

White Paper.

Prozessgase lösen Probleme bei Laser- schweißprozessen.

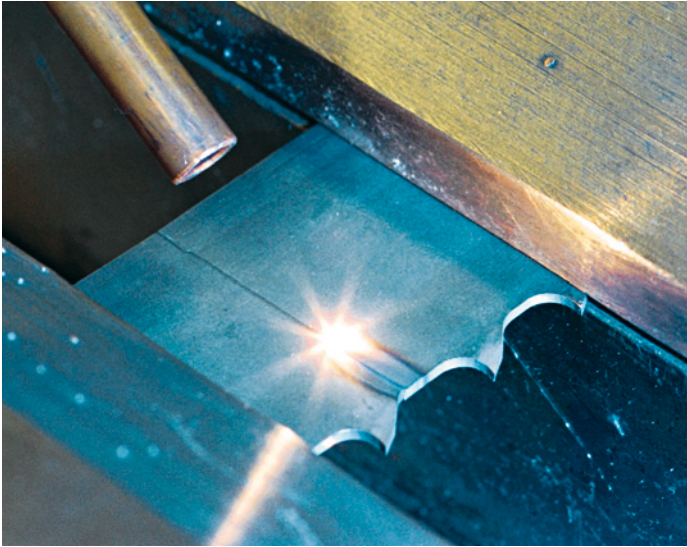
Datum Januar 2011

Autor Johann Herrmann

Inhalt.

Einführung	03
1. Laserschweißen – ein Verfahren mit enormem Potential	04
2. Fehlerbilder	05
2.1 Risse	05
2.2 Poren	05
2.2.1 Prozessporen bei nichtrostenden Stählen – bei hoher Viskosität der Schmelze	06
2.2.2 Prozessporen bei Aluminium – bei geringer Viskosität der Schmelze	07
2.3 Konstruktionsbedingte Störungen des Schweißprozesses	08
2.4 Poren und andere Fehlerbilder aufgrund der Eigenschaften des Werkstoffes	09
2.4.1 Poren durch bereits im Werkstoff enthaltene Gase	09
2.4.2 Laserschweißen von gegossenen Bauteilen mit Trennmittelrückständen	10
2.4.3 Bindung von reaktionsfreudigen Legierungselementen	10
2.4.4 Legierungselemente mit extrem unterschiedlichen Schmelz- bzw. Siedetemperaturen	11
2.4.5 Unterschiedliche Schmelz- und Siedepunkte bei beschichteten Bauteilen	12
2.4.6 Verunreinigungen der Bauteiloberflächen	13
2.5 Stark schwankende Schweißergebnisse und instabile Prozesse	13
3. Weiterentwicklung der Lasertechnik und deren Auswirkungen	14
3.1 Probleme durch Strahlquellen und Lösungsmöglichkeiten	14
3.2 Konstante Ergebnisse beim Remote-Laserschweißen durch Prozessgase	14
4. Zusammenfassung	15

Einführung.



Der Laserschweißprozess ist ein extrem interessanter Prozess mit vielen physikalischen und auch chemischen Wechselwirkungen. Bisweilen treten aber auch bei diesem Schweißprozess Probleme wie Spritzer, Poren, Löcher oder Risse in der Schweißnaht auf. Häufig ist der Anwender mit der Lösung dieser Probleme alleine überfordert. Als Gasanbieter mit eigener Anwendungstechnik, eigenen Geräten und eigenen Erfahrungen in den verschiedenen schweißtechnischen Verfahren wird man deshalb immer wieder um Unterstützung gebeten.

Diese Zusammenarbeit mit den Anwendern ist für beide Seiten vorteilhaft. So kann bei gemeinsamen Versuchen häufig das aktuelle Problem gelöst werden. Gleichzeitig werden die Gasversorgung der Anlage, die Messgeräte, die Gaszuführungen und nicht zuletzt die Prozessgasart überprüft und optimiert. Als einer der führenden Lieferanten für Industriegase haben wir den Anspruch, nicht nur Atome und Moleküle zu liefern. Vielmehr verfolgen wir das Ziel, bei diesen Versuchen Produkte zu entwickeln, die der Anwender zur Lösung seiner Aufgabenstellung benötigt. Die vielen Versuche an verschiedensten Laserschweißanlagen und Materialien zeigen, dass es beim Laserschweißen für ähnliche Schweißnahtfehler viele verschiedene Ursachen geben kann. Am Beispiel von Löchern und Poren werden im Folgenden die verschiedenen Ursachen und Lösungswege hierzu aufgezeigt.

Der Inhalt dieser Abhandlung basiert auf dem Vortrag, den der Autor im Rahmen der Laser-Tagung am 25./26.11.2010 in Jena gehalten hat.

1. Laserschweißen – ein Verfahren mit enormem Potential

Spricht man an dieser Stelle von Problemen, die beim Laserschweißen auftreten, ist als erstes festzustellen, dass es kein Wunder ist, wenn bei diesem Prozess auch Fehler auftreten. Neben der fehlenden Erfahrung mit dem Laserschweißprozess ist es zudem problematisch, dass der Laser heute alles schweißen muss, was herkömmliche Verfahren in dieser Form bisher nicht konnten. Wo andere funktionierende Lösungen vorhanden sind, wird man jedoch keinen neuen – teuren – Laser einsetzen. Der Laser soll aber nun gesintertes Material, alle möglichen Gussorten, Aluminium, Schwarz-Weiß-Verbindungen, Stähle mit hohen Kohlenstoffanteilen sowie gelaserte, gestanzte, verschmutzte Kanten usw. mit höchsten Geschwindigkeiten bei geringstem Aufwand, aber mit bester Qualität verschweißen. Und in sehr vielen Fällen wird dies erfreulicherweise auch erreicht. Treten dann aber einmal Probleme auf, sind die Anwender meist überfordert.

Das Laserschweißen ist ein relativ junges Verfahren, bei dem sich das Expertenwissen erst entwickeln muss. Die Ausbildung in dieser Technologie ist, verglichen mit herkömmlichen Schweißtechniken, fast nicht existent. Die vielen Versuche in Firmen, welche die Laserschweißtechnik heute bereits einsetzen, zeigen immer wieder, dass nur ein geringer

Prozentsatz der Laserschweißanlagen so betrieben wird, dass keine Verbesserungen erzielt werden können. Im überwiegenden Teil der Anlagen sind jedoch gravierende Verbesserungen möglich. Unter anderem zeigt sich immer wieder, dass die Prozessgasart und deren Zuführung sehr selten wirklich optimiert wurden. Dies ist nachvollziehbar, da für solche Optimierungen ein sehr spezielles Wissen und auch die nötigen Geräte zur Verfügung stehen müssen. Bei der Vielzahl der Parameter und der Größe der Variationsmöglichkeiten führt hier einfaches Ausprobieren kaum zum Erfolg.

