

## Laserstrahlschneiden

Joachim Berkmanns, Cleveland – USA

Mark Faerber, Unterschleißheim – Deutschland

# Zum Inhalt

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2. Das Laserstrahlschneiden</b>	<b>4</b>
2.1 Prozessvarianten	4
2.2 Laser für das Laserstrahlschneiden	5
<b>3. Wichtige Größen beim Laserstrahlschneiden</b>	<b>5</b>
3.1 Gepulste oder kontinuierlich betriebene Laser	5
3.2 Laserstrahlleistung und -intensität	6
3.3 Die Brennweite der Fokussierlinse	7
3.4 Intensitätsverteilung im Laserstrahl	8
3.5 Wellenlänge des Laserlichts	8
3.6 Positionierung des Brennflecks relativ zur Werkstückoberfläche	9
3.7 Düsengröße und Arbeitsabstand	10
3.8 Art des Gases und Gasdruck	11
<b>4. Gasdruck und Gasverbrauch abhängig vom Werkstoff</b>	<b>12</b>
4.1 Baustahl und niedriglegierter Stahl	12
4.2 Edelstähle	14
4.3 Aluminium und Aluminiumlegierungen	16
4.4 Titan	18
4.5 Nickellegierungen	18
4.6 Kupferlegierungen	18
4.7 Nichtmetalle	19
<b>5. Literatur</b>	<b>19</b>

# 1. Einleitung

Das Laserstrahlschneiden hat sich in den letzten Jahren in der Fertigungsindustrie zu einem Standardverfahren entwickelt. Schätzungen gehen von mehr als 25.000 Schneidanlagen aus, die weltweit zum Schneiden von Metallen und Nichtmetallen mit hohen Laserstrahlleistungen eingesetzt werden. Diese Zahl ist noch wesentlich größer, wenn das Laserstrahlschneiden mit geringer Leistung von z. B. Kunststoffen und Papier hinzugerechnet würde.

Beeindruckende Beispiele von aktuellen Anwendungen des Laserstrahlschneidens sind:

- Schneiden von Innen-Hochdruck-Umgeformt-Teilen (IHU-Teilen) und -Rohren
- Hochgeschwindigkeitsschneiden von Werkstoffen geringer Materialstärke
- Schneiden von Grobblechen

Die Entwicklungen der letzten Jahre zielen bei den Strahlerzeugern im Wesentlichen auf die Erhöhung der Laserstrahlleistung unter Beibehaltung einer hohen Strahlqualität. Bei der Entwicklung der Laseranlagen lag der Schwerpunkt in der Verbesserung der Antriebstechnik und der Werkstückhandhabung.

Das Laserstrahlschneiden wird aufgrund der zunehmenden Schneidgeschwindigkeiten, des geringen Werkzeug- und Ersatzteilbedarfs sowie der nahezu grenzenlosen Einsatzflexibilität immer mehr konkurrierende Verfahren verdrängen. Vorhersagen gehen sogar von einer Verdoppelung der Anzahl der Flachbett-Laserschneidanlagen in den nächsten 10 Jahren aus. Dazu kommen neue Anwendungen wie z. B. das Schneiden von IHU-Teilen und IHU-Rohren.

Die Gase, die zur Erzeugung des Laserstrahls und zum Austrieb von Werkstoffschmelze und -schlacke eingesetzt werden, sind entscheidende Hilfsstoffe beim Laserstrahlschneiden. Sie beeinflussen die Lebensdauer der optischen Elemente und sind mitbestimmend für die erzielbare Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität. Damit üben sie einen unmittelbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlschneidens aus.

Zielsetzung dieser Informationsschrift ist es daher, mögliche Anwender des Laserstrahlschneidens mit der Technologie vertraut zu machen und Hinweise für den bestmöglichen Einsatz von Schneidgasen zu geben. Die dazu in dieser Broschüre ausgeführten Erkenntnisse sind in den Versuchslaboratorien der Linde-Gruppe entstanden und wurden in Forschungsprojekten, die durch die Linde-Gruppe initiiert und gefördert wurden, ermittelt.



# 2. Das Laserstrahlschneiden

## 2.1 Prozessvarianten

Der Strahlerzeuger produziert einen sich nahezu parallel ausbreitenden und in den meisten Fällen unsichtbaren (!) Laserstrahl. Dieser wird mit Spiegeln zum Schneidkopf geleitet und mit einer darin befindlichen Linse auf einen kleinen Brennfleck fokussiert (Bild 1). Der Brennfleck wird auf der Werkstückoberseite oder im Werkstück platziert (siehe auch „Facts About: Grundlagen der Lasertechnik“).

Die hohe Intensität im Fokus heizt den Werkstoff schnell auf Schmelztemperatur und darüber auf. Das Schneidgas wird dann zugeführt, um die Fokussieroptik zu kühlen und zu schützen und außerdem um den geschmolzenen Werkstoff aus der Schnittfuge zu blasen. Je nachdem, welches Schneidgas verwendet wird, lassen sich folgende Prozessvarianten unterscheiden:

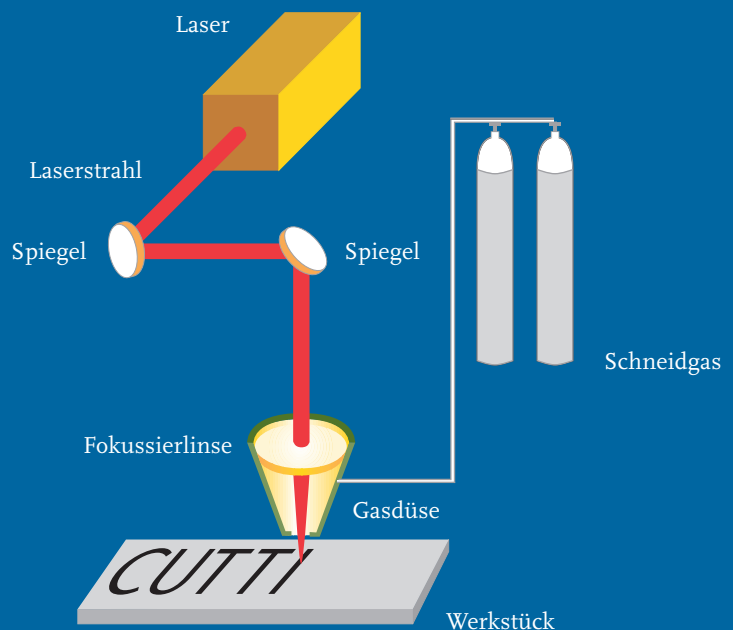
- Beim Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff wird der auf Entzündungstemperatur aufgeheizte Werkstoff verbrannt. Die Reaktion von Sauerstoff und Werkstoff ist exotherm und führt dem Prozess somit zusätzlich Verbrennungsenergie zu, die den Schneidprozess fördert. Diese exotherme Reaktion erleichtert das Schneiden großer Werkstückdicken und reflektierender Werkstoffe.
- Beim Laserstrahlschneiden mit Gasen, die nicht mit dem Werkstoff reagieren wie z. B. Stickstoff oder Argon, muss die gesamte Werkstückdicke vom Laserstrahl geschmolzen werden. Die kinetische Energie des Gasstrahls treibt dann die Schmelze aus der Schnittfuge. Da keine Reaktion stattfindet, wird auch keine zusätzliche Energie zugeführt. Die benötigte Laserstrahlleistung ist deshalb bei gleicher Blechdicke wesentlich höher als die beim Schneiden mit Sauerstoff.

Das Schneiden mit nicht reagierenden Gasen wird wegen der benötigten Gasdrücke auch Hochdruckschneiden genannt und oft eingesetzt, wenn metallisch blanke Schnittflächen erzielt werden sollen.

Eine weitere Prozessvariante ist das Sublimierschneiden. Beim Sublimierschneiden wird der Werkstoff im Laserstrahl spontan verdampft, ohne die Flüssigphase zu durchlaufen. Schneidgase werden hierbei zum Abtransport der verdampften Partikel eingesetzt.

Beim sogenannten „kalten“ Schneiden zerstört das Laserlicht die chemischen Verbindungen des Werkstoffs, der mehr oder weniger pulverisiert wird. Für diesen Prozess muss das Laserlicht genau auf die Verbindungsenergie abgestimmt werden. Ein Schneidgas ist dabei in der Regel nicht notwendig.

