

# Neue Entwicklungen beim Schutzgasschweißen

## Laserinduziertes Fokussieren des WIG-Lichtbogens

H. Cui, Geesthacht, I. Decker, H. Pursch, J. Ruge, J. Wendelstorf und H. Wohlfahrt, Braunschweig

### 1 Einleitung

Das Wolfram-Inert-Gas (WIG)-Schweißen ist ein wirtschaftliches Fügeverfahren, das zum Schweißen von Blechen geringer Dicke (0,5-4 mm) bei hochlegierten Stählen, Aluminium, Kupfer und Nickel sowie deren Legierungen zum Einsatz kommt. Im Vergleich zu strahlentechnischen Fügeverfahren sind die erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten gering, und es entsteht eine vergleichsweise breite Schweißnaht mit einer Oxidschichtbelegung, die in vielen Fällen eine mechanische oder zumindest chemische Nachbehandlung erfordert. Gerade im Hinblick auf eine Automatisierung des Verfahrens erweisen sich diese Faktoren zusammen mit der Zündproblematik und der Lichtbogendynamik als hinderlich.

Eine Möglichkeit, die entscheidend zur Verbesserung des Schweißprozesses beiträgt, besteht darin, den Schweißlichtbogen durch einen fokussierten Laserstrahl zu unterstützen und zu stabilisieren [1,2]. Dies führt vor allem zu einer verbesserten Energieeinbringung in das Werkstück, wodurch die Schweißnahtqualität und -geschwindigkeit wesentlich erhöht werden können.

Verglichen mit den Kosten für eine konventionelle WIG-Anlage sind die Aufwendungen für einen CO<sub>2</sub>-Laser entsprechender Leistung noch recht hoch. Der gegenwärtige Trend zur Entwicklung von kleinen, kompakten CO<sub>2</sub>-Lasern mit Strahlleistungen bis 250 Watt eröffnet jedoch gerade für das laserunterstützte WIG-Schweißen neue Anwendungsmöglichkeiten.

### 2 Stand der Entwicklung

Bereits in früheren Publikationen [2,3] wurde gezeigt, daß durch die Kombination des WIG-Prozesses mit einem Laserstrahl niedriger Leistung qualitative Verbesserungen des Schweißvorgangs erreicht werden können. Sie betreffen vor allem das Zündverhalten, die Einschweißtiefe und die Schweißgeschwindigkeit.

#### 2.1 Zündverhalten

Das Zündverhalten des WIG-Lichtbogens wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Wesentlich dabei sind der Zustand der Schweißelektrode (insbesondere Oberflächenbeschaffenheit) und deren physikalische Eigenschaften (Elektronen-Austrittsarbeit) sowie geometrische Größen (aktuelle Elektrodenform, Abstand zur Werkstückoberfläche), aber auch

der Zustand der Werkstückoberfläche ist von Bedeutung. Schon bei geringfügigen Parameterabweichungen kommt es zu Zündschwierigkeiten des Lichtbogens.

Mit Hilfe des Laserstrahls kann dagegen ein sicheres und reproduzierbares Zünden des WIG-Lichtbogens erreicht werden, weil mit der Bildung eines laserinduzierten Plasmas oberhalb des Bleches eine gewisse Ladungsträgerdichte (Anfangsionisation) erzeugt wird, die in Verbindung mit der HF-Zündeinrichtung der Schweißstromquelle ein direktes Zünden des Lichtbogens ermöglicht. Bereits bei Verwendung eines fokussierten Laserstrahls von 100 W erhöht sich die Zünd-Wahrscheinlichkeit merklich. Eine weitere Steigerung der Laserleistung verbessert das Zünden des Lichtbogens nur noch unwesentlich [4].

