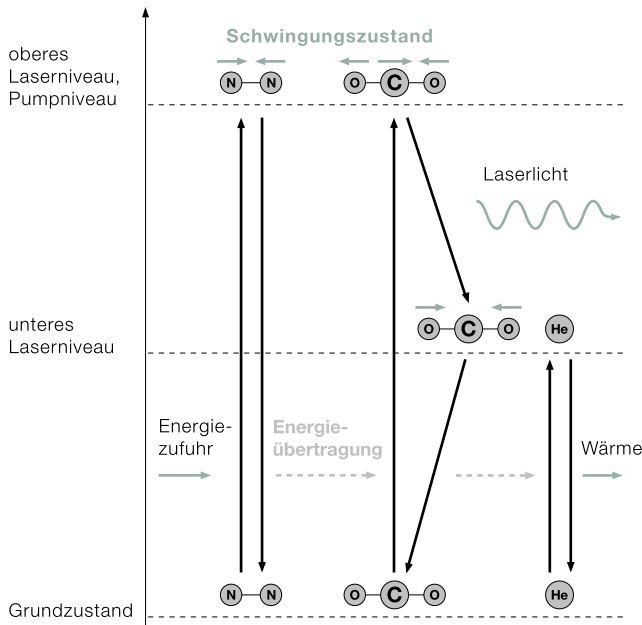
## WENN GASMOLEKÜLE LEUCHTEN

Sein Name verrät es bereits: Im CO<sub>2</sub>-Laser senden CO<sub>2</sub>-Moleküle das Laserlicht aus. Ein CO<sub>2</sub>-Molekül besteht aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen. Sie bilden eine Kette. Das Kohlenstoffatom sitzt zwischen den Sauerstoffatomen. Wenn das Molekül angeregt wird, beginnt es zu schwingen. Die verschiedenen Schwingungsformen entsprechen unterschiedlich hohen Energieniveaus. Der Laserprozess im CO<sub>2</sub>-Laser umfasst 4 Energieniveaus. Pumpniveau und oberes Laserniveau liegen sehr nahe beieinander.

Das laseraktive Medium besteht jedoch nicht nur aus CO<sub>2</sub>. Es ist ein Gemisch aus Helium (He), Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Helium und Stickstoff sind Hilfsgase. Sie unterstützen den eigentlichen Laserprozess im CO<sub>2</sub>-Molekül.

**Laserprozess im Detail** | Im Gasgemisch entstehen durch Gasentladung bei hoher Gleichspannung oder Hochfrequenz-Wechselspannung freie Elektronen, die die Stickstoff-Moleküle durch Stöße anregen. Die Stickstoff-Moleküle beginnen zu schwingen. Über Stöße geben sie ihre Energie an das CO<sub>2</sub>-Molekül weiter und heben es vom Grundzustand ins obere Laserniveau – ein Schwingungszustand, bei dem alle drei Atome des Moleküls in Bewegung sind. Beim Übergang in das untere Laserniveau emittiert das CO<sub>2</sub>-Molekül das Laserlicht mit einer Wellenlänge von 10,6 Mikrometern.

**Das lila Leuchten** Die Wellenlänge des CO<sub>2</sub>-Laserstrahls liegt im fernen Infrarot. Deshalb ist er für uns nicht sichtbar. Doch wenn ein CO<sub>2</sub>-Laser arbeitet, leuchtet das Gasgemisch lila. Woher kommt das Licht? Das lila-farbene Leuchten ist lediglich ein Nebeneffekt. Es stammt von Gasatomen und -molekülen, die in sehr hohe Energieniveaus angeregt werden und von dort in den Grundzustand übergehen.



Wechselspiel von Molekülen und Atomen: der Laserprozess im CO<sub>2</sub>-Laser

Von dort kehrt es in den Grundzustand zurück. Dabei wird Wärme frei. An dieser Stelle treten die Atome des Edelgases Helium in Aktion: Sie beschleunigen die Entleerung des unteren Laserniveaus durch Stöße mit den CO<sub>2</sub>-Molekülen, nehmen die Wärme auf und leiten sie ab.

### WIE ENTWIRFT MAN EINEN LASER?

CO<sub>2</sub>-Laser ist nicht gleich CO<sub>2</sub>-Laser: Wer sich auf dem Markt umschaute, findet viele Konzepte für den Aufbau eines Lasergeräts. Physiker und Ingenieure entwickeln diese Konzepte, indem sie die grundlegenden Bestandteile der Strahlquelle gestalten und für bestimmte Strahleigenschaften

wie Leistung, Strahlqualität, Mode und Betriebsart auslegen. Die wichtigsten Einflussgrößen sind:

- **Zusammensetzung des Lasergases** | Die Anteile von Kohlendioxid, Helium und Stickstoff wirken sich auf den Laserprozess aus. Bewährt hat sich ein Mischungsverhältnis CO<sub>2</sub> 5,5% zu N<sub>2</sub> 29,0% zu He 65,5%.
- **Form und Länge des Resonators** | Der Resonator ist ein Hohlraum, in dem sich das Lasergas befindet, zum Beispiel ein Rohr. Je größer das Resonatorvolumen ist, desto höhere Laserleistungen lassen sich erzeugen. Die Form des Resonators und der Spiegel bestimmen, welche Moden anschwingen.
- **Anregungsart** | Das Lasergas lässt sich mit Gleichspannung oder mit hochfrequenter Wechselspannung anregen.
- **Kühlung** | Das Lasergas muss sehr effektiv gekühlt werden, weil es sich beim Betrieb stark erwärmt und der Laserprozess bei Temperaturen ab 200 bis 300 Grad Celsius stoppt. Dazu wird das Gas entweder fortlaufend umgewälzt und außerhalb des Entladungsraums gekühlt, oder es wird über Diffusion gekühlt.

Ein Laserkonzept zu entwickeln kostet viel Zeit und Geld. Damit sich der Aufwand rechnet, muss das Konzept skalierbar sein. Das bedeutet: Höhere Laserleistungen müssen sich mit den gleichen physikalischen Prinzipien und dem gleichen Aufbau erzeugen lassen. Laserhersteller gehen einen ähnlichen Weg wie Automobilhersteller: Sie bieten viele unterschiedliche Modelle an, die auf wenigen Baureihen basieren.

Die folgenden Abschnitte stellen zwei Konzepte für CO<sub>2</sub>-Laser vor. Beide werden mit hochfrequentem Wechselstrom gepumpt. Die Kühlung und die Resonatorform sind jedoch verschieden.

## GESTRÖMTE CO<sub>2</sub>-LASER

Unter den geströmten CO<sub>2</sub>-Lasern ist der quadratisch aufgebaute ein alter Bekannter. Er ist kompakt, robust und zuverlässig und liefert – je nach Ausbaustufe – Laserstrahlen mit bis zu 20 Kilowatt Leistung.

Seine Entwicklungsgeschichte begann 1989. Damals konnte er bis zu 12 Millimeter dicke Stahlbleche schneiden. 16 Jahre später schaffte er bereits über 30 Millimeter. Leistung und Strahlqualität haben sich vervielfacht. Gewicht, Gasverbrauch und Betriebskosten sind stetig gesunken. In der Materialbearbeitung findet man ihn in Schneid- und Schweißanlagen, seltener in Verbindung mit Robotern.

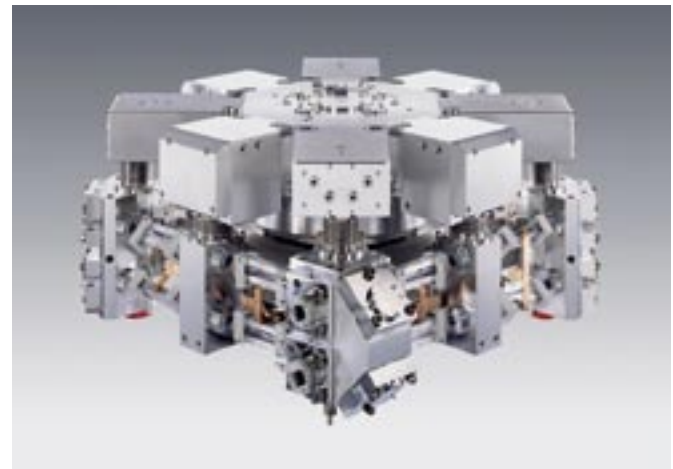
**Aufbau** | Das Lasergas befindet sich in Rohren aus Quarzglas, die die Entladungsstrecke bilden. Außen an den Rohren sitzen Elektroden, die die Anregungsenergie berührungslos in das Lasergas einkoppeln. Für Laserleistungen von mehreren Kilowatt muss die Entladungsstrecke mehrere Meter lang sein. Damit die Strahlquelle trotzdem kompakte Außenmaße hat, werden die Entladungsstrecken gefaltet und zum Beispiel quadratisch angeordnet. Umlenkspiegel reflektieren den Laserstrahl an den Ecken des Quadrats und verbinden die Entladungsstrecken optisch. Rückspiegel und Auskoppelspiegel vervollständigen den Resonator.

In der Mitte der Strahlquelle sitzt ein magnetgelagertes Turboradialgebläse, das das Lasergas ständig umwälzt. Das Gas strömt an den Ecken des Quadrates in die Entladungsröhre und wird in der Mitte jeder Seite wieder abgesaugt. In den Zu- und Ableitungsgehäusen umströmt das Gas wassergekühlte Wärmetauscher und kühlt ab. Der Gasmischer mischt das Lasergas aus Kohlendioxid, Helium und Stickstoff. Für den richtigen Betriebsdruck sorgt die Vakuumpumpe. Sie hält den Gasdruck bei etwa 100 Hektopascal.

**Strahleigenschaften** | Der ausgekoppelte Laserstrahl hat einen kreisförmigen Querschnitt und eine hohe Strahlqualität. Welche Moden anschwingen, hängt vom Durchmesser der Quarzröhren im Resonator sowie von der Form der Spiegel ab: Grundmode (Gauß-Mode), Ring-Mode oder Multi-Moden lassen sich mit diesem Konzept realisieren.

**Bewährtes Konzept** | Der Aufbau mit quadratisch gefaltetem Resonator hat sich in der Industrie zehntausendfach bewährt. Das Konzept hat folgende Vorteile:

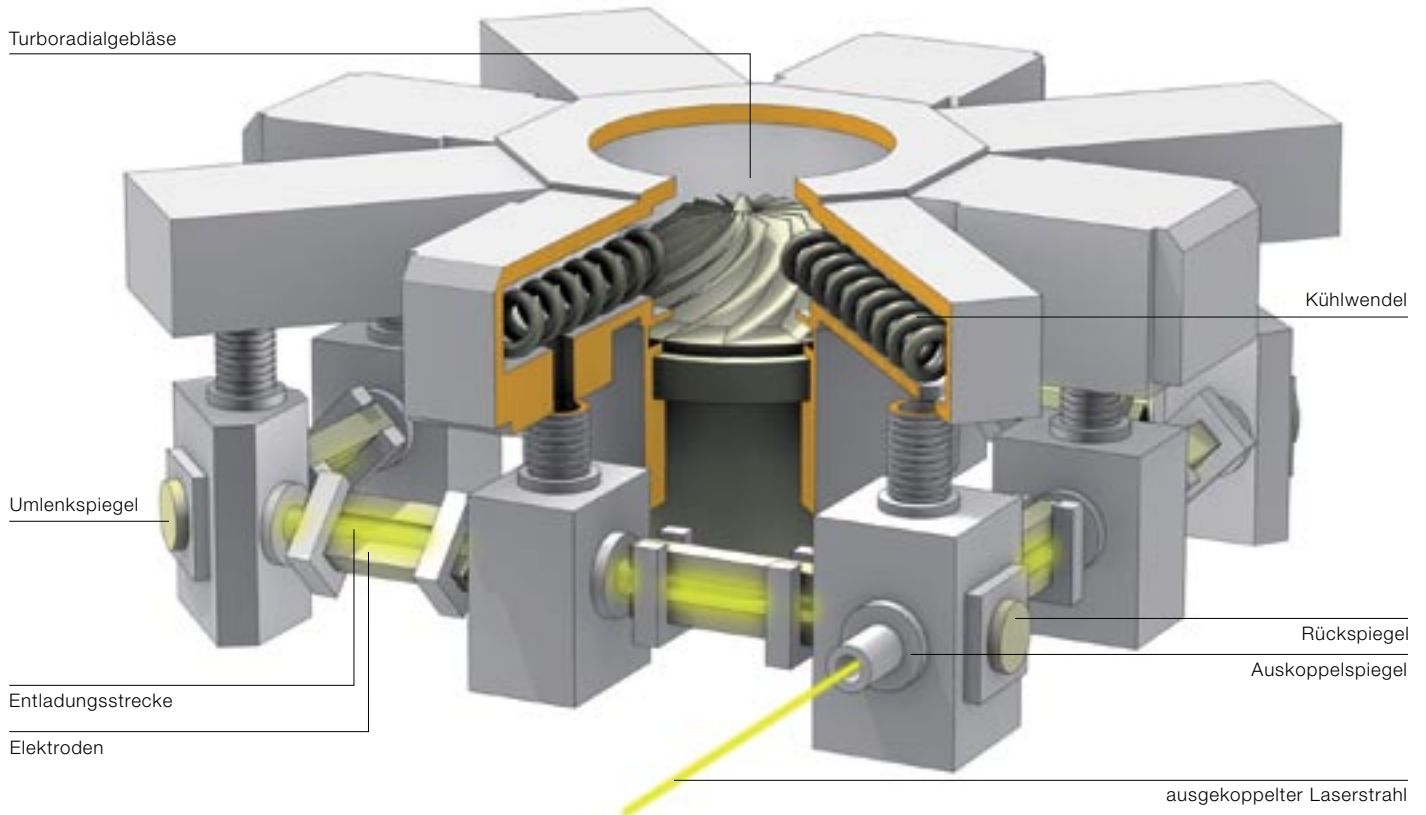
- kurze Gaswege zwischen Kühlung und Resonator
- keine Dejustage bei Erwärmung
- Robustheit: ungestörter Betrieb auch bei Erschütterungen oder Vibrationen
- verschleiß- und wartungsfreies Turboradialgebläse mit Magnetlagerung, das berührungslos läuft
- verschleißfreie Elektroden und hoher Wirkungsgrad beim Einkoppeln der Anregungsenergie