Meist werden Optimierungen erst erreicht, wenn andere gravierende Probleme mit dem Laserschweißprozess auftreten. Wird man dann um Hilfe gebeten, sind die Versuche in der Regel äußerst dringend, da der Kunde die lasergeschweißten Teile reklamiert hat und mit dem Entzug des Auftrages droht. In diesen Fällen unterstützen wir gerne bei der Lösung der Probleme, kann doch nebenbei demonstriert werden, dass der Schweißprozess mit optimierter Gaszufuhr – also mit optimiertem Prozessgas – noch viel einfacher, besser, zuverlässiger und zudem noch viel wirtschaftlicher funktionieren kann.

2. Fehlerbilder

Optimierung der Schweißnaht bereits durch die geringe Kraft der Prozessgasströmung

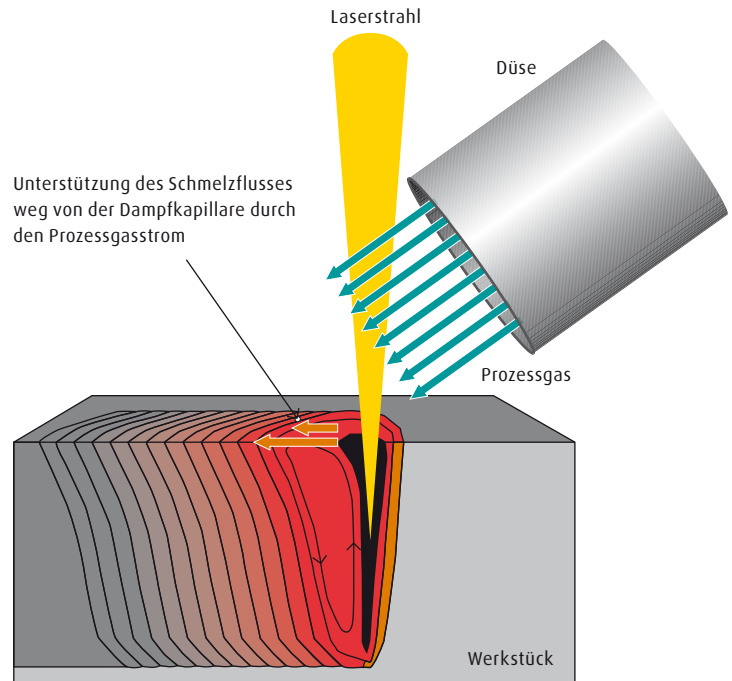


Bild 1: Mit Prozessgasunterstützung wird die Schmelze von der Dampfkapillare weggedrückt

2.1 Risse

Risse in einer Laserschweißnaht treten als Fehlerbild äußerst selten auf. Durch die schmalen Schweißnähte und die geringe Wärmeeinbringung sind auch die durch das Schweißverfahren eingebrachten Spannungen, die zu Rissen führen können, gering. Treten wirklich Risse auf, so können diese zwar auch teilweise mit Prozessgasen reduziert werden, aber in der Regel ist die Lösung schwieriger. Häufig müssen hier das Material, das Zusatzmaterial oder auch die Laserparameter angepasst werden. Dies bedeutet, dass Materiallieferanten, Laserhersteller, Optikhersteller oder andere bei der Lösung unterstützen müssen. Es kann auch sein, dass das Material vorgewärmt, nachgewärmt oder einer separaten Wärmebehandlung unterzogen werden muss. Trotzdem können auch hier Versuche mit Gasen einen entscheidenden Hinweis auf die Ursache der Probleme liefern. Häufig ist Wasserstoff der Verursacher von Rissen oder steht zumindest in Verdacht, die Probleme zu verursachen. Ein Versuch mit wasserstoffhaltigen Prozessgasen oder auch Wurzelschutz zeigen hier in der Regel sofort, ob der Angeklagte schuldig ist oder freigesprochen werden muss.

2.2 Poren

Häufig treten Poren, Löcher und Spritzer beim Laserschweißen gemeinsam auf. In der Regel haben sie gleiche oder ähnliche Ursachen. Teilweise werden Poren in der Laserschweißnaht zumindest bis zu bestimmten Größen auch als „Prozessporen“ toleriert. Dies ist auf das Prinzip des Laserschweißens zurückzuführen.

Hierbei schafft der Laserstrahl eine Dampfkapillare im Werkstück und koppelt über diese Bohrung die Wärmeenergie ins Material ein. Bei Durchmessern dieser Dampfkapillare im Bereich von wenigen Zehnteln eines Millimeters und Tiefen von einigen Millimetern ist es nachvollziehbar, dass die Dampfkapillare manchmal nicht mehr vollständig verfüllt wird und so Poren zurückbleiben. So gesehen ist es sogar erstaunlich, dass es doch auch sehr viele Laserschweißprozesse gibt, die nahezu porenfrei sind. Solche Poren treten bei Materialien wie nichtrostenden Stählen mit sehr zähen Schmelzen auf, aber auch bei Aluminium, dessen Schmelze dünnflüssig wie Wasser ist. Bei nichtrostenden Stählen und schmalen Schweißnähten ist teilweise die Schmelze zu zäh, um in der zur Verfügung stehenden Zeit die Dampfkapillare sauber aufzufüllen. Aus diesem Grund bleiben Hohlräume zurück. Außerdem besteht hier das Problem, dass Poren in der zähen Schmelze nicht aufsteigen können, um die Naht nach oben zu verlassen. Die Naht kann nicht komplett ausgasen. Bei sehr dünnflüssigen Schmelzen dagegen schwappt die Schmelze oben in die Dampfkapillare und wird womöglich teilweise durch den Dampfdruck herausgeschleudert, wodurch Poren bzw. Löcher zurückbleiben.

In beiden Fällen ist es zunächst oft hilfreich, mit schleppender Gaszuführung zu arbeiten. Hierbei können die Düse und der Prozessgasstrom so positioniert werden, dass der Gasstrom die Strömung der Schmelze von der Dampfkapillare weg, hin zur fertigen Schweißnaht unterstützt. Auch durch die Wahl der richtigen Prozessgaszusammensetzung können diese Prozessporen sehr gut reduziert oder gar verhindert werden. Je nach Entstehungsmechanismus kann dies aber in manchen Fällen nicht ausreichen, um die Poren zu verhindern.