#### 2.2 Schweißgeschwindigkeit und Einschweißtiefe

In Abhängigkeit von den eingestellten Schweißparametern existiert eine jeweils obere Grenze der Schweißgeschwindigkeit. Oberhalb dieser Grenze wird keine durchgehende Schweißnaht mehr erzielt, da der Lichtbogen seine Stabilität verliert [4]. Bei dem laserunterstützten WIG-Lichtbogen verschiebt sich diese Geschwindigkeitsgrenze zu deutlich höheren Schweißgeschwindigkeiten. In *Abbildung 1* ist für beide Verfahren die Abhängigkeit der Schweißnahtbreite und -tiefe von der Schweißgeschwindigkeit dargestellt. Für einen merklichen Effekt reicht bei Stahl eine Laserleistung von 100 W

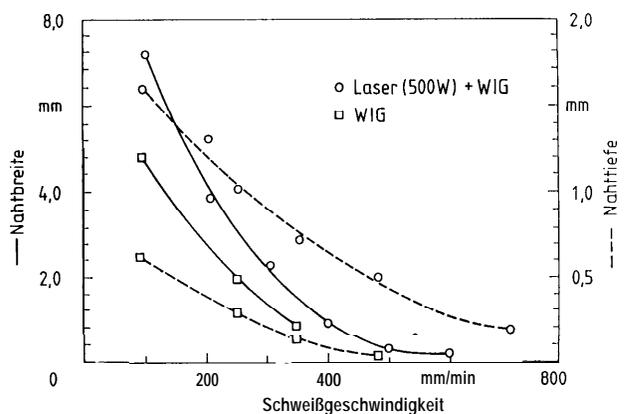


Abbildung 1. Einbrandtiefe und Nahtbreite in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit (Werkstoff: St 52, 4 mm; WIG-Lichtbogen 100 A, 10 mm Elektrodenabstand mit und ohne Laserunterstützung).

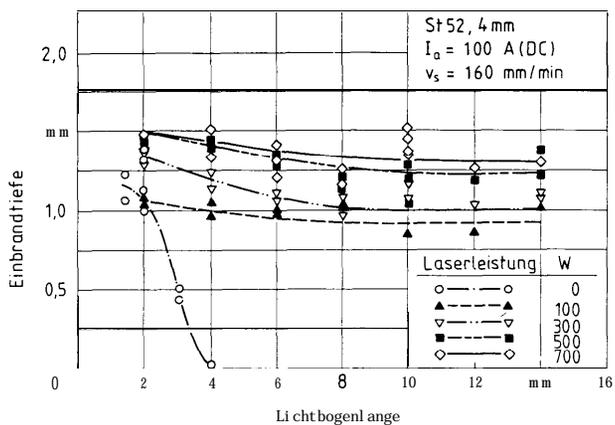


Abbildung 2. Abhängigkeit der Einbrandtiefe von der Lichtbogenlänge und der Laserunterstützung.

aus. Wie *Abbildung 2* dokumentiert, hängt die Schweißnahttiefe von der gewählten Laserleistung nur geringfügig ab, da diese gegenüber der Lichtbogenleistung von in diesem Fall etwa 2 kW nur den kleineren Anteil der gesamten Energiezufuhr in das Werkstück darstellt.

### 2.3 Mechanismus der Energieeinkopplung

Eine effektive Energieeinkopplung eines Laserstrahls in ein Werkstück setzt beim reinen Laserstrahlschweißen voraus, daß die Strahlintensität im Strahlfokus einen kritischen Wert überschreitet, der das Einsetzen des für das Strahlschweißen typischen Tiefschweißeffekts, also die Bildung einer Dampfkapillaren bestimmt. Durch das Vorhandensein eines Lichtbogenplasmas wird es hingegen möglich, daß auch Laserleistungen unterhalb dieser Schwellintensität vollständig in das Werkstück eingekoppelt werden: Während beim reinen Laserstrahlschweißen solche geringen Laserleistungen noch keinerlei Schweißwirkung hervorrufen, werden unter den hier vorliegenden Bedingungen verbesserte Schweißergebnisse erreicht, die einer Erhöhung der Energieeinkopplung entsprechen, welche das zusätzliche Leistungsangebot des Lasers wesentlich übertrifft. Somit wird die Energieübertragung aus dem Lichtbogen selbst verstärkt.

