

Anpassen des MSG-Impulsschweißens auf unterschiedliche Anwendungsbedingungen

Dr.-Ing. Birger Jaeschke, Lorch Schweißtechnik GmbH, Auenwald, Deutschland, 26.09.2016
Dipl.-Ing. Philipp Lozano, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen

Die synergetischen Programme von Schweißstromquellen für das MSG-Impulsschweißen sind von den Herstellern für bestimmte Anwendungsbedingungen ausgelegt. Zu diesen Anwendungsbedingungen gehören vordergründig die Draht- und Materialeigenschaften und das angewandte Prozessgas. Weitere Anwendungsbedingungen, wie zum Beispiel Schweißgeschwindigkeit, Schweißposition, Brennerabstand, Schweißnahtgeometrie und Wärmeableitung, gewinnen dann an Bedeutung, wenn deren Veränderungen wichtig für das Schweißergebnis werden. In diesem Zusammenhang wird die Entwicklung eines besonderen Konzeptes für das MSG-Impulsschweißen betrachtet. Es zeigt sich, dass die Eigenschaften der U-I-Regelung für das Impulsschweißen durch Modifikation zu einer I-U-I-Regelung derart verbessert werden können, dass eine damit verbundene Prozessführung auf unterschiedliche Anwendungsbedingungen mit besonderer Robustheit anpassbar ist.

1 Regelungskonzepte in historischer Sicht

Eine historische Betrachtung hilft, die verschiedenen Varianten des Impulsschweißens vom Verständnis her einzuordnen, vergl. Merkblatt DVS 0926-3 [1].

Impulsstromquellen für das MSG-Schweißen waren bereits ab Mitte der 60er Jahre erhältlich. Verfügbare Leistungshalbleiter (Thyristoren) erlaubten nur eine netzsynchrone Beeinflussung des Schweißstromes. Der Hauptparameter beim Impulsschweißen, die Impulsfrequenz, war dadurch mit bestimmten Faktoren an die Netzfrequenz (50 Hz in Europa) gekoppelt. Manuelle Einstellparameter waren die Impulsdauer, die Impulshöhe (Impulsspannung U) und die Spannung zwischen den Impulsen (Grundspannung U). Eine Schweißdrossel wirkte auf die Stromdynamik und erlaubte damit die Beeinflussung der "Härte" des Pulsens. Die Regelung der Lichtbogenlänge beruhte auf der "inneren" Regelung des Zusammenwirkens von Schweißprozess und Schweißstromquelle. Dabei führt eine Verringerung der Schweißprozessspannung zu einer Erhöhung der Impulsstromhöhe und des Grundstromes, sowie umgekehrt. Aus heutiger Sicht klassifiziert man dies als U-U-Charakteristik für das Impulsschweißen.

Transistorisierte Leistungsteile kamen Mitte der 80er Jahre auf und erschlossen die Unabhängigkeit von der Netzfrequenz. Weiterhin wurde eine so gute Stromregelung möglich, dass in der Grundstromphase (Grundstrom I) der Lichtbogen auch bei kleineren Strömen stabil

gehalten werden konnte. Es wurde die U-I-Regelung mit verbesserten schweißprozess-technischen Eigenschaften eingeführt. Die Möglichkeiten vervielfältigten sich durch regelungstechnische dynamische Nachbildung der Schweißstromdrossel.

Mit Mikroprozessoren setzte sich auch die Digitaltechnik in den Steuerungen der Schweißstromquellen durch. Es waren nun Regelkonzepte unter Nutzung mathematischer Algorithmen möglich, welche auf einer noch größeren Anzahl von Parametern beruhen konnten. Die Impulsfrequenz selbst konnte zur Regelung des Prozesses (insbesondere der Lichtbogenlänge) verwendet werden. Das Konzept der I-I-Regelung wurde realisiert, bei welchem neben dem Grundstrom auch der Strom während des Impulses (Impulsstrom I) nach bestimmten Kriterien geregelt wird. Die Rechen- und Speicherleistung heutiger Stromquellensteuerungen und die Reaktionszeit moderner Leistungsteile erlauben inzwischen eine vielfältige Mischung und Ausweitung der verschiedenen Regelkonzepte.

Bisher bestand der überwiegende Trend in einer starken Spezialisierung bestimmter Modifikationen des Impulsschweißens auf besondere Anwendungsbedingungen. Es bleibt festzuhalten, dass historische Entwicklungsformen des Impulsschweißens, z.B. die U-I-Regelung, auch heute für bestimmte prozesstechnische Aspekte spezifische Eigenschaften (und damit nicht nur historisch überwindende Nachteile, sondern auch Vorteile) haben.

