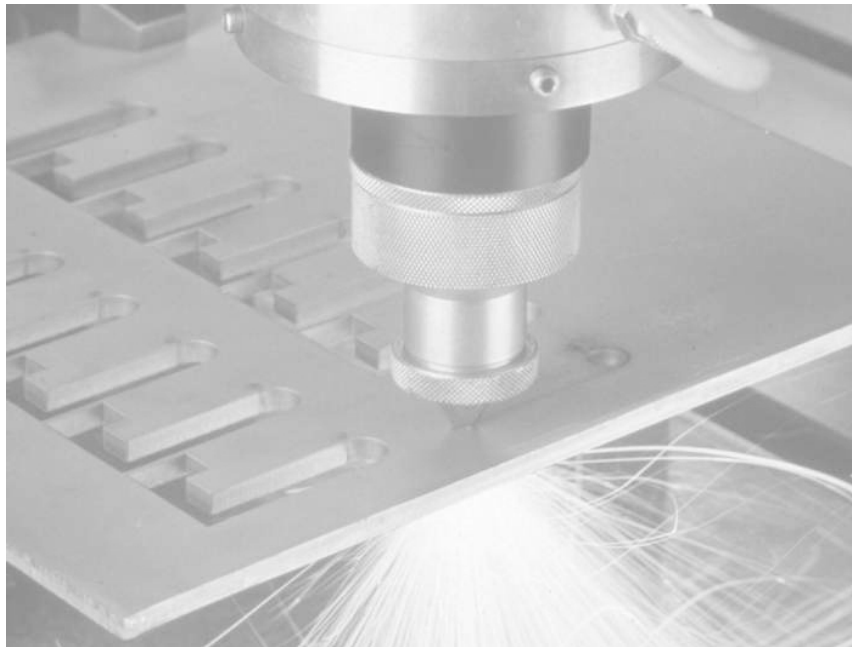


# **Laser in der Materialbearbeitung und im medizinischen Einsatz**



Einführung in eine umfassende Thematik

erstellt von

Daniel Rollert

und

René Juretschk

## LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG UND IM MEDIZINISCHEN EINSATZ

1.	Einleitung .....	3
2.	Grundlagen .....	4
2.1	Industrielaser .....	4
	CO <sub>2</sub> -Laser .....	4
	ND-YAG-Laser .....	5
	Halbleiterlaser .....	6
	Eximerlaser .....	6
2.2	Eigenschaften der Laserstrahlen .....	6
	Leistung und Leistungsdichte .....	6
	Fokussierbarkeit, Divergenz und Strahlqualität .....	7
	Modenstruktur .....	8
3.	Materialbearbeitung .....	8
3.1	Absorption/Reflektion von Laserstrahlung .....	8
3.2	Schneiden .....	9
	Sublimationsschneiden .....	9
	Schmelzschnitten .....	10
	Brennschnitten .....	10
	Weitere Anwendungen (Schneiden von Kunststoffen und Glas, Bohren) .....	11
	Fazit .....	12
3.3	Schweißen .....	13
	Wärmeleitungsschweißen .....	13
	Laserstrahl-tiefschweißen .....	13
	Durchstrahl-schweißen .....	15
	Fazit .....	15
3.4	Löten .....	16
3.5	Andere Verfahren .....	17
	3D Prototyping .....	17
	Oberflächenbehandlung .....	17
4.	Laser in der Medizin .....	19
4.1	Laser in der Diagnostik .....	19
4.2	Laser in der Chirurgie .....	21
4.3	Augenheilkunde .....	24
4.4	Fazit .....	25
5.	Zusammenfassung und Ausblick .....	25

## ***1. Einleitung***

Der Laser gewinnt in der Materialbearbeitung immer mehr an Bedeutung, so kann man sich eine Autoindustrie ohne Laser nicht mehr vorstellen.

Mit ihm können Bleche getrennt und wieder gefügt werden und auch das Bohren Abtragen, Beschriften, Markieren, Umschmelzen, Legieren und Härten sind durch den Ansatz von Lasern schneller und präziser durchführbar. Der Laser ermöglicht ein hohes Maß an Automatisierung, eine Verbesserung der Fertigungsqualität und eine Verringerung von Durchlaufzeiten.

In der Medizin ist eine Krebsfrüherkennung möglich geworden, die ohne Röntgenstrahlung auskommt, und auch die Fehlsichtigkeit kann mit Hilfe des Lasers beseitigt werden. Der Weg zum Zahnarzt wird angenehmer wenn dieser einen Laser zur Kariesbehandlung einsetzt.

Diese schriftliche Ausarbeitung soll einen Überblick von den bisherigen Möglichkeiten verschaffen, in welchen Gebieten der Laser innerhalb der Materialbearbeitung und Medizin eingesetzt werden kann.

Aufgrund der fortlaufenden Entwicklung kann und will es nicht auf Vollständigkeit bestehen, vielmehr die Neugier des Lesers wecken sich weiter mit der Lasertechnologie zu befassen.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Industrielaser

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

Der CO<sub>2</sub>-Laser ist einer der bedeutendsten Laser in der Materialverarbeitung. Der relativ hohe Wirkungsgrad im Zusammenhang mit einer hohen erreichbaren Laserleistung (bis zu 40 kW im kontinuierlichen Betrieb), bei einer überschaubaren technischen Gerätekonfiguration erlauben ein breites Einsatzgebiet.

Der CO<sub>2</sub>-Laser ist ein Gaslaser in dem sich das aktive Medium aus folgenden Elementen zusammengesetzt:

CO<sub>2</sub>: 10...20%      N<sub>2</sub>: 10...20%      He: 60...80%

Die Inversion des oberen Laserniveaus mit CO<sub>2</sub> wird vorwiegend durch Stöße mit den N<sub>2</sub> Molekülen erreicht, welche ihre Energie durch z.B. eine Gasendladung erhielten.

Der bevorzugte Laserübergang findet zwischen dem 001 und dem 100 Energieniveau (Beschreiben die Schwingungszustände der CO<sub>2</sub> Moleküle) statt.

Die dabei entstehende Laserstrahlung hat eine Wellenlänge von 10,6 µm und auf diese ist auch der Resonator eingestellt.