## 3 Diagnostik am laserunterstützten Schweißlichtbogen

### 3.1 Versuchsanlage

Die *Abbildung 3* zeigt das Prinzip der Kombination von La-

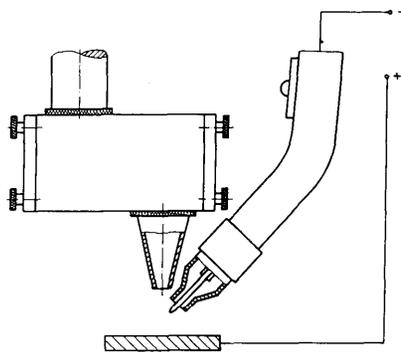


Abbildung 3. Anordnung von Laseroptik und WIG-Brenner beim laserstrahlunterstützten Lichtbogen-schweißen.

seroptik und WIG-Schweißbrenner. Der Brennfleck des Laserstrahls und der Schweißbrenner sind auf den gleichen Ort auf dem Werkstück ausgerichtet. Der Winkel zwischen Laserstrahlachse und Elektrodenachse kann mit Hilfe einer flexiblen Halterung frei gewählt werden. Er betrug bei den hier beschriebenen Versuchen 30°. Die Geschwindigkeit des Arbeitstisches kann im Bereich von 100 bis 5000 mm/min geregelt werden. Die Aufspannplatte ist elektrisch gegenüber den Tischführungen isoliert, so daß die Messungen nicht durch Erdschleifen verfälscht werden. Der Tisch befindet sich in einem Lochplatten-Gehäuse (Faraday-Käfig), um HF-Einflüsse auf die Steuer- und Registriereinrichtung zu vermeiden.

Für die Untersuchungen steht ein HF-angeregter CO<sub>2</sub>-Gaslaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 5,5 kW bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  zur Verfügung. Je nach gewähltem Lasermode (Einschieben von Modenblenden) und Strahlabschwächer können damit Dauerleistungen im Bereich von 17 bis 5500 W bereitgestellt werden. Der Laserstrahl wird über ein off-axis-Spiegelfokussiersystem mit einer Brennweite von 100 mm auf die Werkstückoberfläche fokussiert. Zum Schutz der Spiegeloberflächen vor Verunreinigungen wird eine geringe Menge Argon in das Spiegelgehäuse geleitet, das durch die Strahlöffnung ausströmt und so das Eindringen von Verunreinigungen verhindert.

Beim WIG-Schweißen wird üblicherweise Gleichstrom benutzt. Dabei ist das Werkstück mit dem Pluspol der Stromquelle verbunden, während die Schweißelektrode an den negativen Pol gelegt wird. Als Elektroden wurden reines Wolfram sowie Wolfram mit verschiedenen Zusätzen verwendet. Blind- und I-Nähte wurden an für die industrielle Anwendung typischen niedrig- und hochlegierten Stählen ausgeführt. Bei den Untersuchungen wurde auf eine spezielle Vorbehandlung der Schweißprobe verzichtet, da vorrangig der Einfluß der schweißtechnischen Parameter untersucht werden sollte. Zudem zeigten Vorversuche, daß der Oberflächenzustand des Werkstoffes beim laserunterstützten WIG-Verfahren wenig Einfluß auf das Schweißergebnis hat. Die bisherigen Untersuchungen wurden ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoffen durchgeführt.

### 3.2 Meßverfahren zur Bestimmung der Stromdichte

Die Kenntnis über die Stromdichteverteilung im Lichtbogen kann darüber Aufschluß geben, wie die Energieübertragung in das Werkstück erfolgt. Durch vergleichende Messung der Stromdichteverteilung für den einfachen und den laserstrahlunterstützten Lichtbogen kann darüber hinaus die Wechselwirkung von Laserstrahl und Lichtbogen verdeutlicht werden.

Zur Bestimmung der Stromdichteverteilung im Bogenplasma wurde eine elektrostatische Plasmasonde benutzt [5]. Das Meßprinzip basiert darauf, daß die Sonde mit bekannter Frequenz durch das Bogenplasma oszilliert. Die registrierten Potentialveränderungen sind dann ein Maß für das räumliche Stromdichteprofil.

Um die Stromdichteverteilung direkt auf der Werkstückober-

fläche zu erhalten, ist das sogenannte Nestor-Spalt-Anoden-Verfahren benutzt worden [6]: Wenn man den Stromverlauf des Lichtbogens beim Übergang zwischen zwei gegeneinander elektrisch isolierten Anodenteilen registriert, läßt sich daraus mit Hilfe von numerischen Transformationen die radiale Stromdichteverteilung bestimmen. Die technischen Details und Auswerteprozeduren sind in [4] ausführlich beschrieben.