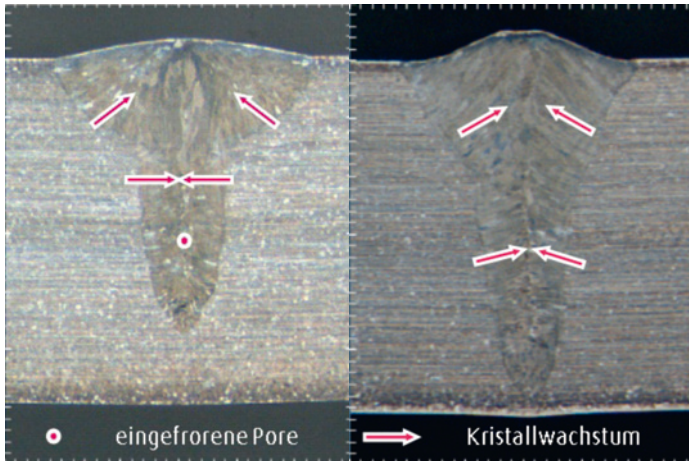


Bild 2: Schliff einer Laserschweißnaht in nichtrostendem Stahl unter inertem Prozessgas

Bild 3: Schliff einer Laserschweißnaht in nichtrostendem Stahl unter aktivem Prozessgas

2.2.1. Prozessporen bei nichtrostenden Stählen – bei hoher Viskosität der Schmelze

Bei sehr vielen Schweißungen in nichtrostenden Stählen sind Schweißnahtgeometrien zu finden, wie sie in Bild 2 dargestellt sind. Hierbei sind die Poren eigentlich immer im unteren schmalen Bereich der Wurzel zu finden. In diesem Bereich ist die Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze am höchsten und der Schmelzfluss wird durch die Nähe der Wände gebremst. Die Kristalle wachsen häufig senkrecht auf die Mitte der Schweißnaht zu. Genau hier in der Mitte der Naht findet man daher auch die meisten Poren, da sie dort zwischen den beiden Kristallisationsfronten eingeklemmt und fixiert werden, wenn die Schmelze über ihnen bereits zu zäh ist und erstarrt. In der Regel sind im oberen Bereich, wo die Kristalle zur Mitte der Oberfläche hin wachsen, keine Poren zu finden, da diese dort durch die Kristallisationsfront nach oben aus der Schweißnaht geschoben werden.

Die Lösung besteht darin, durch die Verwendung angepasster Prozessgase die Viskosität der Schmelze zu reduzieren und diese über eine Sekundärnutzung der Prozessenergie lange schmelzflüssig zu halten.

Dadurch können die Poren besser ausgasen. Durch die erleichterten Strömungsbedingungen kann aber auch die Wärme besser und homogener über die Einschweißtiefe verteilt werden. Unter diesen Bedingungen erstarrt die Schmelze in der Mitte der Schweißnaht sauber von unten nach oben. Die Dampfkapillare wird dadurch sauber aufgefüllt und Poren zuverlässig von der Kristallisationsfront nach oben aus dem Schweißbad gedrückt. Als Prozessgaskomponenten können hier, je nach Aufgabenstellung und Werkstoff, Wasserstoff aber vor allem Kohlendioxid eingesetzt werden. An dieser Stelle sei auf den Vortrag aus dem Jahr 2006 verwiesen, der in den DVS-Berichten Band 241 (ISBN-13: 978-3-87155-797-2, ISBN: 3-87155-797-8) veröffentlicht wurde.

Natürlich müssen bei Verwendung der Aktivgase die Verträglichkeit mit dem Werkstoff gegeben sein und alle Gesichtspunkte der Schweißnahtgüte betrachtet werden. Interessant ist hier, dass vor allem Kohlendioxidanteile sehr gut eingesetzt werden können, ohne eine starke Oxidation der Schweißnaht hervorzurufen. Im Vergleich zur herkömmlichen Schweißtechnik ergeben sich hier doch sehr große Unterschiede in den Auswirkungen von Kohlendioxidanteilen im Prozessgas auf Oberfläche und Qualität der Naht.

Prozessporen bei Aluminium – bei geringer Viskosität der Schmelze

Wie auf der vorigen Seite geschildert, gibt es beim Laserschweißen von Aluminium das genau entgegengesetzte Problem. Die Schmelze von Aluminium und vielen Aluminiumlegierungen ist häufig sehr dünnflüssig. Die Strömung ist oft sehr turbulent, die Spritzer fliegen und die Naht ist anschließend auch nicht unbedingt überzeugend. Erstaunlicherweise kann der Schweißprozess auch hier mit Aktivgasen zumindest teilweise beruhigt und stabilisiert werden.

In diesem Fall wird natürlich kein Wasserstoff eingesetzt, sondern bis zu 100 % Kohlendioxid oder auch geringe Anteile an Sauerstoff. Der Leser wird sich nun fragen, ob die Lösung sein soll, das Schweißbad noch dünnflüssiger zu machen? Dies ist jedoch nicht der Ansatz.

Bei Aluminium wirkt der Sauerstoff nämlich genau entgegengesetzt. Hierbei wird das fein dosierte Sauerstoffangebot dazu verwendet, die Oberfläche der Schmelze zu oxidieren. Dadurch bildet sich eine feine Oxidhaut auf der Schmelze, welche die Schmelze und den gesamten Schweißprozess stabilisiert. In der Regel sind die Vorteile einer solchen Prozessgasoptimierung wesentlich größer als die Nachteile. Die Oberfläche ist nun nicht mehr metallisch blank, sondern hat eine etwas dunklere, härtere und rauere Oberfläche. Zudem ist die Nahtoberfläche nun feiner und gleichmäßiger, homogener strukturiert und weist keine bzw. weniger Poren und Löcher auf. Müssen solche Unregelmäßigkeiten nachgearbeitet werden, kann der Aufwand hierfür in der Regel sehr stark reduziert werden. Die leichte Oxidation der Oberfläche am Aluminium hätte sich im Laufe der Zeit sowieso eingestellt und ist nur vorweggenommen.

Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Metallschmelzen im Vergleich zu Wasser

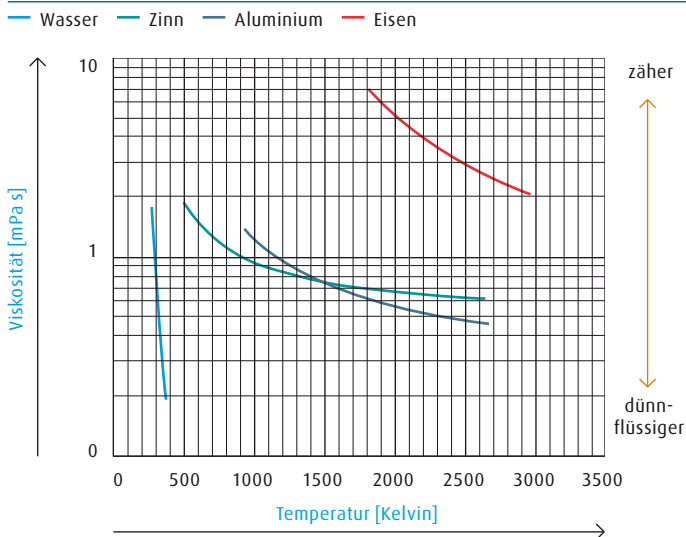


Bild 4: Die Viskosität von verschiedenen Metallschmelzen im Vergleich zur Viskosität von Wasser. Je höher die Viskosität ist, desto zäher ist die Flüssigkeit. Wenn die Viskosität abnimmt, fließt die Schmelze leichter.