1

**Schallgeschwindigkeit im Resonator** Bei Hochleistungs-CO<sub>2</sub>-Lasern müssen Wärmeleistungen im Kilowattbereich pro Entladungsrohr abgeleitet werden. Dies gelingt nur, wenn das Gas sehr schnell ausgetauscht wird: Mit 200 Metern pro Sekunde strömt es deshalb in die Entladungsrohre.

Dort erhitzt es sich und wird weiter beschleunigt. Dabei erreicht es Geschwindigkeiten nahe der Schallgeschwindigkeit. Jedes Gasmolekül durchläuft die Entladungsrohre 30-mal pro Sekunde. Die Durchflugzeit durch die gesamte Entladungsstrecke liegt unter einer Millisekunde.



Quadratisch, leistungsstark, bewährt: Blick in das Innere eines geströmten CO<sub>2</sub>-Lasers mit quadratischem Aufbau

**Varianten** | Lasergeräte aus dieser Baureihe eignen sich für viele Anwendungen: vom Hochgeschwindigkeitsschneiden bis zur Oberflächenbearbeitung. Für höhere Laserleistungen werden Länge und Durchmesser der Entladungsstrecken variiert. Der quadratisch aufgebaute CO<sub>2</sub>-Laser mit 20 Kilowatt Laser-

leistung besitzt zum Beispiel 16 Entladungsstrecken. Diese sind in zwei übereinander liegenden Quadraten angeordnet.

Der Mode lässt sich über Begrenzungen im Strahlengang formen, zum Beispiel mit Blenden, deren Durchmesser kleiner ist als der Durchmesser der Entladungsrohre.



- 1 Der diffusionsgekühlte CO<sub>2</sub>-Laser: Im Rohr entsteht das Laserlicht, die kleine Gasflasche enthält Lasergas für bis zu 2 Jahre Betrieb.

### DIFFUSIONSGEKÜHLTE CO<sub>2</sub>-LASER

Keine Gasumwälzung lautet das Motto der diffusionsgekühlten CO<sub>2</sub>-Laser. Anders als bei geströmten CO<sub>2</sub>-Lasern gibt das Lasergas bei diffusionsgekühlten CO<sub>2</sub>-Lasern die Wärme über die Resonatorwände ab (Diffusionskühlung). Damit das Lasergas effektiv gekühlt wird, muss der Abstand zwischen den Resonatorwänden möglichst gering und die Wandfläche möglichst groß sein. Andererseits braucht es ein bestimmtes Gasvolumen, um hohe Laserleistungen zu erzielen.

Leistungen im Kilowattbereich und trotzdem kompakt aufgebaut, diese Forderungen erfüllt der so genannte Koax-Laser, eine weitere Strahlquelle aus der Familie der CO<sub>2</sub>-Laser.

**Aufbau** | Der Resonator besteht aus zwei ineinander gesteckten, koaxial angeordneten Metallrohren, die dem Laser seinen Namen geben. Die Metallrohre sind wassergekühlt. Der

Raum zwischen den beiden Rohren bildet die Entladungsstrecke. Darin befindet sich das Lasergas. Die Rohrwände dienen als Hochfrequenz-Elektroden und Kühlelemente zugleich.

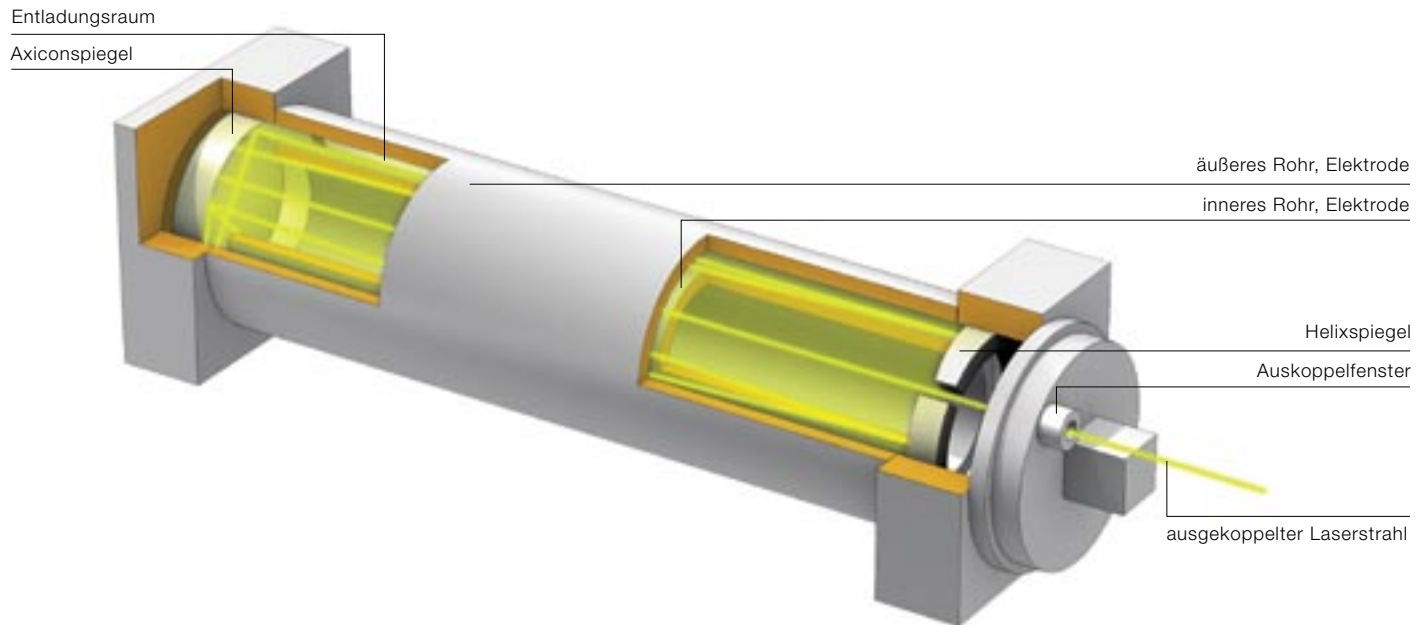
Am einen Ende des Resonators befindet sich der Rückspiegel, ein so genannter Axiconspiegel. Er besitzt eine ringförmige Spiegelfläche am Rand, die einen 45-Grad-Winkel zur Ebene bildet. Die gegenüberliegenden Spiegelflächen des Axiconspiegels bilden einen 90-Grad-Winkel. Anschaulich gesprochen bedeutet das: Ein gedachter Lichtstrahl trifft auf der einen Seite der Entladungsstrecke auf den Axiconspiegel, wird dann auf die gegenüberliegende Seite des Rings reflektiert und gelangt von dort wieder in den Rohrzwischenraum. Einfallender und reflektierter Strahl laufen parallel zueinander.

Am anderen Ende des Resonators trifft der Strahl auf einen Helixspiegel, der ebenfalls ringförmig ist. Seine Spiegelfläche hat eine Steigung. Dadurch reflektiert er den Strahl unter einem größeren Winkel. Der Strahl beginnt, zickzackförmig hin- und herzulaufen. Im Resonator entsteht so ein stabiles Strahlungsfeld. Der Helixspiegel besitzt eine Öffnung. Durch diese Öffnung wird ein Teil des Strahlungsfelds als Laserstrahl ausgekoppelt. Ein Diamantfenster vor der Öffnung trennt den Resonatorinnenraum von der Umgebung.

**Der Strahl** | Der ausgekoppelte Laserstrahl hat den Querschnitt eines Kreissegmentes. Dieser Rohstrahl lässt sich noch nicht so führen und fokussieren, wie es für die Materialbearbeitung erforderlich ist. Deshalb wird er noch in der Strahlquelle zu einem runden Strahl geformt, mit Hilfe mehrerer, zylindrisch gewölbter Spiegel. Wenn der Laserstrahl die Strahlquelle verlässt, ist er symmetrisch und hat eine hohe Strahlqualität von  $M^2$  gleich 1,1 ( $K$  gleich 0,9). Um den Mode des Strahls vollständig zu beschreiben, muss man die zwei Richtungen des Resonators betrachten: Die stabile und die



**Ein Fall für den Entgurker** Wenn der Laserstrahl aus dem Resonator des Koax-Lasers kommt, hat er den Querschnitt eines Kreissegmentes oder einer Gurke – wie die Entwickler gerne sagen. Folglich bezeichnen sie die Spiegel, die den Strahl anschließend rund machen, als Entgurker. Und dieser Begriff ist sogar international gebräuchlich: Die Kollegen in den USA sprechen vom Decucumberer.



Spezialist für mittlere Leistungen: Blick in das Innere eines diffusionsgekühlten CO<sub>2</sub>-Lasers

instabile. In der stabilen Richtung, zwischen den Rohrwänden, bildet sich ein Gauß-Mode. In der instabilen Richtung, um die Achse herum, hat der Mode keine eindeutige Form. Im Modeschuss des ungeformten Strahls zeigt sich ein unregelmäßiges Gebilde. Ein Gebirge, sagen die Entwickler.

**Viel versprechendes Konzept** | Diffusionsgekühlte CO<sub>2</sub>-Laser werden in dieser Form seit 2003 eingesetzt. Geeignet sind sie immer dann, wenn Kompaktheit im mittleren Leistungsbereich bei hoher Strahlqualität gefragt ist. Dies ist zum Beispiel bei Stanz-Laser-Kombimaschinen der Fall. In diesen Maschinen findet der Koax-Laser auf dem Maschinenrahmen Platz. Ein weiterer Vorteil dieses Lasers: Das Lasergas

ist bereits fertig gemischt und befindet sich in einer kleinen Gasflasche. Nach 72 Betriebsstunden wird das Lasergas im Resonator automatisch ausgetauscht. Die Menge ist so klein, dass das Gas in der Gasflasche für 1,5 bis 2 Jahre ausreicht.

Der Aufbau des Koax-Lasers gewährleistet Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb: Im Betrieb erhitzen sich die Resonatorrohre. Der Axiconspiegel kompensiert das Kalt-warm-Verhalten, weil er die einfallenden Strahlen immer parallel auf die andere Seite reflektiert. Wenn der Strahl leicht schräg auftrifft, wird er ebenso reflektiert. Der Laser läuft ungestört weiter.

Laserhersteller rechnen damit, dass sich der Koax-Laser im unteren bis mittleren Leistungssegment etabliert und vor allem für Einsteiger in die Laserbearbeitung attraktiv ist.

# Festkörperlaser

Festkörperlaser wurden bereits Anfang der 1970er Jahre in größerem Umfang für die industrielle Fertigung eingesetzt. Sie lieferten kurze Laserpulse mit Leistungen im Kilowattbereich und eigneten sich damit als präzises Werkzeug für



die Feinwerktechnik. Zu den ersten Anwendungen gehörten beispielsweise das Schweißen der feinen Schwingfedern in mechanischen Uhren und das Bohren der Uhrsteine – kleine Rubine, auf denen die Mechanik gelagert war.