2 Vergleich der Basis-Regelungskonzepte

Die Regelstrategien von I-I-Regelung und U-I-Regelung sind sehr unterschiedlich und haben unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Der überragende Vorteil der I-I-Regelung ist, dass die Ablösung des Tropfens durch einen Stromimpuls konstanter Höhe über einen großen Regelbereich immer gewährleistet werden kann, dies vermeidet Spritzer. Nachteile: Dafür müssen zur Regelung der Lichtbogenlänge die Impulsfrequenz und andere Parameter von der Stromquellensteuerung verändert werden, **Bild 1**. Dies ist akustisch an einer „unreinen“ (nicht konstanten) Impulsfrequenz hörbar. Kurzzeitige Störungen bei der Messung der Lichtbogenlänge zu bestimmten Zeitpunkten, z.B. durch verschlissene Stromkontaktrohre, können zu relativ starken Störungen bei der Ausregelung der Lichtbogenlänge führen.

Die für bestimmte Anwendungen im Vordergrund stehenden Vorteile der historisch älteren U-I-Regelung decken die Nachteile der I-I-Regelung ab. Kurzzeitige Störungen bei der Messung der Lichtbogenlänge haben nur geringe Auswirkungen, da die U-Regelungsphase nicht kurze, sondern längere Zeitbereiche der Lichtbogenlänge auswertet. Die U-Regelungsphase reagiert sofort während des aktuellen Impulses mit einer Stromänderung, **Bild 2**. Die Impulsfolgefrequenz ist nahezu konstant, sie klingt dadurch auch stabil. Ein wesentlicher Nachteil der U-I- gegenüber der I-I-Regelung ist aber, dass bei der Verringerung der Impulsstromamplitude durch die höhere Spannung eines längeren Lichtbogens die Tropfenablösung fehlschlagen kann. Dies führt zu einer Prozessstörung mit Spritzern.

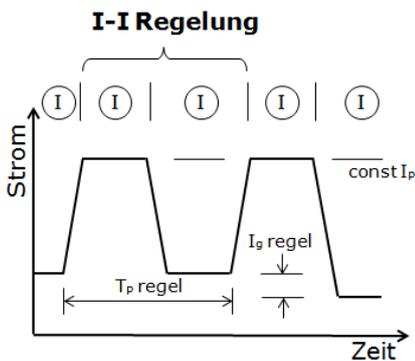


Bild 1

I-I-Regelung (Impulsstrom I, Grundstrom I)

Vorteile	Nachteile	Eigenschaften
grosser Regelbereich, steile mögliche Reglerreaktion, Absicherung der regulären Tropfenablösung	unruhiger subjektiver Prozesseindruck (Frequenzveränderungen)	integrales Verhalten der Lichtbogen-Längenstabilisierung möglich

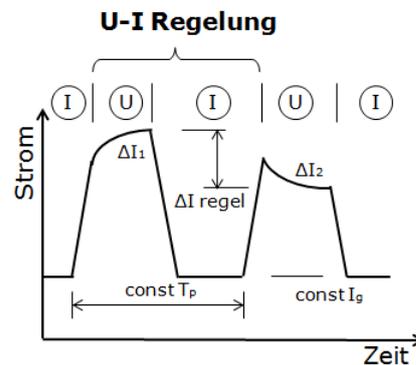


Bild 2

U-I-Regelung (Impulsspannung U, Grundstrom I)

Vorteile	Nachteile	Eigenschaften
inhärent, un-mittelbar, konstante Frequenz (angenehme subjektive Wahrnehmung), Wahl der Frequenz	beschränkter Regelbereich, Mögliche Entartung der Tropfenablösung	proportionales Verhalten der Lichtbogen-Längenstabilisierung

3 Erweiterung der Regelungskonzepte

Die heutigen Möglichkeiten der Modifikation des Impulslichtbogens (ergänzend zu den U-I- und I-I-Regelungskonzepten) werden genutzt zur Optimierung bestimmter Prozesseigenschaften. Zur Ausprägung besonderer Eigenschaften werden im Merkblatt DVS 0973 [2] folgende Modifikationen genannt:

- Abweichungen von der Konvention des „ein Tropfen pro Impuls“-Prinzips;
- wahlweise Nutzung einer Strom- oder Spannungsregelung in der Impulsphase;
- Verkürzung der Lichtbogenlänge zum impulsangeregten Werkstoffübergang in einer geregelten Kurzschlussphase zur vorteilhaften Kombination der Eigen-

- schaften des Impulslichtbogens mit denen des Kurzlichtbogens;
- Nutzung einer temporär an den Impuls anschließenden kurzen Sprühlichtbogenphase zur vorteilhaften Kombination der Eigenschaften des Impulslichtbogens mit denen des Sprühlichtbogens.

Die vielfältigen Möglichkeiten der Anpassung des Impulsschweißens an verschiedene Anwendungsbedingungen sind für die Schweißaufsichtsperson grundsätzlich eine spannende Sache:

- Was erfordert die Fügeverbindung, der Schweißprozess?
- Persönliche Befindlichkeiten, was mag der Schweißer bzw. die Schweißaufsichtsperson?
- Wie stark variiert das alles?
- Was kann die Schweißstromquelle?