Bild 1: Prinzipieller Aufbau einer Laserstrahlschneidanlage



# 3. Wichtige Größen beim Laserstrahlschneiden

## 2.2 Laser für das Laserstrahlschneiden

Viele Laser können für das Laserstrahlschneiden eingesetzt werden, solange ihr Laserstrahl auf einen Brennfleck ausreichender Intensität zum Entzünden/Schmelzen des Werkstoffs fokussiert werden kann und die Wellenlänge des Laserlichts vom Werkstoff absorbiert wird. Heutzutage kommen im Wesentlichen CO<sub>2</sub>-Gaslaser, Nd:YAG-Festkörperlaser und Excimer-Gaslaser für das Laserstrahlschneiden zur Anwendung.

Der noch junge Diodenlaser lässt sich demzufolge nicht für das Laserstrahlschneiden einsetzen, da die Intensität im Brennfleck zur Zeit noch nicht ausreichend ist. Anders sieht es bei der jüngsten Laserentwicklung, dem Faserlaser, aus. Dieser scheint von der Strahlqualität, Leistung und Intensität im Brennfleck für das Laserstrahlschneiden gut geeignet.

## 3.1 Gepulste oder kontinuierlich betriebene Laser

Die höchste Schneidgeschwindigkeit wird im kontinuierlichen Betrieb (cw-Betrieb, cw = continuous wave) des Lasers erzielt. Kontinuierlicher Betrieb bedeutet dabei eine konstant hohe Ausgangsleistung ohne Unterbrechungen. Bei hohen Schneidgeschwindigkeiten wird nahezu die gesamte Laserstrahlenergie genutzt, um den Werkstoff zu schmelzen und zu verdampfen. Der Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff ist dabei vergleichsweise gering.

Ist jedoch eine Umkehr der Vorschubrichtung notwendig oder werden spitze Ecken mit verminderter Schneidgeschwindigkeit geschnitten, verursacht der Wärmestau eine lokale Überhitzung des Werkstoffs mit deutlich verminderter Schnittqualität. Beim Schneiden filigraner Strukturen oder beim Lochstechen in dickem Material ist es deshalb oft schwierig eine akzeptable Schnittqualität mit hoher

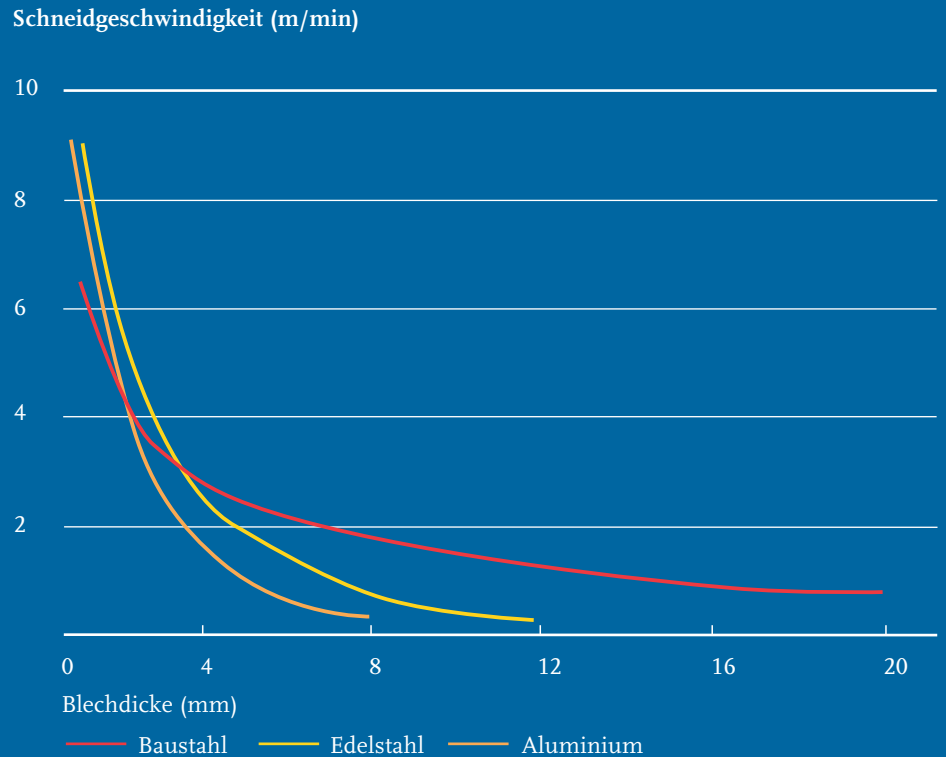
cw-Laserstrahlleistung zu erzielen. Wird die Laserstrahlung dagegen gepulst zugeführt, lässt sich der Werkstoff mit hoher Pulsleistung effektiv aufschmelzen und austreiben und kann in den Pausen zwischen den Pulsen abkühlen.

Die Schneidgeschwindigkeit ist beim Schneiden mit gepulster Laserstrahlung wesentlich geringer als bei kontinuierlich zugeführter Laserstrahlleistung. Die Durchschnittsleistung muss dabei zum Teil bis auf wenige hundert Watt reduziert werden, um eine signifikante Verbesserung der Schnittqualität zu ermöglichen. Die Schneidgeschwindigkeit ist entsprechend gering und kann zum Beispiel nur 10 % der im cw-Betrieb erreichbaren Geschwindigkeit betragen.

Zum Schneiden von Metallen werden in der Regel Pulsleistungen von 1 bis 10 kW benötigt, und die Pulszeit muss lang genug gewählt werden, um eine Werkstoffschicht an der Schneidfront aufzuschmelzen. Dazu sind üblicherweise Puls-längen von 1–3 Millisekunden notwendig.



**Bild 2: Typische Schneidgeschwindigkeiten mit ca. 3 kW-Laserstrahlleistung**



### 3.2 Laserstrahlleistung und -intensität

Laser werden üblicherweise nach der bereitgestellten Laserstrahlleistung unterschieden wie zum Beispiel 1.000-W- oder 6-kW-Laser. Die Laserstrahlleistung beschreibt dabei die abgegebene Energie pro Sekunde in Form von Strahlung. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Intensität des Laserlichts. Die Intensität beschreibt die Laserstrahlleistung je Flächeneinheit entsprechend:

$$\text{Intensität} = \frac{\text{Laserstrahlleistung}}{\text{beleuchtete Fläche}}$$

Beispiel: Wird ein Laserstrahl von 1.000 W auf einen Brennfleck von 0,1 mm im Durchmesser fokussiert, beträgt die Intensität der Laserstrahlung 125.000 W/mm<sup>2</sup>. Eine hohe Intensität bedeutet eine schnelle Erwärmung der Schneidstelle, sodass nur wenig Energie in den umliegenden Werkstoff abfließen kann. Damit lassen sich die lasertypisch hohen Schneidgeschwindigkeiten und die außerordentlich gute Schnittqualität erzielen.

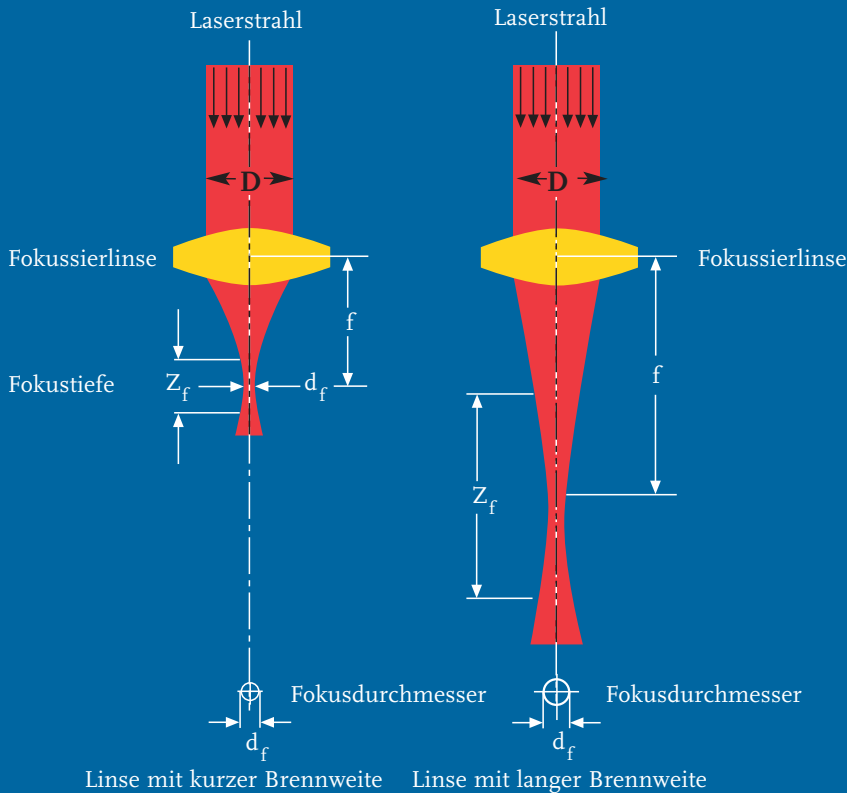
Die Intensität der Laserstrahlung ist außerdem für die schneidbare Blechdicke maßgeblich, je dicker der Werkstoff, desto höher die benötigte Intensität. Die Intensität wiederum hängt von der Höhe der Laserstrahlleistung ab und wird durch die optischen Eigenschaften der Linse verändert. Ein kleiner Brennfleck hoher Intensität lässt sich zum Beispiel mit einer kurzen Brennweite der Linse erzielen, die dazugehörige geringe Fokustiefe