**Vielfalt macht vielseitig** | Heute gibt es ganz verschiedene Festkörperlaser. Die Vielfalt macht vielseitig: Festkörperlaser schneiden, schweißen, löten, bohren, härten und beschriften. Eigenschaften und Merkmale auf einen Blick:

- kurze Grundwellenlängen von etwa 1 Mikrometer
- Die Grundwellenlänge lässt sich verändern:  
Es gibt auch grüne und ultraviolette Laser.
- Es gibt gepulste Festkörperlaser und cw-Laser, die im Dauerstrichbetrieb und im Pulsbetrieb arbeiten können.
- Festkörperlaser decken ein großes Leistungsspektrum ab. cw-Laser liefern Leistungen von einigen Kilowatt. Puls-laser erzeugen Pulse von bis zu einigen 100 Kilowatt.
- Die Strahlqualität variiert stark von Lasertyp zu Lasertyp. Sie reicht von mittel bis sehr hoch:  $M^2$  von 1,2 bis 74 (K-Werte von 0,8 bis 0,01; Strahlparameterprodukt von 0,4 bis 25 Millimeter Milliradiant)

**Vorteil Laserlichtkabel** | Die Laserstrahlen von Festkörperlasern mit Grundwellenlängen im Bereich von 1 Mikrometer lassen sich in Glasfasern einkoppeln und in Laserlichtkabeln transportieren, ohne dabei nennenswert an Qualität und Leistung zu verlieren. Die Vorteile des Laserlichtkabels: Lasergerät und Arbeitsstation sind räumlich unabhängig. Strahlteiler und Strahlweichen erlauben es, den Laserstrahl einer Strahlquelle über verschiedene Laserlichtkabel an mehrere Arbeitsstationen zu schicken.

- 1 Stablasers zum Punktschweißen aus den 1970er Jahren
- 2 Aktive Medien von Festkörperlaser: Stab, Scheibe und Faser

**Künstliche Kristalle** Die Kristalle, die im Festkörperlaser leuchten, werden künstlich hergestellt. Nur so bilden sich die vollkommen regelmäßigen Kristallgitter aus, die für den Laser gebraucht werden. In der Fachsprache heißen diese perfekten Kristalle Einkristalle.

**LICHT AUS KRISTALLEN UND GLÄSERN**

Das Laserlicht im Festkörper entsteht in fluoreszierenden Fremdionen, die in geringen Mengen in einen Wirtskristall oder in Gläser eingebunden sind. In Strahlquellen für die industrielle Materialbearbeitung werden vor allem Neodym (Nd) und Ytterbium (Yb) zum Dotieren verwendet. Die Wellenlängen ihres Laserlichts unterscheiden sich kaum. Sie liegen bei 1,06 Mikrometern (Neodym) und 1,03 Mikrometern (Ytterbium).

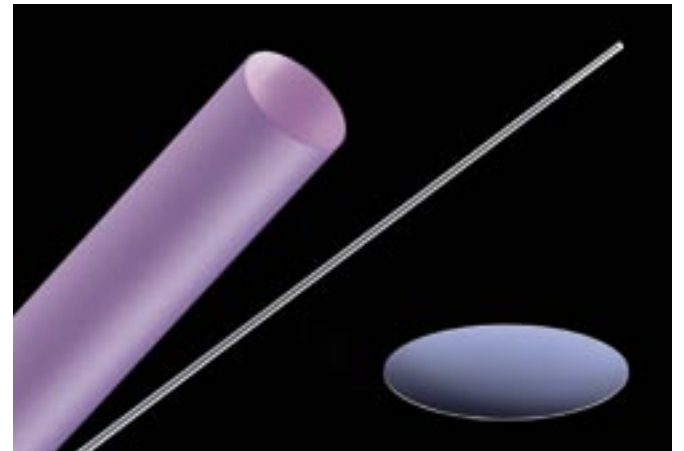
**Nd:YAG** | Die Neodym-Konzentration im Kristall eines Nd:YAG-Lasers liegt typischerweise bei einem Prozent. Die Neodym-Ionen machen aus dem durchsichtigen Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) einen rötlich schimmernden Kristall.

Der Laserprozess umfasst 4 Energieniveaus. Mit Licht aus Bogenlampen oder Diodenlasern werden die Elektronen der Neodym-Ionen in ein hohes Energieniveau angeregt. Von dort gehen sie sehr schnell in das obere Laserniveau über. Dabei geben sie Energie in Form von Wärme an den Wirtskristall ab. Anschließend folgt der Laserübergang in das untere Laserniveau, bei dem Laserlicht mit 1,06 Mikrometer Wellenlänge entsteht. Vom unteren Laserniveau gelangen die Elektronen in den Grundzustand zurück und geben Wärme ab.

Beim Neodym-Ion liegt das untere Laserniveau deutlich über dem Grundzustand. Deshalb ist es im Grundzustand des Kristalls nicht besetzt. Vorteil: Die Besetzungsinversion lässt sich leicht erreichen.

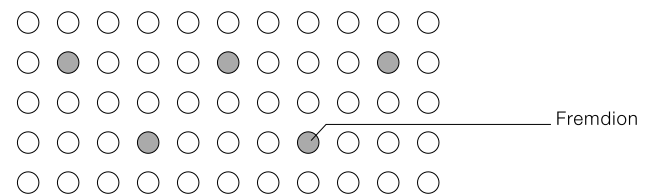
**Yb:YAG und Yb:Glas** | Ytterbium wird als Yb:YAG in Scheibenlasern und als Yb:Glas in Faserlasern eingesetzt und gewinnt daher zunehmend an Bedeutung.

Typische Ytterbium-Konzentrationen liegen im YAG bei etwa 10 Prozent. Die höhere Dotierung ermöglicht höhere Laserleistungen pro Volumen des aktiven Mediums.



2

Der Laserprozess des Ytterbium-Ions umfasst ebenfalls 4 Energieniveaus. Unteres Laserniveau und Grundzustand liegen allerdings sehr eng beieinander. Deshalb spricht man hier von einem Quasi-3-Niveau-System. Aus dem gleichen Grund genügt schon eine geringe Erwärmung, damit das untere Laserniveau besetzt ist. Um die Besetzungsinversion zu erreichen und die Laserleistung konstant zu halten, muss das aktive Medium gut gekühlt werden.



Dotierter Kristall: Im Kristallgitter, dem so genannten Wirtsgitter, sind Ionen eines anderen Elements eingebunden, so genannte Fremdionen.

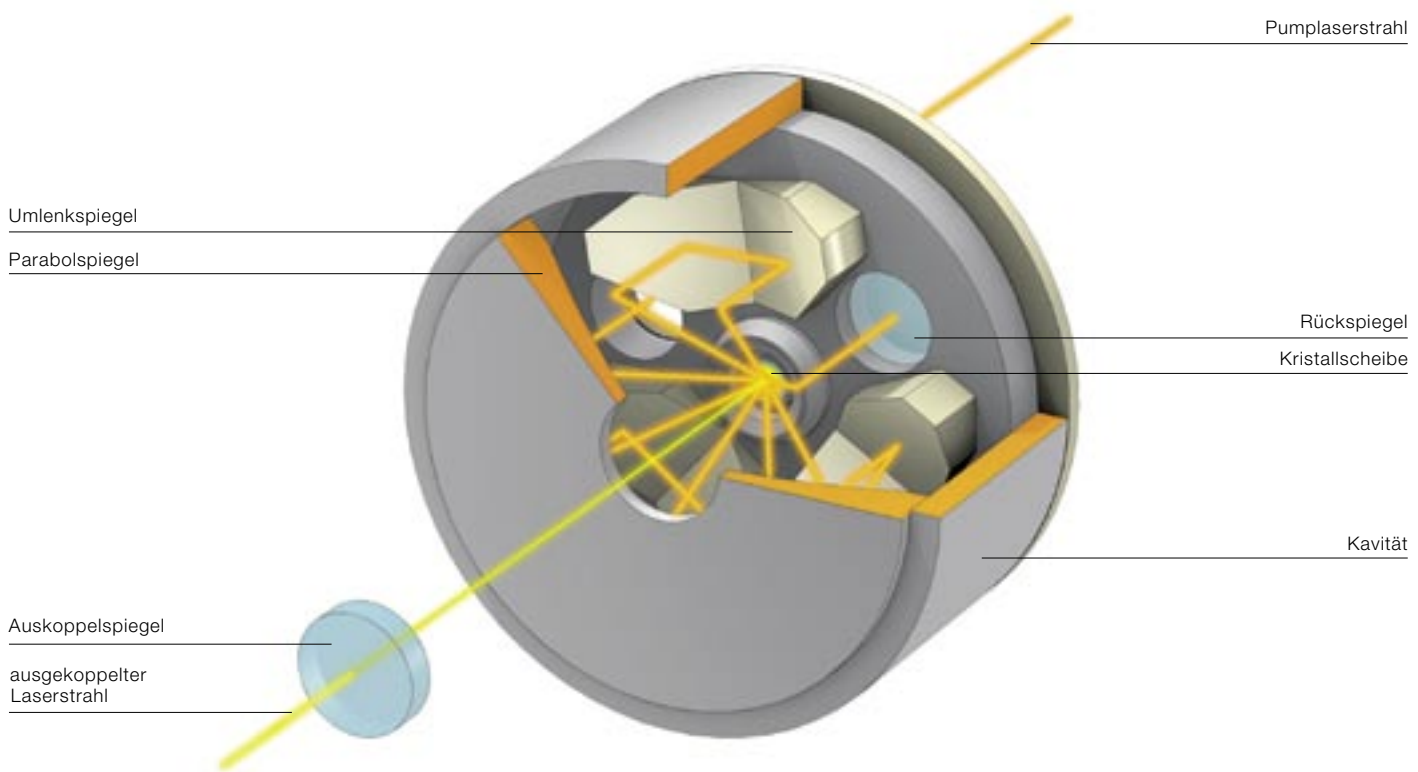
**Das grüne Leuchten** Der Kristall eines Yb:YAG-Scheibenlasers leuchtet im Betrieb grün, obwohl die Wellenlänge des Laserstrahls im infraroten Bereich liegt, und der Laserstrahl unsichtbar ist. Woher stammt das grüne Licht? Es stammt von Verunreinigungen im Kristall, die doppelt angeregt werden. Beim Übergang in den Grundzustand senden sie grünes Licht aus.

Das grüne Licht ist ein Abfallprodukt mit nützlichem Nebeneffekt: Der Pumpfleck auf der Scheibe leuchtet grün. Dadurch lässt sich der Laser ohne optische Hilfsmittel justieren. Man muss nur dafür sorgen, dass ein möglichst scharfer grüner Fleck entsteht, dann weiß man, dass der Pumpstrahl optimal eingestellt ist.

### HAUCHDÜNN: DER SCHEIBENLASER

Beim Scheibenlaser gingen die Entwickler den umgekehrten Weg wie beim Faserlaser: Der Stab wurde nicht durch eine feine, lange Faser ersetzt, sondern durch eine dünne, runde Scheibe. Die ersten Hochleistungs-Scheibenlaser kamen 2003 auf den Markt. Ihre Leistung hat sich innerhalb kurzer Zeit

verdoppelt. Experten versprechen sich viel von dieser Strahlquelle, weil ihr Laserstrahl die hohen Strahlqualitäten der CO<sub>2</sub>-Laser bei besseren Wirkungsgraden erreicht und dazu die Vorteile des Laserlichtkabels bietet. Im Labor erzeugen Laserhersteller bereits viele Kilowatt mit einer Scheibe. Die Scheiben von Seriengeräten liefern 2 Kilowatt und mehr.



Aus einem Pumplaserstrahl mit geringer Strahlqualität wird ein Laserstrahl mit hoher Strahlqualität: Blick in das Innere eines Scheibenlasers.