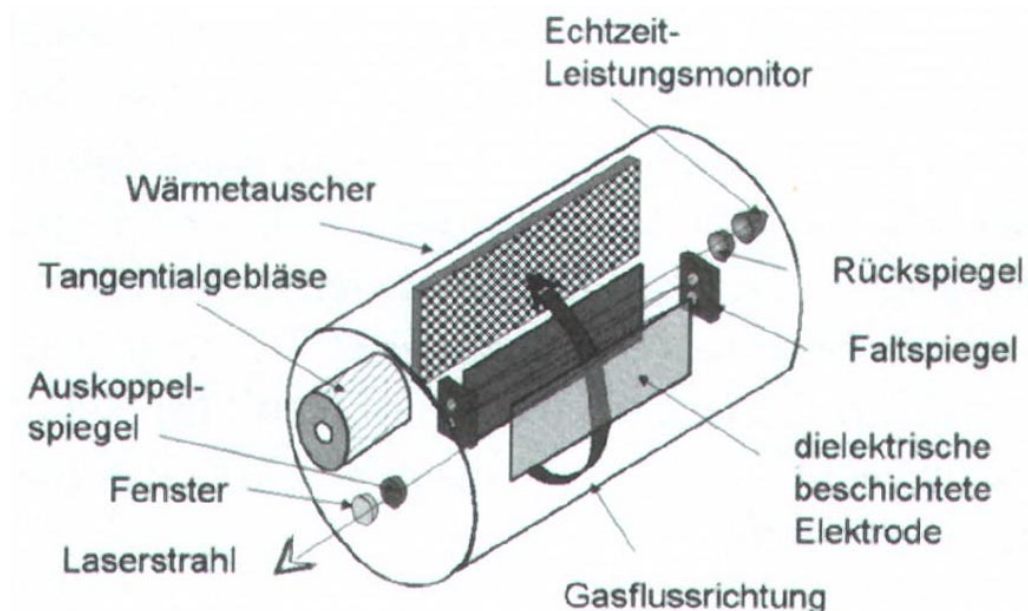


Abbildung 1: Aufbau des CO<sub>2</sub> Lasers

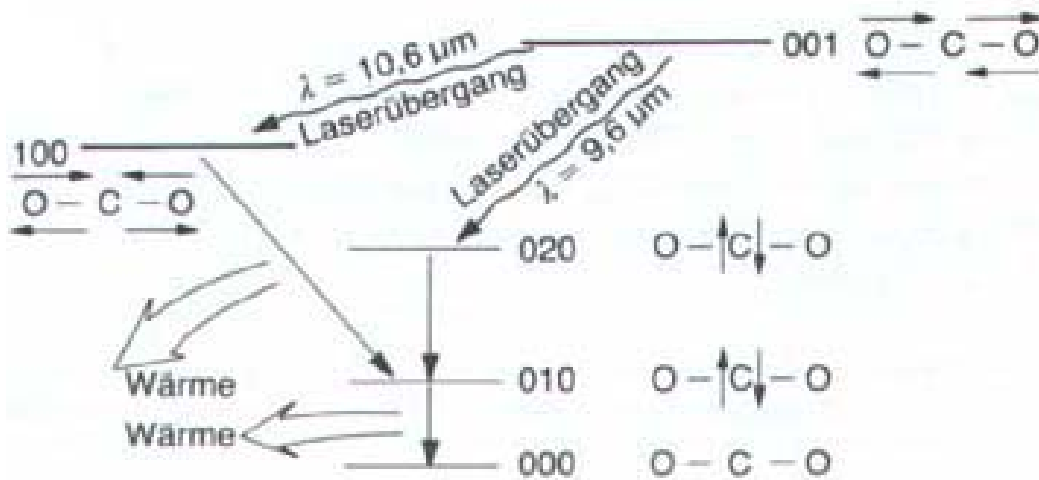


Abbildung 2: Laserübergang beim CO<sub>2</sub> Laser

### ND-YAG-Laser

Dieser Festkörperlaser ( kristalliner Laserstab mit Fremdionen dotiert ) ist ein viel verwendeter Laser in der Materialverarbeitung. Die Anregung erfolgt optisch, im zunehmenden Maße durch Laserdioden. Die emittierte Laserstrahlung hat eine Wellenlänge von  $1,06\mu\text{m}$  und ist daher sehr gut per Lichtleitfaser übertragbar. Leistungen von bis zu 4 KW werden erreicht.

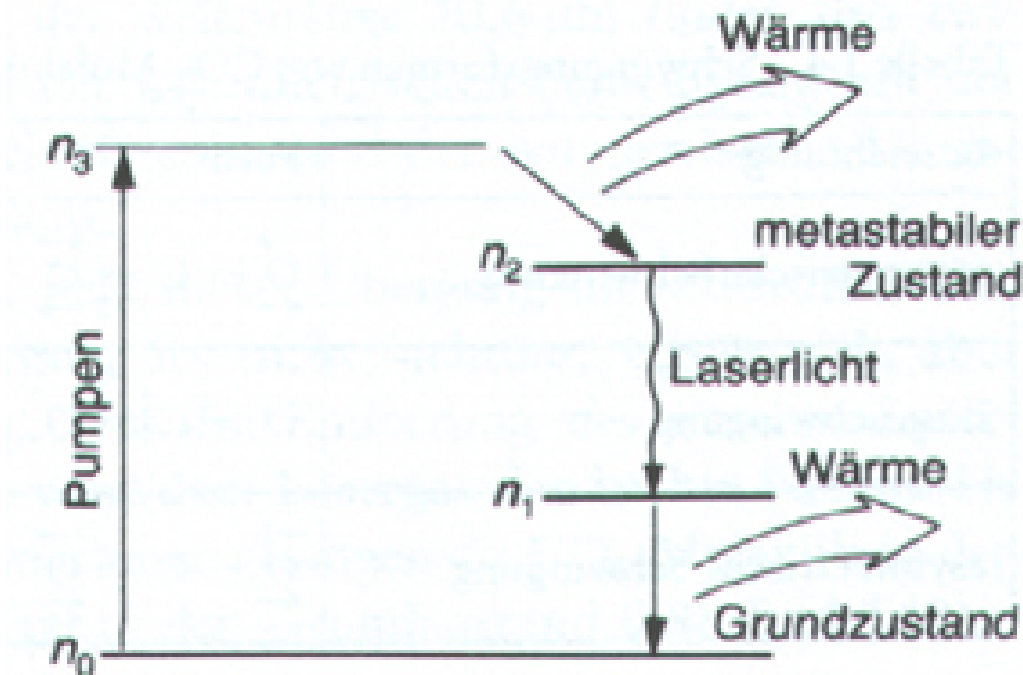


Abbildung 3: Laserübergang des ND-YAG-Lasers

## **Halbleiterlaser**

Siehe Ausführungen von Poser/Böhme „Der Halbleiterlaser“

## **Eximerlaser**

Dieser Gaslaser besitzt durch seine Gaszusammensetzung aus Edelgasen kein unteres Laserniveau, Laserstrahlung entsteht beim Zerfall in neutrale Atome. Die sehr kleinen Wellenlängen dieser Laserstrahlung ( 192...359nm ) lassen sehr kleine Fokussdurchmesser zu. Dieser Laser kommt überwiegend in der Medizin zum Einsatz.

## **2.2 Eigenschaften der Laserstrahlen**

### **Leistung und Leistungsdichte**

Für die Materialbearbeitung und medizinischen Einsätze sind hohe Leistungsdichten der Laserstrahlung erforderlich um ein thermisches Einwirken zu erreichen.

Die Leistungen von Lasern unterscheiden sich nicht nur quantitativ sehr voneinander, auch kommt es darauf an, ob es sich um einen gepulsten oder Dauerstrichlaser handelt, und auf welche Betriebsweise sich die Leistungsangabe bezieht.

Ist die mittlere Leistung zweier Laser gleich so kann man dennoch mit einem gepulsten Laser eine andere Veränderung am Material hervorrufen als mit einem Dauerstrichlaser, da dessen Pulsausgangsleistung die des CW-Lasers um ein Vielfaches übertreffen kann. Durch das Verändern von Puls und Aussetzzeiten ist die Laserausgangsleistung regulierbar und es lassen sich hohe Pulsleistungen erzielen.

Die Intensität oder Leistungsdichte berechnet sich aus der Laserleistung durch Fokussierungsquerschnitt. Durch die bessere Fokussierbarkeit des Laserstrahls (im Vergleich zum normalen Licht sind um den Faktor  $10^{-8}$  kleinere Querschnitte erreichbar) ist eine große Leistungsdichte möglich.