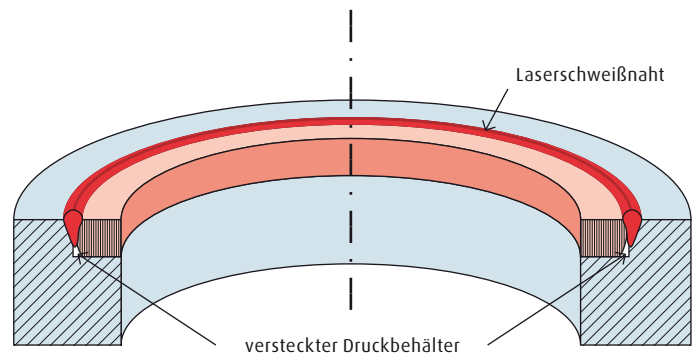


Bild 5: Versteckte Hohlräume können bei Erhitzung des Gasinhaltes zu Löchern in der Schweißnaht führen

2.3 Konstruktionsbedingte Störungen des Schweißprozesses

Da der Laser die Möglichkeit bietet, die Schweißenergie sehr konzentriert einzubringen, ohne die Bauteile an sich zu stark zu erwärmen, wird er häufig dazu eingesetzt, Sensoren, elektronische Bauteile usw. in Gehäuse einzuschweißen. Das sensible Innenleben kann so zuverlässig vor Umwelteinflüssen geschützt werden. Bei derartigen Schweißungen werden in der Regel auch Gasvolumen in einem Hohlraum eingeschlossen. In diesen Fällen kann es vorkommen, dass sich dieses Gasvolumen im Hohlraum erwärmt und sich durch die damit verbundene Ausdehnung des Gases Druck in dem Bauteil aufbaut. Wird der Druck zu groß, so ergibt sich ein Druckabbau durch die Dampfkapillare oder die Schmelze. Dieser Bereich bietet dem Gasdruck den geringsten Widerstand. Wo die Schmelze am heißesten ist, ist sie am dünnflüssigsten und lässt sich am leichtesten zur Seite drücken. Auf diese Weise entstandene Löcher und Poren in der Schweißnaht findet man nie gleich am Anfang der Laserschweißnaht, sondern gehäuft zum Ende der Naht hin.

Wird dieser Prozess als Ursache für Schweißprobleme erkannt, kann auf zwei verschiedene Arten versucht werden, das Problem zu lösen. Entweder man versucht, die Schmelze so dünnflüssig zu machen, dass ein Druckabbau durch die Schmelze erfolgen kann, ohne Materialauswurf zu verursachen und ohne dass Löcher zurückbleiben. Oder man versucht genau den entgegengesetzten Weg, der auch teilweise zum Erfolg führen kann. Hierbei sorgt ein inertes Prozessgas für eine zähe Schmelze (bei Eisenwerkstoffen), die vor allem bei sehr schlanken Schweißnähten

dem Druck standhalten kann. Ob diese Problematik eines Druckaufbaus im Werkstück vorliegt, ist festzustellen, wenn eine Hälfte der Schweißnaht entlang der bewegten Achse des Laserstrahls abgearbeitet wird. Falls ein Druckaufbau an der Wurzel der Laserschweißnaht Auslöser der Probleme ist, wird man beobachten, dass insbesondere vor den Löchern bereits ein Wurzelrückfall auftritt. Das Schweißgut wird hier bereits durch den Gasdruck nach oben aus der Schweißnaht gedrückt. An der Oberfläche führt dies gleichzeitig zu einer zunehmenden Nahtüberhöhung, bis sich der Druck an der Nahtwurzel wieder entlasten kann. Häufig erkennt man erst nach einem Schliff, dass es an dem Bauteil solche problematischen Hohlräume gibt und dass es wirklich solche Mechanismen sind, welche die Probleme auslösen.

Die Ursache für Löcher in der Schweißnaht kann zum Beispiel auch nur eine Phase an einem Bauteil sein, die nötig ist, um die Teile einfach fügen zu können. Kann auf die Phase nicht verzichtet werden, so sind andere konstruktive Änderungen am Bauteil nötig. Ein Beispiel könnte eine Druckentlastungsbohrung sein, die erst zum Schluss dichtgeschweißt wird, oder im Fall der Phase irgendwelche Abstandshalter, die sicherstellen, dass ein Druckausgleich aus dem Hohlraum erfolgen kann. Eine weitere Möglichkeit, das Schweißergebnis zu verbessern, wäre, die Wärmeeinbringung in den Hohlraum zu minimieren, was mit einer hohen Strahlqualität, hohen Schweißgeschwindigkeiten, geringeren Einschweißstiefen u. a. realisierbar ist.

2.4 Poren und andere Fehlerbilder aufgrund der Eigenschaften des Werkstoffes

Da das Problem in diesen Fällen bereits im Werkstück enthalten ist, geht es hier darum, einen Trick zu finden, durch den das Problem lösbar wird bzw. die negativen Auswirkungen auf ein Minimum reduziert werden. Teilweise können natürlich auch hier durch Prozessgase und Schweißparameter Verbesserungen erzielt werden, welche die Ausgasung des Materials unterstützen. Diese Ausgasungsbedingungen, die auch durch Prozessgasgemische verbessert werden können, sind bei allen Unterpunkten positiv und werden deshalb nicht bei jedem einzelnen erwähnt. Da es die verschiedensten Eigenschaften von Werkstoffen als Problemmursachen gibt, ist es nötig, sich diese im Einzelnen anzusehen. Man wird feststellen, dass – je nach Ursache – auch noch andere Lösungsansätze möglich sind.

2.4.1 Poren durch bereits im Werkstoff enthaltene Gase

Viele Werkstoffe haben die für das Schweißen mehr oder weniger unangenehme Eigenschaft, dass in ihnen Gase enthalten sind. Dass gesinterter Materialien, d. h. unter hoher Temperatur aus Metallpulver gepresste Werkstoffe, auch noch Luft zwischen den einzelnen Pulverteilchen enthalten, ist relativ klar. Häufig haben aber auch gegossene Bauteile Gaseinschlüsse im Inneren, da das Material beim Herstellungsprozess nicht sauber ausgasen konnte. Diese Gaseinschlüsse würde man bei Schliffen entdecken, weil die Hohlräume schon groß genug sind. Es gibt aber auch Gase in Werkstoffen, die so fein verteilt sind, dass sie mit Schliffen nicht zu finden sind. In gehärteten Oberflächen kann zum Beispiel Stickstoff enthalten sein, der beim Nitrieren in die heiße Oberfläche eindiffundiert ist und dort für entsprechende Werkstoffeigenschaften sorgt. Viele Metalle sind vor allem bei höheren Temperaturen in der Lage Gase zu lösen. Die Löslichkeit nimmt bei der Abkühlung des Metalls wieder ab und die Gase würden bei langsamer Abkühlung

wieder entweichen. Geschieht die Abkühlung aber schnell, wird den Gasteilchen die Bewegungsfreiheit genommen und der Rückweg aus dem Gitter ist nicht mehr möglich. Aluminium und andere Leichtmetalle haben auch Oberflächen, die auch chemische Verbindungen mit Gasen eingehen und in denen sich Wasserstoff oder Feuchtigkeit einlagern können.