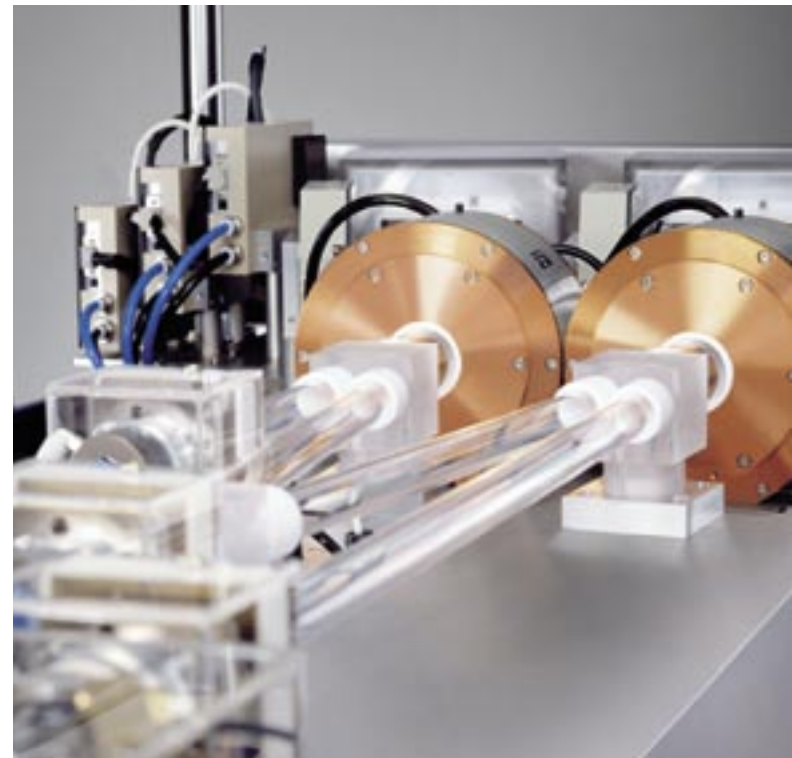
**Aufbau und Funktionsweise** | Das laseraktive Herzstück des Scheibenlasers ist eine kleine, hauchdünne Kristallscheibe aus Yb:YAG. Sie misst knapp 15 Millimeter im Durchmesser und ist nur 2 Zehntelmillimeter dick. Die Scheibe sitzt auf einer Wärmesenke, die die Wärme ableitet und so die Scheibe kühlt. Die gekühlte Rückseite der Scheibe ist verspiegelt. Sie reflektiert den Laserstrahl und das Pumplicht.

Als Pumplicht dient die Laserstrahlung von Diodenlasern. Sie wird auf einige Millimeter im Durchmesser gebündelt und auf die Scheibe gelenkt. Die Scheibe ist so dünn, dass sie nur einen Bruchteil der Pumpstrahlung bei einem Durchlauf absorbiert. Um die Absorptionslänge zu erhöhen, wird der Pumpstrahl insgesamt 16-mal durch die Scheibe geschickt. Dafür sind mehrere Umlenkspiegelpaare, ein Rückspiegel und ein Parabolspiegel zuständig.

Der Pumpstrahl nimmt folgenden Weg: Zunächst trifft er auf den Parabolspiegel, der ihn auf die Scheibe bündelt. Der Teil, den der Pumpstrahl ausleuchtet, wird als Pumpfleck bezeichnet. Der Pumpstrahl durchläuft die Scheibe, wird an der verspiegelten Rückseite reflektiert, durchläuft die Scheibe ein zweites Mal und tritt aus der Scheibe aus. Er trifft nun erneut auf den Parabolspiegel. Dieser bündelt ihn und lenkt ihn auf ein Umlenkspiegelpaar. Das Umlenkspiegelpaar schickt den Pumpstrahl ein Stück versetzt wieder auf den Parabolspiegel. Von dort geht es aufs Neue zur Scheibe, zum Parabolspiegel und so weiter. Nach 2 weiteren Umlenkspiegelpaaren und 8 Durchläufen durch die Scheibe gelangt der Strahl zum Rückspiegel, der ihn den ganzen Weg wieder rückwärts laufen lässt. Danach ist die Pumpstrahlung fast vollständig absorbiert.

Der Laserstrahl breitet sich senkrecht zur Scheibenfläche aus und verlässt die Kavität durch eine Bohrung in der Mitte des Parabolspiegels. Der Auskoppelspiegel des Resonators befindet sich außerhalb der Kavität.

**Strahleigenschaften** | Der Laserstrahl des Scheibenlasers zeichnet sich durch hohe Strahlqualitäten aus. Die Strahlqualität ist sehr viel höher als die eines Stablasers und leistungsunabhängig. Das liegt daran, dass sich in der Scheibe – anders als im Stab – nahezu keine thermische Linse bildet, die den Laserstrahl verformt. Zwischen der Ober- und Unterseite der Scheibe besteht zwar auch ein Temperaturunterschied. Der verläuft jedoch axial in Richtung des Laserstrahls und nicht radial, wie beim Stab. Damit ist der optische Weg für alle Photonen gleich, und der Strahl wird nicht deformiert.



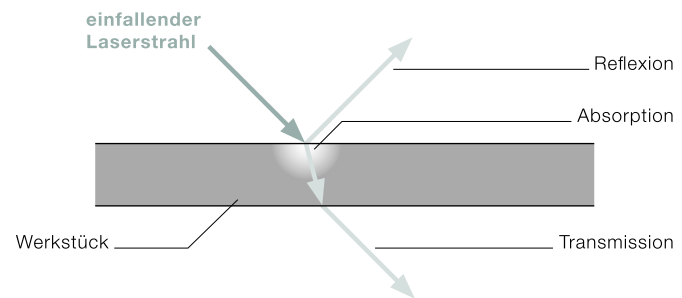
1

# Im Prinzip sind alle gleich

## LASER TRIFFT WERKSTÜCK

Alle Verfahren beginnen gleich: Der Laserstrahl trifft auf das Werkstück. Dann setzt der Bearbeitungsprozess ein, und schon sind Unterschiede da: In einer Maschine erzeugt der Laserstrahl eine Bohrung in der Turbinenschaufel eines Flugzeuges. In einer anderen schreibt er Informationen auf eine elektrische Zahnbürste. In der Flachbett-Laserschneidanlage schneidet der Laserstrahl ein Sägeblatt aus.

Jedes Verfahren beruht auf der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück. Was während der Bearbeitung geschieht, bestimmen die Eigenschaften des Werkstückes und die Eigenschaften des Laserstrahls.



Alle Verfahren beginnen gleich: Der Laserstrahl trifft auf das Werkstück.



**Im Werkstück** | Das Werkstück absorbiert einen Teil des Laserstrahls und reflektiert einen zweiten Teil. Ein weiterer Teil durchdringt das Werkstück ohne Wechselwirkung (Transmission). Das Verhältnis von Absorption, Reflexion und Transmission ändert sich von Werkstoff zu Werkstoff. Bei Metallen gibt es beispielsweise keine Transmission.

Entscheidend ist der Absorptionsgrad: Er hängt von der Wellenlänge, der Polarisierung und dem Auftreffwinkel des Laserstrahls ab sowie von Werkstoff, Temperatur, Aggregatzustand, Geometrie und Oberfläche des Werkstückes. Je höher der Absorptionsgrad ist, desto mehr Energie gelangt in das Werkstück und steht dann für die Bearbeitung zur Verfügung. Fachleute sprechen vom Einkoppeln der Energie.

Die eingekoppelte Energie erwärmt das Material. Dabei gilt es, an der Bearbeitungsstelle mehr Wärme zu erzeugen, als durch Wärmeleitung an das umgebende Material abfließen kann (Wärmestau). Die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs beeinflusst den Bearbeitungsprozess folglich sehr stark. Je geringer sie ist, desto stärker kann das Werkstück auch mit niedrigen Leistungen lokal erwärmt werden und desto leichter

- 1 Scannerschweißen mit dem Laser: Hier wirkt der Laserstrahl als thermisches Werkzeug.

lässt es sich bearbeiten. Ein Beispiel: Kupfer lässt sich schlechter schweißen als Stahl, weil es einen geringen Absorptionsgrad und gleichzeitig eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat. Es nimmt wenig Energie auf und leitet diese schnell ab.

Als thermisches Werkzeug kann der Laserstrahl Material

- erwärmen, zum Härten oder Löten,
- schmelzen, zum Schneiden oder Schweißen,
- verdampfen oder zersetzen, zum Bohren oder Strukturieren und
- ionisieren, das heißt Plasma erzeugen, zum Beispiel beim Tiefschweißen.

Was im Werkstück geschieht, hängt vom Werkstoff ab. Metalle kann der Laser in alle oben genannten Aggregatzustände versetzen. Einige Kunststoffe bilden dagegen keine Schmelze und keinen Dampf, sondern zersetzen sich, wenn sie stark erhitzt werden. Organische Stoffe wie Holz reagieren bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff und verbrennen.

Bei Verfahren wie dem Strukturieren oder Abtragen in Metallen soll möglichst wenig Schmelze erzeugt werden. In diesem Fall wird so viel Energie ins Material eingekoppelt, dass es sofort verdampft. Dieser Vorgang heißt Sublimieren.

Direkte Dissoziation oder Photodissoziation lautet ein Stichwort für die Mikrobearbeitung mit dem Laser. Dabei löst der Laserstrahl die Bindung zwischen Atomen und Molekülen im Material direkt, ohne Wärme zu erzeugen. Dies ermöglicht filigrane, präzise Bearbeitungen – ohne Verzug und ohne Rückstände wie Spritzer oder Schmelzablagerungen.

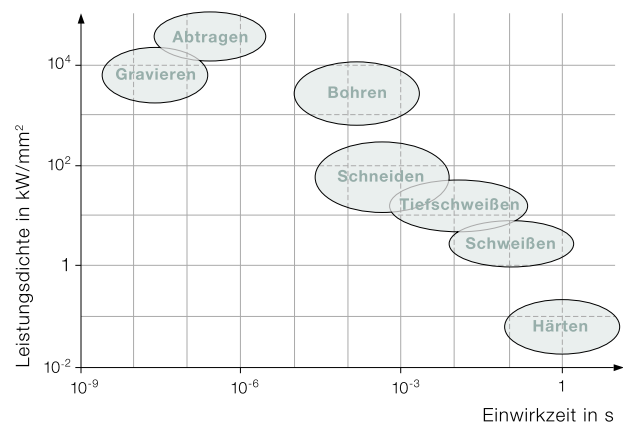
**Leistungsdichte und Einwirkzeit** | Je weiter der Aggregatzustand des Werkstoffs während der Bearbeitung vom Ausgangszustand entfernt ist, desto mehr Energie erfordert

**Geballte Energie** Laserlicht lässt sich sehr gut fokussieren. Beispiel: Die Leistung eines CO<sub>2</sub>-Lasers mit 2,6 Kilowatt kann auf einen Brennfleck mit 0,15 Millimeter Durchmesser gebündelt werden. Die mittlere Leistungsdichte beträgt dann 15 Megawatt pro Quadratzentimeter. Zum Vergleich: Eine Kochplatte mit 1 Kilowatt Leistung und 15 Zentimeter Durchmesser hat eine mittlere Leistungsdichte von 5,6 Watt pro Quadratzentimeter. Die Leistungsdichte des Lasers ist rund 2,7 Millionen Mal höher.

der Bearbeitungsprozess. Das bedeutet: Erst wenn eine bestimmte Energiemenge überschritten wird, beginnt der gewünschte Prozess. Man spricht in diesem Zusammenhang von Bearbeitungsschwellen.

Jeder kennt das aus dem Alltag: Einen Topf voll Wasser zum Kochen zu bringen, dauert einige Minuten. Bis das Wasser im Topf vollständig verdampft ist, dauert es wesentlich länger. Das liegt daran, dass zum Verdampfen sehr viel mehr Energie benötigt wird als zum Erhitzen. Mit 4,2 Joule lässt sich ein Gramm Wasser um ein Grad erwärmen. Es braucht aber 2 256 Joule, um ein Gramm 100 Grad Celsius heißes Wasser in 100 Grad heißen Dampf zu verwandeln.

In der Materialbearbeitung muss der Laserstrahl die benötigte Energie für den Bearbeitungsprozess mitbringen. Physikalisch ausgedrückt ist Energie Leistung mal Zeit, also die Leistung des Laserstrahls, die über einen Zeitraum auf das Werkstück einwirkt. Meist soll dieses nur lokal bearbeitet werden. Die Leistung wird auf einer kleinen Fläche benötigt.



Jedes Verfahren erfordert bestimmte Leistungsdichten und Einwirkzeiten.