(Rayleighlänge) ist jedoch für dickere Werkstoffe weniger gut geeignet.

Eine hohe Intensität kann sowohl mit gepulster als auch mit kontinuierlicher Laserstrahlung erzielt werden. Die schneidbare Blechdicke wird somit entweder durch die Pulsspitzenleistung bei gepulstem Betrieb oder durch die kontinuierliche Strahlleistung bei cw-Betrieb bestimmt.

Die Schneidgeschwindigkeit hängt demgegenüber von der eingebrachten Strahlleistung ab. Je höher die gesamte Strahlleistung, desto höher ist die Schneidgeschwindigkeit (Bild 2). Laser hoher Ausgangsleistung stellen aber nicht automatisch Laserstrahlung hoher Intensität bereit. Die Schneidlinse zur Fokussierung der Laserstrahlung ist jedoch in jedem Falle das entscheidende Element im Hinblick auf die erzielbare Schneidgeschwindigkeit.

Bild 3: Fokussierbarkeit von Laserstrahlung



### 3.3 Die Brennweite der Fokussierlinse

Die Fokussierlinse bündelt den Laserstrahl abhängig von der Brennweite der Linse unterschiedlich stark. Die Größe des Brennflecks ( $d_f$ ) hängt dabei von der Wellenlänge des Laserlichts ( $\lambda$ ), der Intensitätsverteilung im Laserstrahl ( $K$ ) und dem Durchmesser des unfokussierten Laserstrahls an der Linse ( $D$ ) ab, entsprechend der Formel:

$$d_f = \frac{4 \lambda}{\pi} \times \frac{f}{D} \times \frac{1}{K}$$

Ein kleiner Brennfleck ergibt sich bei:

- kurzer Brennweite der Linse ( $f$ )
- gleichmäßiger Intensitätsverteilung im Strahl ( $K$ ), (optimal: gaußförmige Verteilung,  $K = 1$ )
- kurzer Wellenlänge des Laserlichts ( $\lambda$ )
- großem Strahldurchmesser an der Linse ( $D$ )

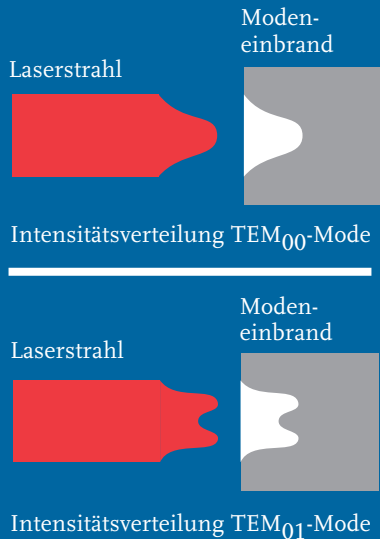
Die Fokustiefe  $Z_f$  (Rayleighlänge) ist ein Maß dafür, wie schnell sich der Strahl hinter dem Brennpunkt wieder aufweitet. Eine große Fokustiefe lässt mehr Spielraum bei der Positionierung des Fokus zu und ermöglicht das Schneiden größerer Blechdicken. Die Fokustiefe wird durch die gleichen Parameter beeinflusst wie die

Brennweite. Grundsätzlich bedeutet eine kurze Brennweite auch eine kurze Fokustiefe und umgekehrt.

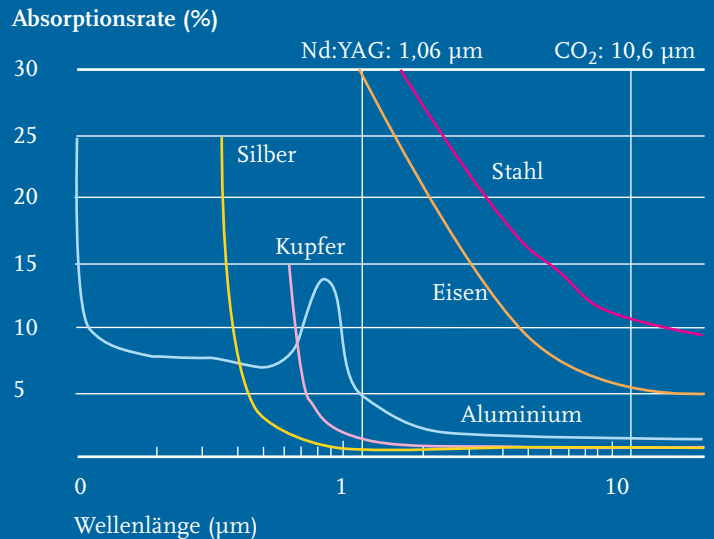
Eine Linse kurzer Brennweite erzeugt somit auch einen kleinen Brennfleck und eine kurze Fokustiefe. Damit ermöglicht sie hohe Schneidgeschwindigkeiten und gute Schnittqualität bei dünnen Werkstoffen. Der Arbeitsabstand ist jedoch wegen der kurzen Fokustiefe möglichst konstant zu halten.

Für größere Werkstückdicken muss die Fokustiefe entsprechend angepasst werden (Bild 3). Eine größere Fokustiefe bedeutet aber wiederum einen größeren Brennfleck mit verringerter Intensität, der eine höhere Laserleistung erfordert, um eine vergleichbar hohe Schneidgeschwindigkeit zu ermöglichen.

**Bild 4: Intensitätsverteilung im Laserstrahl, Mode**



**Bild 5: Absorptionsrate in Abhängigkeit von der Wellenlänge für unterschiedliche Werkstoffe**



### 3.4 Intensitätsverteilung im Laserstrahl

Die Intensitätsverteilung im Laserstrahl wird durch die so genannte Modenordnung beschrieben (Bild 4). (Details dazu in den „Facts About: Grundlagen der Lasertechnik“). Der Mode hat einen besonderen Einfluss auf den Schneidprozess wie im vorigen Kapitel beschrieben:

- Der Mode bestimmt die Größe des Brennflecks und damit die Intensität im Fokuspunkt
- Der Mode definiert die Intensitätsverteilung im Strahl und im Fokus und damit die Schnittqualität

Ein Mode niedriger Ordnung ist für das Laserstrahlschneiden entscheidend. Der beste Mode ist durch eine gaußförmige Intensitätsverteilung und damit optimale Fokussiereigenschaften der Strahlung gekennzeichnet. Diese gaußförmige Intensitätsverteilung wird durch den Term  $TEM_{00}$  beschrieben (Transverse Electromagnetic Mode der Ordnung Null).