## Fokussierbarkeit, Divergenz und Strahlqualität

In der Materialbearbeitung und noch mehr in der Medizin ist auch eine gute Qualität des Laserstrahls von Bedeutung. Für die Fokussierbarkeit des Strahls wird das Strahlparameterprodukt definiert und beschreibt die Qualität des Laserstrahls.

Strahlparameterprodukt = Divergenz  $\theta$  · Radius an der Strahltaillie

Je kleiner dieses Produkt ist, desto besser ist die Qualität, allerdings wird dieses von der Wellenlänge und der Laserleistung beeinflusst und besitzt bei TEM<sub>00</sub> Moden ein Minimum.

Die Fokussierbarkeit des Laserstrahls wird beeinflusst von der Divergenz, Modenstruktur und Wellenlänge.

Die Fokussierung der Strahlen kurz vor dem Werkstoff ist nicht unproblematisch, zwar erhält man mit kurzen Brennweiten der Linsensysteme einen sehr kleinen Fokussierpunkt (mit kurzen Abstand zw. Optik und Mat.) doch ist aufgrund von Strahlgesetzen und Beugung, besonders bei dickeren Werkstoffen eine breite Schnittfuge zu erwarten. Die Verwendung von langen Brennweiten macht die Abstandsregelung zu einem Abenteuer, das in manchen Anwendungen nicht eingegangen werden kann, da der Fokus in einer bestimmten Tiefe konstant gehalten werden muss. Wie die Laserleistung das Strahlprodukt beeinflusst kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

Laserart	Laserausgangsleistung	Strahlparameterprodukt in $\mu\text{m} \cdot \text{rad}$
ND-YAG-Laser	0,015	0,36
	0,090	2,25
	1,0	20
CO <sub>2</sub>	1,0	6,5
	5,0	33

## Modenstruktur

Durch die Modenordnung werden unterschiedliche Intensitätsverteilungen im Strahlquerschnitt von Lasern beschrieben. Die Intensitätsverteilung wird vom Aufbau des optischen Resonators des Lasergeräts bestimmt. Die Modenstruktur ist mitverantwortlich für das Einsatzgebiet eines Laserstrahls. So werden Laser mit punktförmiger Verteilung zum Schweißen, Trennen und Bohren, und mit flächiger Verteilung zum Härten und Löten verwendet.

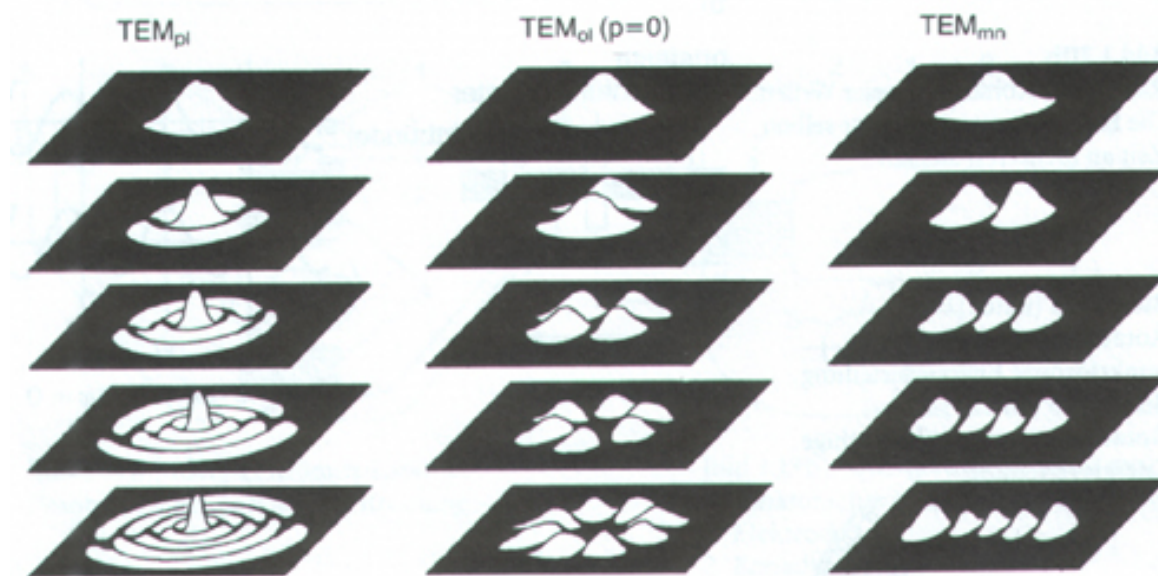


Abbildung 4: Darstellung der Moden

## 3. Materialbearbeitung

### 3.1 Absorption/Reflektion von Laserstrahlung

Die Materialbearbeitung beruht auf der thermischen Einwirkung, die aus der Umwandlung der eingestrahnten Laserenergie (Strahlungsenergie) in Wärme entsteht. Maßgeblich für die Materialbearbeitung ist der vom Werkstoff absorbierte Anteil der Intensität. Reflektionsgrad und Absorptionsgrad sind von der Wellenlänge und dem Werkstoff abhängig, außerdem steigt mit größerem Einfallswinkel zum Lot der Absorptionsgrad.

Das Eindringen der Intensität wird durch den Absorptionskoeffizienten beschrieben. Da die meisten zu bearbeitende Werkstoffe gute Wärmeleiter sind, verteilt sich die eingestrahlte Energie sehr rasch, eine kleine Streuung von Wärme um den



bestrahlten Punkt. Diese Intensitätsabnahme im Werkstoff wird durch den Absorbtkoeffizienten beschrieben

Die Absorptionslänge (eindringende Intensität ist auf  $1/e$  abgeklungen) ist im Allgemeinen sehr klein dies resultiert in einer sehr oberflächlichen Einkopplung im Material.

stark            ← Absorption →            schwach  
 unwesentlich    ← Streuung →            Wesentlich

Will man die Absorption des Werkstoffes verändern so kann man diesen entweder mit einem Lack o.ä. beschichten, oder man verwendet Laser anderer Wellenlängen.