## 4.2 Schweißergebnisse

Die Ergebniszusammenstellung in Abschnitt 2 basiert auf Einschweißversuchen an 4 mm dicken Blechen aus unlegiertem Stahl St52. Die durch die Laserunterstützung erzielte höhere Energiestromdichte im Kern des WIG-Bogens führt zwar zu einer Verbreiterung des Schmelzbades auf ein Maß, das der seitlichen Ausdehnung des Hauptstromkanals entspricht. Die Breite der WEZ an der Blechoberfläche nimmt

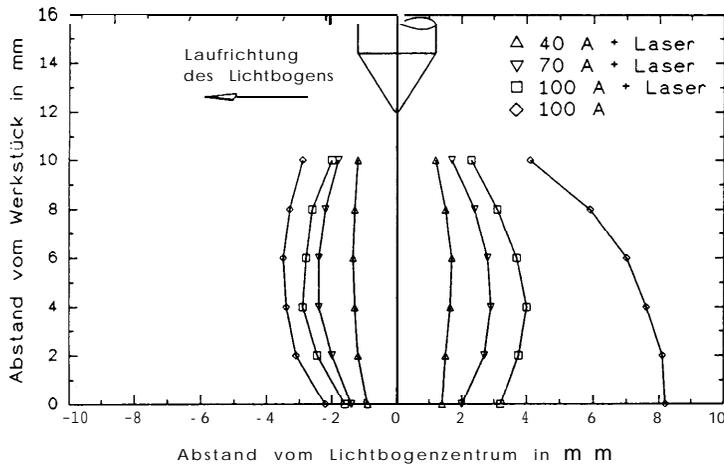


Abbildung 4. Hauptstromkanäle des WIG-Lichtbogens mit und ohne Laserunterstützung in Abhängigkeit von der Stromstärke (Werkstoff: St 37, 3 mm; Schweißgeschwindigkeit 90 mm/min,  $P_{\text{Laser}} = 200 \text{ W}$ ).

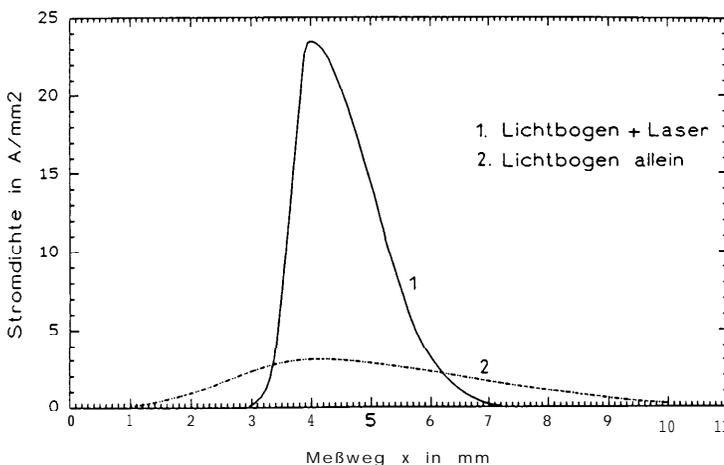


Abbildung 5. Stromdichte des WIG-Lichtbogens mit und ohne Laserunterstützung an der Werkstückoberfläche (Werkstoff: St 37, 3 mm; WIG-Lichtbogen 50 A, 10 mm Länge; Schweißgeschwindigkeit 90 mm/min,  $P_{\text{Laser}} = 200 \text{ W}$ ).