Beim Schweißvorgang wird dem Bauteil nun thermische Energie sehr konzentriert zugeführt und das Material auf hohe Temperaturen erhitzt. Dadurch werden chemische Verbindungen wieder aufgebrochen, die Gasteilchen werden frei und die im Gitter gefangenen Gasteilchen können sich nun wieder bewegen. Entsprechend dem entweichenden Kohlendioxid in frischen Getränken sammeln sich die Gasteilchen zu größeren Ansammlungen und bilden nun sichtbare Poren. Wird der Gasinhalt durch die Aufnahme von thermischer Energie aus der Schmelze weiter erhitzt, dehnt sich die Blase weiter aus, kann aufplatzen und dabei Material aus der Schweißnaht schleudern. Zurück bleibt ein Loch in der Naht. Was ist zu tun, wenn solche Materialien trotzdem verschweißt werden müssen?

Ist zumindest ein Fügepartner weniger schwierig, kann man versuchen, die Schmelze in dessen Material zu legen und mit seiner Schmelze das Problemmaterial anzubinden. Sind beide Fügepartner gleich schwierig, wäre der nächste Weg, Zusatzmaterial einzusetzen, in Form von Zusatzdraht oder auch in Form von Zwischenstücken. Neben dem generellen Ansatz, Prozessgase und Parameter einzusetzen, die das Ausgasen der Schweißnaht erleichtern, kann die Lösung nur noch darin liegen, die Eigenschaften des Vormaterials zu optimieren, auf gesintertes Material zu verzichten, porenfreien Guss anzustreben, zu verschweißende Stellen beim Nitrieren abzudecken und poröse Oberflächen trocken zu lagern oder vor dem Schweißen aufzuheizen.

2.4.2 Laserschweißen von gegossenen Bauteilen mit Trennmittelrückständen

Bei gegossenen Bauteilen ist zum einen mit Gaseinschlüssen zu rechnen, zum anderen aber auch mit Rückständen von Trennmitteln, die sich in der Oberfläche des Bauteils festgesetzt haben. Liegen die Siedepunkte dieser Trennmittel unter den Schmelztemperaturen des Werkstoffes, so ist auch hier mit Poren in der Schweißnaht zu rechnen. Eine wirkliche Lösung des Problems liegt damit in der Auswahl des Trennmittels bzw. dessen Trägerstoffs. Wird beispielsweise Kohlenstoff als Trennmittel verwendet, kann dieser mit hierfür entwickelten Brennern in Reinform aufgetragen werden. Da der Kohlenstoff einen sehr hohen Siedepunkt hat, führt die Erwärmung der Reste beim Laserschweißen zu keiner Porenbildung. Teilweise wird er aber auch mittels Pinsel als Bestandteil von Flüssigkeiten als Emulsion aufgetragen und die Trägerflüssigkeit ist anschließend der Auslöser der Porenbildung. Bisweilen ist es deshalb nötig, so kontaminierte Oberflächenschichten abzutragen, um auf nicht belastetes Material zu kommen. Beim Guss von Aluminium- oder auch Magnesiumbauteilen für die Automobilindustrie konnte hier in den letzten Jahren einiges verbessert werden.

Oxidationsreaktionen von Legierungselementen und die dabei frei werdende Energie

$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	$\Delta H_R = - 912 \text{ kJ/mol}$
$\text{Ti} + \text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$	$\Delta H_R = - 945 \text{ kJ/mol}$
$2 \text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{MgO}$	$\Delta H_R = - 1202 \text{ kJ/mol}$
$(2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O})$	$\Delta H_R = - 572 \text{ kJ/mol}$

Tabelle 1: Exotherme chemische Reaktionen von Legierungselementen aus Metallen mit Sauerstoff, im Vergleich zur „Knallgasreaktion“ – der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff.

2.4.3 Bindung von reaktionsfreudigen Legierungselementen

In den Stählen findet man viele chemische Elemente, die zum Beispiel mit Sauerstoff sehr exotherm reagieren. Teilweise werden diese bei der Stahlherstellung als Desoxidationsmittel zugesetzt, um den Sauerstoff im Stahl zu binden, um andere Legierungselemente zu reduzieren und den nun an das Desoxidationsmittel gebundenen Sauerstoff als Schlacke entfernen zu können. Hierzu werden hauptsächlich Aluminium und Silizium eingesetzt. Teilweise haben die Legierungselemente aber auch die Aufgabe, Kohlenstoff als so genannte Karbidbildner zu binden. So dient beispielsweise Titan in korrosionsbeständigen Stählen dazu, den Stahl durch das Abbinden des Kohlenstoffs vor interkristalliner Korrosion zu schützen. Diese Elemente liegen also meist im Stahl gemäß ihrer Aufgabe nicht in ihrer Reinform vor. Aus den Analysen ist nicht ersichtlich, ob sie in Reinform oder abgebunden in Oxiden, Nitriden oder Karbiden vorliegen. Die Elemente findet man nur dann als reaktionsfreudige Atome, wenn sie keinen Reaktionspartner mehr gefunden haben. Werden solche Materialien mit dem Laser und Sauerstoff als Schneidgas geschnitten, so ist die erzielbare Schneidgeschwindigkeit davon abhängig, wie viel zusätzliche Energie dem Schneidprozess durch die Verbrennung von beispielsweise freien Siliziumatomen zugeführt wird.

Beim Schweißen solcher Materialien unter aktiven Prozessgasen, die Sauerstoff oder Kohlendioxid enthalten, kann es zu sehr exothermen Reaktionen kommen. Die Reaktionen können in „kleinen Explosionen“ ablaufen und die Schweißnaht sehr turbulent gestalten und zurückklappen. Teilweise kommt es bei nicht formierten Laserschweißprozessen nur durch den Einfluss des Sauerstoffes aus der Luft an der Nahtwurzel zu solchen Erscheinungen, obwohl inerte Prozessgase eingesetzt werden. Diese Art von Problemen kann durchaus chargenabhängig auftreten. Kommen solche Probleme vor, macht es keinen Sinn, Aktivgas einzusetzen, um die Ausgasung zu unterstützen. Diese Schweißungen sind jedoch völlig unproblematisch, wenn ein inertes Prozessgas mit der richtigen Düsentchnik den Prozess an der Oberfläche sauber vor dem Zutritt von Sauerstoff aus der Luft schützt, wenn der Schutzbereich mit Nachlaufduschen lange genug aufrecht erhalten bleibt und auch die Wurzel sauber formiert wird. Tabelle 1 zeigt einige chemische Reaktionen mit den dabei frei werdenden Energien.