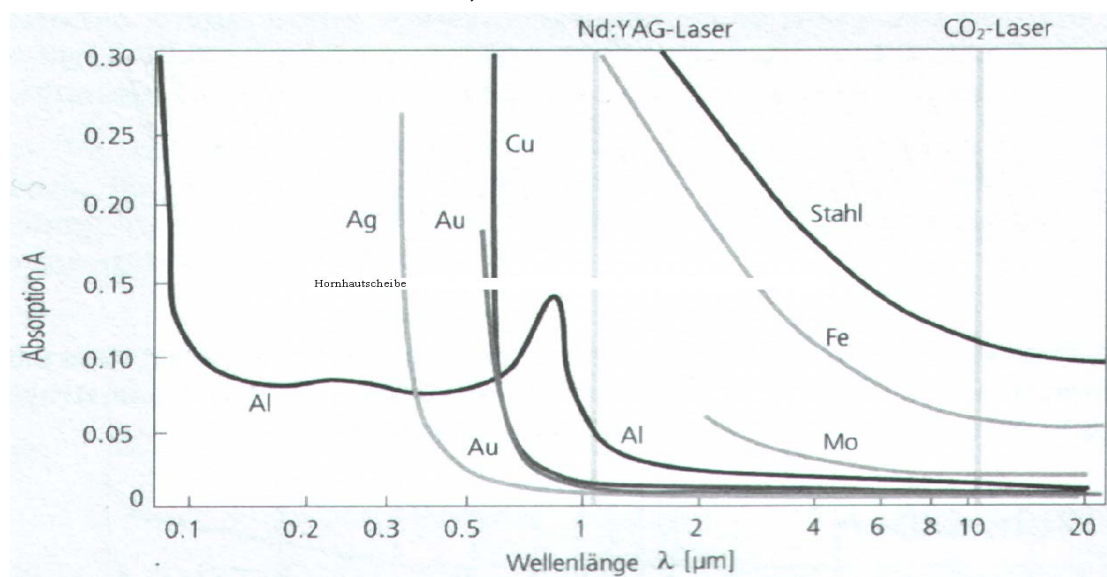


Abbildung 5: Abhängigkeit der Absorption von Material und Wellenlänge

### 3.2 Schneiden

Der fokussierte Laserstrahl wirkt in einem engen Flächenbereich auf den Werkstoff thermisch ein, so dass dieser aufschmilzt und teilweise oder vollständig verdampft. Die Fokusslage wird entweder kurz oberhalb, direkt auf oder geringfügig innerhalb des Werkstücks platziert. Aus den Einsatzmöglichkeiten von Schneidgasen lassen sich 3 Verfahren ableiten.

#### Sublimationsschneiden

Bei diesem Prozess wird der Werkstoff verdampft und entweicht aus der Trennfuge, die hierbei eingesetzten Gase (Argon, Stickstoff, Helium) schützen den Einwirkungsbereich.

Verwendung bei Stoffen die keinen schmelzfähigen Zustand einnehmen (Holz, Papier, Kunststoffe) und auch bei metallischen Werkstoffen kleiner Dicken (saubere oxidationsfreie Schnittflächen).

## Schmelzschnneiden

Der aufgeschmolzene Werkstoff wird durch einen Gasstrahl (koaxial zum Laserstrahl, Stickstoff, Argon) aus der Trennfuge herausgeblasen.

Durch das Heraufsetzen des Gasdrucks (bis 6 bar) kann die ohnehin schnelle Schneidgeschwindigkeit noch weiter gesteigert werden (Hochdruckschneiden). Zum Austreiben der Schmelze muss eine, mit der Dicke des Materials steigende, Schnittfugenbreite berücksichtigt werden. Typische Schneidgeschwindigkeiten für Stahl liegen z.B. bei 8 m/min für 1 mm, 4,5 m/min für 3 mm und 1,5 m/min für 8 mm Materialstärke sind jedoch vom verwendeten Laser und der Stahlart abhängig.

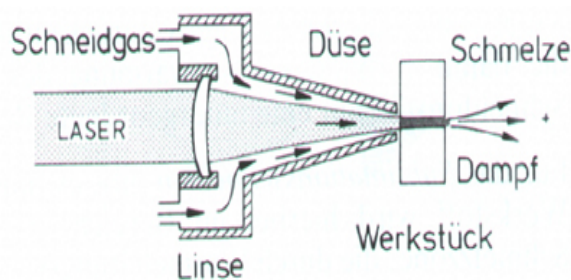


Abbildung 6: Schneidkopf

Abbildung 7: Schmelzschnneiden

## Brennschnneiden

Abbildung 8: Durch Brennschnneiden hergestellte Teile

Dieses Schneidverfahren beruht im Wesentlichen auf der Technologie des Schmelzschnittens.

Dem schmelzflüssigen Material wird hier Sauerstoff zugeführt was zur einer exothermen Reaktion und somit zu einer zusätzlichen



Energieeinspeisung und Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit führt. Dadurch ist

gegenüber dem Schmelzschneiden eine geringere Laserleistung notwendig. Mit diesem Verfahren lassen sich noch dickere Materialien schneiden (bis zu 40mm), als es mit dem Schmelzschneiden möglich ist.

Nachteilig ist die Oxidation der Schneidkanten durch den eingesetzten Sauerstoff zu bewerten.

### Weitere Anwendungen (Schneiden von Kunststoffen und Glas, Bohren)



**Abbildung 9: Mit Laser geschnittener Kunststoff**

**Thermoplastische Kunststoffe** können bereits mit relativ geringen Leistungen von 100 bis 300 Watt mit CO<sub>2</sub>-Lasern geschnitten werden. Je nach Einrichtung der Applikation lassen sich Trennschnitte oder Polierschnitte (optisch klare Schneidkante) ausführen. Ein wesentliches

Einsatzgebiet solcher lasergeschnittenen Teile stellt beispielsweise die Lichtwerbung dar. Die Schneidgeschwindigkeiten hängen sehr stark von der gewünschten Kantenqualität ab, als ein Beispiel seien 2,5 m/min Trennschnitt in 4 mm Material mit 200 Watt genannt.

**Abbildung 10: Lasergeschnittenes Glas**

Beim **Schneiden von Quarz Glas** liegt der Vorteil des Lasers gegenüber herkömmlichen Trennverfahren im fehlenden Verschleiß des berührungslos arbeitenden Strahls. Weiterhin erzeugt die Lasertechnik eine

Schneidkantenqualität, die ohne Mikrorisse eine deutliche Verbesserung gegenüber anderen Verfahren bietet und so auch schmalste Stege möglich werden lässt. Typische Schneidgeschwindigkeiten liegen je nach Materialstärke zwischen 0,2 und 1,5 m/min unter Verwendung von CO<sub>2</sub>-Lasern. Andere Lasertypen finden keine Anwendung, da der Strahl vom Glas nicht absorbiert wird.



Das **Bohren mit Hilfe von Laserstrahlen** (Nd-YAG-Laser) kann in 3 Verfahren vorgenommen werden, über deren Einsatz die zu erreichenden Durchmesser und der Werkstoff entscheiden.

Mit Hilfe eines **Einzelimpulses** lassen sich die kleinsten Löcher in ein Material bringen, die Durchmesser bis zu 1  $\mu\text{m}$  (minimal) erreichen.

Ist das Material dicker oder soll eine tiefere Grundbohrung gemacht werden, kommt das **Perkussionsbohren** zum Einsatz, bei dem eine Folge von Impulsen das Loch in das Material treibt. Die Bohrlöcher werden hier mit zunehmender Tiefe konisch, es lassen sich Durchmesser bis 1mm erzielen.

Mit dem **Trepanieren** lassen sich die Löcher aus dem Material schneiden, in dem ein Laserstrahl durch die Fokussieroptik um den Mittelpunkt gedreht wird. Die Bohrlöcher können Durchmesser bis 6mm annehmen.

#### **Fazit**

- Vorwiegender Einsatz von CO<sub>2</sub> und Nd-YAG-Lasern
- Präziser, leichter automatisierbar
- Entfallende Nachbearbeitung
- Bessere und gleich bleibende Qualität
- Höhere Produktionsgeschwindigkeiten
- Schnittdicken bis 40 mm (materialabhängig)
- Präzisionsschnitte möglich (Maßgenauigkeiten <10 $\mu\text{m}$ , Schnittfuge <20 $\mu\text{m}$ )
- Fugenbreite und Schnittflächenqualität werden durch die Fokusslage beeinträchtigt → Einsatz von kapazitiven Abstandsregelsystemen
- Genaue Schneiddüsengestaltung notwendig
- Schnittfugenbreite ist von der Materialdicke abhängig

### 3.3 Schweißen

Zum Laserstrahlschweißen verwendet man CO<sub>2</sub> oder YAG-Laser, in einigen Fällen auch Hochleistungs-Diodenlaser. Ziel des Schweißens ist es, zwei Materialien miteinander zu verschmelzen.