## 4 Experimentelle Ergebnisse

### 4.1 Stromdichteverteilung im Lichtbogen

Die *Abbildung 4* zeigt die räumliche Ausdehnung des Lichtbogens (mittlere Ausdehnung bezogen auf 80% des Gesamtstroms), während in *Abbildung 5* die Stromdichteverteilung im Bogenplasma auf der Werkstückoberfläche dargestellt ist. Beide Gegenüberstellungen verdeutlichen die Wirkung des Laserstrahls auf den Lichtbogen. Die Stromdichte eines laserstrahlunterstützten Schweißlichtbogens ist beträchtlich höher als im einfachen Lichtbogen. Etwa die Hälfte des gesamten Lichtbogenstroms fließt in einem sehr engen Kern, in dem die Stromdichte über  $20 \text{ A/mm}^2$  liegt. Der Querschnitt des Stromkanals im WIG-Bogen wird durch die Laserunterstützung um den Faktor 4 verringert. Dieser Effekt ist für geringe WIG-Stromstärken besonders ausgeprägt.

dabei jedoch in nur geringem Maße zu, da der Lichtbogen aufgrund der Einschnürung hier weniger Wärme deponiert. Die Hauptwirkung des konzentrierten Lichtbogens ist die deutlich erhöhte Einschweißtiefe, was sich gleichzeitig in einer in Blechtiefenrichtung verbreiterten (nahezu parallelen) WEZ andeutet. Dieser Sachverhalt kommt in *Abbildung 6* deutlich zum Ausdruck. Dies entspricht ansatzweise bereits einem Tiefschweißeffekt.

Da die Nähte auch eine gleichmäßige und relativ oxidfreie Oberfläche aufweisen, sollte die industrielle Anwendbarkeit des kombinierten Verfahrens im Bereich des automatisierten WIG-Schweißens an hochlegierten Stählen bis 3 mm Dicke liegen. Die an diesen Werkstoffen durchgeführten Schweißversuche bestätigen, daß sich beträchtliche Verbesserungen sowohl in der Nahtbreite als auch in der Einschweißtiefe erreichen lassen.

Die *Abbildung 7* zeigt eine Schweißnaht an einem 2 mm dicken Blech aus X5 Cr Ni 18 10. Ohne Laserstrahl konnten keine vergleichbaren Schweißnähte erzielt werden. Der Licht-

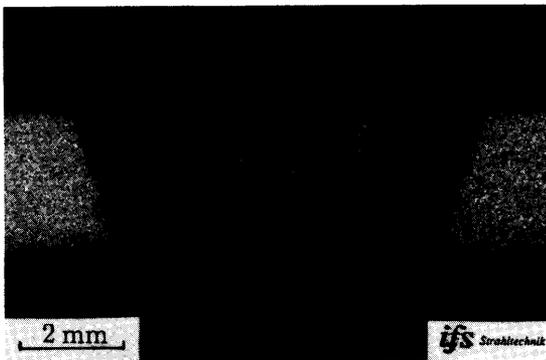


Abbildung 6. Querschliffe von WIG-Schweißungen mit (oben) und ohne (unten) Laserunterstützung an 3 mm dicken St 37-Blechen (WIG-Lichtbogen: 100 A, 8 mm Länge,  $P_{\text{Laser}} = 400 \text{ W}$ ).



Abbildung 7. Nahtoberfläche einer WIG-Schweißung mit Laserunterstützung an austenitischem Stahl (X5CrNi 18 10, Blechdicke 2 mm, Stromstärke 100 A,  $P_{\text{Laser}} = 190 \text{ W}$ , Schweißgeschwindigkeit 650 mm/min).

bogen verfügt in diesem Fall über keine ausreichende Energieflußdichte, um das Werkstück tatsächlich aufzuschmelzen. Die qualitativen Verbesserungen werden insbesondere sichtbar, wenn man die Schmelzvolumina anhand von Querschliffen vergleicht. Wie Abbildung 8 zeigt, wird durch Zuschalten des Laserstrahls eine komplette Durchschweißung des Bleches erreicht. Der oben zu Bild 6 beschriebene Zusammenhang ist hier noch wesentlich ausgeprägter, da die Wärmeleitfähigkeit eines hochlegierten Stahls geringer ist und damit der Übergang zum Tiefschweißeffekt sich stärker bemerkbar macht. Das durch die Kombination von Laser und WIG-Lichtbogen **erschmolzene** Volumen ist erheblich größer als eine Addition der durch den WIG-Lichtbogen und den Laser einzeln erzielten Schmelzgut-Volumina.