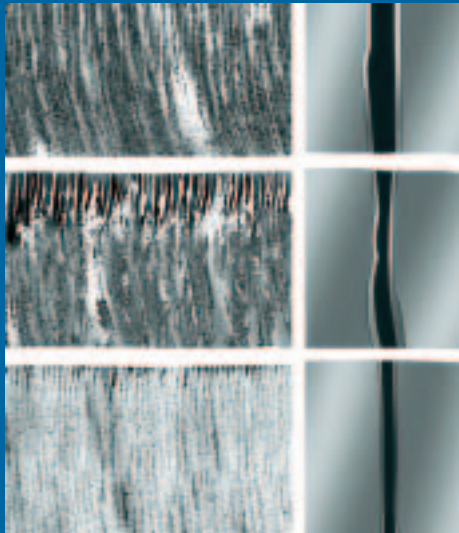
### 3.5 Wellenlänge des Laserlichts

Die Wellenlänge des Laserlichts ist entscheidend für die Absorption des Laserstrahls im Werkstoff, der geschnitten werden soll (Bild 5). So ist die Absorptionsrate für das  $CO_2$ -Laserlicht in kaltem Stahl nur ca. 15 %, was bedeutet, dass ca. 85 % des Laserstrahls reflektiert wird. Für das Nd:YAG-Laserlicht beträgt die Absorptionsrate dagegen ca. 25 %. Die zu Prozessbeginn hohe Reflexionsrate (kalter Werkstoff) kann jedoch sowohl vom Nd:YAG- als auch vom  $CO_2$ -Laser überwunden werden, wenn die Intensität des fokussierten Laserlichts ausreichend hoch ist. Mit steigender Temperatur steigt dann auch die Absorptionsrate deutlich an.

Glas kann demgegenüber mit Laserlicht aus dem sichtbaren und dem nahen Infrarotbereich nicht bearbeitet werden, da diese Strahlung ohne Absorption das Glas passiert.

Verschiedene hochreflektierende Werkstoffe wie z. B. Aluminium oder Kupfer

**Bild 6: Einfluss der Brennfleckposition auf die Schnittqualität**



Fokusposition: + 3,0 mm

▶ Fokusposition zu hoch

Fokusposition: - 2,5 mm

▶ Fokusposition zu tief

Fokusposition: 0,0 mm  
(Blechoberseite)

▶ Fokusposition richtig

absorbieren ebenfalls Laserstrahlung bestimmter Wellenlänge besser als Strahlung anderer Wellenlänge. Gleichwohl werden für die Auswahl des geeigneten Lasers oft andere Parameter wie z. B. die Spitzenleistung, die Pulslänge oder die Fokussierbarkeit der Strahlung sowie die Wellenlänge herangezogen.

Nd:YAG-Lasern wird oft eine bessere Schnittqualität als CO<sub>2</sub>-Lasern nachgesagt. Dieses gilt jedoch nur für gepulst betriebene Nd:YAG-Laser im Vergleich mit kontinuierlich betriebenen CO<sub>2</sub>-Lasern.

### 3.6 Positionierung des Brennflecks relativ zur Werkstückoberfläche

Hohe Intensitäten werden in einem Brennfleck kleinen Durchmessers erzielt, wobei allerdings auch die Fokustiefe gering ist. Demzufolge muss der Brennfleck relativ zur Werkstückoberfläche genau positioniert werden.

Grundsätzlich wird der Brennfleck beim Schneiden mit Sauerstoff an der Werkstückoberfläche platziert (Bild 6) oder bis zu ca. 75 % der Werkstückdicke im Werkstück beim Schneiden mit reaktionsträgen oder inerten Gasen. Werden große Werkstückdicken mit Sauerstoff geschnitten, kann der Brennfleck auch oberhalb des Werkstücks platziert werden. Dadurch wird die Schnittfuge breiter und die Entnahme des geschnittenen Teils vereinfacht.

Der Brennfleck ist bei verschiedenen Werkstoffen unterschiedlich zu positionieren. Die genaue Positionierung ist dabei kritischer bei geringerer Laserstrahlleistung als bei hoher Leistung und muss genau eingestellt und eingehalten werden, um eine konstant gute Schnittqualität zu erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen:

- Unterschiedliche Werkstoffe und Blechdicken können eine Anpassung der Fokusposition erfordern
- Änderungen der Laserstrahlparameter, des Modes, der Kühlwassertemperatur oder erhöhte Absorption in der Fokussierlinse infolge Verschmutzung verändern die Position des eingestellten Fokus

Bild 7: Düsengröße und Arbeitsabstand

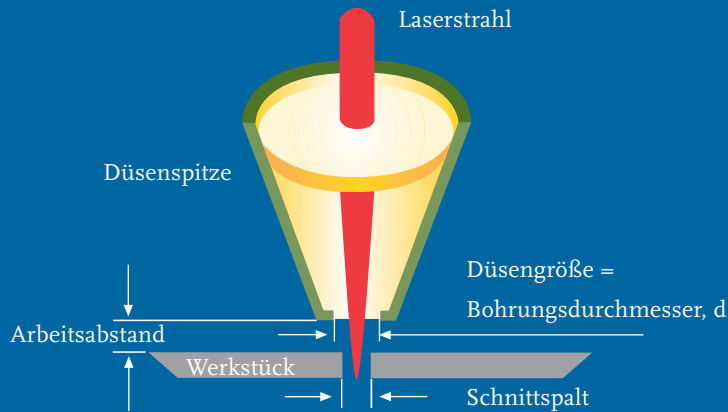


Bild 8: Einfluss von Düsengröße und Arbeitsabstand auf den effektiven Schneidgasdruck



### 3.7 Düsengröße und Arbeitsabstand

Die Ausbildung der Gasströmung ist entscheidend für die Schnittqualität. Die Gasströmung wird dabei wesentlich durch die Gasdüse und den Arbeitsabstand bestimmt.

Düsen für das Laserstrahlschneiden und deren Strömungsprofil unterscheiden sich deutlich von Düsen, die bei anderen thermischen Trennverfahren eingesetzt werden (Bild 7). Hierbei spielt der kompakte Aufbau und die im Vergleich zur schmalen Schnittfuge große Düsenöffnung eine besondere Rolle. Infolgedessen wird nur ein Bruchteil des Schneidgasstrahls in die Fuge eingekoppelt.

Der Arbeitsabstand wird wesentlich durch das Design der Düse bestimmt. Für die standardmäßig eingesetzten Düsen gilt, dass der Arbeitsabstand möglichst kleiner als der Durchmesser der Düsenbohrung sein sollte, um Turbulenzen und Druckschwankungen im Schneidgasstrahl bei größerem Arbeitsabstand zu vermeiden (Bild 8). Bei kleinerem Düsenabstand wirkt der Schnittspalt wie eine zusätzliche Düse, sodass die Geometrie der Düsenöffnung für die Schnittqualität weniger kritisch ist. Sind größere Arbeitsabstände notwendig, muss die Düse entsprechend konstruiert sein, insbesondere bei Drücken von mehr als 2–3 bar.

Standarddüsen weisen einen Öffnungsdurchmesser von 0,8–3,0 mm auf, wobei Arbeitsabstände von 0,5–1,5 mm eingehalten werden sollten.



### 3.8 Art des Gases und Gasdruck

Die Auswahl des Schneidgases ist entscheidend für das Schneidergebnis. Zum Schneiden von Baustahl und niedriglegierten Stählen wird Sauerstoff eingesetzt, um hohe Schneidgeschwindigkeiten zu erzielen. Dabei reagiert der Sauerstoff mit dem Grundwerkstoff und es bildet sich eine fest haftende Oxidschicht. Bei hochlegierten Stählen ist dieses in der Regel unerwünscht, sodass Stickstoff als Schneidgas bevorzugt wird, wenn ausreichend Laserstrahlleistung zur Verfügung steht.

Stickstoff wird aber auch bei Baustahl eingesetzt, wenn die Werkstücke nach dem Laserstrahlschneiden pulverbeschichtet werden sollen. Oxide würden die Haftung der Beschichtung auf der Oberfläche beeinträchtigen und damit die Korrosionsbeständigkeit in Frage stellen<sup>1)</sup>.

Der Wechsel von Sauerstoff zu Stickstoff erfordert eine Anpassung der Maschinen-/ Prozessparameter. Für den Schneidgasdruck gelten dabei folgende Regeln:

#### Laserstrahlbrennschneiden von Baustahl mit Sauerstoff

- je dicker der Werkstoff, desto niedriger der Druck
- maximaler Druck ca. 6 bar

#### Laserstrahlschmelzschnitten von Edelstahl mit Stickstoff

- je dicker der Werkstoff, desto höher der Druck
- Mindestdruck ca. 8 bar

Zum Laserstrahlschneiden stehen heute Systeme mit bis zu 6 kW Laserstrahlleistung zur Verfügung, die ausreichend Leistungsreserven bieten, um damit zunehmend auch rostfreie und andere hochlegierte Stähle mit Stickstoff zu schneiden. Eine Unterstützung des Prozesses durch exotherme Reaktion findet dabei nicht statt und der Schneidgasdruck muss mit zunehmender Blechdicke erhöht werden.