#### Wärmeleitungsschweißen

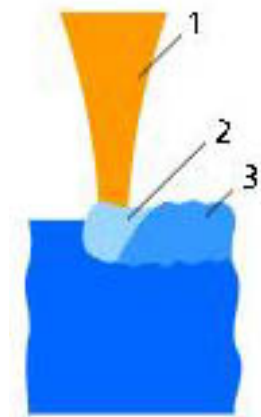


Abbildung 11: Wärmeleitschweißen

- 1:Laserstrahl
- 2:Schmelze
- 3:erstarre Schmelze

Durch die Fokussierung des Laserstrahls an der Schweißstelle wird eine kleinflächige thermische Einwirkung erreicht.

Durch das Verhältnis von Absorption und Reflektion bei metallischen Werkstoffen, kommt es bei Bestrahlung mit kleinen Intensitäten lediglich zu einem lokalen Aufschmelzen des Materials mit geringem Tiefeneinfluss. Da die Schweißgeschwindigkeiten unter 2m/min liegen, hat dieses Verfahren eine begrenzte Bedeutung.

#### Laserstrahl-tiefschweißen

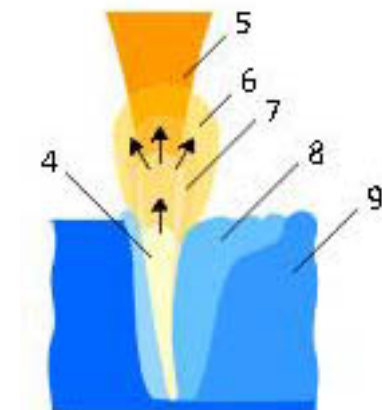
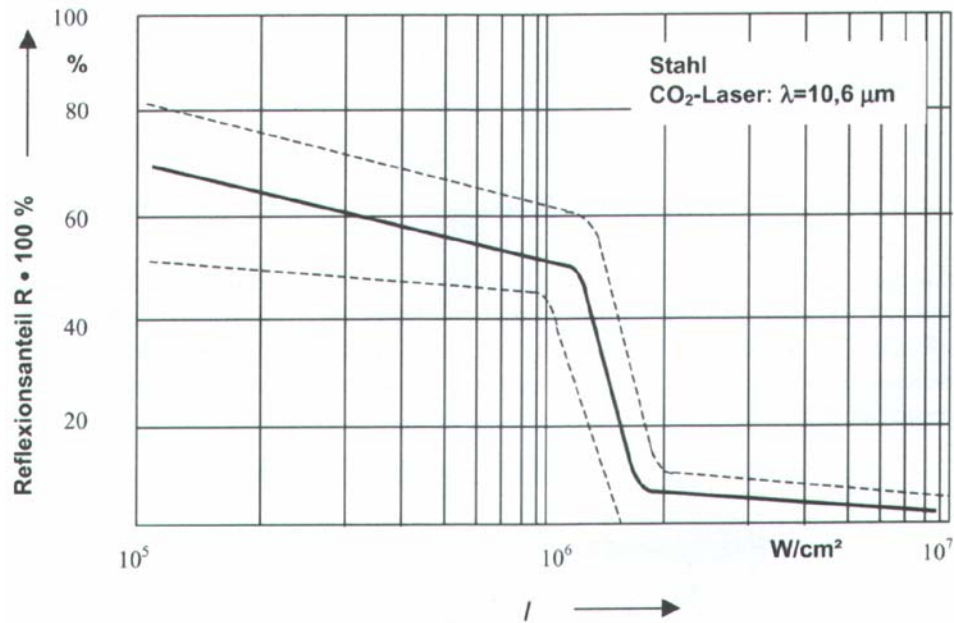


Abbildung 12: Laserstrahl-tiefschweißen

- 4:Dampfkapillare
- 5:Laserstrahl
- 6:abströmender Metalldampf
- 7:verdampfendes Metall
- 8:flüssige Schmelze
- 9:erstarre Schweißnaht

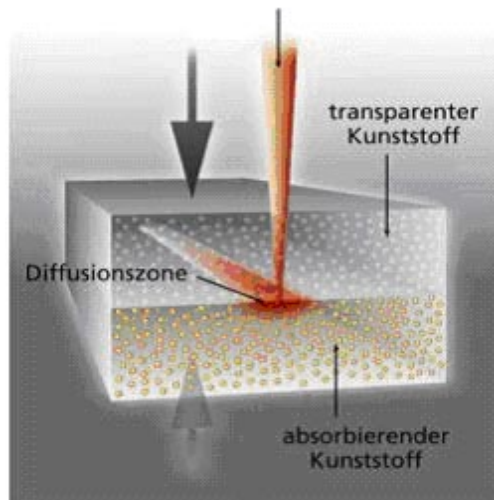


**Abbildung 13: Änderung des Reflektionsgrades**

Hier wird mit Lasern höherer Intensitäten gearbeitet, so dass sich das Reflektionsverhalten, durch die Entstehung von Metaldampf um die bestrahlte Fläche, des Werkstoffes verändert. Bei genügend hoher Leistung bildet sich in Verbindung mit einem laserinduzierten Plasma eine Dampfkapillare aus. Durch die Kapillare nimmt die Absorption wesentlich höhere Werte an, so dass die Laserstrahlung tiefer in das Material eindringen kann. Dadurch entsteht ein großes Nahttiefe- zu Nahtbreite-Verhältnis.

Das Herausschleudern von Plasma kann durch Zusatzwerkstoffe, die als Draht an die Schweißstelle geführt werden, kompensiert werden. Es lassen sich dadurch auch Metalllegierungen an der Schweißnaht herstellen. Durch den Einsatz von Prozessgasen lassen sich eine Schutzwirkung gegenüber der umgebenden Atmosphäre und eine Verbesserung der Plasmabildung erzielen.

## Durchstrahlschweißen



Beim Durchstrahlschweißen dringt ein Laserstrahl, durch ein für dieses Laserlicht transparenten Kunststoff und erwärmt einen absorbierenden Kunststoff bis zur Schmelze. Durch den Kontakt der beiden Kunststoffe gelangt der transparente ebenfalls zur Schmelze, es bildet sich eine innenliegende Schweißnaht.

Abbildung 14: Durchstrahlschweißvorgang

## Fazit

- Eng begrenzte Wärmeeinflusszone im Werkstoff mit geringer thermischer Verzugswirkung
- Reduzierung oder Entfall der Nachbearbeitung
- Enge Nahtausbildung dadurch Mikrobearbeitung
- Unterschiedliche Werkstoffe miteinander ffügbar
- Schweißoperationen an schwerzugänglichen Stellen → komplizierte Formen herstellbar
- Hohe Schweißgeschwindigkeiten und Einsatz in CAM-Systemen
- Geringer Verschleiß (Düsen)
- Hohe Anlagenkosten mit besonderen Anforderungen an Konstruktion an Werkstoffe und Handling

### 3.4 Löten

Das Löten ist ein Fügeprozeß, bei dem die zu verbindenden Werkstoffe durch ein aufgeschmolzenes Lot zusammengebracht werden. Man unterscheidet zwischen Hartlöten ( $T > 800 \text{ °C}$ ) und Weichlöten ( $T < 230 \text{ °C}$ ), allen gemeinsam ist aber, dass die Schmelztemperatur des Lotes unterhalb derer der Werkstoffe liegt und somit nur das Lot aufgeschmolzen wird. Welche Lötart eingesetzt wird, richtet sich nach dem erforderlichen Festigkeitsansprüchen.