Die konzentrierte Energiezufuhr im Fokus des Laserstrahls bewirkt, daß zusätzlich Material verdampft wird, wodurch der Widerstand in der Bogensäule reduziert und die Stabilität der Entladung erhöht wird. Der Ort, an dem das lasererzeugte Metaldampfplasma entsteht, dient als günstiger Ansatzpunkt für den Schweißlichtbogen und unterstützt dessen Fixierung in einem örtlich stabilen Anodenbrennfleck.

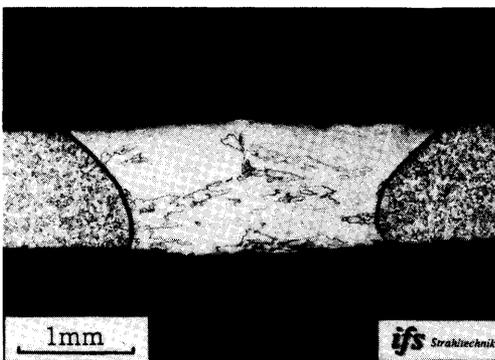
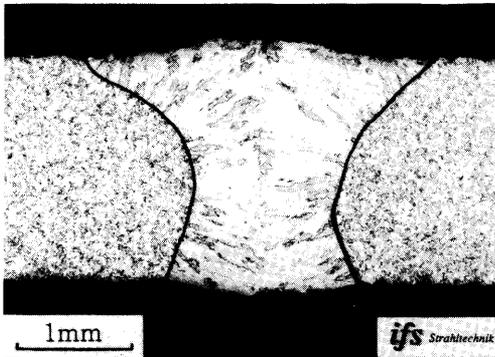
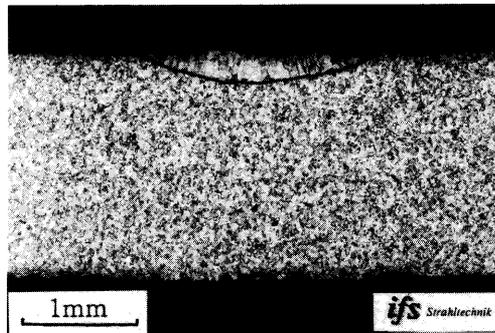


Abbildung 8. Querschliffe von WIG-Schweißungen mit und ohne Laserunterstützung am Austeniten X5CrNi 18 10 (4 mm Bogenlänge, Schweißgeschwindigkeit 650 mm/min); oben: 110 A WIG ohne Laser, Blechdicke 2 mm, Mitte: 130 A WIG + 170 W Laser, Blechdicke 2 mm, unten: 100 A WIG + 210 W Laser, Blechdicke 1 mm.

Weiterhin werden durch die zusätzliche Energiebereitstellung die Teilchen- und Leistungsverluste des Lichtbogenplasmas ausgeglichen, was ebenfalls zur Erhöhung der Stabilität der Bogenentladung beiträgt. Durch die hohe Leistungsdichte können dann auch bei größeren Lichtbogenlängen akzeptable Einschweißstiefen realisiert bzw. die Schweißgeschwindigkeit gesteigert werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Effekt eines unterstützenden Laserstrahls mit vergleichsweise geringer Leistung auf den WIG-Lichtbogen wurde untersucht. Mit Hilfe von Lichtbogendiagnostik und Schweißversuchen wurden folgende Veränderungen festgestellt:

- Verbesserung der Nahtqualität durch reproduzierbares Zünden und erhöhte Stabilität des Lichtbogens

- Erhöhung der Einschweißtiefe bei gleicher Schweißgeschwindigkeit bzw. höhere Schweißgeschwindigkeit bei vorgegebener Nahttiefe
- Verminderte Oxidschichtbildung im Nahtbereich insbesondere auch bei den hochlegierten Stählen

Bei konsequenter Optimierung des durch einen Laserstrahl unterstützten WIG-Lichtbogens lassen sich die aufgezeigten Vorteile besonders bei der Automatisierung des Schweißverfahrens nutzbringend umsetzen. Die technische Bedeutung des Laser-WIG-Verfahrens liegt vor allem im Bereich des automatisierten Dünnblechschweißens von Edelstählen.

Momentan wird in einem Forschungsvorhaben an einer Verfahrensoptimierung und der Klärung der zugrundeliegenden physikalischen Effekte gearbeitet. In nächster Zukunft wird ein erster LASER-WIG-Schweißkopf für die automatisierte Anwendung zur Verfügung stehen.

