

WIG-Schweißen mit Impulsen im höheren Frequenzbereich

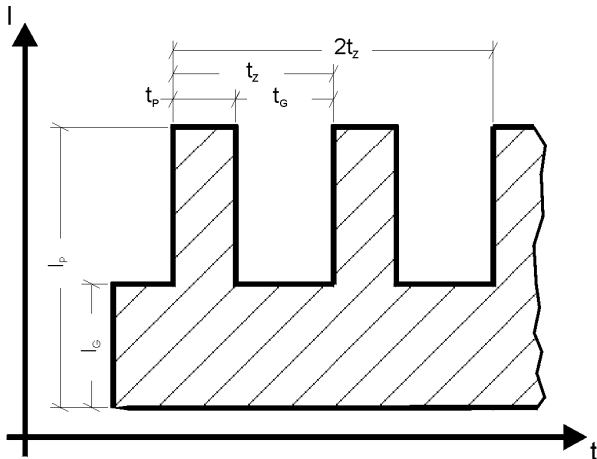
N. Knopp, Mündersbach und R. Killing, Solingen

Einleitung

Beim WIG-Impulsschweißen im kHz-Bereich wird der Lichtbogen eingeschnürt und erhöht das Einbrandverhalten des Prozesses. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt zwischen 2 und 6 kHz. Das verbesserte Einbrandverhalten ermöglicht schnellere Schweißgeschwindigkeiten und auch eine Kostenersparnis; insbesondere beim Verbinden von dünnen Blechen.

1. Einleitung

Beim WIG-Impulsschweißen pulsieren Stromstärke und Spannung im Lichtbogen mit einstellbarer Frequenz. Moderne Stromquellen zum WIG-Schweißen haben meist eine Konstantstromcharakteristik, so daß als Parameter der Grundstrom, der Impulsstrom und die Impulsfrequenz einzustellen sind, **Bild 1**. Letztere läßt sich am einfachsten bei konstanter Impulsdauer durch Verändern der Grundstromzeit erhöhen oder verringern. Damit ändert sich aber auch das Tastverhältnis und damit die wirksame Stromstärke. Soll das Tastverhältnis gleichbleiben, dann muß auch die Impulszeit angepaßt werden. Bei höheren Frequenzen, wenn man sehr viele Impulse pro Zeiteinheit unterbringen muß, ist das sogar unabdinglich. Das WIG-Impulsschweißen wird, von Ausnahmen abgesehen nur zum mechanisierten Schweißen eingesetzt, beispielsweise beim Orbitalschweißen. Je nach Frequenzbereich in dem gepulst wird, ergeben sich dabei, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, ganz unterschiedliche Effekte.



I	Strom
t	Zeit
I _P	Impulsstrom
I _G	Grundstrom
t _P	Impulsstromzeit
t _G	Grundstromzeit
t _Z	Zyklusdauer
PB	Tastverhältnis
f	Impulsfrequenz (f=1/t _Z)

$$PB = \frac{t_P}{t_P + t_G} \times 100\%$$

Bild 1 Stromverhältnisse beim WIG-Impulsschweißen mit rechteckförmigen Stromimpulsen.

2. Pulsen in verschiedenen Frequenzbereichen

Bild 2 zeigt, wie sich die Anwendung von Strom- und Spannungsimpulsen in verschiedenen Frequenzbereichen beim WIG-Schweißen auswirkt.