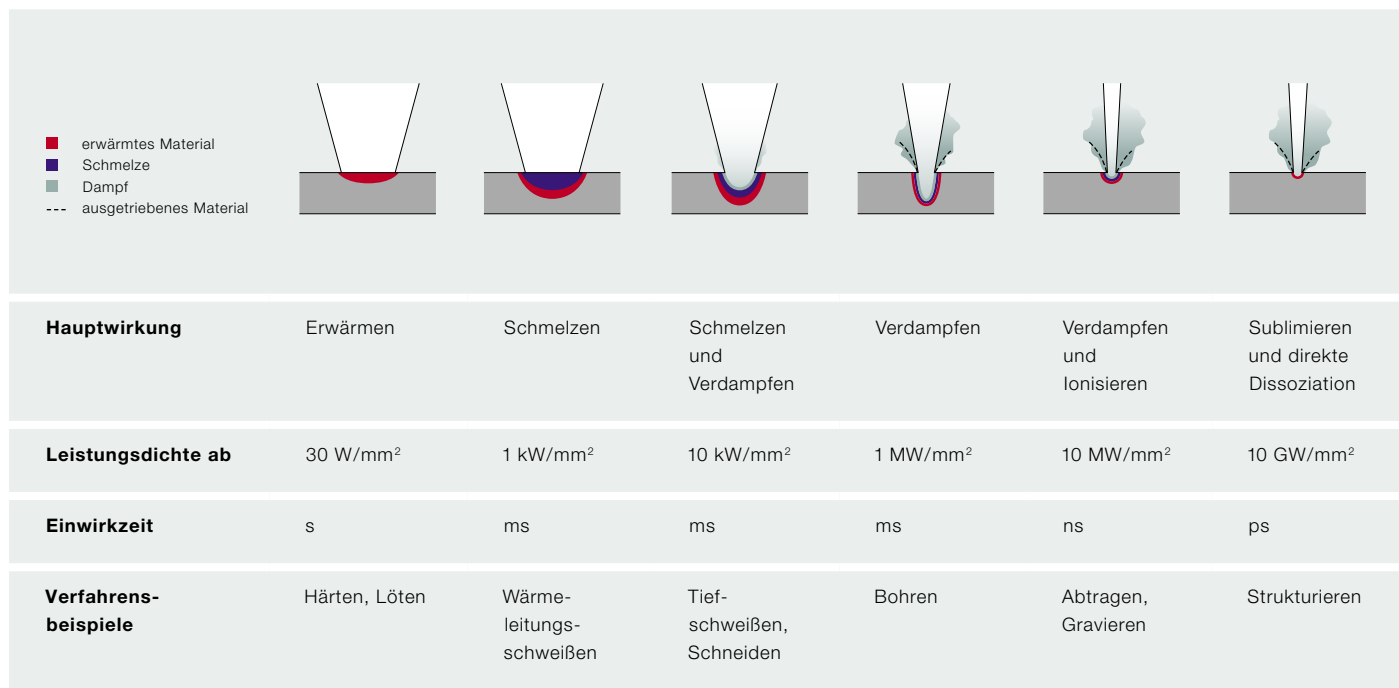
**Von fest nach gasförmig** Beim Bohren oder Strukturieren macht der Laser feste Stoffe gasförmig, ohne sie zu schmelzen. Dieser Vorgang nennt sich Sublimieren. Jeder, der nasse Wäsche bei Minusgraden im Freien aufhängt, kann diesen Vorgang beobachten: Die Wäsche gefriert zunächst. Das Wasser ist fest. Nach einiger Zeit ist die Wäsche trocken. Warum? Das Eis geht direkt in den gasförmigen Zustand über, ohne davor zu schmelzen. Es sublimiert.

Die Leistung pro Fläche ist die Leistungsdichte. Leistungsdichte und Einwirkzeit bestimmen, welche Energie pro Fläche in das Werkstück eingekoppelt wird. Diese beiden Parameter machen den Unterschied zwischen Bohren und Schweißen, zwischen Schneiden und Beschriften.

Die Leistungsdichte lässt sich über Laserleistung und Fokussierung steuern. Höhere Leistungen und kleinere Fokusse erzeugen höhere Leistungsdichten. Die Einwirkzeit lässt sich bei gepulsten Lasern über die Pulsdauer anpassen und im Dauerstrichbetrieb über die Vorschubgeschwindigkeit.

### VIELE VERFAHREN, VIELE VORTEILE

In der Materialbearbeitung haben sich viele Laserverfahren etabliert. Sie lassen sich in drei Kategorien einteilen. Erstens: Die Materialmenge bleibt unverändert; das Material wird geschmolzen oder in seiner Struktur verändert. Beispiele sind Schweißen und Beschriften durch Farbumschlag. Zweitens: Material wird entfernt. Beispiele sind Trennen, Abtragen und Strukturieren. Drittens: Die Materialmenge wird vermehrt, durch auftragende, generierende Prozesse. Beispiele sind Schweißen mit Zusatzstoffen, Beschichten und Laserformen.



Leistungsdichte und Einwirkzeit bestimmen, wie viel Energie ins Werkstück gelangt und welche Wirkung sie erzielt – hier am Beispiel von Metallen.

- 1 Laser sind flexibel und liefern hohe Qualität. Das zeigen diese laser-geschnittenen Blechteile mit Dicken zwischen 2 und 20 Millimetern.

**Warum Laser?** | Manchmal bieten Laserverfahren konkurrenzlose Lösungen. So eine Lösung ist das Einschweißen der Sollbruchmembran im Airbag: Auf der einen Seite der Membran befindet sich Sprengstoff. Dieser darf sich beim Schweißen nicht entzünden. Die Frage „Warum Laser?“ ist in diesem Fall schnell beantwortet: Es geht nicht anders. Nur der Laser kann die Energie so gezielt auf kleinste Flächen einbringen, dass der umgebende Werkstoff nahezu kalt bleibt.

**Die Vorteile** | Viel häufiger gibt es jedoch Alternativen zum Laser, etwa beim Laserschneiden von Blechen. Hier eroberte sich der Laserstrahl seinen festen Platz neben dem Stanzen.

Die Gründe liegen in den Vorteilen, die der Laser bietet:

- **Laser arbeiten berührungslos** | Das Werkstück wird nicht mechanisch belastet. Der Laserstrahl verschleißt nicht wie andere Werkzeuge.
- **Laser arbeiten präzise** | Sie können feine Konturen und Strukturen mit hoher Genauigkeit erzeugen.
- **Laser erwärmen das Material nur lokal** | Die Wärmeinflusszone ist sehr gering. Das restliche Werkstück wird minimal oder gar nicht thermisch belastet.
- **Laser sind flexibel** | Mit einem Werkzeug lassen sich ganz unterschiedliche Formen und Konturen erzeugen. An einer Maschine lassen sich verschiedene Verfahren einsetzen, etwa wenn Blechteile ausgeschnitten und gleich beschriftet werden.

**Wirtschaftlichkeit und Qualität** | Wirtschaftlichkeit und Qualität sind die entscheidenden Faktoren bei der Entscheidung gegen oder für die Laserbearbeitung. Den Vorteilen der

Laserbearbeitung stehen hohe Investitionskosten gegenüber: Das Lasergerät und die zugehörige Anlage kosten mehr als konventionelle Maschinen. Diesen Nachteil gleicht der Laser mit folgenden Stärken aus:

- **Laser sind schnell** | Oft ist die Prozessgeschwindigkeit höher als bei konventionellen Verfahren. Höhere Produktivität gleicht die hohen Investitionskosten aus.
- **Laser liefern Qualität** | Die Qualität der Laserbearbeitung ist oft besser als die der konventionellen Verfahren.
- **Laser verringern Nacharbeit** | oder machen sie ganz überflüssig. Beim Laserschweißen fallen Arbeitsschritte wie Richten oder Verschleifen meist weg. Das beschleunigt die Fertigung und erhöht die Produktivität.

**Image** | Zuletzt zählt auch das Image. Laserbearbeitung ist hochwertig, modern und zeitgemäß. Auch das ist für viele Unternehmen ein Grund, auf den Laser zu setzen.





Das Schneiden gehört sicher zu den bekanntesten Laserverfahren. Schon in den 1970er Jahren wurden die ersten Laser zum Schneiden eingesetzt – damals CO<sub>2</sub>-Laser mit 200 bis 500 Watt Leistung. In den folgenden Jahrzehnten etablierte sich das Verfahren in der industriellen Fertigung.

Die Blechbearbeitung war und ist das wichtigste Einsatzgebiet. Beim Schneiden von flachen Blechtafeln, tiefgezogenen Teilen oder Profilen macht dem Laser so schnell kein konventionelles Verfahren etwas vor. Außer Blechen schneidet der Laser auch andere Werkstoffe, etwa Kunststoffe, Glas, Keramiken und Halbleiter, aber auch Textilien, Holz und Papier. Entsprechend bunt ist das Anwendungsspektrum.

Jenseits von massiven, dicken Werkstoffen und großen Teilen liegt die Fein- und Mikrobearbeitung im Trend. Experten gehen davon aus, dass Anwendungen in diesem Bereich in den nächsten Jahren stark zunehmen werden.

## **SCHNEIDEN IST NICHT GLEICH SCHNEIDEN**

Heute erledigt der Laser ganz unterschiedliche Schneidaufgaben. Sie reichen von der mikrometergenauen Schnittfuge im hauchdünnen Halbleiterchip bis zum Qualitätsschnitt im 30 Millimeter dicken Stahlblech. Dazu werden verschiedene Schneidverfahren genutzt.

**Prinzip** | Wo der fokussierte Laserstrahl auf das Werkstück trifft, erwärmt er das Material so stark, dass es schmilzt oder verdampft. Sobald er das Werkstück vollständig durchdrungen hat, kann der Schneidprozess beginnen: Der Laserstrahl bewegt sich entlang der Teilekontur und schmilzt das Material fortlaufend auf. Die Schmelze wird meist von einem Gasstrom nach unten aus der Schnittfuge geblasen. Dadurch entsteht ein enger Schnittspalt zwischen Teil und Restgitter. Der Schnittspalt ist kaum breiter als der fokussierte Laserstrahl selbst.

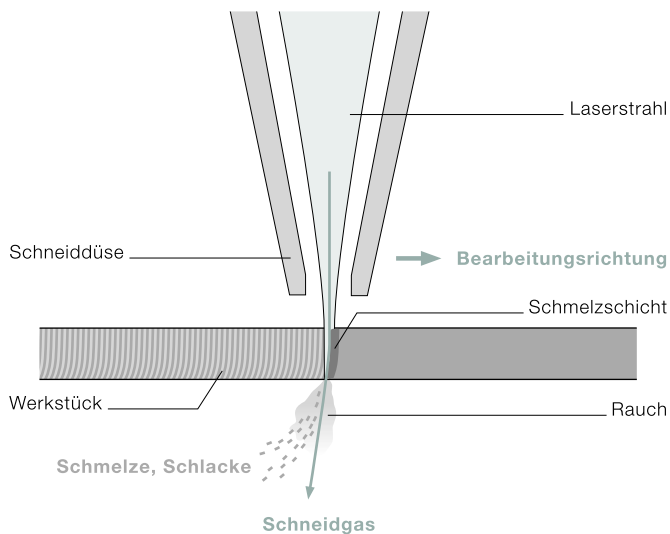
- 1 Dieses Fahrrad ist nur 1,5 Millimeter dick, das Teil darunter hingegen 25 Millimeter. Beide hat der Laserstrahl geschnitten.

**Brennschneiden** | Brennschneiden ist ein Standardverfahren, mit dem überwiegend Baustahl geschnitten wird. Zum Brennschneiden wird Sauerstoff als Schneidgas eingesetzt.

Der Sauerstoff wird mit Drücken von bis zu 6 bar in die Schnittfuge geblasen. Dort reagiert das erwärmte Metall mit dem Sauerstoff: Es verbrennt und oxidiert. Die chemische Reaktion setzt sehr viel Energie frei – bis zum Fünffachen der Laserenergie – und unterstützt den Laserstrahl.

Brennschneiden erlaubt hohe Schneidgeschwindigkeiten und das Bearbeiten dicker Bleche. Baustahl lässt sich beispielsweise in Dicken bis über 30 Millimeter schneiden.

Allerdings hat das Verfahren auch Nachteile: Die Schnittfläche ist mit einer Oxidschicht bedeckt. Wenn Teile anschließend lackiert oder pulverbeschichtet werden, muss die Oxidschicht



Prinzip des Laserschneidens: Der Laserstrahl schmilzt das Werkstück auf. Das Schneidgas bläst Schmelze und Schlacke aus dem Schnittspalt.

abgetragen werden. Auf der oxidierten Oberfläche haften Lack und Beschichtung schlecht. Wenn die Schicht aufbricht, ist das Teil nicht mehr vor Korrosion geschützt.

**Schmelzschneiden** | Schmelzschneiden ist ebenfalls ein Standardverfahren, mit dem Metalle bearbeitet werden. Man kann damit aber auch andere schmelzbare Werkstoffe schneiden, zum Beispiel Keramiken.

Als Schneidgas dient Stickstoff oder Argon. Es wird mit Drücken zwischen 2 und 20 bar durch die Schnittfuge getrieben. Argon und Stickstoff sind inerte Gase. Das heißt, sie reagieren nicht mit dem aufgeschmolzenen Metall im Schnittspalt, sondern blasen es nur nach unten aus. Gleichzeitig schirmen sie die Schnittkante von der Luft ab.