## Schrifttum

[1] Steen, W.M.: Arc augmented laser processing of materials, J.Appl.Phys. Bd. 51 (1980) 11, S. 5636-41

- [2] Cui, H., u.a.: Wechselwirkungen zwischen WIG-Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl, Proc. LASER 89 Optoelektronik, S. 577-81, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989
- [3] Finke, B.R., u.a.: Auswirkungen eines unterstützenden Laserstrahls auf den WIG-Schweißprozeß, DVS-Berichte, Bd. 135, S. 149-152, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991
- [4] Cui, H.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten kombinierter Laser-Lichtbogentechnik, Dissertation, TU Braunschweig, 1991
- [5] Gick, A.E.F., u.a.: The use of electrostatic probes to measure the temperature profiles of welding arcs, J.Phys.D, Bd.6 (1973), S.1941-9
- [6] Nestor, O.H.: Heat intensity and current density distributions at the anode of high current inert gas arcs, J.Appl.Phys. Bd.33 (1962), S.1638-48

Die Arbeiten wurden im Rahmen des von der Kommission der Europäischen Gemeinschaft geförderten BRITE/EURAM Projektes *Plasma and Laser Enhanced Arc Welding for Automatic Applications* (Prop.No. BE-3037, Contr.No. BREU-0069) durchgeführt. Einer der Autoren (H. Cui) bedankt sich zusätzlich für die Förderung durch die Volkswagen-Stiftung in deren China-Programm.

## Modulares Orbitalschweißsystem für atmosphärische und hyperbare Einsätze

H. Cui, J. F. Dos Santos, H. Manzmieder und P. Szlagowski, Geesthacht

### 1. Einleitung

Der Betrieb von seeverlegten Pipelines ist nur möglich, wenn gleichzeitig vor Ort Installations- und Reparaturverfahren zur Verfügung stehen. Hyperbares Schweißen stellt hierbei eines der am meisten favorisierten Verfahren dar, da die erzielbaren mechanischen Eigenschaften den entsprechenden Anforderungen entsprechen. Dabei geht man von bemannten Einsätzen bis zu Wassertiefen von ca. 500 m aus, während für größere Wassertiefen unbemannte vollautomatische Reparaturverfahren entwickelt werden.

Innerhalb bemannter Taucheinsätze werden überwiegend manuelle bzw. semi-automatische Schweißverfahren (E-Hand, WIG, MIG/MAG) angewandt, wofür hochqualifizierte Schweißer-Taucher benötigt werden. Um die körperliche Arbeit des Tauchers unter den lebensfeindlichen Umgebungsbedingungen soweit wie möglich zu reduzieren und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit qualifizierter Schweißprozeduren zu gewährleisten, werden große Anstrengungen unternommen, mechanisierte und automatisierte Schweißverfahren zu entwickeln.

Auch bei Installation, Austausch und Reparatur von Rohrleitungen unter atmosphärischen Bedingungen, besonders bei der Verwendung von Sonderstählen, bei eingeschränkter Zugänglichkeit sowie bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen, werden zunehmend mechanisierte anstelle manueller Schweißverfahren eingesetzt [1,2]. Auch hier sind die Hauptbeweggründe die Reduzierung körperlicher Arbeit, gleichbleibend hohe Qualität der Schweißung sowie Steigerung der Produktivität. Das im Folgenden vorgestellte Orbital-Schweißsystem eignet sich aufgrund seiner Konzeption für die Bearbeitung aller oben angeführten Schweißaufgaben.

Weltweit befinden sich derzeit für hyperbare Schweißaufgaben drei Orbital-Schweißsysteme im Einsatz. Entsprechende Berichte beschreiben erfolgreiche Reparaturschweißungen im Tiefenbereich zwischen 110 und 185 m, wobei alle Reparaturen ausschließlich mit dem WIG-Schweißverfahren durchgeführt wurden [2,3,4]. Aufgrund der bekannt niedrigen Schweißgeschwindigkeit und Ausbringungsrates des WIG-Prozesses ergeben sich dabei vergleichsweise lange Bodenzeiten, was hin-