Gegenüberstellung der Schmelz- und Siedetemperaturen von Zink und Kupfer

■ fest ■ flüssig ■ gasförmig

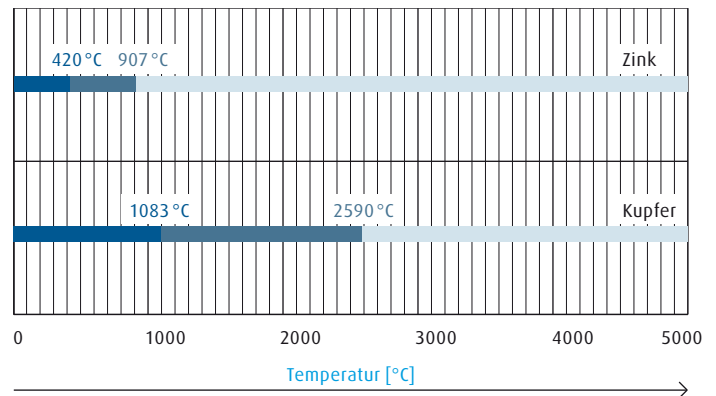


Bild 6: Zu unterschiedliche Schmelz- und Siedetemperaturen wie hier bei Kupfer und Zink, den Bestandteilen von Messing, führen zu Problemen beim Laserschweißprozess.

2.4.4 Legierungselemente mit extrem unterschiedlichen Schmelz- bzw. Siedetemperaturen

Viele Stähle und Buntmetalle bestehen nicht aus einem chemischen Element, sondern sind Legierungen aus vielen verschiedenen Elementen. Durch die genaue Zusammensetzung der Materialien aus den verschiedenen Legierungselementen werden die besonderen Eigenschaften der Materialien definiert. Die verschiedenen Legierungselemente können aus den unterschiedlichsten Bereichen des Periodensystems stammen. Es kann sich nicht nur um Metalle, sondern auch um Nichtmetalle, ja sogar Gase handeln. Diese verschiedenen Legierungselemente können deshalb auch extrem unterschiedliche Eigenschaften mitbringen.

Beim Schweißen und insbesondere beim Laserschweißen werden sehr hohe Temperaturen und Temperaturgradienten erreicht, da der Tiefschweißeffekt auf der Erzeugung einer Dampfkapillare beruht. Die maximalen Prozesstemperaturen liegen damit immer über den Siedepunkten des Materials, meist auch über denen aller Legierungselemente. Ein sauberes Schweißergebnis zu erzielen kann daher immer dann schwierig werden, wenn die Schmelz- und Siedepunkte der Legierungselemente extrem unterschiedlich sind. Ein Beispiel hierfür ist Messing, eine Legierung aus Kupfer und Zink. Bei diesen beiden Materialien liegt der Siedepunkt von Zink mit 907 °C sogar unter dem Schmelzpunkt von Kupfer bei 1083 °C. Die Schweißnaht ist in diesem Fall sehr porös und kaum zu verwenden. Würde beim Schweißen das gesamte Zink entweichen, würde man eine Schweißnaht aus Kupfer erzeugen. Eine vernünftige Lösung des Problems scheint deshalb nicht möglich.

2.4.5 Unterschiedliche Schmelz- und Siedepunkte bei beschichteten Bauteilen

Die Problematik der verschiedenen Siedepunkte ist auch im Bereich der beschichteten Materialien häufig der Auslöser fehlerhafter, poröser Schweißnähte. Vor allem in der Automobilindustrie werden große Mengen von beschichteten, meist verzinkten Blechen eingesetzt. Diese werden mehr und mehr auch mittels Lasertechnik verschweißt. Abhängig von den Stärken der Beschichtungen sind diese Schweißvorgänge mit mehr oder weniger Poren-, Löcher- und Spritzerbildung behaftet.

Auch Eisen und Zink haben sehr unterschiedliche Schmelz- und Siedepunkte. Eisen beispielsweise erstarrt bei ca. 1535 °C und verdampft oberhalb von 2730 °C. Zink schmilzt aber bereits bei 420 °C und ist bei Temperaturen über 907 °C sogar noch gasförmig. Gelangt jetzt Material aus der Beschichtung in die Schmelze des Grundmaterials, was über die Strömungen des Schmelzbades jederzeit möglich ist, verdampft das Zink und sein Volumen wird mit steigender Temperatur immer größer. Teilweise platzen diese Poren, wenn sie an die Oberfläche kommen und schleudern das Material aus der Schweißnaht, was zu Löchern und Spritzern führt. Teilweise bleiben sie aber auch als Poren in der Schweißnaht zurück, wenn die Schmelze erstarrt. Zuerst handelt es sich sozusagen um Zinkdampfblasen im gerade erstarrten Eisen. Kühlt das Material weiter ab, so kondensiert der Zinkdampf an der Wand der Pore und erstarrt ebenfalls. Zurück bleibt bei Raumtemperatur eine Pore mit verzinkter Wand, ohne Gas zu enthalten. Im Gegensatz zu dem Fall, wenn das Element mit niedrigem Siedepunkt als Legierungselement im Werkstoff verteilt ist, ergeben sich jetzt aber Ansätze, die Schweißergebnisse wesentlich zu verbessern. Hierbei spielt die Wahl des Prozessgases und die Art der Zuführung eine entscheidende Rolle. Wie funktioniert das?

Zur Bekämpfung solcher Probleme werden vorzugsweise Prozessgase mit Anteilen an Sauerstoff, in der Regel aber mit Anteilen an Kohlendioxid, eingesetzt. Die Gaszuführung ist vorzugsweise stechend anzuordnen. Das Prozessgasgemisch durchquert das Plasma – die Metall-

dampffackel – und wird dadurch stark erhitzt und aktiviert. Durch die stechende Gaszufuhr trifft dieses heiße und reaktionsfreudige Gas vor dem eigentlichen Schweißprozess auf die Oberfläche und oxidiert die sich erwärmende Zinkbeschichtung. Das entstehende Zinkoxid (Schmelztemperatur 1970 °C) liegt beim Schmelzpunkt von Eisen (Schmelztemperatur 1535 °C) noch als Feststoff vor, kann also nicht mehr wie Zink in der Eisenschmelze verdampfen und Poren, Löcher und Spritzer verursachen. Das zu Zinkoxid umgewandelte Material schlägt sich als weißer Niederschlag teilweise in der Umgebung nieder oder wird abgesaugt. Selbst wenn solche Zinkoxide in die Schmelze gelangen, sind sie wesentlich unkritischer als die Poren zuvor.

Das Zink von der Oberfläche wurde über die Verbrennung durch die Prozessgaskomponente entschärft. Der Zinkeintrag von der Unterseite der Bleche im I-Stoß ist wegen der geringeren Nahtbreite und der geringeren Schmelzbaddynamik in der Regel wesentlich unkritischer. Werden die Bleche im Überlappstoß verschweißt, so sind die Schweißergebnisse mit den oxidierenden Aktivgasanteilen auch schon wesentlich besser, aber es sind weitere Tricks nötig.