Stickstoff ist für fast alle Metalle geeignet. Die Ausnahme: Titan. Titan reagiert sowohl mit Sauerstoff als auch mit Stickstoff heftig. Daher wird es mit Argon geschnitten.

Schmelzschneiden hat einen großen Vorteil: Die Kanten bleiben oxidfrei und müssen nicht mehr nachbearbeitet werden. Allerdings steht zum Schneiden allein die Energie des Laserstrahls zur Verfügung. Deshalb sind die Schneidgeschwindigkeiten nur in dünnen Blechen so hoch wie beim Brennschneiden. Auch das Einstechen wird erschwert. Einige Schneidanlagen bieten die Möglichkeit, mit Sauerstoff einzustechen und dann mit Stickstoff weiterzuschneiden.

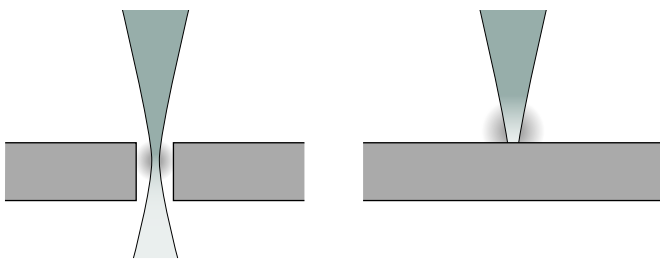
**Variante Druckluftschneiden** | Wer kein Gas kaufen möchte, kann zum Schneiden dünner Bleche auch Druckluft einsetzen. Druckluft mit 5 bis 6 bar genügt, um die Schmelze aus dem Schnittspalt zu blasen. Luft besteht zu 80 Prozent aus Stickstoff. Deshalb ist Druckluftschneiden überwiegend ein Schmelzschneidverfahren. Auf den ersten Blick erscheint Druckluftschneiden als eine kostengünstige Alternative zum

- 1 Dieser sublimiergeschnittene Stent hält Arterien offen.
- 2 Kunststofffolien wie diese werden ebenfalls sublimiergeschnitten.

Schneiden mit Stickstoff. Luft ist zwar umsonst, sie muss aber komprimiert, getrocknet und entölt werden. Damit relativiert sich der Kostenvorteil gegenüber Stickstoff.

Welche Blechdicke geschnitten werden kann, hängt vom Druck ab, den das Druckluftnetz zur Verfügung stellt, und von der Laserleistung. Mit 5 Kilowatt Laserleistung und 6 bar Druck lässt sich etwa Blech mit einer Dicke von 2 Millimetern gratfrei schneiden. Insgesamt werden die Schnittkanten rauer als beim Schmelzschnitten mit Stickstoff. Die besten Schneidergebnisse liefert Druckluftschneiden in Aluminium.

**Variante plasmaunterstützt** | Beim plasmaunterstützten Schmelzschnitten nutzt man einen Effekt, der auch beim Laserschweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern auftritt: Wenn man die Parameter geschickt wählt, bildet sich im Schnittspalt eine Plasmawolke. Sie besteht aus ionisiertem Metaldampf und ionisiertem Schneidgas. Die Plasmawolke bewirkt, dass mehr Energie ins Werkstück gelangt. Sie absorbiert den CO<sub>2</sub>-Laserstrahl und gibt die Energie an das Werkstück ab. So schmilzt das Material schneller auf, und das erlaubt höhere Schneidgeschwindigkeiten. Deshalb spricht man auch vom plasmaunterstützten Hochgeschwindigkeitsschneiden.



Links: Plasma im Schnittspalt erhöht die Absorption des CO<sub>2</sub>-Laserstrahls. Rechts: Plasma über dem Schnittspalt schirmt den Laserstrahl ab.

Die Plasmawolke darf jedoch nicht nach oben aus dem Schnittspalt austreten. Sonst schirmt sie den Laserstrahl von der Werkstückoberfläche ab. Der Schnitt reißt ab, weil der Laser nicht mehr ganz durchs Werkstück dringt, und das Teil wird unbrauchbar. Um dies zu verhindern, regeln Sensoren den Schneidprozess.

Das Verfahren ermöglicht extrem hohe Schneidgeschwindigkeiten in dünnen Blechen. Erreicht werden 40 Meter und mehr pro Minute bei einer Blechdicke von 1 Millimeter. Die Schnittkante wird allerdings rauer als beim Schmelzschnitten mit Stickstoff. Die maximale Blechdicke hängt von der Laserleistung ab. Mit 6 Kilowatt Laserleistung lassen sich zum Beispiel 4 Millimeter dicke Aluminiumtafeln bearbeiten.

Für die Wellenlänge des Festkörperlaser ist die Plasmawolke praktisch transparent. Deshalb ist plasmaunterstütztes Schmelzschnitten nur mit CO<sub>2</sub>-Lasern möglich.

**Sublimierschneiden** | Bei allen bisher vorgestellten Verfahren schmilzt der Laserstrahl das Material vorwiegend auf. Anders beim Sublimierschneiden, auch Sublimationschneiden genannt: Bei diesem Verfahren soll der Laser das Material möglichst schmelzarm verdampfen. Der Materialdampf erzeugt in der Schnittfuge einen hohen Druck, der die Schmelze nach oben und unten herausschleudert.

Das Prozessgas, Stickstoff, Argon oder Helium, schirmt die Schnittflächen lediglich von der Umgebung ab. Es sorgt dafür, dass die Schnittkanten oxidfrei bleiben. Aus diesem Grund genügt ein Gasdruck von 1 bis 3 bar.

Metall zu verdampfen erfordert mehr Energie als es zu schmelzen. Deshalb benötigt Sublimierschneiden hohe Laserleistungen und ist langsamer als andere Schneidverfahren. Dafür erzeugt es hochwertige Schnittkanten. In der Blechbearbeitung wird das Verfahren kaum angewendet. Es ist

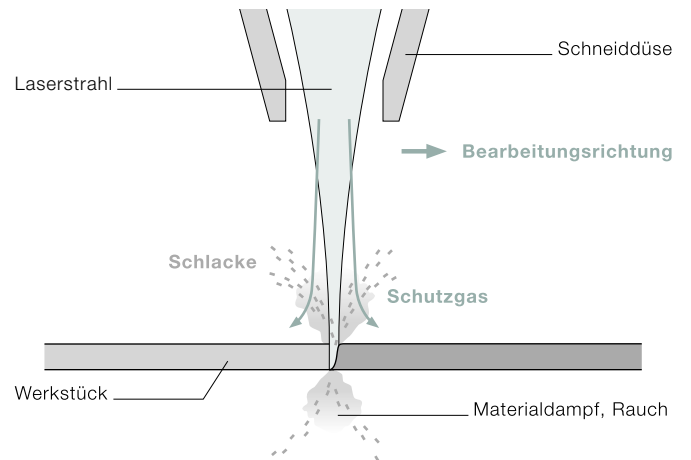
„Obwohl Laserschneiden nun auch schon einige Jahrzehnte alt ist, hat es etwas vom Glanz des Modernen. Bei den extrem schnellen Schneidstrategien gerät so mancher alte Hase ins Staunen. Es fasziniert auch mich immer wieder, mit welcher Geschwindigkeit und Eleganz sich der Schneidkopf bewegt und wie der Laserstrahl scheinbar mühelos durch zentimeterdickes Blech schneidet.“ Jörg Müller, Dokumentation

schlichtweg zu teuer. Erst dort, wo die Schneidaufgaben besonders fein sind, wird es attraktiv. Dazu gehört beispielsweise das Schneiden von Stents. Das sind feine, netzartige Metallschläuche, die in Arterien eingesetzt werden, um sie offen zu halten. Solche Stents werden aus dünnwandigen Rohren mit bis zu 2 Millimeter Durchmesser gefertigt.

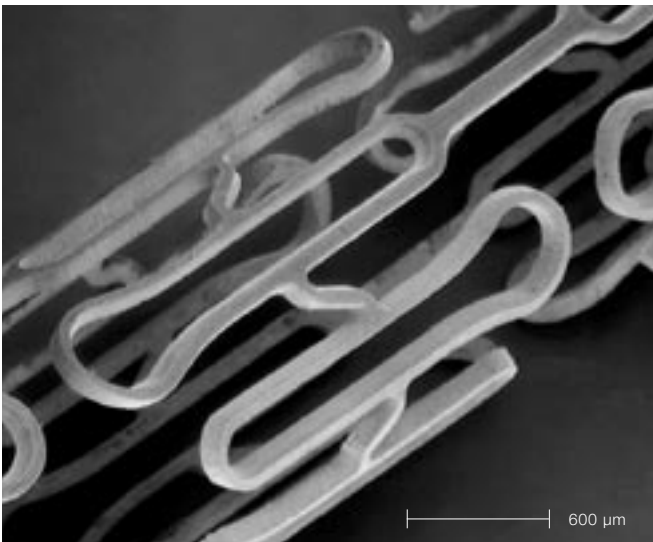
Bei Metallen ist Sublimierschneiden eine Ausnahme, bei Nichtmetallen ist es gang und gäbe: Viele nichtmetallische Werkstoffe werden immer mit Sublimierschneiden bearbeitet.

Zu den typischen Werkstoffen zählen

- Kunststofffolien und Textilien, die schon bei geringer Energie verdampfen, und
- Werkstoffe, die nicht schmelzen können, etwa Holz, Pappe, Schaumstoffe.



Sublimierschneiden: Der Laserstrahl verdampft und verbrennt das Material. Der Dampfdruck treibt die Schlacke aus der Schnittfuge.



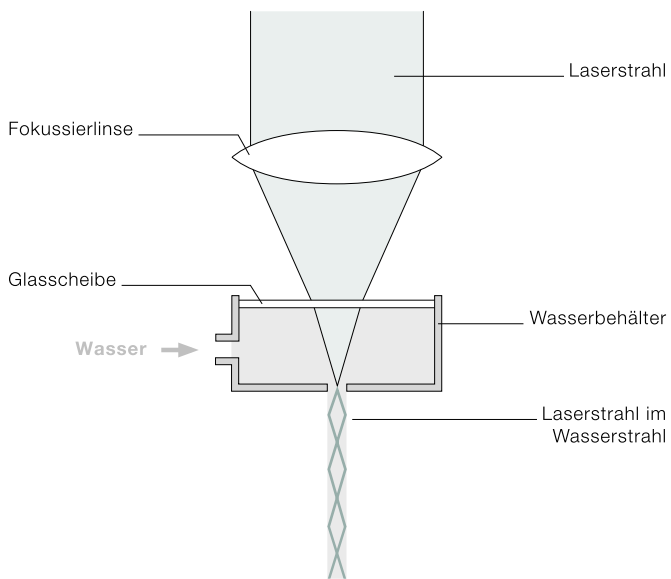
1



2

**Microjet** | Hinter dem Begriff Microjet verbirgt sich ein Schneidverfahren, das ohne Gas und dafür mit Wasser arbeitet. In der Bearbeitungsoptik wird der Laserstrahl in einen dünnen Wasserstrahl fokussiert. Der Wasserstrahl leitet den Laserstrahl wie ein Laserlichtkabel: An den Grenzen zwischen Luft und Wasser wird der Laserstrahl totalreflektiert.

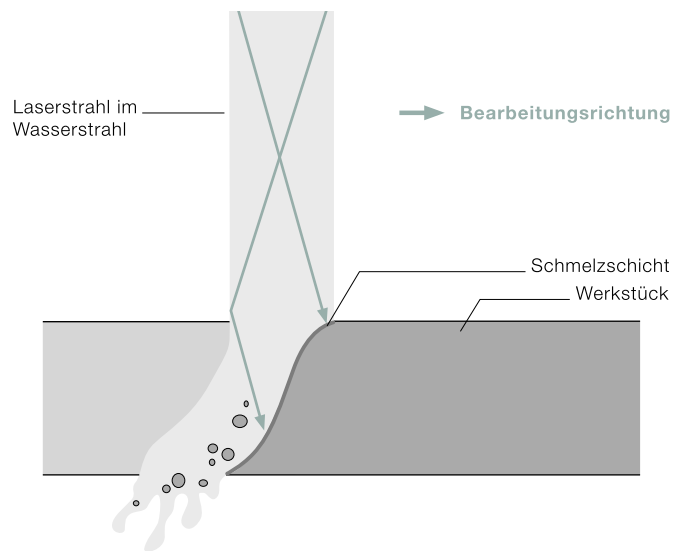
Laserstrahl im Wasserstrahl. Was machen die beiden am Werkstück? Der Laserstrahl schmilzt das Material oder trägt es ab. Das Wasser übernimmt mehrere Funktionen: Der größte Teil des Wassers dringt in die Schnittfuge ein und transportiert das aufgeschmolzene Material ab. Gleichzeitig kühlt das Wasser die Schnittkante. So gelangt kaum Wärme ins Material. Ein Teil des Wassers gelangt nicht in die Schnittfuge,



Für das Microjet-Verfahren wird der Laserstrahl in einen feinen Wasserstrahl fokussiert und gelangt im Wasserstrahl zum Werkstück.

sondern bildet einen dünnen Wasserfilm auf der Werkstückoberfläche. Dadurch können sich keine Spritzer ablagern.