In der Elektronikindustrie werden zunehmend Leiterplatten mit Lasern gelötet, wodurch die Wärmebelastung der Bauteile (SMD) im Vergleich zu herkömmlichen Lötverfahren sinkt. Da hier nur kleine Laserintensitäten benötigt werden kommen vorwiegend ND-YAG-Laser und Halbleiterlaser zum Einsatz.

Im Automobilbau werden die so genannten Class-A-Verbindungen (Außenhautbereiche der Karosserie) hartgelötet.

Die geringe Wärmeeinbringung resultiert in einem minimalen Verzug der Komponenten und durch eine Stromdurchflossene Elektrode kann die Lötgeschwindigkeit noch gesteigert werden.

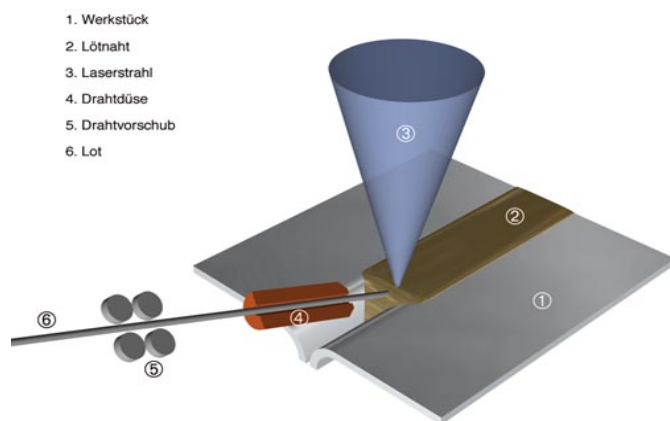


Abbildung 15: Vorgang des Laserlötens



16: Laserlötvorrichtung

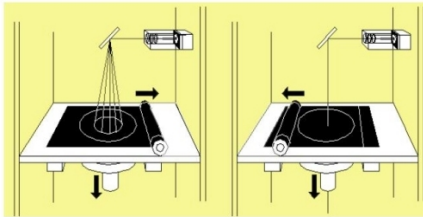


### 3.5 Andere Verfahren

In der Industrie sind viele weitere Anwendungen verbreitet, von denen eine kleine Auswahl im nachfolgenden Abschnitt kurz aufgezeigt werden.

#### 3D Prototyping

Prinzip des selektiven Lasersintern



**Abbildung 17: Lasersintern**

Mit diesem Verfahren ist eine schnelle Herstellung von Prototypen möglich, die den Entwicklungsprozess beschleunigen, und es erlauben schon vor der Serienfertigung praktische

Erprobungen durchzuführen.

Das wohl wichtigste und am weitesten verbreitete Verfahren ist die **Stereolithographie**. Bei diesem Vorgang werden Photopolymere (Harz, Kunststoffe in flüssiger Form) durch die Einwirkung von Laserstrahlung in Schichten von 0,1..0,3 mm vernetzt und damit polymerisiert (fest). Der Strahl verursacht eine chemische Reaktion und durch schichtweise Absenkung der Konstruktionsplattform kann ein 3-D Gebilde erzeugt werden, welches anschließend ausgehärtet werden muss.

Beim **Lasersintern** wird statt des flüssigen Photopolymers ein Pulver schichtweise aufgetragen und mit Hilfe des Laserstrahls verschmolzen.

Als **Laminated Objekt Manufacturing** wird das schichtweise Verschweißen von Folienteilen bezeichnet.

#### Oberflächenbehandlung

Ziel ist die Veredlung der Randschichten des Werkstoffs mit Verbesserung der Gebrauchseigenschaften. So kann man einerseits seine Struktur verändern, oder ihm andererseits Hilfsstoffe „untermischen“ die Lokal seine Eigenschaften verändern. Beim **Umschmelzen** wird mit einer kurzen Strahleinwirkdauer aufgeschmolzen, so dass die nichtmetallischen Einschlüsse (Verunreinigungen) vollständig aufgelöst und verdampft werden. Nach dem Erstarren bleibt eine homogenisierte Oberfläche zurück die verschleißfest und korrosionsbeständig ist. Anwendungsbeispiele sind das gezielte Härten von Nockenwellen und Schalthebeln.

Beim **Laserhärten** werden Stähle bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt und danach durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit (Kohlenstoff verändert seine Struktur) gehärtet. Hierzu ist kein zusätzliches Abkühlmittel erforderlich (konventionell Ölbad). Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in einer geringen thermischen Belastung des Werkstücks durch eine gezielte Eingrenzung der Härtebereiche. Besonders die Möglichkeit, Werkstücke im fertig bearbeiteten Zustand und an ungünstig zugänglichen Konturen zu härten, macht diese Anwendung für die moderne Automobilindustrie unverzichtbar

Beim **Legieren** wird eine vorher aufgebrauchte Legierungsschicht oder während des Prozesses zugeführter Legierungswerkstoff aufgeschmolzen und mit der tiefenmäßig gering aufgeschmolzenen Randschicht des Basiswerkstoffes vermischt. Eine partielle Legierungswirkung an verschleißanfälligen Konturen (Werkzeugen) ist möglich.

Das **Beschichten** dient neben der qualitativen Verbesserung der Randschichteigenschaften auch dekorativen Anforderungen. Ein vorher aufgespritzter Beschichtungswerkstoff wird erhitzt (verflüssigt) und verbindet sich mit der Kontaktfläche des Werkstoffes.

## 4. Laser in der Medizin

Die besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung haben gleich nach der Realisierung des ersten Lasers zur Untersuchung über seine Anwendbarkeit in der Biologie und Medizin geführt. Sie galten sowohl diagnostischen und therapeutischen Verfahren als auch Untersuchungen zur biologisch-medizinischen Forschung.