Im Rahmen eines bilateralen Forschungsprojektes des ISF Aachen [3] und Lorch Schweißtechnik [5] wurde diese Problematik aufgegriffen. Ziel war die Entwicklung einer robusten Lösung, welche es dem Schweißer auf einfache Weise erlauben soll, den von einer geregelten volldigitalen Schweißstromquelle geführten Impulsschweißprozess möglichst einfach an wechselnde Anwendungsbedingungen anpassen zu können.

4 Lösungsansatz für "wechselnde Anwendungsbedingungen"

Unter „wechselnden Anwendungsbedingungen“ können viele verschiedene und sogar sich widersprechende Anforderungen verstanden werden. Nach Recherchen zum Stand der Technik, der Befragung von arglosen Schweißern, der Auswertung existierender Prozessparameter- und Prozessmessdaten, sowie unter Berücksichtigung der Kenntnisse und Möglichkeiten beider Projektpartner, wurde ein im Sinne des Anwenders besonders robuster Lösungsansatz favorisiert.

Eckpunkte dieses Lösungsansatzes sind:

- Berücksichtigung der von der bisherigen schweißtechnischen Erfahrung geprägten Reaktion des Schweißers auf wechselnde Anwendungsbedingungen (Intuition);
- I-U-I-Regelung des Impulsschweißprozesses zur Nutzung innewohnender

- Selbstregelungseffekte von freiem Drahtende und Lichtbogenlänge (Inhärenz);
- Erschließung von Lichtbogenlänge und Impulsfrequenz als Anpassungsgrößen an „wechselnde Anwendungsbedingungen“ (Variabilität).

Diese Eckpunkte sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Intuition

Viele Schweißer reagieren während des Schweißens auf einen als zu kurz empfundenen Lichtbogen mit einem Zurückziehen des Brenners und erwarten intuitiv eine Vergrößerung von Lichtbogenlänge und freiem Drahtende. Umgekehrt reagieren viele Schweißer auf einen als zu lang empfundenen Lichtbogen oder auf eine beginnende unerwünschte Lichtbogenablenkung (z.B. bei magnetischer Blaswirkung) mit einer Verkürzungsbewegung oder veränderter Brennerneigung. Ähnliche Reaktionen sind feststellbar (und machen auch Sinn) beim Überschweißen von Heftstellen oder anderen Nahtbesonderheiten. Der Schweißer ist vom herkömmlichen MSG-Schweißen im Kurzlichtbogen-, Mischlichtbogen- und Sprühlichtbogenbereich gewohnt, durch Veränderung des Brennerabstandes den Lichtbogen von kurz aggressiv drückend (knackig) bis zu länger, breiter während des Schweißens zu beeinflussen. Die unmittelbaren intuitiven Reaktionen des Schweißers auf während des Schweißens wechselnde Anwendungsbedingungen soll die neue Schweißstromquellenregelung ermöglichen. Dies steht durchaus bewusst im Gegensatz zu anderen Regelstrategien, bei denen die Lichtbogenlänge von der Schweißprozessregelung unabhängig von Brennerhaltung und freiem Drahtende absolut konstant gehalten wird.

Inhärenz

Zur Realisierung der beiden anderen Eckpunkte des Lösungsansatzes wurde eine neue I-U-I-Impulsprozessregelung umgesetzt, die auf den klassischen Regelstrategien der I-I- und U-I-Regelung beruht (**Bild 1, Bild 2**) und zusätzlich den Effekt einer vorteilhaften Modifikation des Impulsschweißprozesses nutzt (**Bild 3**).

Die I-U-I-Impulsprozessregelung bewahrt von der bekannten I-I-Regelung die arteigene Sicherheit für stabilen Grundstrom und impuls-synchrone Tropfenbildung und sorgt so für einen spritzerarmen Werkstoffübergang in einem