Sind die Teile dicht aufeinandergepresst, kann es in diesem Bereich weder durch das Prozessgas noch durch den Sauerstoff aus der Luft zu einer Oxidation und damit einer Entschärfung des Zinks kommen. Zur Demonstration der Problematik kann man die Bleche einmal direkt zusammenpressen und versuchen zu verschweißen, oder man streut vorher feinen Sand – „Zaubersalz“ – zwischen die Bleche. Der Unterschied im Schweißergebnis ist erstaunlich. Durch den geringen Abstand, verursacht durch die Sandkörner, kann das beim Schweißprozess verdampfende Zink zur Seite entweichen und wie von Geisterhand ist das Schweißergebnis plötzlich wesentlich besser. Auch in der Praxis werden deshalb alle möglichen Tricks eingesetzt, damit zwischen den Blechen während des Schweißens am Überlapp ein konstanter Entgasungsspalt in der Größenordnung von ca. 0,1 mm vorhanden ist.

2.4.6 Verunreinigungen der Bauteiloberflächen

Viele Bauteile, die mit dem Laserschweißen verbunden werden, haben vorher bereits zahlreiche Fertigungsschritte durchlaufen. Viele wurden gebogen, gefräst, gedreht, gebohrt und vieles mehr. Damit diese Arbeitsschritte zuverlässig funktionieren und die Teile zwischen den Arbeitsschritten auch nicht korrodieren, wurden hierzu allerhand Hilfsstoffe eingesetzt. Ziehfette, die Emulsionen vom Drehen und Fräsen, der Korrosionsschutz, Fett von Händen – alle möglichen Rückstände befinden sich auf den zu verschweißenden Oberflächen.

Genau wie Zink und Alubeschichtungen verursachen auch diese durch den gleichen Mechanismus der niedrigen Siedepunkte und der sich ausdehnenden Gasblasen dieselben Probleme. Zum Glück lassen sich die negativen Auswirkungen wie bei den Zinkbeschichtungen mit aktiven oxidierenden Prozessgasen reduzieren oder gar ganz vermeiden. Waschanlagen, in denen die Teile vorher gewaschen werden, machen in meinen Augen dann Sinn, wenn sie in eine Fertigungslinie fest integriert und auf eine bestimmte Aufgabenstellung optimiert sind. Aus meiner Sicht ist es sehr problematisch, wenn Waschanlagen zur Bauteilreinigung eingesetzt werden, die womöglich mit Teilen aus der gesamten Fertigung beschickt werden. In diesem Fall hat man keinen Überblick mehr, was sich auf der aktuellen Charge gerade mit welchem Anteil befindet. Der Oberflächenzustand ist nun nicht mehr nur davon abhängig, wann das Reinigungsbad zuletzt regeneriert bzw. erneuert wurde, sondern auch davon, welche Rückstände aus welchen Prozessen seitdem abgewaschen wurden.

Die Schweißbarkeit der Bauteile kann dadurch extrem schwanken und die Analyse und Verbesserung des Prozesses wird enorm erschwert. Problematisch ist auch, wenn gewaschene Teile anschließend auf verschmutzten Werkstückträgern transportiert und von verölten Greifern eingelegt werden oder tagelang ungeschützt herumstehen, um auf den Laserschweißprozess zu warten. Auch bei einer Verschmutzung der Oberflächen können geringe Spalte, über die sich der Gasdruck der verdampfenden Verunreinigung abbauen kann, Wunder wirken.

2.5 Stark schwankende Schweißergebnisse und instabile Prozesse

Treten starke Schwankungen des Schweißergebnisses beim Laserschweißen auf, werden diese nahezu immer durch eine ungenügende Prozessgaszufuhr verursacht. Natürlich kann auch einmal eine Optik verschmutzen oder die Laserstrahlübertragung im Strahlengang Probleme bereiten. In der Regel aber werden die Schwankungen durch das Einmischen von mehr oder weniger Umgebungsluft in das Prozessgas verursacht.

Da vor allem das Sauerstoffangebot, aber auch die Luftfeuchtigkeit und der Stickstoff aus der Atmosphäre den Laserschweißprozess extrem beeinflussen können, sind hier vernünftige Düsendurchmesser, dazu passende Prozessgasmengen und die richtige Positionierung des Prozessgasstromes ein absolutes Muss, um stabile Prozesse und Ergebnisse zu generieren. Auch an dieser Stelle möchte ich auf meinen Vortrag aus dem Jahr 2006 verweisen, der in den DVS-Berichten Band 241 (ISBN-13: 978-3-87155-797-2, ISBN: 3-87155-797-8) veröffentlicht wurde und in dem die Wechselwirkungen mit der Atmosphäre bei ungenügender Gasabdeckung oder beim Verzicht auf Prozessgas ausführlich beschrieben wurden.

Der erste Schritt bei Optimierungsaufgaben an Laserschweißprozessen ist für mich deshalb immer, die Gaszufuhr so zu optimieren, dass sichergestellt ist, dass wirklich unter genau dem Prozessgas geschweißt wird, das auch zugeführt wird. Eine Überprüfung ist hier eigentlich in der Regel sehr einfach. Bei Verwendung eines inerten Prozessgases muss die Naht auch frei von Oxiden sein. Ist die Wärmeeinbringung zu groß, sodass es zu einer Nachoxidation kommt, da der mit Schutzgas abgedeckte Bereich zu kurz ist, muss die Oxidschicht sehr gleichmäßig sein und eine konstante Stärke aufweisen. Bei einem Großteil der optimierten Laserschweißprozesse war die Optimierung der Gaszuführung in der Vergangenheit ein wesentlicher Faktor auf dem Weg zur Lösung der Probleme. Erst wenn gewährleistet ist, dass das Gas auch in reiner Form – ohne Luftbeimengungen – am Prozess ankommt, kann die Prozessgaszusammensetzung optimiert werden. Glücklicherweise ist festzustellen, dass neue Anlagen inzwischen mehr und mehr auch mit vernünftigen Düsendurchmessern mit mindestens 4 mm, besser 6 mm, Durchmesser ausgerüstet werden und Düsen im Bereich von 2 und 3 mm Durchmesser nicht mehr verbaut werden. Fehlerhafte Positionierungen und falsche Messgeräte findet man in den Laserschweißanlagen hingegen immer noch häufig.

3. Weiterentwicklung der Lasertechnik und deren Auswirkungen

Die Dynamik in der Lasertechnik und in der Lasermaterialbearbeitung wird nicht geringer, sondern verstärkt sich sogar in der letzten Zeit. So vorteilhaft es ist, dass immer neue Strahlquellen zur Verfügung stehen, mit noch mehr Leistung, noch besserer Strahlqualität und besserem Wirkungsgrad, so problematisch sind teilweise jedoch die Auswirkungen bei den Anwendern. Es ist in der letzten Zeit festzustellen, dass häufig Anlagen mit neuesten Technologien eingesetzt werden, wo herkömmliche Technik wesentlich besser geeignet gewesen wäre.