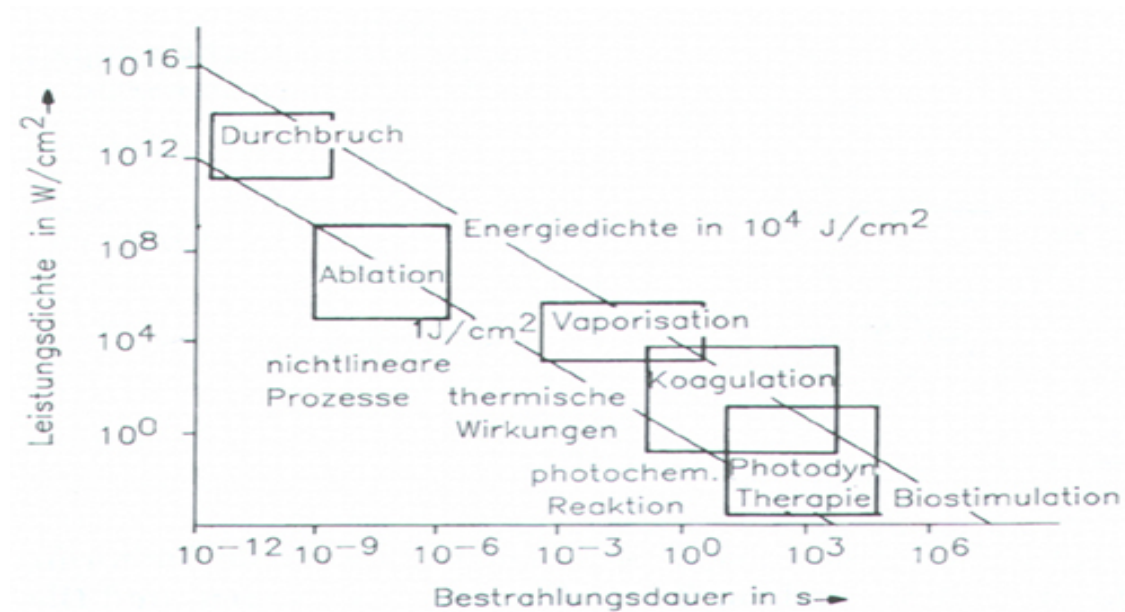


Abbildung 18: Einsatzgebiete des Lasers in der Medizin

Auch in der Medizin entscheidet die Wellenlänge des Lasers und die Absorptionseigenschaften der Materie über sein Einsatzgebiet, was besonders in der Chirurgie zum Ausdruck kommt. Die Eindringtiefe ist auch hier stark von der Wellenlänge abhängig, so erreicht man mit stark infrarotem und ultraviolettem Licht nur eine oberflächliche Behandlung, während sichtbares Licht tiefer eindringt. Auch die Art der Wechselwirkung, ob chemisch oder thermisch ist von der Wellenlänge abhängig.

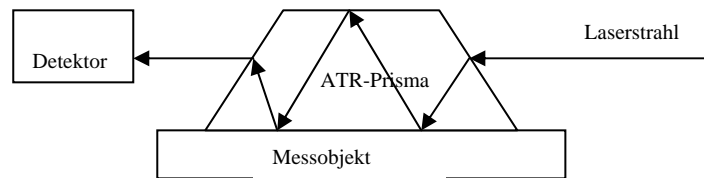
### 4.1 Laser in der Diagnostik

Wenn der Laser in der Diagnostik eingesetzt wird dann meist wie in anderen Bereichen auch als Messgerät und Indikator. Seine besonderen Eigenschaften wie Kohärenz, das monochromatische Licht und die Möglichkeit dieses durchzustimmen, machen ihn hier unverzichtbar.

Mit einem **ATR-Spektrometer** lassen sich metabolische Prozesse im lebenden Gewebe nachweisen. Ein Laserstrahl fällt in das ATR-Prisma so ein, dass er im Grenzwinkel der

Totalreflektion an den parallelen Seiten des Prismas reflektiert wird. Das Messobjekt wird an eine der parallelen

Seiten herangepresst und absorbiert je nach seinen Absorptionseigenschaften einen Teil der in das optisch dünnere Medium bei Totalreflektion eindringenden Lichtwelle. Nachweisbar sind Methabolite (Stoffwechselprodukte) Alkohol, Cholesterin, Glucose, Harnstoff u.a., was zu Diagnose zur Herzinfarktgefährdung, Diabetes, Gicht u.a. führen kann. Vorteile des Spektrometers sind seine hohe Empfindlichkeit, Auflösungsvermögen und die geringe Wärmebelastung des Messobjekts.



Durch die **Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmessung** lässt sich die Blutströmung im Auge mit hoher räumlicher Auflösung ermitteln. Dabei werden die Blutgefäße mit Laserlicht bestrahlt und das von den roten Blutzellen gestreute Licht registriert. Mit Hilfe der Laserstrahlung ist ein zeitiges Aufspüren von Krebswucherungen möglich, noch bevor sie aufgrund ihrer geringen Größe (ca. 10 Zellen) auf Röntgenbildern nachweisbar sind. Nach Verabreichung von Hämatoporphyrinderivat (HPD), das sich sofort an die Krebszellen anlagert wird dieses mit Hilfe einer starken UV-Strahlenquelle geortet und fluoresziert im Roten-Bereich.

Mit Hilfe eines Laserstrahls kann die auch Netzhaut des Auges genauer als bisher vermessen werden was zu einer schnelleren und präziseren Anpassung von Linsen führt.

## 4.2 Laser in der Chirurgie

Durch die Wechselwirkung von Laserstrahlung mit biologischem Material lassen sich spezifische Gewebeveränderungen hervorrufen, die für medizinisch-therapeutische Anwendungen ausgenutzt werden können. Ausgehend von Pulsdauer Wellenlänge und Leistung lassen sich die Reaktionen des Gewebes auf Bestrahlung in drei wesentliche Effekte aufteilen, wobei in der Praxis nicht immer eine deutliche Trennung möglich ist.

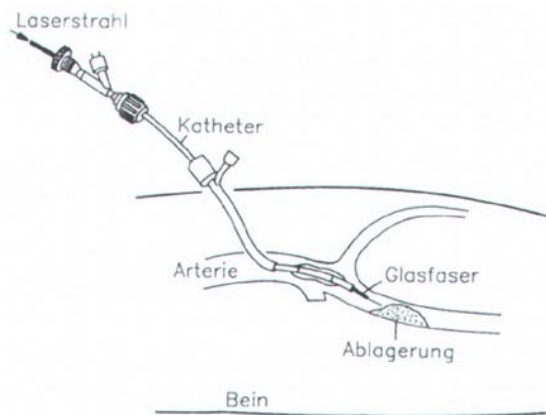
Bei niedrigen Intensitäten und langen Bestrahlungsdauern sind **photochemische** Wirkungen im Gewebe zu erwarten. Dabei werden mit kurzen ultravioletten Wellen die Verbindungen der Moleküle und Atome aufgebrochen, und deren physikalischen und chemischen Eigenschaften verändert.

Wird die Leistung weiter erhöht so verursacht die Steigende Temperatur im Gewebe ein Verdampfen des im Gewebe befindlichen Wassers. Wirkt der Laser weiter auf diese Stelle ein so kommt es zu einer Zersetzung des Gewebes mit Karbonisierung (Verkohlung) und es kann eine Schneidwirkung erzielt werden. Diesen Vorgang nennt man **photothermische Wirkung**.

Der **nichtlineare Effekt**, oder **Photoablation** tritt dann auf, wenn man mit sehr kurzen Pulsen ( $<1\mu\text{s}$ ) und hohen Energiedichten ( $10^7 \text{ Watt/cm}^2$ ) auf das Gewebe einwirkt. Hierbei werden die Molekülstrukturen aufgespalten (Dissoziation), aufgrund der sehr kurzen Pulse ist dieser Effekt aber auf ein sehr begrenztes Gebiet reduziert und es entsteht so gut wie keine Umgebungswärme. Ein Teil der Laserstrahlung trägt zur Volumenvergrößerung der abgetrennten Fragmente bei so das diese den Ort verlassen.

Durch eine weitere Leistungssteigerung wird das Gewebe optisch durchbrochen (**Photodisruption**), was zur Zertrümmerung von z.B. Nieren und Blasensteinen genutzt wird. Hier wird ausgenutzt, dass ein enorm expandierendes Plasma dem Laserstrahl alles an Energie entzieht. Hier ist eine minimale Laserenergie-zu-Wärmeenergie-Umwandlung zu beobachten, die Druckwellen der Explosion können eineigen Hundert Kilobar betragen.