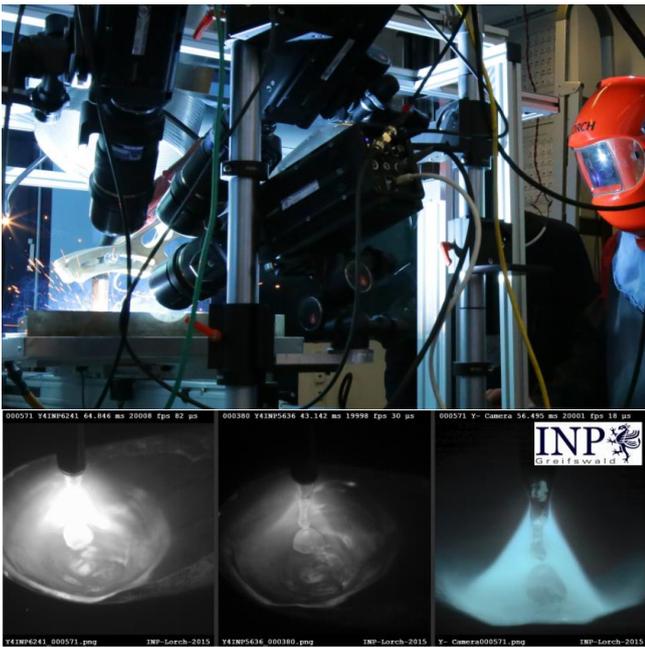


Bild 5: Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeitskameras (oben) und synchrone Bilder der Schmelze (links), des Werkstoffübergangs (Mitte) und des Lichtbogen-Metaldampfbereiches (rechts) des untersuchten I-U-I-Impulsprozesses (Schutzgas M21, 1.2mm G3Si1, $v_D=12.5\text{m/min}$, $v_S=75\text{cm/min}$)

Es bestätigt sich, dass die inhärente Lichtbogenlängenstabilisierung mit der Menge des zusätzlich abgeschmolzenen Werkstoffes, ange regt durch die Strombeeinflussung während der U-Regelphase, in Zusammenhang steht. Unter der Voraussetzung einer identischen Abschmelzgeschwindigkeit der Elektrode (dies entspricht im Mittel der eingestellten Drahtvorschubgeschwindigkeit) ist für eine geringere Impulsfrequenz ein größeres Abschmelzvolumen pro Impuls erforderlich als bei einer höheren Impulsfrequenz. Die I-U-I-Regelung sorgt in der ersten I-Phase nun für eine sichere Ablösung des Haupttropfens (primärer Führungstropfen), **Bild 6**.

Es ist erkennbar, dass der primäre Führungstropfen trotz unterschiedlicher Einstellung der Impulsfrequenz immer eine ähnliche Größe hat. Die Veränderung des pro Impuls von der Elektrode abgeschmolzenen und übertragenen Werkstoffes findet hauptsächlich in der sekundären Sprühlichtbogenphase statt.

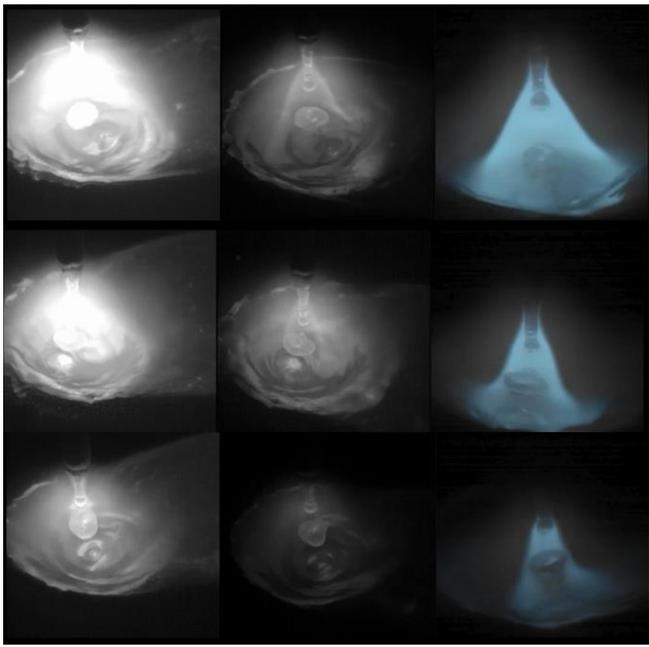


Bild 6: der Haupttropfen (primärer Führungstropfen) hat trotz unterschiedlicher Einstellung der Impulsfrequenz (obere Bildreihe hohe Frequenz, unten tiefe Frequenz) immer eine ähnliche Größe