Der Durchmesser des Wasser-Laser-Strahls liegt zwischen 20 und 150 Mikrometern. Er ist ähnlich klein wie der Fokussdurchmesser eines stark fokussierten, reinen Laserstrahls und bietet einen Vorteil: Der Laserstrahl kann sich nicht aufweiten, da der Wasserstrahl ihn begrenzt. So entstehen senkrechte, parallele Schnittkanten. Der Wasser-Laser-Strahl übernimmt vor allem kleine und feine Schneidaufgaben. Er schneidet zum Beispiel die Halbleiterchips aus der Halbleiterplatte (Wafer) sowie Touchscreens und medizinische Implantate. Beim Schneiden von Kunststoffen bietet das Verfahren den Vorteil, dass alle Nebenprodukte im Wasser gebunden werden.



Microjet-Bearbeitung: Der Laserstrahl schmilzt das Material, das Wasser kühlt und transportiert Schmelze und Nebenprodukte aus der Schnittfuge.

„Immer mehr Unternehmen in der Blechbearbeitung erkennen die Möglichkeiten, die Laserschneiden von Rohren bietet: innovative Konstruktionen, weniger Fertigungsschritte und damit auch geringere Herstellkosten. Deshalb steigt die Nachfrage nach Rohrschneidanlagen kontinuierlich. Laserschneiden von Rohren liegt eindeutig im Trend.“  
*Norbert Beier, Vertrieb Rohrschneidanlagen*

## NUTZE DIE MÖGLICHKEITEN

Laserschneiden von Profilen bietet viele Vorteile für die Konstruktion. Wer sie voll ausschöpfen will, benötigt zweierlei. Erstens: ein Team, das die Laserschneidanlage in- und auswendig kennt und immer wieder Neues ausprobiert. Zweitens: Konstrukteure, die sich auf den Wissensaustausch einlassen und die entdeckten Möglichkeiten nutzen.

Die Meyra GmbH + Co. KG in Kalletal-Kalldorf hat beides. „Die Teile, die wir auf unserer Rohrschneidanlage fertigen, beeindrucken sogar den Maschinenhersteller“, sagt Jörg Pielemeier, Sprecher der Gruppe Rohr-Laserschneiden. Die innovativen Konstruktionen vereinfachen Fertigungsabläufe, senken Kosten und erhöhen die Produktqualität. Jörg Pielemeier zeigt ein Beispiel: den Vorderrahmen eines Scooters. Scooter sind Elektrofahrzeuge für Menschen mit Gehbeeinträchtigungen. Der Rahmen trägt die Lenksäule und hält das Vorderrad. Er entsteht an der Laser-Rohrschneidanlage aus einem quadratischen Stahlprofil mit 30 Millimeter Kantenlänge und 2 Millimeter Dicke. Das Laserschneiden hat die Fertigung vereinfacht und beschleunigt. „Ausbrüche, Bohrungen, Trennschnitte – der Laser erledigt alles in einem Fertigungsschritt. In 5 Minuten sind die Teile fertig. Danach werden sie geschweißt“, umreißt Jörg Pielemeier den Fertigungsprozess. Früher bestand der Rahmen aus 14 Teilen. „Jedes Teil musste gesägt, gebohrt, gefräst und gestanzt werden. Allein das Sägen dauerte insgesamt 4 Minuten.“

Für die Laserbearbeitung wurde der Rahmen neu konstruiert. Er besteht nun aus den beiden Hälften und 2 Mittelstreben. Knickkonstruktionen erleichtern das Fügen: An den späteren Ecken des Rahmens werden große Aussparungen eingebracht.



Intelligent: Die Knickkonstruktionen in diesem Rahmen eines Elektrofahrzeugs vereinfachen das Schweißen

Dabei bleibt eine Seite des Profils stehen. So lässt sich der Rahmen an einem Stück fertigen und manuell knicken. Jörg Pielemeier erklärt: „Die Knickkonstruktion reduziert Fügenähte, vereinfacht die Spannvorrichtung und erleichtert das Schweißen.“ Ein weiterer Kostenvorteil.

„Das Highlight ist aber die Genauigkeit“, bemerkt Pielemeier. Zu Recht: 0,01 Millimeter beträgt die Toleranz. Das ist 50-mal weniger als die Genauigkeit, die die Maschine für das eingespannte Rohr garantiert. Wie geht das? „Mit einem selbst entwickelten, speziellen NC-Programm: Die Anlage vermisst jedes eingespannte Rohr und gleicht die Maße aus.“

Rund 250 Rahmen fertigt Meyra pro Jahr. Schneller, kostengünstiger und mit höherer Qualität. Für Jörg Pielemeier ist das selbstverständlich: „Man muss eben seine Laseranlage richtig gut beherrschen und die Möglichkeiten eines Verfahrens kennen. Dann ist fast alles machbar.“



**Wenn die Schmelze hüpf** Humping-Effekt, zu deutsch Hüpfefekt, so heißt ein Vorgang, der beim Tiefschweißen zu Störungen in der Nahtoberfläche führt. Der Humping-Effekt kann bei hohen Schweißgeschwindigkeiten entstehen. Wenn die Schmelze hinter der Dampfkapillare zusammenfließt,

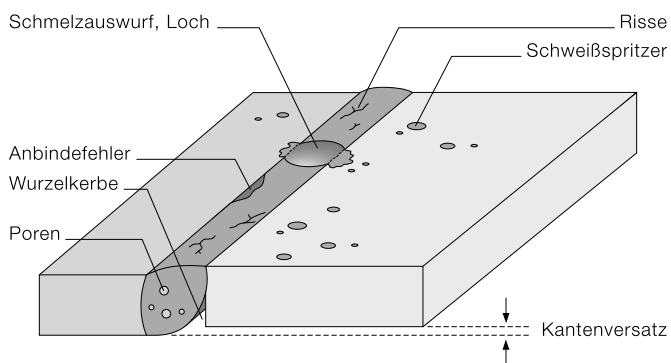
entsteht eine aufwärts gerichtete Strömung. Ein Teil der Schmelze wird dann in der Nahtmitte konzentriert. An der Nahtoberfläche bilden sich tropfenförmige Erhebungen in regelmäßigen Abständen. Der Humping-Effekt ist unerwünscht, weil er Anbindefehler verursacht.

## WIE ERKENNT MAN HOCHWERTIGE NÄHTE?

Hinter jeder Qualitätsprüfung steht die Frage, ob das Bauteil seine Funktion zuverlässig erfüllen wird. So auch beim Schweißen und Löten. Hier richtet sich die Aufmerksamkeit auf die Eigenschaften der Naht und den Einfluss des Bearbeitungsprozesses auf das Werkstück.

**Breite und Tiefe** | Breite und Tiefe der Naht müssen die definierten Werte erreichen, denn sie bestimmen den Anbindungsquerschnitt und damit die Festigkeit der Naht. In der Regel sollten Breite und Tiefe über die gesamte Naht hinweg konstant sein. Für Löt Nähte ist die Eindringtiefe des Lots in die Kapillare bestimmend für die Festigkeit.

**Metallurgische Eigenschaften** | Für alle metallischen Schweißnähte gilt: Das Gefüge der Naht sollte möglichst gleichmäßig und feinkörnig sein. Welche weiteren Eigenschaften die Naht mitbringt, hängt von ihren Legierungsbestandteilen ab:



Äußere und innere Nahtfehler, die beim Laserschweißen auftreten können, am Beispiel einer Stumpfstoßverbindung

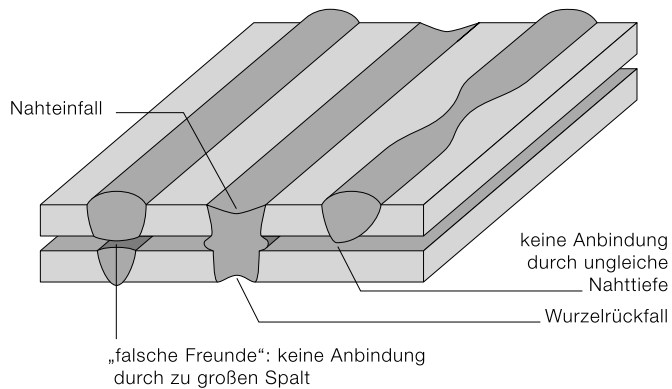
In der Schweißnaht verbinden sich die Schmelzen der Fügepartner. Wenn sie aus dem gleichen Werkstoff bestehen, können die Eigenschaften denen des Grundwerkstoffes entsprechen.

Wenn die Fügepartner aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen oder wenn Zusatzwerkstoffe verwendet werden, bildet sich eine Legierung. Die Eigenschaften der Legierung lassen sich gezielt anpassen. Dazu zwei Beispiele: Chrom oder Nickel machen die Naht korrosionsbeständiger. Durch Legieren mit Silizium können Heißrisse beim Schweißen von Aluminiumlegierungen vermieden werden.

**Nahtfehler** | Technische Normen unterscheiden äußere und innere Nahtfehler. Äußere Nahtfehler und ihre Auswirkungen:

- Nahtformfehler wie Einbrand- und Wurzelkerben sind Schwachstellen, an denen die Naht reißen kann.
- Schmelzauswurf: Wenn die Schmelze aus der Naht geschleudert wird, entstehen Löcher. Diese verringern die Festigkeit und machen die Naht undicht.
- Nahteinfall und Wurzelrückfall verringern den Nahtquerschnitt und damit die Festigkeit.
- Kantenversatz bei der I-Naht am Stumpfstoß verringert den Nahtquerschnitt ebenfalls.
- Mulden am Nahtende, so genannte Endkrater, verringern ebenso den Nahtquerschnitt. Sie entstehen, wenn der Laserstrahl zu schnell abgeschaltet wird.
- Die Oxidation der Ober- und Unterraupen reduziert die Korrosionsbeständigkeit von rostfreien Stählen.
- Spritzer auf dem Werkstück oder auf der Nahtoberfläche können stören und erfordern dann Nacharbeit.

**Falsche Freunde** Der Ausdruck „falsche Freunde“ steht für einen Nahtfehler, der am Überlappstoß auftreten kann. Wenn der Spalt zwischen den Fügepartnern zu groß ist, schmilzt der Laserstrahl zwar beide Blechlagen auf, die Schmelzen verbinden sich jedoch nicht. Äußerlich sieht man es der Naht nicht an. Die Werkstücke scheinen fest verbunden, sind es aber nicht – wie falsche Freunde eben.



Fehler, die beim Tiefschweißen am Überlappstoß auftreten können

Qualitätsmängel im Werkstoff und falsch eingestellte Prozessparameter können folgende Fehler in der Naht verursachen:

- Anbindefehler: Der Fügespalt ist nicht vollständig gefüllt.
- Poren: Die Naht enthält kleine Luft- oder Gasblasen.
- Risse in der Nahtoberfläche oder im Werkstück, die beispielsweise durch Spannungen oder Material schrumpfung beim Abkühlen entstehen.

Beim Löten entstehen Nahtfehler, wenn die Temperatur der Fügepartner nicht stimmt: Ist sie zu niedrig, beginnt das Lot nicht zu fließen und benetzt nur die Kanten. Ist sie zu hoch, wird das Lot spröde oder verbrennt. Verschmutzte Oberflächen führen ebenfalls dazu, dass das Lot nicht bindet.

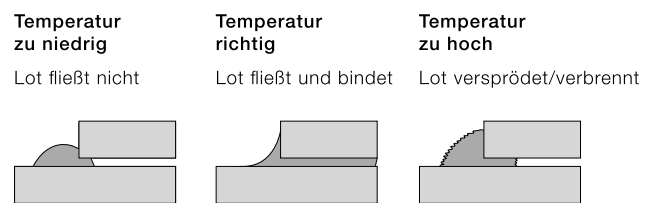
**Wärmeeinbringung und Verzug** | Egal ob Schweißen oder Löten: Die Schmelze gibt ihre Wärme an das umgebende Material ab. Beim Laserschweißen ist die Wärmemenge zwar wesentlich geringer als bei konventionellen Verfahren, die das

Werkstück mit einem Lichtbogen oder mit einer Flamme aufschmelzen. Aber auch diese geringen Wärmemengen führen dazu, dass sich das Werkstück verzieht oder empfindliche Teile beschädigt werden.