Dieser Druck liegt im Schneidkopf auch an der Fokussierlinse an, die nur eine begrenzte Festigkeit aufweist. Bei älteren Systemen können die Schneidlinsen zum Teil nur einen Druck von ca. 12 bar aushalten, neuere Systeme sind mit Linsen größerer Festigkeit ausgestattet, die bis zu ca. 20 bar ertragen. Damit lassen sich Edelstahl und auch Aluminium in hoher Qualität schneiden.

Im Folgenden werden dazu unterschiedliche Werkstoffe und deren Schneidparameter betrachtet.

# 4. Gasdruck und Gasverbrauch abhängig vom Werkstoff

## 4.1 Baustahl und niedriglegierter Stahl

Das Laserstrahlbrennschneiden wird hauptsächlich zum thermischen Trennen von Baustahl und niedriglegiertem Stahlblech angewendet. Profile, wie sie z. B. in der Automobilfertigung benötigt werden, werden bevorzugt mit einem robotergeführten Nd:YAG-Laser bearbeitet.

Heutzutage werden Bleche von bis zu 20 mm Dicke mit 3 kW Laserstrahlleistung standardmäßig geschnitten. Der Fokus ist dabei an der Werkstückoberseite platziert. Weitere typische Parameter sind in Tafel 1 zusammengefasst; der Gasverbrauch ist im Bild 10 dargestellt.

Die darin gemachten Angaben sollten jedoch nur als Anhaltswerte betrachtet werden, da sich abhängig vom Laser, vom Strahlführungssystem, von der Gaszuführung und der Fokusposition andere Parameter ergeben können. Dieses ist insbesondere beim Schneiden von Profilen

der Fall. Die Schneidgeschwindigkeit kann dabei kleiner als in den Tabellen angegeben sein, da das Führungssystem, z. B. ein Roboter, der Kontur evtl. nur mit eingeschränkter Geschwindigkeit folgen kann.

Zum Schneiden von Blechen mit einer Blechdicke von bis zu 6 mm können Schneidlinen mit einer Brennweite von 127 mm (5''), bei größerer Blechdicke von 190 mm (7,5'') eingesetzt werden.

Eine Laserleistung von mindestens 3 kW ermöglicht das Schneiden von Baustahlblechen der Dicke 12–25 mm. Dabei wird Sauerstoff mit einem Druck von weniger als 1 bar über eine Düse mit großer Bohrung von 2–3 mm zugeführt. Der Fokus wird 1–3 mm oberhalb der Blechoberfläche platziert.

Ein wesentlicher Einflussfaktor beim Schneiden von Bau- und niedriglegiertem Stahl ist die Reinheit des Schneidsauerstoffs<sup>2)</sup>. Die Schneidgeschwindigkeit ist

**Tafel 1: Parameter für das Laserstrahlschneiden von Baustahl mit Laserschneidsauerstoff**

Blechdicke	Laserstrahlleistung	Arbeitsabstand	Bohrungsdurchmesser der Düse	Sauerstoffdruck	Sauerstoffverbrauch	Schneidgeschwindigkeit
mm	W	mm	mm	bar	m <sup>3</sup> /h	m/min
0,5	500	0,3–0,6	0,6–0,8	3,5–6,0	2,0	15,0
1,0	800	0,3–0,6	0,6–0,8	3,5–6,0	1,8	11,0
2,0	1000	0,3–0,8	0,6–1,2	2,5–4,0	3,0	7,0
4,0	1000	0,3–0,8	0,6–1,2	2,0–4,0	2,7	4,0
6,0	1000	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–3,0	3,2	2,5
8,0	1500	0,5–1,0	1,2–1,5	1,5–2,5	3,0	2,0
12,0	1500	0,5–1,0	1,2–1,5	1,0–2,0	2,4	1,0
18,0	2000	0,5–1,0	1,2–1,5	0,5–1,0	1,4	0,5
25,0	4000	0,5–1,0	1,5–2,0	0,5–0,7	1,3	0,5

Achtung: Der Sauerstoffdruck wird mit zunehmender Blechdicke reduziert, um die Nachoxidation des Werkstoffs und Schnittqualitätseinbußen zu vermeiden. Siehe Seite 19 (\*)

bei Verwendung einer höheren Reinheit von zum Beispiel 99,9 %–99,95 % gegenüber der Standardreinheit von 99,5 % deutlich erhöht (Bild 9). Der Zugewinn kann 10–30 % ausmachen, abhängig von Blechdicke und Werkstoff sowie der zu schneidenden Werkstückkontur. Bei großen Werkstücken mit wenigen Richtungswechseln ist der mögliche Geschwindigkeitszuwachs deutlich größer als bei komplexen Werkstücken, bei denen die Schneidgeschwindigkeit eher durch das Führungssystem als durch den Schneidprozess begrenzt wird (siehe auch „Sonderdruck: Laserschneiden“).

Beim Schneiden von un- und niedriglegiertem Stahl mit Sauerstoff bildet sich auf der Schnittfläche ein Oxidsaum. Diese Oxidschicht ist in der Regel für die Gebrauchseigenschaften unbedeutend, es sei denn, dass eine Lackierung oder Pulverbeschichtung vorgesehen ist. Die Haftung der Beschichtung ist eingeschränkt und ein Abplatzen von Oxidschicht und

Beschichtung leicht möglich. Damit wäre ein vorgesehener Korrosionsschutz häufig. In diesem Fall wäre Stickstoff als Schneidgas vorzuziehen, der oxidfreie Schnittflächen hoher Haftung ermöglicht. Bei Werkstoffen großer Blechdicke ist die Schneidgeschwindigkeit mit Stickstoff als Schneidgas jedoch gegenüber Sauerstoff deutlich vermindert. Im Feinstblechbereich von weniger als 2 mm Blechdicke ist die Schneidgeschwindigkeit moderner Laser dagegen vergleichbar und kann mit Stickstoff sogar größer sein als mit Sauerstoff.

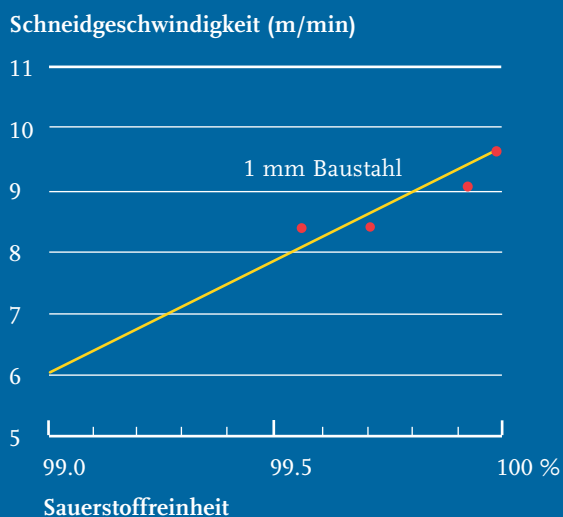
Der Zustand der Werkstückoberfläche hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Schneidergebnis bei un- und niedriglegierten Stählen. Werden zum Beispiel rostige Blechtafeln laserstrahlbrenngeschnitten, können Schlackenanhaftungen und Auskolkungen die Schnittqualität vermindern. Auch gezielt auf die Oberfläche aufgetragene Beschichtungen wie z. B. Zink- oder Eisenoxid-

primer schränken die Schnittqualität abhängig von der Art der Beschichtung deutlich ein. Eine Verbesserung der Situation lässt sich erreichen, wenn eine einseitige Beschichtung auf der unteren, also dem Laserschneidkopf abgewandten Seite platziert wird.

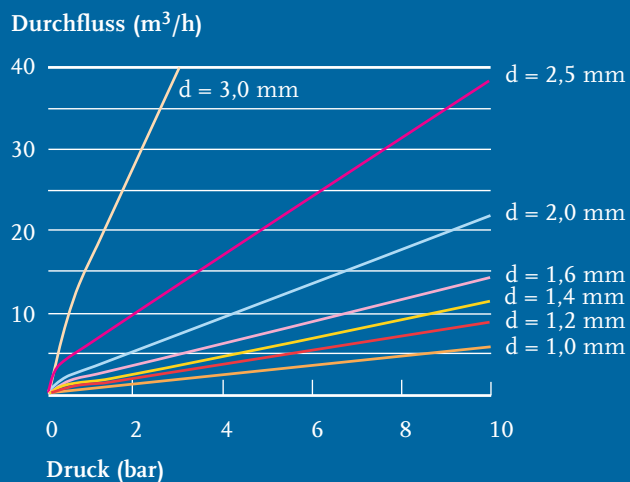
Qualitätseinbußen lassen sich auch dadurch weitgehend vermeiden, dass Stickstoff als Schneidgas verwendet wird, auch wenn die Schneidgeschwindigkeit deutlich geringer ist als bei Einsatz von Sauerstoff.