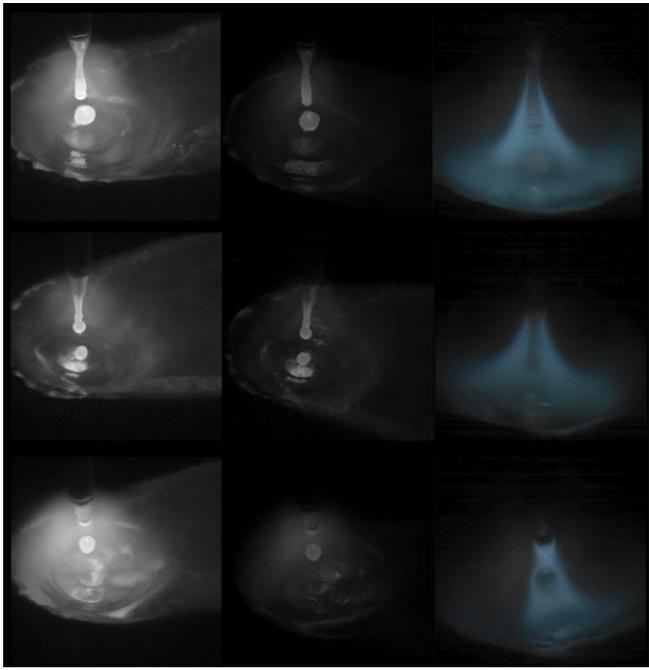


Bild 7: der auf den Haupttropfen folgende sekundäre sprühlichtbogenartige Werkstoffübergang hat bei unterschiedlicher Einstellung der Impulsfrequenz (oben hohe Frequenz, unten tiefe Frequenz) ein daran angepasstes verändertes Volumen pro Impuls.

In **Bild 7** ist erkennbar, dass die gebildete sprühlichtbogencharakterisierte Tropfenkette bei der geringeren Frequenz (obere Bildreihe) ein größeres Materialvolumen (eine längere Tropfenkette) umfasst, als bei höherer Frequenz (untere Bildreihe).

Auf Grund dieses Wirkzusammenhanges ist es möglich, für die Impulsfrequenz andere Werte zu wählen, ohne Nachteile bei der für einen spritzerarmen Impulsprozess so wesentlichen sicheren Ablösung des Haupttropfens einzugehen.

Der Wirkzusammenhang der inhärenten Wechselwirkung von Stickout- und Lichtbogenlänge ist in starker Vereinfachung ähnlich wie beim Standard-MSG-Schweißen derart, dass ein kürzerer Lichtbogen zu einer Stromerhöhung in der U-Regel-Phase der I-U-I-Prozessregelung führt, welche eine Erhöhung der Abschmelzgeschwindigkeit der Elektrode nach sich zieht. In umgekehrter Richtung verringert sich der Strom bei einem längeren Lichtbogen.

Dieses Verhalten führt zu einer vergleichsweise robusten Stabilisierung des Schweißprozesses, wobei die Lichtbogenlänge nicht so konstant gehalten wird, wie bei einem I-I-geregelten Impulsprozess üblich. Vielmehr wird diese Eigenschaft der I-U-I-Regelung von der "Intuition" des Schweißers erkannt und vorteilhaft ausgenutzt.

Vielleicht zunächst unerwartet, aber auch das ohne "Intuition" ablaufende mechanisierte Schweißen zieht aus der I-U-I-Regelung einen bestimmten Vorteil. Dieser Vorteil ist die Robustheit der "inhärenten" Regelung. Hingegen ist der zu vermutende Nachteil der nicht vollständigen Ausregelung der Lichtbogenlänge bei Abstandsänderungen nur sehr gering, denn diese werden bei der mechanisierten Brennerführung üblicherweise sowieso vermieden.

Die Robustheit der "inhärenten" Regelung ergibt sich aus der Tatsache, dass die U-Regel-Phase nicht ein Zeitpunkt, sondern eine Zeitdauer ist, in der sich eventuelle kurzzeitige Störungen (z.B. die ständigen Kontaktveränderungen im Stromkontaktrohr) ausgleichen und weniger Störeinfluss erlangen, als dies zum Beispiel bei Messung der Lichtbogenlänge für den Regelkreis der I-I-Impulsprozessregelung der Fall sein kann.

Im **Bild 8** sind zugeordnet zu den zeitlichen Strom- und Spannungsverläufen die Zeitpunkte und Bilder des Werkstoffübergangs bestimmter Prozessphasen dargestellt. Die obere Darstellungsreihe zeigt die Verhältnisse bei einem relativ kurzen, die untere Reihe bei einem relativ langen Lichtbogen. Es ist erkennbar, wie der sich einstellende Stromverlauf in der U-Regelphase den gepulsten Werkstoffübergang beeinflusst, sowohl hinsichtlich des zeitlichen Auftretens bestimmter Merkmale, als auch in deren Ausprägung.

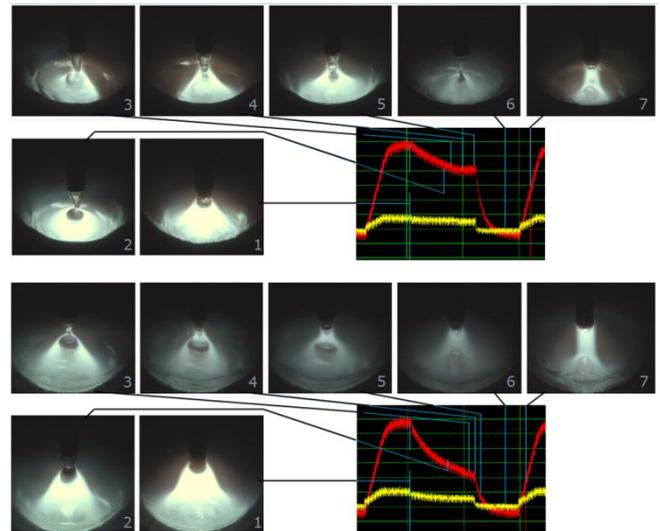


Bild 8: Zeitpunkte und Bilder des Werkstoffübergangs bestimmter Prozessphasen: Beginn der U-Regel-Phase (1), Tropfeneinschnürung (2), Tropfenabtrennung (3), sekundäre Sprühlichtbogenphase (4), Impulsende (5), Grundstromphase (6), Impulsbeginn (7); Kürzerer Lichtbogen (oben); längerer Lichtbogen (unten)