3.1 Probleme durch Strahlquellen und Lösungsmöglichkeiten

Insbesondere die neuen Festkörperlaser, Scheibenlaser und Faserlaser haben heute Strahlqualitäten, die für das Laserschneiden optimal, für das Laserschweißen aber häufig viel zu gut sind. Bei den alten lampengepumpten Festkörperlasern war es nötig, den Strahl möglichst groß aufzuweiten und anschließend mit einer Optik mit kurzer Brennweite auf das Bauteil zu fokussieren, um einen kleinen Fokusedurchmesser und hohe Schweißgeschwindigkeiten zu erzielen. Der geringe Abstand zwischen Optik und Schweißprozess führte zwar zur Belastung der Optiken mit Schmauch und Spritzern, aber der Strahlwinkel war ziemlich groß, sodass in der Dampfkapillare die Laserstrahlung unter relativ stumpfen Winkeln auf die Wände auftraf und ein großer Anteil der Laserleistungen an den Wänden absorbiert wurde. Das dadurch verdampfende Material übte durch den Dampfdruck auch Kräfte aus, die die Wände auseinanderdrückten und die Dampfkapillare offen hielten. In der Folge ergaben sich zwar langsame, aber sehr gutmütige und stabile Schweißprozesse.

Die brillanten Strahlqualitäten, die heute in vielen Fällen zum Einsatz kommen, können, wegen des nahezu senkrechten Einfalls der gesamten Strahlung an den Wänden, kaum mehr absorbiert werden. Die Absorption konzentriert sich komplett auf die Front und insbesondere die Wurzel. Die Dampfkapillare wird sehr eng und die Gefahr von Spritzern und zurückbleibenden Löchern steigt. Das aus der Dampfkapillare austretende Material und der eng gebündelte Laserstrahl haben außerdem nun direkt über der Dampfkapillare eine Wechselwirkungszone mit extremen Energiedichten, Temperaturen und auch wieder Plasmen, welche die Strahlqualität sehr stark beeinflussen können. Auch bei den neuen Scheiben- und Faserlasern ist es deshalb nötig, diesen Bereich mit auf die Anwendung abgestimmten Prozessgasen zu kontrollieren. Über das Prozessgas kann auch hier ein absorbierendes bzw. defokussierendes Plasma verhindert werden. Außerdem kann hier, wie auch bei den CO₂-Lasern, die Energie genutzt werden, um positive Effekte am Schweißprozess zu erzielen. Auch bei diesen Festkörperlasern mit höchster Strahlqualität konnten auf diese Weise schon einige Fertigungsprobleme mit angepassten Gasgemischen entschärft werden.

3.2 Konstante Ergebnisse beim Remote-Laserschweißen durch Prozessgase

Auch die Remote-Technologie ist eine ausgezeichnete Errungenschaft. Derart brillante Strahlquellen zu bauen, die noch in zwei Meter Entfernung von der Optik einen Schweißprozess ermöglichen, ist eine große Leistung. Allerdings müssen auch hier der gesamte Prozess betrachtet und alle Anforderungen erfüllt werden. Es kann nicht sein, dass solche Anlagen an Anwender verkauft werden, die damit nichtrostende Stähle oder Aluminium schweißen müssen. Für reproduzierbare Laserschweißprozesse ist es eigentlich in jedem Fall wichtig, den Schweißprozess auch mit den Prozessgasen einzustellen und zu kontrollieren. Dies wird an Remote-Anlagen extrem schwierig.

Der Aufwand, den die Anwender dann betreiben müssen, um Ihre Prozesse noch sicher fahren zu können, ist extrem hoch und trotzdem immer nur eine Notlösung. Es schadet der Technologie insgesamt, wenn solche Anlagen ohne Gaszuführungen ausgeliefert werden und erst nachträglich Düsen in die Spannvorrichtungen mit riesigem Aufwand und hohen Kosten eingebaut werden müssen. Meist geschieht dies erst, nachdem der Anwender nach monatelangen vergeblichen Versuchen feststellt, dass ohne Prozessgas wirklich kein konstantes Laserschweißergebnis erzielt werden kann und der Werkstoff nicht ohne Prozessgasabdeckung in der nötigen Qualität geschweißt werden kann.

4. Zusammenfassung

Die Laserschweißtechnik ist ein äußerst dynamisches und interessantes Arbeitsgebiet. Sowohl die technologische Entwicklung als auch die Marktdurchdringung nehmen beständig an Tempo zu. Dabei stellt uns die technologische Entwicklung immer wieder vor neue Aufgabenstellungen, die gelöst werden müssen, um das Potential, das die Gase bieten, auch optimal einsetzen zu können. Häufig kommt es leider oft erst dann zu gemeinsamen Versuchen, wenn der Anwender selbst nicht mehr weiter weiß und keine Lösung für seine Probleme findet. Er ist dann zwar in der Regel hoch erfreut, wenn bei den Versuchen seine Probleme endlich gelöst wurden und nebenbei auch noch dieses und jenes verbessert wurde, von dem er glaubte, es ginge nicht besser.

Wesentlich sinnvoller wäre es aber, eine frühzeitige Betrachtung der Aufgabenstellung hinsichtlich der verwendeten Gase sowie deren Zufuhr vorzunehmen. Es könnte häufig viel Zeit und Geld gespart werden, wenn bereits in der angeschafften Anlagentechnik auch die gasetechnischen Anforderungen der Aufgabenstellung berücksichtigt worden wären. Damit die Gase, wie vom Prozess benötigt, bestmöglich zugeführt, gesteuert und gemessen werden können und auch die Gasversorgung bereits für das optimale Prozessgas ausgelegt ist, beraten wir die Anwender gerne auch schon im Vorfeld zur Auslegung solcher Laserschweißanlagen. Wir als Gaselieferant tun alles, damit der Anwender problemlos seine Fertigungsprozesse starten kann und sorgen dafür, dass für die Anwendungen die optimalen Gase und Gasgemische zur Verfügung stehen.

Vorsprung durch Innovation.

Linde ist mehr. Linde 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 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 – ideas become solutions.

Für Sie einheitlich erreichbar – bundesweit in Ihrer Nähe.

Vertriebszentren/Kundenservice allgemein

Berlin	Hannover	München
Düsseldorf	Leuna	Nürnberg
Hamburg	Mainz	Stuttgart

Telefon 01803.85000-0*

Telefax 01803.85000-1*

Linde AG

Geschäftsbereich Linde Gas, Linde Gas Deutschland, Seitnerstraße 70, 82049 Pullach, www.linde-gas.de



*0,09 € pro Minute aus dem dt. Festnetz, Mobilfunk bis 0,42 € pro Minute. Zur Sicherstellung eines hohen Niveaus der Kundenbetreuung werden Daten unserer Kunden wie z. B. Telefonnummern elektronisch gespeichert und verarbeitet.