Hohe Qualität heißt, das Werkstück möglichst wenig zu erwärmen und dafür zu sorgen, dass die Wärme gut abfließen kann. Gesteppte Nähte erwärmen das Werkstück weniger stark als durchgezogene Schweißlinien. Der Verzug ist entsprechend geringer. Wenn der Laserstrahl im Pulsbetrieb arbeitet, kann das Material in den Pausen zwischen den Pulsen abkühlen. Mit gekühlten Vorrichtungen, die die Wärme gut ableiten, lässt sich das Abkühlen beschleunigen.

Wenn die Baugruppe viele Schweißpunkte oder -nähte enthält, gelangt viel Wärme in die Baugruppe. Damit sich die Baugruppe nicht verzieht, wird die Schweißreihenfolge so angepasst, dass sie sich gleichmäßig erwärmt.

**Glatte Oberflächen** | Je weniger Schritte der Fertigungsprozess eines Produktes umfasst, desto schneller und günstiger kann es hergestellt werden. Laserschweißen und -löten helfen, Fertigungsschritte zu reduzieren. Die Oberflächen der Nähte sollten exakt geformt und so glatt sein, dass sie nach dem Schweißen nicht in einem zusätzlichen Arbeitsschritt manuell verschliffen werden müssen.



Beim Löten hängt die Qualität von der Temperatur der Fügepartner ab.

## VON HANDARBEITSPLÄTZEN UND ROBOTERN

Wie die Laserschweißanlage aufgebaut ist, hängt von vielen Faktoren ab: Form des Werkstücks, Nahtgeometrie- und Nahtart, Stückzahl, Automationsgrad der Fertigung, Verfahren und Werkstoff spielen dabei eine wichtige Rolle.

**Handarbeit** | An Handarbeitsplätzen werden Schweißarbeiten an kleinen Werkstücken ausgeführt, zum Beispiel das Schweißen von Schmuckstücken oder das Reparaturschweißen von Werkzeugen. Maschinenhersteller bieten auch handgeführte Bearbeitungsoptiken an. Diese können wie konventionelle Schweißbrenner über das Werkstück geführt werden.

**1D-Anwendungen** | Manchmal genügt es, wenn der Laserstrahl nur in einer Bewegungsachse schweißen kann, etwa um Rohre oder Kanten zu schweißen. Hierfür setzt man spezielle

Maschinen wie die Kantenschweißmaschine oder die Rohrschweißanlage ein. Dabei wird entweder das Werkstück oder die Bearbeitungsoptik bewegt.

**3D-Anlagen und Roboter** | Meist verbindet der Laserstrahl dreidimensionale Bauteile mit ebensolchen Nahtgeometrien. Dann nutzt man koordinatengeführte Laseranlagen mit 5 Bewegungsachsen und einer beweglichen Optik. In der Automobilindustrie werden in der Regel Roboter in Kombination mit Festkörperlasern eingesetzt.

**Scannerschweißen** | Scannerschweißen und Remote-Schweißen sind zwei Begriffe, die das Gleiche meinen: Der Laserstrahl wird nicht durch eine Bearbeitungsoptik nah am Werkstück geführt, sondern von einer Scanneroptik mit großem Abstand zum Werkstück (remote = englisch für fern).

Handarbeitsplatz



Kantenschweißmaschine



Roboter mit Scannerschweißoptik



„Wie genau Scannerschweißen ist, wird fast immer unterschätzt. Es beeindruckt auch mich immer wieder, dass einer oder zwei bewegliche Spiegel, die oft 1 Meter und mehr vom Werkstück entfernt sind, den Laserstrahl auf den Zehntelmillimeter genau positionieren können. Das ist ohne Weiteres möglich.“ *Dr. Wolfgang Andreasch, Entwicklung Scannersysteme*

In der Scanneroptik positionieren 1 oder 2 bewegliche Spiegel den Laserstrahl blitzschnell. Das ermöglicht es, die Strahlquelle höher auszulasten. Denn die Positionierzeiten zwischen 2 Nähten, in denen der Laserstrahl ausgeschaltet wird, verringern sich fast auf Null. Scannerschweißen bietet sich vor allem bei vielen kurzen Nähten an. Die Schweißreihenfolge lässt sich so optimieren, dass Wärmeeinbringung und Verzug minimal sind. Mit dem Scannerschweißen werden Überlappnähte und Stumpfstöße geschweißt. Das Schutzgas wird über die Spannvorrichtung zugeführt.

**Anlagen zum Scannerschweißen** | Wer das Scannerschweißverfahren nutzen möchte, dem stehen 2 Maschinenkonzepte zur Auswahl. Das erste: die Scannerschweißanlage. Das Werkstück wird im Arbeitsfeld unter der Scanneroptik positioniert und dann geschweißt. Wenn viele Teile mit kurzen

Bearbeitungszeiten geschweißt werden sollen, können sie auch kontinuierlich unter der Optik hindurch bewegt werden. Man spricht dann von fliegender Bearbeitung.

Das zweite Konzept: ein Roboter, der die Scanneroptik trägt. Der Roboter übernimmt dann die großräumigen Bewegungen und fährt beispielsweise den Umriss einer Autotür ab. Die Scanneroptik ist für die genaue Positionierung des Laserstrahls zuständig und lässt ihn hin und her, vor und zurück über das Werkstück flitzen. Scannerschweißen mit dem Roboter ist eine steuerungstechnische Meisterleistung. Die Maschinensteuerung muss die überlagerte Bewegung von Roboter und Scanneroptik koordinieren. Im Millisekundentakt misst sie die exakte räumliche Position des Roboters. Die Steuerung vergleicht die Position mit dem programmierten Weg. Wenn die Position abweicht, gleicht die Steuerung dies mit Hilfe der Scanneroptik aus.

**3D-Laserschweißanlage**



**Schweißroboter**



„Lange wurde das automatisierte Laserschweißen ausschließlich in Großserien eingesetzt. Wer mit dem Laser viele unterschiedliche Teile in kleinen Stückzahlen schweißen wollte, brauchte einen Verfahrensspezialisten. Deshalb arbeiteten wir daran, das Verfahren zu standardisieren. Mittlerweile sind die ersten Schritte getan. In Zukunft wird die automatisierte Laserschweißanlage auch für Klein- und Mittelserien attraktiv.“

*Dr. Thomas Harrer, Applikationslabor Laserschweißen*

## ES WIRD NOCH EINFACHER

Zwei wichtige Arbeitsgebiete für Verfahrensentwickler und Maschinenhersteller sind derzeit das Standardisieren von Prozessen und die Qualitätssicherung durch Sensorik.

**Standardisierung** | Welche Werkstoffe lassen sich mit welchem Verfahren verbinden? Und wie lauten die zugehörigen Werte der Prozessparameter? Beim Laserschneiden finden Anwender die Antwort in standardisierten Technologietabellen. Beim Laserschweißen müssen sie oft Verfahrensexperten von Instituten oder Maschinenherstellern konsultieren. Künftig soll sich das ändern. Standardisierte Parameter werden es dem Anwender ermöglichen, einfacher und schneller hochwertige Bearbeitungsergebnisse zu erzielen. Sie sind der Schlüssel, um unterschiedliche Baugruppen in kleinen und mittleren Stückzahlen wirtschaftlich mit dem Laserstrahl verbinden zu können, und erleichtern den Einstieg in die Technologie.

**Qualitätssicherung** | Ausschussteile reduzieren die Produktivität und steigern die Produktionskosten. Sensoren, die den Prozess überwachen und die Qualität sichern, werden immer wichtiger. Lange galten Sensoren als Luxus, den sich nur wenige Anwender leisteten. Mittlerweile ist die Integration von Sensoren für die Prozessüberwachung auch bei Serienmaschinen zum Standard geworden.

**Großes Potenzial** | Die Laserfügeverfahren eröffnen sehr viele Anwendungsmöglichkeiten. Hohe Qualität, geringe Nacharbeit und damit auch Wirtschaftlichkeit sind und bleiben schlagkräftige Argumente für den Laser. Experten sprechen dem Laserschweißen ein großes Potenzial zu. Sie rechnen damit, dass sich die Verfahren in den nächsten Jahren genau so etablieren werden wie das Laserschneiden.

<b>Wärmeleitungsschweißen</b>	
<b>Wie funktioniert's?</b>	Der Laserstrahl schmilzt die Fügepartner an der Oberfläche auf. Die Schmelzen vermischen sich und erstarren.
<b>Welcher Laser?</b>	überwiegend Festkörperlaser (cw und gepulst), Diodenlaser
<b>Welches Material?</b>	Stähle, Edelstahl, Titan sowie Bunt- und Edelmetalle
<b>Wichtige Prozessparameter</b>	Laserleistung, Leistungsdichte, Schweißgeschwindigkeit oder Pulsdauer, Strahldurchmesser auf dem Werkstück, Schutzgas
<b>Fokussdurchmesser</b>	0,3 bis 1 Millimeter
<b>Wichtige Qualitätskriterien</b>	metallurgische Eigenschaften, Fehlerfreiheit, glatte Oberfläche an Sichtkanten, Gleichmäßigkeit
<b>Maschinen und Anlagen</b>	Handarbeitsplatz, koordinatengeführte Laseranlage, Roboter
<b>Anwendungen</b>	Blechbearbeitung: Sichtkanten; Punktverbindungen in Elektronik und Feinmechanik; Medizintechnik

Schweiß- und Lötverfahren in Stichworten

<b>Tiefschweißen</b>	<b>Hybridschweißen</b>	<b>Löten</b>	<b>Durchstrahlenschweißen</b>
Aufgrund sehr hoher Intensitäten bildet sich eine Dampfkapillare, die tief ins Material reicht. Schlanke und tiefe Nähte entstehen.	Verfahrenskombination aus Laserstrahl und MAG-, MIG-, WIG- oder Plasmaschweißen	Der Laserstrahl erwärmt die Fügepartner und schmilzt so den Zusatzwerkstoff, das Lot, auf. Das flüssige Lot benetzt die Fügepartner und verbindet sie.	Der Laserstrahl durchdringt den transmissiven Fügepartner und schmilzt den zweiten, absorbierenden auf. Unter Druck verbinden sich die Fügepartner.
überwiegend CO <sub>2</sub> -Laser, cw-Festkörperlaser	CO <sub>2</sub> -Laser, cw-Festkörperlaser	cw-Festkörperlaser, Diodenlaser	Diodenlaser, cw-Festkörperlaser
Stähle, Edelstahl, Aluminium, Titan	überwiegend Stahl und Aluminium	Stähle, Aluminium	Kunststoffe: Thermoplaste, thermoplastische Elastomere
Laserleistung, Leistungsdichte, Schweißgeschwindigkeit, Fokussdurchmesser, Arbeits- und Schutzgas, bei Bedarf: Zusatzwerkstoffe	Zusatzwerkstoff, Laserleistung, Leistungsdichte, Schweißgeschwindigkeit, Arbeits- und Schutzgas, Parameter des Zusatzgeräts	Lotwerkstoff, Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Strahldurchmesser auf dem Werkstück	Werkstoffeigenschaften: Absorption, Transmission, Streuung; Laserleistung, Strahlform und -durchmesser, Vorschubgeschwindigkeit, Streckenenergie
0,1 bis 0,6 Millimeter	0,3 bis 0,6 Millimeter	0,5 bis 3 Millimeter	meist 1 bis 2 Millimeter
metallurgische Eigenschaften, Fehlerfreiheit, Einhalten der geforderten Breite und Tiefe, geringe Wärmeeinbringung und Verzug	metallurgische Eigenschaften, Fehlerfreiheit, Gleichmäßigkeit	glatte und porenfreie Nahtoberfläche, Festigkeit, Anbindung, Gleichmäßigkeit	Festigkeit, Gleichmäßigkeit, Dichtheit
koordinatengeführte Laseranlage, Roboter, Scannerschweißanlagen	koordinatengeführte Laseranlage, Roboter	überwiegend Roboter	Scanneroptiken; koordinatengeführte Laseranlage, Roboter
Karosserie- und Getriebebau, Gehäusebau, Rohre und Profile	Spezialanwendungen im Stahlbau, Beispiel: Schiffsdecks	überwiegend Autokarosserien	Konsumgüter, Automobilindustrie, Elektronikgehäuse, Medizintechnik