Die durchgeführten systematischen Untersuchungen, Hand in Hand mit der Entwicklung der Synergiekennlinien, konzentrierten sich auf das Erkennen bzw. die Verifikation prognostizierter analytischer Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einstell- und Prozessparametern. Wesentliches Augenmerk wurde darauf gelegt, die Prozessregelvariante "gutmütig reagierend" (robust) auf wechselnde Anwendungsbedingungen zu gestalten.

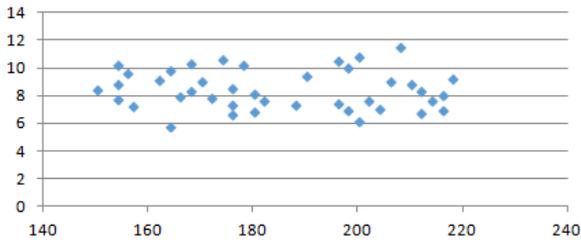


Bild 9: Statistische Versuchsmatrix der untersuchten Proben. Dargestellt ist die Lichtbogenleistung in kW (Ordinate) über der Impulsfrequenz in Hz

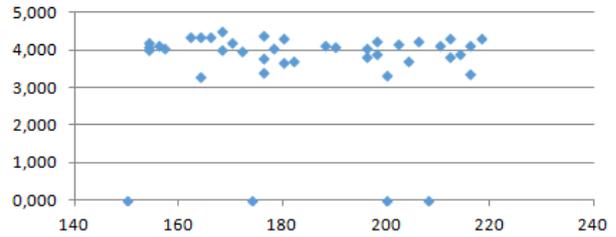


Bild 13: Darstellung der ermittelten Einbrandtiefe H2 in mm über der Impulsfrequenz in Hz (0=selektierte Ausreißer)

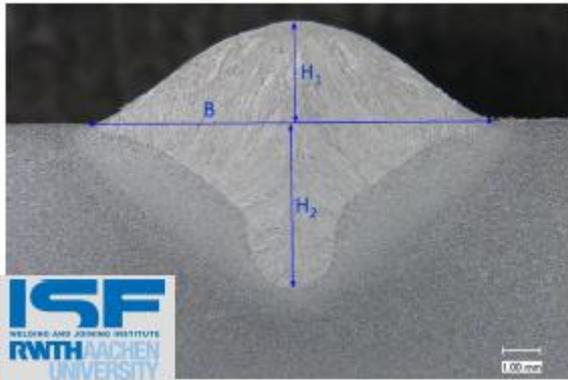


Bild 10: Darstellung der untersuchten geometrischen Längen-Kennwerte des Nahtquerschnitts

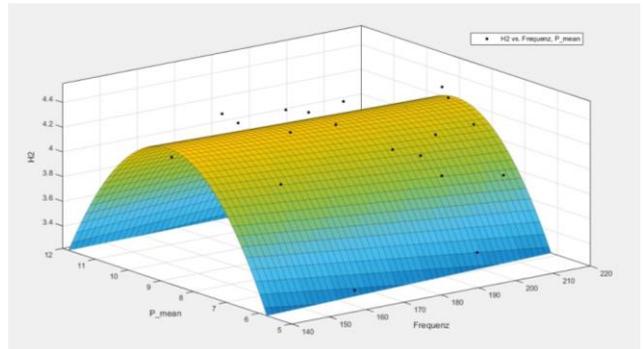


Bild 14: Darstellung der ermittelten Einbrandtiefe H2 in mm über der Lichtbogenleistung in kW und der Impulsfrequenz in Hz

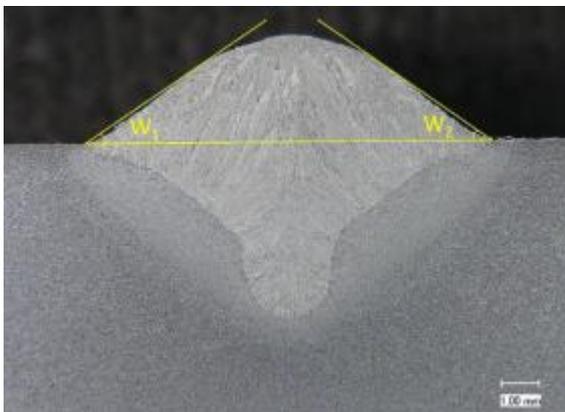


Bild 11: Darstellung der untersuchten geometrischen Winkel-Kennwerte des Nahtquerschnitts

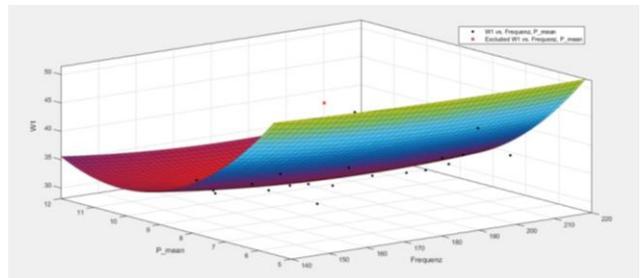


Bild 15: Darstellung der ermittelten Winkel W in Gradmaß über der Lichtbogenleistung in kW und der Impulsfrequenz in Hz

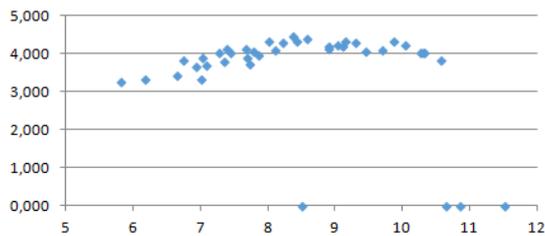


Bild 12: Darstellung der ermittelten Einbrandtiefe H2 in mm über der Lichtbogenleistung in kW (0=selektierte Ausreißer)

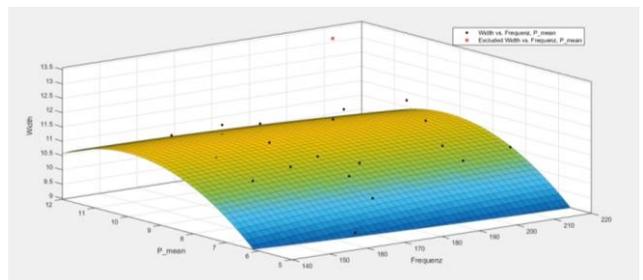


Bild 16: Darstellung der ermittelten Nahtbreite B in mm über der Lichtbogenleistung in kW und der Impulsfrequenz in Hz

Dargestellt in **Bild 9 bis Bild 16** sind Auszüge aus systematisch ermittelten Untersuchungsergebnissen zur Anwendung der I-U-I-Prozessregelvariante (SG3Si1, Schutzgas Ar/CO₂ 92/08, t=10mm, vD=9,5m/min, vS=60cm/min).

Die 2-D und 3-D-Auswertungen zeigen übereinstimmend keine erkennbare systematische Abhängigkeit der ermittelten Naht-Geometriemerkmale von der Impulsfrequenz. Erkennbar ist hingegen eine systematische (nichtlineare) Abhängigkeit der Naht-Geometriemerkmale von der elektrischen Lichtbogenleistung. Damit bestätigt sich auch bei der I-U-I-Impulsprozessregelvariante, dass die wahre Lichtbogenleistung wichtig bei Betrachtungen zur Prozess-Sicherheit ist. Dies steht in Einklang mit bekannten Untersuchungen und Aussagen zum Einfluss der Parameter gepulster Prozesse auf die Wärmeeinbringung [7].

Die Ergebnisse der systematischen Untersuchungen deuten auf eine breite Anwendbarkeit hin.

6 Feldtest und Industrialisierung

Die auf wechselnde Anwendungsbedingungen durch „Intuition“, „Inhärenz“ und „Variabilität“ anpassbare neue Impulsprozessregelvariante wurde bei einer Reihe von anspruchsvollen industriellen Anwendern im Rahmen eines Feldtests im Jahr 2015 geprüft.

Neben den ausgeprägten robusten prozesstechnischen Eigenschaften wurde die konstante Impulsfrequenz subjektiv als angenehmer und der Prozess dadurch als stabiler empfunden als die Impulsfrequenzregelung herkömmlicher I-I-geregelter Impulsprozesse.

Im Gegensatz zu den schwer fassbaren wissenschaftlichen Aussagen hinsichtlich der besonderen Eigenschaften der neuen Impulsprozessregelvariante fand einer der am Feldtest Beteiligten auch endlich eine simple Beschreibung: „Bei Autos gibt es Frontantrieb, Heckantrieb und manchmal auch Differentialsperre. Das ist nun der Allrad unter den Impulsprozessen“.

Die durchweg sehr ermutigenden Rückmeldungen führten Anfang 2016 zur Industrialisierung einer neuen Impulsprozessregelvariante von Lorch mit der Bezeichnung „SpeedPulse XT“. Es liegen zertifizierte Verfahrensprüfungen mit

davon abgeleiteten Schweißanweisungen (WPS) vor.

Als Beispiel für eine gelöste anspruchsvolle Aufgabe soll hier das automatisierte Schweißen bei einem Hersteller von Fahrradrahmen gezeigt werden, **Bild 17**. Die Brennerorientierung durchläuft die Positionen PA, PB, PG, PD bei sich gleichzeitig ändernden Flankenwinkeln am unbewegten Rohrsegment. Durch die in einem zyklischen Prozess gesteuerte I-U-I-Impulsprozessregelung, zusammen mit einer angepassten Bewegungsbahn des Brenners mit unterschiedlichen Abständen des Stromkontaktrohrs zur Schweißfuge, konnte die geforderte Qualität und Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

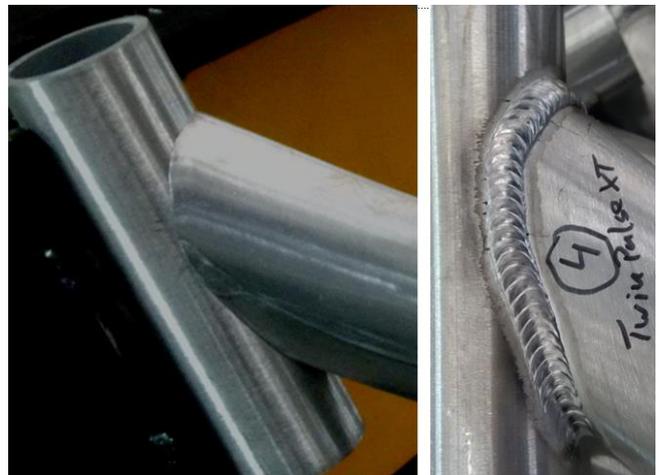


Bild 17: Vorbereitete Elemente eines Aluminium-Fahrradrahmen (links), mechanisiert MIG-geschweißt in "WIG-Hand-Optik" (rechts) mit der I-U-I-geregelten zyklischen Impulsprozessvariante "TwinPulse XT"

7 Zusammenfassung

Im Kontext der Einteilung der Prozessregelvarianten nach Merkblatt DVS 0973 [2] und dem Merkblatt für geregelte Impulslichtbogenprozesse, DVS 0926-3 [1], wurden Konzeption und Untersuchungsergebnisse eines neuen patentierten I-U-I-geregelten Impulsschweißprozesses mit besonderen robusten Eigenschaften ("Intuition", "Inhärenz", "Variabilität") vorgestellt.

Die Schweißprogrammdateien sind hinsichtlich ihrer Parameter so gestaltet, dass sich trotz der für den Anwender vorteilhaften Variabilität keine systematischen negativen Einflüsse auf die Prozesssicherheit einstellen.

Ein besonderer Vorteil dieser in einem weiten Feld einsetzbaren I-U-I-Regelvariante liegt darin, dass der Schweißer seine Intuition nutzen kann, denn der neue spritzerarme Impulsprozess reagiert "gutmütig" und "robust" und "anpassbar".

8 Quellen und Verweise

[1] Prozessparameter und Gerätetechnik für das Impuls-Lichtbogenschweißen, Merkblatt DVS 0926-3, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2012

[2] Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens, Merkblatt DVS 0973, DVS-Media GmbH, Düsseldorf 2015

[3] Institut für Schweißtechnik und Füge-technik (ISF) der RWTH Aachen, ISF - Welding and Joining Institute, RWTH - Aachen University, Pontstrasse 49, 52062 Aachen, www.isf.rwth-aachen.de

[4] Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) Greifswald, Felix-Hausdorff-Str. 2, 17489 Greifswald, www.inp-greifswald.de

[5] Lorch Schweißtechnik GmbH, Im Anwänder 24-26, 71549 Auenwald, www.lorch.eu

[6] B. Jaeschke: Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Metall-Schutzgasschweißens durch moderne Schweißgerätesysteme. Jahrbuch Schweißtechnik 2013, S.182/185, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2012

[7] B. Jaeschke, W. Ernst, M. Luritzhofer: Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse. DVS-Berichte Band 296, DVS Congress 2013, S. 302 ff. DVS Media, Düsseldorf 2013

[8] Patentschrift DE102010002121B8: Lichtbogen-Schweißverfahren und Schweißstromquelle zur Durchführung des Verfahrens. Patentinhaber: Lorch Schweißtechnik GmbH. Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 28.07.2011

Diese Fachdokumentation wurde auch veröffentlicht in: DVS-Berichte Band 327, DVS Congress 2016, S. 54-60, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2016.

Auf der Großen Schweißtechnischen Tagung vom DVS Congress 2016 wurde ein gleichnamiger Vortrag vom ersten Autor am 19.09.2016 in Leipzig gehalten.