Nachstehend einige Anwendungsbeispiele für den Einsatz in der chirurgischen Praxis.



**Abbildung 19: Endoskopische Laserbehandlung**

Mit dem Laser lassen sich eine Vielzahl von Behandlungen durchführen und optimieren. Die Urologie (Tumorentfernung), Orthopädie (Schneiden Oberflächenbehandlung an Knochen), Gynäkologie (Virusdeaktivierung) und Behandlung im HNO-Bereich stehen hier stellvertretend für viele Einsatzbereiche des Lasers. Sein

Potential kann er an besonders schwer zugänglichen Körperstellen unter Beweis stellen (Tumorentfernung im Magen-Darm-Trakt), so besteht die Möglichkeit Patienten zu operieren ohne sie zu öffnen.

Neben dem Aufspüren der Krebszellen, ist auch eine Schädigung dieser möglich, wenn man die zuvor mit HPD angereicherten Zellen mit rotem Licht bestrahlt (Wellenlänge 630 nm).

Beim Einsatz von CO<sub>2</sub>-Lasern als Laserskalpell wird durch explosionsartige Verdampfung des Zellwassers die Materialstruktur zerstört. Erst dann erfolgt ein Temperaturanstieg der zur Verkohlung und Verdampfung von Gewebe führt. Dadurch werden Blutgefäße (bis 1mm) spontan verschlossen und es sind somit Schnitte in stark durchblutetem Gewebe möglich. Im Gegensatz ist die Schneidwirkung des Nd-YAG-Lasers geringer und somit wird er vorzugsweise zur Verklumpung und Verödung an schwer zugänglichen Gewebestellen genutzt.



**Abbildung 20: Laserschnitt durch Biomaterial**

Auf der anderen Seite lassen sich mit Hilfe des Lasers auch sehr kleine Schnitte durchführen, was besonders in der medizinischen Forschung Anwendung findet. So wird an Laserskalpellen geforscht, die es ermöglichen Schnitte im nm-Bereich durchzuführen. So ist es möglich mit einem ultrakurzgepulsten Laser ein einzelnes

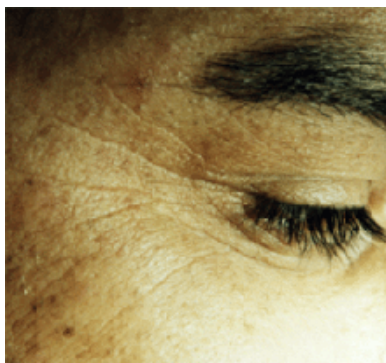
Chromosom mit einem Schnitt von nur 110 nm Breite einzuschneiden.

Vorteil des Laserskalpells im nahinfraroten Spektrum ist es, das mit dem Strahl durch Zellschichten gedrungen werden kann ohne sie zu beschädigen, bevor er sein eigentliches Einsatzgebiet erreicht.

In der Dermatologie ist der Laser zu einem Instrument für kosmetische Korrekturen und zur Behandlung von Operationsnarben und Wunden geworden.



**Abbildung 21/22: Entfernung von Altersflecken**



**Abbildung 23/24: Faltenglättung**



**Abbildung 25/26: Entfernung einer Tätowierung**

### 4.3 Augenheilkunde

Durch die hohe Präzision der Laserstrahlung stellt auch die Augenheilkunde ein wichtiges Anwendungsgebiet dar. Die **Lasik-Behandlung** soll als Beispiel für den Einsatz von Lasern dienen. Hier wird die Photoablation angewendet.

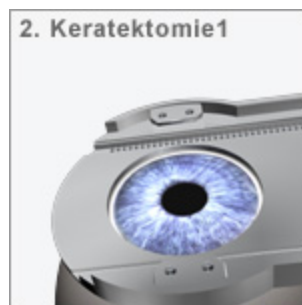
Möglich ist eine Korrigierung von Kurz-, Weit-, Stab- und Altersichtigkeit indem die Linsenkrümmung mit dem Laser berichtigt wird. Es Werden Veränderungen bis max. 5 Dioptrien durchgeführt, oder wenn der Fehler vorher nicht sehr groß war kann auch eine „übernatürliche Sehschärfe“ (eagle vision) erreicht werden

Nach Einsetzen eines Lidsperrers, der ein unbeabsichtigtes Schließen des Auges verhindert, wird die oberste Deckschicht der Hornhaut entfernt. Die umgebenden Gewebsschichten werden dabei nicht beschädigt. Nach Abtragung der feinen Schicht schließt und glättet sich die Hornhautoberfläche wieder.

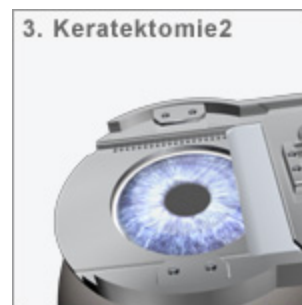
Abbildungen 27 bis 33: Schritte der LASIK-Behandlung



1. Augenuntersuchung



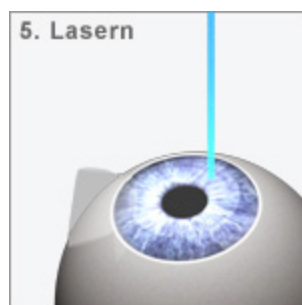
2. Präzisionsmesser  
aufsetzen



3. Präzisionshornhautschnitt



4. Aufklappen der  
Hornhautscheibe



5. Abtragen des  
Hornhautgewebes



6. Rückklappen der  
Hornhautscheibe



#### 4.4 Fazit

- Keine Instrumentelle Keimverschleppung
- Keine Störung der Reizleitungen bei Eingriff an Herz und Gehirn
- Schneiden weicher Gewebsteile ohne deren Fixierung möglich
- Absolut berührungsfreier Bearbeitungsprozess
- Erhebliche Reduzierung des Blutverlustes
- Einsatz in der Mikrochirurgie
- Geringer postoperativer Schmerz
- Hoher operativer Aufwand für Strahlführung und Fokussierung

### *5. Zusammenfassung und Ausblick*

Durch die weiter anhaltende Entwicklung sind in der Zukunft stabilere und kompaktere Lasersysteme in Verbindung mit geringeren Kosten zu erwarten. Die Verbesserung von Größe, Lebensdauer und Handhabung werden die Verbreitung in Materialbearbeitung und Medizin weiter vorantreiben. Besonders das Vordringen in den UV-Bereich (kürzere Wellenlängen) ermöglicht es immer kleinere Strukturen zu untersuchen und zu manipulieren. Durch die weitere Verkürzung der Pulsdauern wird die Photoablation zunehmend an Bedeutung gewinnen. Wenn es gelingt die Strahlqualität (Divergenz) zu verbessern und die Leistung von Halbleiterlasern zu erhöhen wird deren Verbreitung in der Materialbearbeitung weiter zunehmen. Da die Ausgangsleistungen von CO<sub>2</sub>-Lasern für die Materialbearbeitung bisher ausreichend sind (cw –Betrieb 40 kW) wird man versuchen die Leistung von Festkörperlasern zu erhöhen, da diese eine einfache Strahlführung über Glasfaser erlauben.