2.1 Pulsen im niedrigen Frequenzbereich

Am meisten wird das WIG-Impulsschweißen mit Frequenzen unter 10 Hz, vorzugsweise unter 6 Hz angewendet. Der Wärmeeintrag des Lichtbogens in des Schmelzbad ist - richtige Einstellungen für Grund- und Impulsstrom vorausgesetzt - in der Impulsphase bedeutend größer als in der Grundphase. Unter Einwirkung des hohen Impulsstromes wird der Einbrand erzielt und das Schmelzbad aufgeschmolzen. Unter Einfluß der niedrigeren Temperatur in der Grundphase beginnt das Bad aber vom Rand her bereits wieder zu erstarren, bevor es durch den nächste Impuls wieder auf seine ursprüngliche Größe aufgeschmolzen wird. Inzwischen ist der Lichtbogen aber in Schweißgeschwindigkeit weitergewandert, so daß die Schweißnaht aus vielen miteinander verbundenen Einzelpunkten gebildet wird. Dies läßt sich auch an der typischen Schuppung einer mit niedriger Frequenz nach dem WIG-Impulsverfahren geschweißten Nahtoberfläche erkennen. Nach Untersuchungen von [1], tritt dieser Effekt nur bei Impulsfrequenzen unter etwa 6 Hz auf, weil sich bei höheren Frequenzen die Temperaturen in der Impuls- und in der Grundphase immer mehr annähern. Bei richtig eingestellten Werten für den Grund- und den Impulsstrom bildet sich in diesem Frequenzbereich durch den geschilderten Effekt ein Schmelzbad aus, daß verglichen mit dem ungepulsten Schweißen bei gleichem Einbrand im Durchschnitt kleiner ist. Es läßt sich deshalb in Zwangslagen besser beherrschen. Das Verfahren wird deshalb auch vorzugsweise da eingesetzt, wo eine gute Beherrschung des Schmelzbades in verschiedenen Positionen gefragt ist.

2.2 Pulsen im mittleren Frequenzbereich

Das WIG-Schweißen mit höheren Impulsfrequenzen - bis zu einigen hundert Hz - wird auch metallurgisches Pulsen genannt. Unter Einfluß des unterschiedlichen Lichtbogendruckes in der Grund- und Impulsphase beginnt das Schweißbad im Rhythmus der eingestellten Impulsfrequenz zu schwingen. Es tritt dadurch

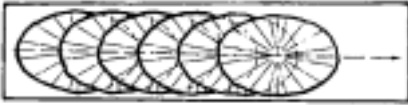
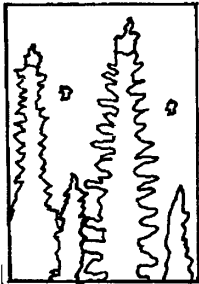
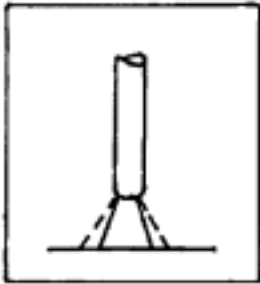
Frequenzbereich, Niveau	0,5 bis 6 Hz, niedrig	Hundert- Hz- Bereich, mittel	Kilo- Hz- Bereich, hoch
Zweck des Pulsens	Verbesserung des Zwangslagenschweißens	Verbesserung der Zähigkeit bei kritischen Werkstoffen	Verbesserung des Einbrandverhaltens, Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit
Wirkungsmechanismus	Im Durchschnitt kleineres Schweißbad bei gleicher Einbrandtiefe durch den Temperaturunterschied zwischen Grund- und Impulsphase	Verfeinerung des Primärgefüges infolge Rührwirkung durch die Badschwingungen	Höhere Energiekonzentration im Lichtbogen durch Einschnürung des Lichtbogens
Wirkungsmechanismus (Schematisch)			

Bild 2 Wirkung des Pulsens in verschiedenen Frequenzbereichen beim WIG- Schweißen

im erstarrenden Schweißgut ein Effekt auf, wie er vom magnetisch induzierten Rühren in der Stahlmetallurgie bekannt ist [2]. Die Spitzen der in das Bad hineinwachsenden Kristalle (Zellen oder Dendriten) werden dabei abgebrochen. Die Bruchstücke wirken selbst als Kristallisationskeime für neue Kristalle und auf den Bruchstümpfen der bereits gewachsenen Kristalle kristallisieren neue auf. Es kommt dadurch zu einer insgesamt feineren Erstarrungsstruktur und die Bildung durchgehender Strengelkristalle wird dadurch verhindert. Dadurch soll eine Verbesserung der Zähigkeit erreicht werden. Der Effekt läßt sich bei konventionellen Werkstoffen schwer nachweisen, weil er von Umkristallisierungsvorgängen bei der Sekundärgefügeausbildung überlagert wird. