

Qualifizieren des aktivmittelunterstützten WIG-Schweißens von Stählen für den industriellen Einsatz

Alexander Nitsche, André Hälsig, Mario Kusch, Chemnitz, Stefan Habisch, München

Aus der internationalen Fachliteratur ist bekannt, dass Einschweißtiefe und Schweißgeschwindigkeit beim WIG-Schweißen durch den Einsatz von Aktivmitteln steigerbar sind. Die Anwendung ist denkbar einfach, ein oberflächlicher Auftrag genügt, es kann mit konventioneller WIG-Anlagentechnik gearbeitet werden, der Einsatz ist auch beim manuellen Schweißen und bei kleinen Losgrößen effektiv. Trotzdem wird das aktivmittelunterstützte WIG-Schweißen in Deutschland nicht eingesetzt. Als Ursachen dafür werden vor allem mangelnde Kenntnisse zu den technischen Randbedingungen des Aktivmitteleinsatzes und die teilweise komplexen Zusammensetzungen der Substanzen angesehen.

Im durchgeführten Projekt wurde TiO_2 (Rutil) als Aktivmittel eingesetzt, welches in der Schweißtechnik schon vielfach als Pulver oder Elektrodenumhüllung verwendet wird. Ziele der Arbeiten waren die Quantifizierung der Wirkung der Aktivmittel hinsichtlich Einbrandgeometrie, Beeinflussung der Prozessstabilität und Auswirkungen auf die Nahtqualität sowie die Bewertung von arbeitsschutzrelevanten Aspekten, wie z. B. die Schweißrauchentstehung. Um den Prozess im industriellen Maßstab nutzbar zu machen, ist es erforderlich, die Aktivmittelzufuhr in den Prozess zu integrieren. Hierzu wurden verschiedene Methoden, wie z. B. vorlaufender Auftrag oder Beschichtung, Integration in die Schutzgaszufuhr, Einsatz von behandelten Fülldrähten usw. getestet und auf ihre industrielle Anwendbarkeit bewertet.

1 Stand der Technik

Der WIG-Schweißprozess ist nahezu universell einsetzbar und zeichnet sich durch eine einfache Prozessführung und qualitativ hochwertige Schweißergebnisse aus. Da der WIG-Lichtbogen offen brennt, lässt sich allerdings nur eine vergleichsweise geringe Energiedichte am Werkstück erzeugen und der Prozess ist hinsichtlich Einbrandtiefe und Schweißgeschwindigkeit limitiert. Um die Wärmewirkung des Lichtbogens am Werkstück zu erhöhen, lässt sich dessen Querschnitt durch technische Maßnahmen komprimieren. Etablierte Varianten dazu sind:

- mechanische Einschnürung durch eine Düse (Plasmaschweißen),
- thermische Beeinflussung durch spezielle Elektrodenkühlung [1]
- strömungstechnische Beeinflussung durch spezielle Gasströmungsführung [2]
- elektromagnetische Konzentration durch Hochfrequenzpulsen [3]

Mit diesen Techniken sind Einschweißtiefen von bis zu 10 mm oder alternativ eine deutliche Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit beim WIG-Schweißen möglich. Für alle Varianten ist allerdings spezielles Schweißequipment erforderlich. Zudem entfalten die Techniken ihre höchste Effektivität zumeist erst im mechanisierten/automatisierten Einsatz. Eine einfache Alternative zur Steigerung der Einschweißtiefe beim WIG-Schweißen besteht in der Beeinflussung des Schmelzbades durch Zugabe von aktivierenden Substanzen.

Der Einsatz der Aktivmittel führt bei gleichbleibendem Energieeinsatz zur Erhöhung der Einschweißtiefe um den Faktor 2...3. Dieser Effekt kann zur Reduzierung von Nahtvorbereitungsarbeiten und der Anzahl der Schweißlagen genutzt werden. Im I-Stoß können, im Vergleich zum konventionellen WIG-Schweißen, dickere Bleche einlagig ohne Nahtvorbereitung und ohne Zusatzwerkstoff verschweißt werden. Beim mehrlagigen Schweißen (z.B. Y-Nähte) kann die Steghöhe vergrößert und damit die Lagenanzahl und die Zusatzwerkstoffeinbringung verringert werden. Ein weiteres typisches Anwendungsszenario ist das manuelle WIG-Schweißen an schwer zugänglichen Stellen, z.B. Rohrknoten an Rohrbündeln. Hier lässt sich der aktivmittelbedingte Tiefschweißeffekt zur Sicherstellung einer ausreichenden Anbindung der Bauteile nutzen.

Bekannte Aktivmittel zum WIG-Schweißen werden als Komplexmischung verschiedener Oxide, Salze, u.ä. hergestellt [4-5]. Verfügbar sind Aerosole oder Pasten zum Schweißen verschiedener Werkstoffe. Die Lieferanten kommen überwiegend aus dem osteuropäischen Raum (z.B. Paton-Institut, Ukraine), wobei keine klassischen Vertriebsstrukturen existieren. Verfügbarkeit und Lieferfähigkeit größerer Mengen sind nicht industrietauglich. Weitere Probleme sind, dass eine reproduzierbare Zusammensetzung der Mittel nicht gewährleistet werden kann, die Zusammensetzung nur teilweise offengelegt wird oder die Mittel gesundheitsschädliche Substanzen wie Chloride und Fluoride enthalten.

Aktuelle Forschungen konzentrieren sich auf Single-Component-Aktivmittel in Pulverform [6-8]. Diese sind in großen Mengen und in reproduzierbarer Ausführung vorhanden und werden bereits teilweise in anderen Bereichen der Schweißtechnik (Elektrodenumhüllungen, Fülldrähte, Schweißpulver) eingesetzt. Sowohl für die Komplexmischungen als auch die Single-Component-Pulver sind die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Aktivmittelchemie und Einbrandbeeinflussung hinreichend erforscht. Als ursächlich für die Einbrandsteigerung am Werkstück wird eine Umkehr der Schmelzbadströmung angesehen [9-11]. Die Schmelzbadströmung entsteht beim WIG-Schweißen vorwiegend durch die Wirkung von Kräften, die auf Oberflächenspannungsgradienten in der Schmelze beruhen. In Metallschmelzen sinkt die Oberflächenspannung mit zunehmender Temperatur. Am verhältnismäßig kalten Schmelzbadrand ist daher die Oberflächenspannung deutlich größer als in der heißeren Mitte der Schmelze. Der

Ausgleich dieser Spannungen ergibt eine nach außen gerichtete Kraft. Die dadurch entstehende divergente Strömung transportiert Wärme an die Schmelzbadränder und erzeugt eine breite, flache Schweißnaht. Die Zugabe der Aktivmittel zur Schmelze bewirkt ein Absinken der Oberflächenspannung im unteren Temperaturbereich. Dadurch sinkt die Oberflächenspannung am Schmelzbadrand unter den Wert der Oberflächenspannung in der Schmelzbadmitte. Die durch den Spannungsausgleich hervorgerufene Kraft wirkt jetzt nach innen und erzeugt eine konvergente Strömung in Richtung Schmelzbadmitte. Diese zentrische Wärmekonzentration erzeugt ein tieferes und schmaleres Einbrandprofil, Bild 1.

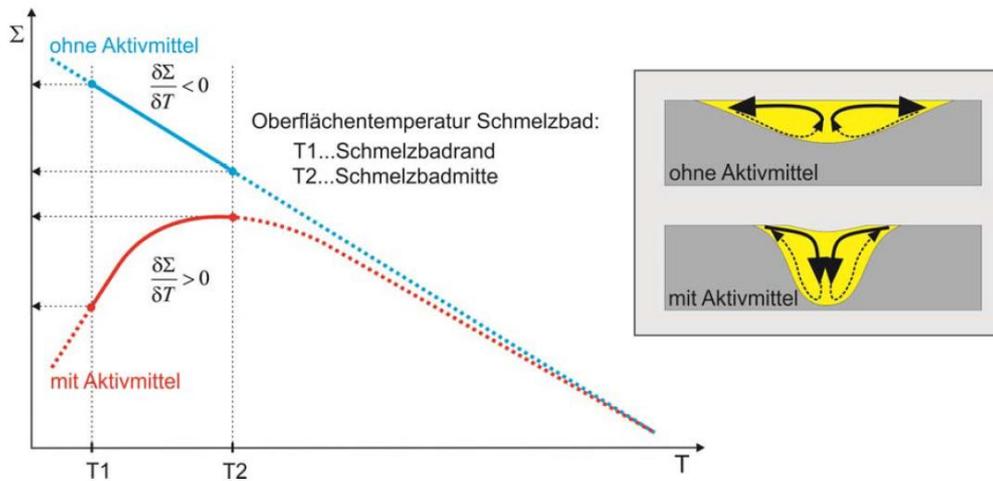


Bild 1. Beeinflussung der Schmelzbadströmung durch Aktivmittel.

Sekundär können die Aktivmittel auch die Lichtbogenverhältnisse beeinflussen. Verdampfende Elemente verändern die Ionisationsbedingungen und damit die Schweißspannung [12-13]. Der konzentriertere Wärmeeintrag erhöht zudem den Prozesswirkungsgrad. Eigene Untersuchungen zu diesen Sekundäreffekten ergaben einen Anteil von ca. 10 % an den durch den Aktivmitteleinsatz erzeugten Einbrandsteigerungen. Ca. 90 % lassen sich somit dem Effekt der Strömungsumkehr im Schmelzbad zuordnen.

Der Einsatz der Aktivmittel erfolgt üblicherweise durch einen manuellen Auftrag auf die Fügezone vor dem Schweißvorgang. Aerosole werden aufgesprüht, Pasten manuell aufgestrichen. Pulverförmige Stoffe müssen vor dem Auftrag noch mit Flüssigkeit, zumeist Ethanol, angemischt werden. Eine Reproduzierbarkeit ist dabei nicht gegeben. Ebenso fehlen Erkenntnisse zur notwendigen Quantität des Auftrages (g/cm^2), zur Auftraggeometrie (Auftragbreite, -höhe, ...) und zur Auftragmethodik bei verschiedenen Nahtvorbereitungen. Lösungen zur mechanisierten Aktivmittelzufuhr existieren ebenfalls nicht. Auch bezüglich des Schweißergebnisses bestehen noch viele Unklarheiten. Es fehlen Untersuchungen

- zur Quantifizierung und zur Reproduzierbarkeit der Einbrandeffekte,
- zu den Auswirkungen von verdampfenden Bestandteilen der Aktivmittel auf den Prozess und die Gesundheitsgefährdung des Schweißpersonals,
- zu den Auswirkungen der veränderten Einbrandgeometrie auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht,
- zur Beeinflussung der Korrosionsbeständigkeit durch die Anreicherung des Schmelzbades mit Aktivmitteln und
- zu eventuell notwendiger Nacharbeit.

2 Zielstellungen

Das aktivmittelunterstützte WIG-Schweißen zeichnet sich durch einfachste Anwendbarkeit aus und kann mit vorhandener konventioneller WIG-Technik genutzt werden. Es ist zudem auch beim manuellen Schweißen und bei kleinen Losgrößen effektiv einsetzbar. Trotz zahlreicher Forschungsberichte und Literaturstellen zur Wirkung der Aktivmittel [5-12], vor allem aus dem osteuropäischen und asiatischen Raum, wird das aktivmittelunterstützte WIG-Schweißen in Deutschland bisher nicht eingesetzt. Als Gründe dafür werden vor allem eine mangelnde Verfügbarkeit der Substanzen und fehlende Kenntnisse über die technologischen Randbedingungen ihres Einsatzes angesehen. Letzteres betrifft insbesondere die Bereiche:

- Zufuhr des Aktivmittels (Auftragmethodik, Auftragsmenge, Reproduzierbarkeit des Auftrages etc.)
- Beeinflussung des Schweißvorgangs (Parametrisierung, Verdampfungen etc.)
- Beeinflussung des Schweißergebnisses (Einbrandgeometrie, mechanische Eigenschaften etc.)

Schwerpunkt der Forschungsarbeiten war daher die Klärung der technologischen Einsatzbedingungen der Aktivmittel. Dies beinhaltete die Bereitstellung der Substanzen, die Auftragmethodik auf das Werkstück, die Quantifizierung

der Wirkeffekte und die Bewertung der erzeugten Schweißnahteigenschaften. Um den Prozess für industrielle Anwendungen zu qualifizieren, wurden zudem Lösungen für eine mechanisierte, prozessintegrierte Aktivmittelzufuhr erarbeitet und getestet.

3 Ergebnisse und Diskussion

Bereitstellung der Aktivmittel

In Voruntersuchungen wurden verschiedene, aus der Literatur bekannte, Single-Component-Mittel hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht, Bild 2. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig auf die Substanz TiO_2 konzentriert. Dieser Stoff ist in verschiedenen Ausprägungen verfügbar, preiswert und bereits in Form von Rutil in der Schweißtechnik eingeführt. Zudem ist die Wirkung des TiO_2 auf den Schweißprozess bereits ausreichend erforscht.

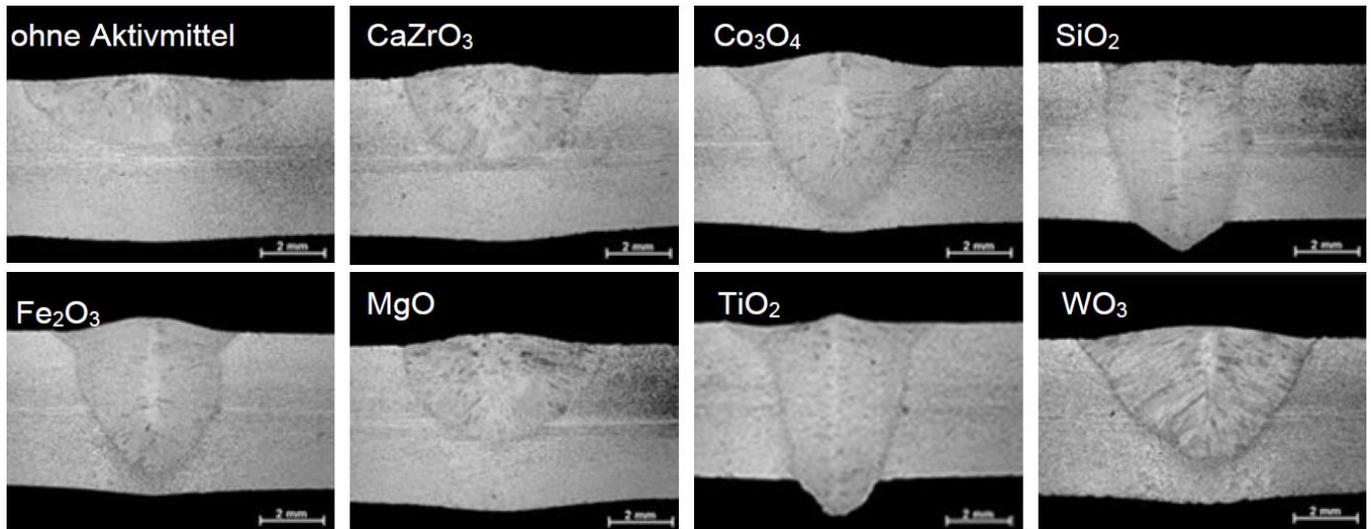


Bild 2. Einbrandprofile unter Einsatz verschiedener Aktivmittel ($I = 200 \text{ A}$, $v_s = 30 \text{ cm/min}$, Werkstoff 1.4301, $t = 5,0 \text{ mm}$).

In ersten Schweißversuchen wurde das pulverförmige Aktivmittel mit Hilfe von Ethanol pastös angemischt und im Vorhinein auf die Schweißstelle aufgetragen. Aufgrund der schnellen Verdampfung des Ethanols konnten keine reproduzierbaren Schweißergebnisse erzielt werden. Zudem konnte die Menge des Aktivmittels, welches im Prozess wirksam wird, aufgrund von Abplatzungen und einer unzureichenden Haftung nicht sichergestellt werden.

In einem zweiten Schritt wurden daher Schweißversuche mit drei verschiedenen Wassergläsern als Bindemittel unternommen. Folgende Wassergläser wurden dabei getestet:

- Natronwasserglas
- Kaliwasserglas
- Lithiumwasserglas

Derartige Substanzen werden in der Schweißtechnik beispielsweise als Bindemittel in der Herstellung von Stabelektroden eingesetzt. Durch das Anmischen mit Wasserglas wurden die Verarbeitbarkeit und Topfzeit der Gemische deutlich verbessert. Des Weiteren ergab sich eine gute Haftung des Aktivmittels im Anschluss an die Trocknung der aufgetragenen Schicht. Dadurch könnte die Aufbringung und Nutzung des Aktivmittels innerhalb der schweißtechnischen Fertigung flexibler eingesetzt werden.

Tests an Verbindungsschweißungen

An Dünnscheiben der Blechstärke 3 mm wurden Testschweißungen vorgenommen, um einen direkten Vergleich zwischen dem WIG-Schweißen ohne Aktivmittel und dem aktivmittelunterstützten WIG-Schweißen zu erhalten. Dabei wurden Bleche aus S235JR, X10CrNi18-10 und Alloy 625 im Stumpfstoß (I-Naht) geschweißt. Die Schweißgeschwindigkeit wurde jeweils angepasst bzw. optimiert. Als Aktivmittel wurde ein TiO_2 -Kaliwasserglas-Gemisch (Mischungsverhältnis 1:5) verwendet, welches pastös im Vorhinein auf der Blechoberseite im Schweißnahtbereich aufgetragen wurde. Die Trocknungszeit des aufgetragenen Gemischs betrug 10 Minuten. Zusätzlich wurde jeweils ein artgleicher Kaltdraht $\varnothing 0,8 \text{ mm}$ beim Schweißen zugeführt, dessen Zuführmenge ebenfalls jeweils angepasst wurde. Folgende Parameter wurden bei allen drei Grundwerkstoffen eingestellt:

- $I = 200 \text{ A}$
- Lichtbogenlänge: 2 mm
- Wolframelektrode: WC 20, $\varnothing 3,2 \text{ mm}$, Anschleifwinkel 40°
- Elektrodenüberstand: 6 mm
- Schutzgas: Brenner Ar 4.6, 10 l/min + Nachlaufbrause Ar 4.6, 27 l/min
- Formiergas: Ar 4.6, 8 l/min

In Tabelle 1 sind die erreichten Schweißgeschwindigkeiten und die jeweils dabei eingestellten Kaltdrahtzufuhrgeschwindigkeiten dargestellt. Es wurde festgestellt, dass für alle drei Grundwerkstoffe Steigerungen der Schweißgeschwindigkeit durch den Aktivmitteleinsatz erzielt werden können, wobei der korrosionsbeständige Stahl und der Nickelbasiswerkstoff deutlichere Steigerungen erlauben.

Tabelle 1. Einfluss des verwendeten TiO₂-Bindemittel-Gemischs auf die Emissionsrate und die Lichtbogenspannung.

Versuch		Schweißgeschwindigkeit in cm/min	Kaltdrahtzufuhr in m/min
Baustahl S235JR	WIG ohne AM	35	1,7
	WIG + TiO ₂ -Kaliw.-Gemisch	40	1,9
X10CrNi18-10 (1.4301)	WIG ohne AM	20	1,4
	WIG + TiO ₂ -Kaliw.-Gemisch	35	1,9
Alloy 625 (2.4856)	WIG ohne AM	20	1,4
	WIG + TiO ₂ -Kaliw.-Gemisch	38	1,9

Als nachteilig stellte sich heraus, dass durch den Einsatz des TiO₂-Kaliwasserglas-Gemischs beim Schweißen eine Rauch- und Schmauchentwicklung zu beobachten ist und eine fest haftende schwarze, schlackeähnliche Substanz auf der Schweißnaht zurückbleibt, siehe Bild 3-a). Diese Rückstände sind vergleichsweise schwer entfernbar. Deren chemische Zusammensetzung und eventuelle negative Effekte hinsichtlich der Überschweißbarkeit und Korrosionsbeständigkeit müssen noch untersucht werden. In einigen Versuchen traten die schlackeähnlichen Substanzen auch auf der Wurzelseite auf, siehe Bild 3-b). Bisher konnte nicht abschließend geklärt werden, welche Zusammenhänge zwischen fehlerfreien (Bild-3c) bzw. schlackebehafteten Wurzelseiten und den Schweißparametern, der Aktivmittelmenge usw. bestehen.



Bild 3. Bildung von schlackeähnlichen Substanzen im Nahtbereich beim WIG-Schweißen mit einem TiO₂-Kaliwasserglas-Gemisch.

Schweißrauchuntersuchungen

Bei Schweißrauchuntersuchungen wurde festgestellt, dass mit dem jeweils eingesetzten Bindemittel-TiO₂-Gemisch die Menge und Zusammensetzung des entstehenden Schweißrauches variieren. Bild 4 zeigt einen Vergleich der im Anschluss an die Messungen entnommenen Filter. Im Vergleich zu dem nur wenig belasteten Filter beim WIG-Schweißen ohne Aktivmittel sind zum Teil deutliche Belastungen beim aktivmittelunterstützten WIG-Schweißen erkennbar. Dabei wurden die größten Schweißrauchmengen beim Einsatz von Natronwasserglas als Bindemittel für TiO₂ gemessen. Die geringste Schweißrauchbelastung beim Schweißen mit Aktivmittel wurde beim Bindemittel Lithiumwasserglas gemessen.

Tabelle 2 zeigt die Emissionsraten, welche in den Versuchen beim Einsatz verschiedener TiO₂-Bindemittel-Gemische ermittelt wurden. Diese sind im Vergleich zu anderen Schweißverfahren, wie MAG-Schweißen oder MAG-Fülldrahtschweißen, sehr niedrig. Die hier aufgeführten Werte sind daher zunächst als Relativwerte im direkten Vergleich zum WIG-Schweißen ohne Aktivmittel zu verstehen. Es wird erkennbar, dass durch das Auftragen des mit Wasserglas angemischten TiO₂ als Aktivmittel die Emissionsraten zunehmen. Des Weiteren ist die Höhe der Emissionsrate von dem verwendeten Bindemittel bzw. Wasserglas abhängig. Die höchsten Emissionswerte wurden bei der Verwendung von Natronwasserglas gemessen.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die verwendeten TiO₂-Wasserglas-Gemische die Lichtbogenspannung und damit die Wärmeeinbringung in die Bauteile verändern. Alle drei verwendeten Wassergläser führten in Verbindung mit TiO₂ zu einer deutlichen Steigerung der Lichtbogenspannung, wobei Natronwasserglas den höchsten Effekt zeigte.

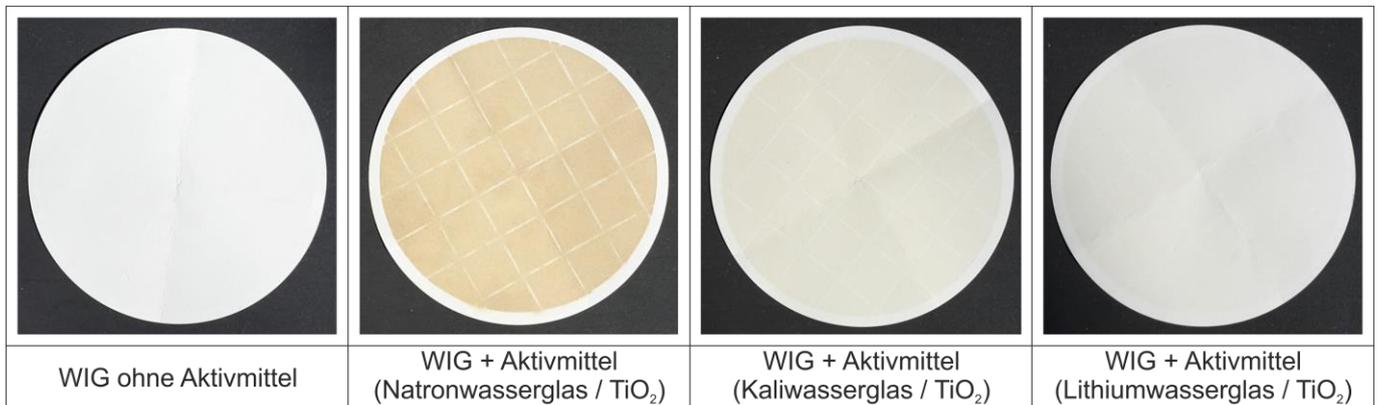


Bild 4. Vergleich der bei Schweißrauchmessungen entnommenen Filter für das WIG-Schweißen ohne und mit Aktivmitteln.

Tabelle 2. Einfluss des verwendeten TiO_2 -Bindemittel-Gemischs auf die Emissionsrate und die Lichtbogenspannung.

Versuch	Stromstärke in A	Spannung in V	Emissionsrate in mg/s
WIG ohne AM	150	9,72	0,028
WIG + AM (Natronwasserglas / TiO_2)	150	14,74	0,229
WIG + AM (Kaliwasserglas / TiO_2)	150	11,81	0,101
WIG + AM (Lithiumwasserglas / TiO_2)	150	12,39	0,056

Mechanisierung der Aktivmittelzufuhr

Um die Nutzung der Aktivmittel beim WIG-Schweißen zu verbessern wurden verschiedene Konzepte der Aktivmittelzufuhr untersucht. Neben beschichteten Schweißstäben wurden zwei Arten der mechanisierten Pulverzufuhr untersucht. Die Verwendung von Schweißstäben, welche zuvor mit einem TiO_2 -Wasserglas-Gemisch beschichtet und getrocknet wurden, stellte sich in der praktischen Anwendung als problematisch heraus. Zwar konnte eine einbrandsteigernde Wirkung erzielt werden, jedoch konnten aufgrund von Abplatzungen und ungleichmäßiger Schweißzusatzzufuhr keine reproduzierbaren Schweißergebnisse erzielt werden.

Bild 5 zeigt die untersuchten Methoden der mechanisierten Pulverzufuhr. In einer ersten Versuchsreihe wurde eine dem Laser-Auftragschweißen entlehnte Off-Axis-Düse verwendet. Die zweite Versuchsreihe wurde mit einer koaxialen, mehrstrahligen Pulverzufuhr durchgeführt. Dabei wurde ein PPA-Brenner, welcher zum Plasma-Pulver-Auftragschweißen genutzt wird, eingesetzt. Dieser wurde derart modifiziert, dass der Lichtbogen frei zwischen Werkstück und Elektrode brannte. Große Bedeutung bei diesen Methoden der Aktivmittelzuführung hat die Kornfraktion des Pulvers, welche dessen Förderbarkeit und Wirksamkeit beeinflusst.