Verzinkte Bleche, galvanisiert oder heiß aufgetragen, sind nur schlecht mit Sauerstoff zu schneiden. Feste Anhaftungen und sehr raue Schnittflächen schränken die Schnittqualität ein. Industriell wird daher hauptsächlich das Hochdruckschneiden mit Stickstoff für verzinkte Bleche eingesetzt. Die Schnittqualität ist akzeptabel und die Schnittkanten sind frei von Anhaftungen.

**Bild 9: Einfluss der Sauerstoffreinheit auf die Schneidgeschwindigkeit beim Schneiden von 1 mm Baustahl mit 800 W Laserleistung und einem Schneidgasdruck von 3 bar**



**Bild 10: Sauerstoffverbrauch (Durchfluss) abhängig vom Druck in der Düse für unterschiedliche Düsengrößen, d**



## 4.2 Edelstähle

In der Fertigung werden sowohl Sauerstoff als auch Stickstoff zum Laserstrahlschneiden von Edelstählen eingesetzt.

Mit Sauerstoff lassen sich infolge des exothermen Energiebeitrags hohe Schneidgeschwindigkeiten realisieren. Die maximal schneidbare Blechdicke beträgt ca. 16–18 mm. Der Fokus ist dabei an der Oberfläche bzw. nahe der Oberfläche im Werkstoff platziert.

Im Gegensatz zu Baustahl wird Edelstahl auch bei größerer Blechdicke mit einem relativ hohen Sauerstoffdruck von ca. 5 bar geschnitten. Eine höhere Sauerstoffreinheit von 99,9 %–99,95 % ermöglicht höhere Schneidgeschwindigkeiten als eine Standardreinheit von ca. 99,5 %. Parameter für das Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff sind in Tafel 2 zusammengestellt.

Nachteilig bei der Verwendung von Sauerstoff als Schneidgas ist die eingeschränkte Schnittqualität mit Schlackenanhaftungen und Verfärbung der Schnittflächen infolge der Bildung von Eisen- und Chromoxiden<sup>3)</sup>. Diese Oxide beeinträchtigen die Nahtqualität bei einem nachfolgenden Schweißprozess. Bei WIG-Schweißungen finden sich z. B. schwarze Oxideinschlüsse im Wurzelbereich oder auch ungenügende Durchschweißung. Besonders kritisch ist jedoch die Einschränkung der Korrosionsbeständigkeit infolge der Oxidation zu betrachten. Diese Nachteile des Schneidens von Edelstahl mit Sauerstoff wiegen schwer, insbesondere wenn die Gebrauchseigenschaften des Werkstücks mit aufwändiger Nacharbeit wiederhergestellt werden müssen.

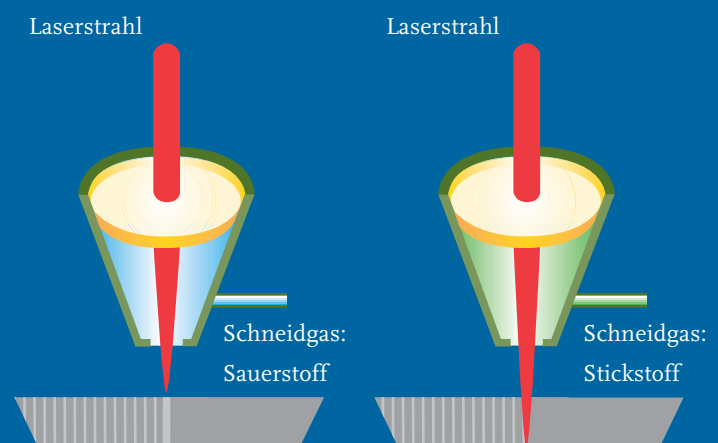
Wird jedoch anstatt Sauerstoff Stickstoff mit hohem Druck zugeführt, lassen sich anhaftungs- und oxidfreie Schnittflächen erstellen.

Tafel 2: Parameter für das Laserstrahlschneiden von Edelstahl mit Laserschneid-Sauerstoff

Blechdicke	Laserstrahlleistung	Arbeitsabstand	Bohrungsdurchmesser der Düse	Sauerstoffdruck	Sauerstoffverbrauch	Schneidgeschwindigkeit
mm	W	mm	mm	bar	m <sup>3</sup> /h	m/min
0,5	1000	0,3–0,6	0,6–1,2	4,0–6,0	5,0	15,0
1,0	1000	0,3–0,6	0,6–1,2	4,0–6,0	5,0	11,0
2,0	1000	0,3–0,6	0,6–1,2	4,0–6,0	5,0	7,0
4,0	1500	0,3–0,6	0,8–1,5	4,0–5,0	7,0	3,0
6,0	1500	0,5–0,8	1,0–1,5	3,5–5,0	7,0	0,6
9,0	1500	0,5–0,8	1,2–1,5	3,5–4,0	5,5	0,3

Achtung: Der Sauerstoffdruck ist höher als beim Schneiden von Baustahl. Siehe Seite 19(\*)

Bild 11: Position des Brennflecks beim Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff und Stickstoff



Die Schneidgeschwindigkeit ist dabei jedoch wesentlich langsamer als mit Sauerstoff und lässt sich nur mit Erhöhung der Laserleistung steigern. CO<sub>2</sub>-Laser mit einer Leistung von mindestens 2,5 kW werden für diese Anwendung eingesetzt. Die in guter Qualität zu schneidende Blechdicke beträgt dabei ca. 12–16 mm.

Eine gute Schnittqualität ohne Anhaftungen lässt sich mit Stickstoff als Schneidgas erzielen, wenn der Fokus an der Blechunterseite platziert ist. Der Schnittpalt ist dadurch erweitert und ein größerer Anteil Stickstoff kann in den Schnittpalt eindringen und die Schmelze austreiben.

Als Folge der tiefen Fokusposition bzw. des größeren Abstands von der Düse ist der Strahldurchmesser in der Düse größer als beim Schneiden mit Sauerstoff (Bild 11).

Für das Laserstrahlschneiden mit Stickstoff sind demzufolge Düsen mit einem größeren Bohrungsdurchmesser von mindestens 1,5 mm einzusetzen, um eine Wandberührung des Laserstrahls zu verhindern. Parameter für das Laserstrahlschneiden mit Stickstoff hohen Drucks sind in der Tafel 3 zusammengestellt. Bild 12 zeigt den Stickstoffverbrauch abhängig von Druck und Düsengröße.

Eine höhere Reinheit als die Standardreinheit des Stickstoffs bedingt keine Verbesserung der Schneidgeschwindigkeit. Allerdings können bereits geringe Mengen an Sauerstoffverunreinigungen im Schneidstickstoff Anlauffarben und damit Oxidation an den Schnittflächen verursachen. Bei rostfreien Stählen ist damit bereits die Korrosionsbeständigkeit aufgehoben.

Um bei diesen Stählen eine metallisch blanke und korrosionsbeständige Schnittkante zu erzielen, darf nicht mehr als ca. 20 ppm (0,002 %) Sauerstoff im Schneidstickstoff enthalten sein. Diese Spezifikation gilt schwerpunktmäßig für korrosionsbeständige Stähle und ist bei anderen Werkstoffen nicht notwendig.