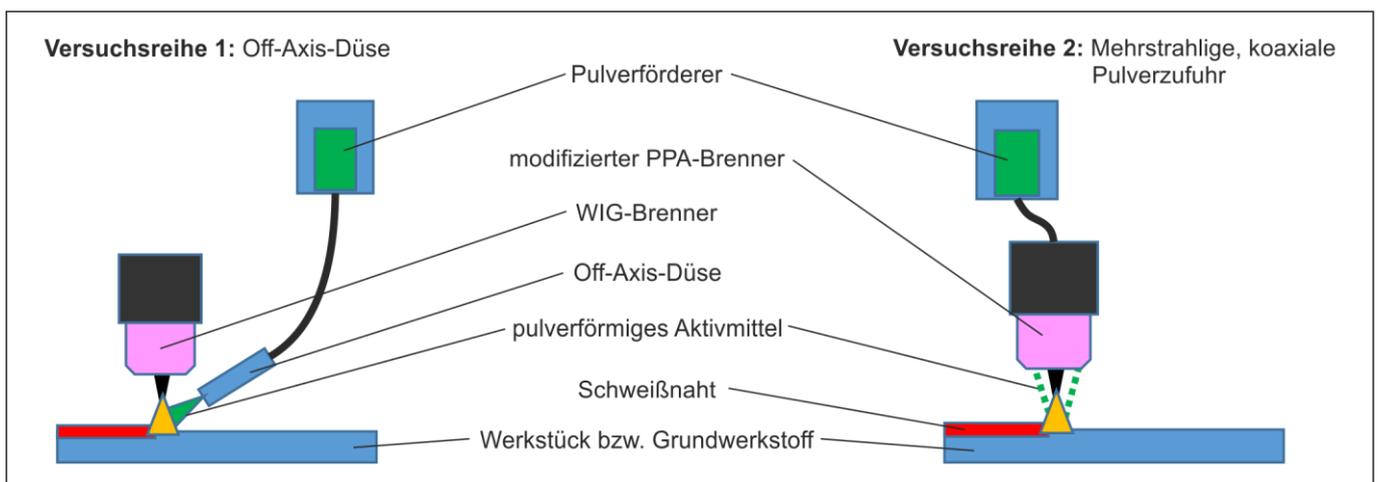


Bild 5. Schematische Darstellung der untersuchten Methoden bzgl. einer mechanisierten Pulverzufuhr.

Die Untersuchungen zeigten, dass beide Methoden zur Pulverzuführung in den Wirkungsbereich des Lichtbogens geeignet sind. Bei der Nutzung der Off-Axis-Düse ergaben sich Nachteile hinsichtlich der Pulververluste, welche in den Umgebungsbereich des Schweißprozesses geblasen werden und somit nicht im Schweißprozess zur Wirkung gelangen. Dies sollte auch hinsichtlich des Arbeitsschutzes bzw. in Verbindung mit entsprechenden Grenzwerten beachtet werden. Optimierte Schweißparameter, beispielsweise Schweißstromstärken, Pulverfördermengen usw., konnten bisher nicht vollumfänglich ermittelt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 20.117 B/DVS-Nummer 03.2267 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schrifttum

- [1] Lohse, M.; Füssel, U.; Schuster, H; Friedel, J.; Schnick, M.: Keyhole welding with cathode focussed GTA. *Welding in the World*, Heft 5/2013.
- [2] Kallabis, M.; Schwankhart, G.: Plasmatron-Technologie im Karosseriebau. *Blech, Rohre, Profile* Heft 4/2002.
- [3] Dzelnitzki, D.; Killing, R.: WIG-Impulsschweißen in verschiedenen Frequenzbereichen. *Der Praktiker*, Heft 3/1999.
- [4] Badheka, Vishvesh J.: Effects of oxide-based flux mixtures on the dissimilar A-TIG welding of carbon steel to stainless steel. *Welding and Cutting*, Heft 1/2015.
- [5] Venkatesan, G.; George, Jimin; Sowmyasri, M.; Muthupandi, V.: Effect of Ternary Fluxes on Depth of Penetration in A-TIG Welding of AISI 409 Ferritic Stainless Steel. ICAMME, in: *Procedia Materials Science*, Band 5 (2014).
- [6] Modenesi, P.; Apolinario, E.; Pereira I.: TIG welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*, Band 99, 1-3/2000.
- [7] Tseng, K.-H.; Hsu, C.-Y.: Performance of activated TIG-Process in austenitic stainless steels weld. *Journal of Materials Processing Technology*, Band 211, 3/2011.
- [8] Sridhar, S. P.; Arun Kumar, S.; Sathiya, P. A.: Study on the Effect of Different Activating Flux on A-TIG Welding Process of Incoloy 800H. *Advances in Materials Science*, Heft 3/2016.
- [9] Wang, X.; Huang, J.; Huang, Y.; Fan, D.; Guo, Y.: Investigation of heat transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*, Band 113, 2/2017.
- [10] Sandor, T.; Mekler, C.; Dobranszky, J.; Kaptay, G.: An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, Heft 1/2013.
- [11] Lu, S.; Fujii, H.; Sugiyama, H.; Tanaka, M.; Nogi, K.: Marangoni convection and welding penetration in A-TIG welding. *Transactions of JWRI (Japan Welding Research Institute)*, Heft 1/2003.
- [12] Li, Q.; Wang, X.; Zou, Z.; Wu, J.: Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, Band 17, Heft 3/2017.
- [13] Liu, F.; Yang, C.; Lin, S.; Wu, L.; Zhang, Q.: Spectral distribution characteristics of A-TIG welding arc. *Acta Metallurgica Sinica (Chinese Letters)*, Band 39, Heft 8/2003.