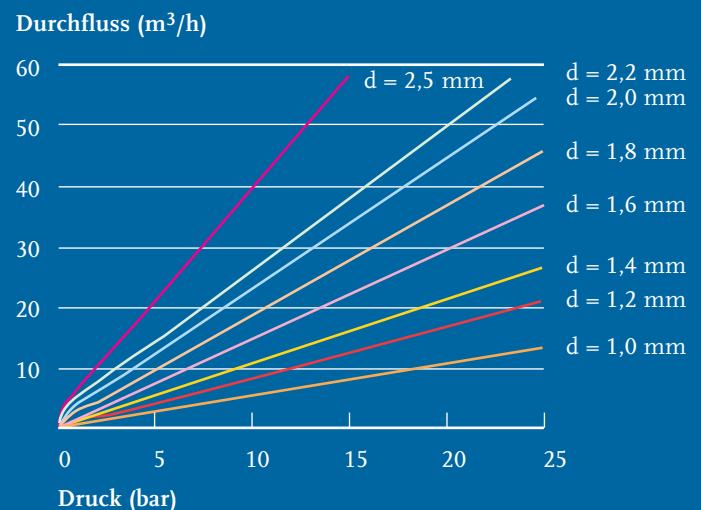
Gasförmiger Stickstoff wird in Gasflaschen und Flaschenbündeln unterschiedlicher Reinheitsgrade bereitgestellt. Zum Schneiden rostfreier Stähle muss entsprechend eine geeignete Reinheit angefordert werden. Bei einer Versorgung mit flüssigem Stickstoff, z. B. über einen Tank, sind Sauerstoffverunreinigungen wegen der hohen Produktqualität in der Regel so gering, dass keine Verfärbungen auftreten.

**Tafel 3: Parameter für das Laserstrahlschneiden von Edelstahl mit Laserschneid-Stickstoff**

Blechdicke	Laserstrahlleistung	Arbeitsabstand	Bohrungsdurchmesser der Düse	Stickstoffdruck	Stickstoffverbrauch	Schneidgeschwindigkeit
mm	W	mm	mm	bar	m <sup>3</sup> /h	m/min
1,0	1500	0,3–0,6	1,2–1,5	6,0	8,0	7,0
2,0	1500	0,3–0,6	1,2–1,5	9,0	12,0	4,0
4,0	3000	0,3–0,8	2,0–2,5	13,0	28,0	3,0
6,0	3000	0,5–1,0	2,5–3,0	14,0	52,0	1,5
9,0	4000	0,5–1,0	2,5–3,0	16,0	60,0	1,0
12,0	4000	0,5–1,0	2,5–3,0	18,0	68,0	0,5

Achtung: Je größer die Blechdicke, desto höher der Stickstoffdruck. Siehe Seite 19(\*)

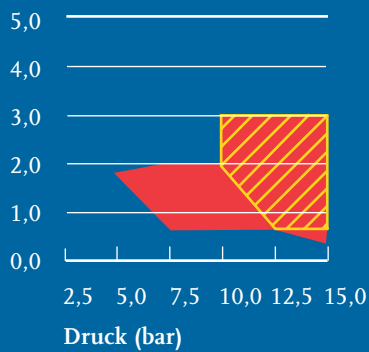
**Bild 12: Stickstoffverbrauch (Durchfluss) abhängig vom Druck in der Düse für unterschiedliche Düsengrößen, d**



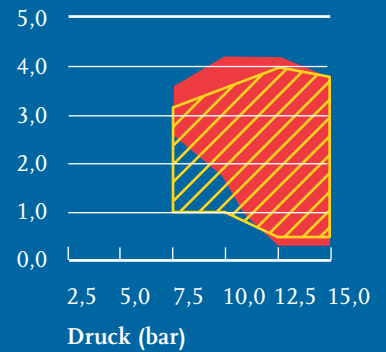


**Bild 13: Parameterfeld für gratfreies Schneiden von 2 mm Aluminium und 2 mm Aluminiumlegierung mit Stickstoff und Sauerstoff bis zu 15 bar und einer Laserleistung von 1.500 Watt**

**Rein-Aluminium (Al 99,5)**  
Schneidgeschwindigkeit  
(m/min)



**Aluminiumlegierung (AlMg3)**  
Schneidgeschwindigkeit  
(m/min)



Stickstoff Sauerstoff

### 4.3 Aluminium und Aluminiumlegierungen

„Aluminium“ ist ein Oberbegriff, der üblicherweise sowohl für reines Aluminium als auch für Aluminiumlegierungen verwendet wird. Reines Aluminium ist ein weiches Material, dessen Festigkeit durch Zugabe von Legierungselementen wie z. B. Magnesium, Kupfer, Mangan, Silizium und Zink erhöht werden kann.

Aluminium zeichnet sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus und die Werkstoffoberfläche ist stark reflektierend. Aluminiumlegierungen sind dabei mit dem Laserstrahl oftmals besser zu bearbeiten als reines Aluminium und die Schneidgeschwindigkeit ist größer. Eloxiertes Aluminium ist einfacher zu verarbeiten als unbehandeltes Aluminium, da die dicke Oxidschicht die Laserstrahlung besser absorbiert. Eine hohe Laserstrahlleistung von mindestens 2 kW und ein guter Mode sollten demzufolge für das Laserstrahlschneiden von Aluminium zur Verfügung stehen.

**Tafel 4: Parameter für das Laserstrahlschneiden der Aluminiumlegierung AlMg3, Schnitte ohne Anhaftungen, Schneidgas: Stickstoff**

Blechdicke	Laserstrahlleistung	Arbeitsabstand	Bohrungsdurchmesser der Düse	Stickstoffdruck	Stickstoffverbrauch	Schneidgeschwindigkeit
mm	W	mm	mm	bar	m <sup>3</sup> /h	m/min
1,0	1800	0,3–0,6	1,2–1,5	12,0	11,0	8,2
2,0	1800	0,3–0,6	1,2–1,5	14,0	15,0	3,6
3,0	3000	0,3–0,8	1,2–1,5	14,0	15,0	2,5
4,0	3000	0,3–0,8	1,8–2,2	14,0	35,0	1,8
6,0	4000	0,5–1,0	2,0–2,4	16,0	40,0	1,8
8,0	4000	0,5–1,0	2,0–2,5	16,0	45,0	0,8

Siehe Seite 19(\*)

Eine kleine Brennweite von ca. 63 mm (2,5") kann bei dünnen Blechdicken wegen der hohen Strahlintensität vorteilhaft angewendet werden. Die größte schneidbare Blechdicke beträgt, abhängig von der Legierungszusammensetzung, ca. 6–8 mm.

Aluminium kann sowohl mit Sauerstoff als auch mit Stickstoff als Schneidgas bearbeitet werden, wobei die Schneidgeschwindigkeit mit Sauerstoff nicht signifikant höher ist als die mit Stickstoff. Ursächlich dafür ist die mit ca. 2.072 °C hohe Schmelztemperatur der Aluminiumoxide. Aluminiumoxide bilden auf der Schnittfläche einen festen Film, der den Schneidsauerstoff von einem Zutritt zum Grundwerkstoff abhält. Dieser Oxidfilm bricht infolge der turbulenten Schmelzenströmung immer wieder auf und die Sauerstoffreaktion mit dem Grundwerkstoff kann fortschreiten, allerdings bei insgesamt geringer Schneidgeschwindigkeit.

Gleichwohl wird Aluminium oft mit Sauerstoff und einem Druck von weniger als 6 bar geschnitten. Der Laserstrahl ist dabei an der Werkstückoberseite fokussiert. Schneidsauerstoff in einer Standardreinheit ist dabei ausreichend, da mit höherer Reinheit keine signifikante Verbesserung der Schneidgeschwindigkeit erreicht werden kann. Nachteilig beim Schneiden mit Sauerstoff ist jedoch die Bildung von Schlackenanhaftungen und die sehr grobe Struktur der Schnittflächen.

Anhaftungsfreie Schnitte lassen sich sowohl mit Stickstoff als auch mit Sauerstoff erzielen, wenn ein ausreichend hoher Schneidgasdruck bereitgestellt wird. Stickstoff hat sich dabei als vorteilhaft für das Schneiden von Aluminiumlegierungen und Sauerstoff für reines Aluminium herauskristallisiert<sup>4)</sup>. Im Bild 13 sind dazu beispielhaft die Parameterfelder für das Schneiden von 2 mm dicken Blechen aus

reinem Aluminium (Al 99,5) und der Aluminiumlegierung AlMg3 in hoher Schnittqualität dargestellt. Beim Schneiden mit hohem Druck ist der Fokus an der Blechunterseite platziert. In der Tafel 4 sind typische Parameter für das Laserstrahlschneiden von AlMg3 zusammengestellt.

#### 4.4 Titan

Sauerstoff und Stickstoff sind als Schneidgase für Titanwerkstoffe ungeeignet, da diese Gase ebenso wie Wasserstoff im Werkstoff aufgenommen werden und eine Versprödung des Werkstoffs verursachen. Infolgedessen können Risse in der versprödeten Schicht entstehen, die sich ausweiten und zum Bauteilversagen führen.

Zum Schneiden von Titanwerkstoffen werden deshalb nur vollständig inerte Gase angewendet und das Bauteil vorzugsweise während des Schneidens in einer inerten Atmosphäre gelagert. Zum Schneiden wird Argon oder ein Argon-Helium-Gemisch eingesetzt, wobei Sauerstoffverunreinigungen weitestgehend ausgeschlossen werden müssen (Gasqualitäten 99,996–99,999 %). Ein Heliumanteil verbessert die Schnittqualität, wenn hohe Intensitäten im Fokus vorliegen und die Plasmabildung den Schneidprozess stört. Damit lassen sich anhaftungsfreie Schnitte erstellen. Der Fokus ist dabei tief im Werkstück unterhalb der Oberseite platziert.

#### 4.5 Nickellegierungen

Nickel ist die Basiskomponente bei einer Vielzahl von Legierungen mit speziellen Eigenschaften wie z. B. Inconel (Ni-Cr), Nimonic (Ni-Cr-Co), Hastelloy (Ni-Mo-Cr) und Monel (Ni-Cu).

Zum Laserstrahlschneiden dieser Werkstoffe kann Sauerstoff bei einem Druck von weniger als 6 bar eingesetzt werden. Der hohen Schneidgeschwindigkeit steht jedoch eine Qualitätsminderung durch Anhaftungen und oxidierte Schnittflächen gegenüber.

Stickstoff als Schneidgas unter hohem Druck zugeführt ermöglicht demgegenüber anhaftungsfreie Schnittkanten und metallisch blanke Schnittflächen bei deutlich geringerer Schneidgeschwindigkeit gegenüber Sauerstoff. Der Fokus ist dazu tief im Werkstoff unterhalb der Werkstückoberfläche platziert.

#### 4.6 Kupferlegierungen

Das Schneiden von Kupfer ist wegen des hohen Reflexionsvermögens und der Wärmeleitfähigkeit eine besondere Herausforderung. In der Regel müssen Maßnahmen getroffen werden, um eine vollständige Rückreflexion der Laserstrahlung und dadurch ausgelöste Beschädigung des Resonators zu vermeiden.

Messing als wichtigster Vertreter der Kupferlegierungen (Kupfer-Zink-Legierung) hat eine geringere Reflexivität und ein geringeres Wärmeleitvermögen als Kupfer und lässt sich mit CO<sub>2</sub>-Lasern bearbeiten. Dabei ist eine hohe Laserstrahlleistung sowie kurze Brennweite von z. B. 63 mm (2,5'') vorteilhaft.

Als Schneidgas kann Sauerstoff eingesetzt werden, wobei die sich bildende Oxidschicht die Absorption der Laserstrahlung verbessert. Der Schneidsauerstoff wird sowohl mit niedrigem Druck von bis zu 6 bar als auch mit hohem Druck von bis zu 20 bar angewendet. Der hohe Sauerstoffdruck birgt dabei das besondere Risiko der Sauerstoffanreicherung und erfordert spezielles Augenmerk auf die Arbeitssicherheit. Die schneidbare Blechdicke beträgt ca. 4–5 mm. Auch Stickstoff kann als Schneidgas für Kupferlegierungen eingesetzt werden.

#### 4.7 Nichtmetalle

Laser eignen sich hervorragend zur Bearbeitung von Nichtmetallen.

CO<sub>2</sub>-Laser werden zum Schneiden von Kunststoffen, Gummi, Textilien, Holz, Keramik und Quarzglas eingesetzt. Ein 1-kW-Laser schneidet dabei Kunststoff oder Sperrholz in einer Dicke von bis zu 25 mm.

Nd:YAG-Laser eignen sich besonders für das Schneiden von Keramiken wie z. B. Silizium-Karbid- oder Silizium-Nitrid-Keramiken. Als Schneidgas kann in den meisten Fällen öl- und fettfreie, trockene Druckluft verwendet werden. Inerte Gase wie z. B. Stickstoff werden bevorzugt, wenn der Werkstoff leicht entflammbar ist.

Sauerstoff ist das geeignete Schneidgas für Keramiken und verhindert Verfärbungen beim Schneiden von Aluminiumoxid- oder Zirkonoxidkeramiken.

Bei der Bearbeitung einiger Nichtmetalle wie z. B. Kunststoffe, Kunstfasern oder Keramik können giftige Gase und Stäube entstehen, die besondere Sicherheitsmaßnahmen und gute Absaugung erfordern.

## 5. Literatur

- 1) M. Faerber: Appropriate Gases for Laser Cutting of Stainless Steel, International Congress Stainless Steel 1996, Düsseldorf, VDEM (1996), S. 282–283
- 2) John Powell: CO<sub>2</sub> Laser Cutting, Springer Verlag (1993)
- 3) M. Faerber und W. Schmidt: Laserschneidgase, DVS-Berichte Band 185, DVS-Verlag (1997), S. 72–74
- 4) T. Kristensen und F.O. Olsen: Cutting of Aluminium Alloys, Proc. of the 4<sup>th</sup> NOLAMP Conf., Sonderborg (1993), S. 121–129

#### Bildnachweis:

Foto auf Seite 3 von Firma  
K. Moder GmbH, Wiesmoor, Deutschland

Foto auf Seite 11 von AUDI AG,  
Ingolstadt, Deutschland

**\* Die in den Tabellen und Diagrammen angegebenen Werte sind Anhaltswerte und können in der Praxis abweichen.**



#### Vertriebszentrum

##### Berlin

Tel.: (0 30) 6 09 08-0  
Fax: (0 30) 60 90 8-160

##### Hamburg

Tel.: (0 40) 85 31 21-0  
Fax: (0 40) 85 31 21-166

##### Köln

Tel.: (0 22 36) 39 08-0  
Fax: (0 22 36) 39 08-149

##### Mainz

Tel.: (0 61 34) 208-0  
Fax: (0 61 34) 208-25

##### Nürnberg

Tel.: (09 11) 42 38-0  
Fax: (09 11) 42 38-115

##### Düsseldorf

Tel.: (02 11) 74 81-0  
Fax: (02 11) 74 81-403

##### Hannover

Tel.: (05 11) 2 79 93-0  
Fax: (05 11) 2 79 93-53

##### Leuna

Tel.: (0 34 61) 8 53-0  
Fax: (0 34 61) 8 53-3 00

##### München

Tel.: (0 89) 3 10 01-0  
Fax: (0 89) 3 10 01-521

##### Stuttgart

Tel.: (07 11) 8 00 02-0  
Fax: (07 11) 8 00 02-19

## Vorsprung durch Innovation.

Linde Gas ist mehr. Linde Gas übernimmt mit zukunftsweisenden Produkt- und Gasversorgungskonzepten eine Vorreiterrolle im globalen Markt. Als Technologieführer ist es unsere Aufgabe, immer wieder neue Maßstäbe zu setzen. Angetrieben durch unseren Unternehmergeist arbeiten wir konsequent an neuen hochqualitativen Produkten und innovativen Verfahren.

Linde Gas bietet mehr – wir bieten Mehrwert, spürbare Wettbewerbsvorteile und erhöhte Profitabilität. Jedes Konzept wird exakt auf die Bedürfnisse unserer Kunden abgestimmt. Individuell und maßgeschneidert. Das gilt für alle Branchen und für jede Unternehmensgröße.

Wer heute mit der Konkurrenz von morgen mithalten will, braucht einen Partner an seiner Seite, für den höchste Qualität, Prozessoptimierungen und Produktivitätssteigerungen tägliche Werkzeuge für optimale Kundenlösungen sind. Partnerschaft bedeutet für uns jedoch nicht nur wir für Sie – sondern vor allem wir mit Ihnen. Denn in der Kooperation liegt die Kraft wirtschaftlichen Erfolgs.

**Linde Gas – ideas become solutions.**



Linde AG | Geschäftsbereich Linde Gas | Seitnerstraße 70 | 82049 Höllriegelskreuth  
Tel.: +49 (0)89 74 46-0 | Fax: +49 (0)89 74 46-1216 | [www.linde-gas.de](http://www.linde-gas.de)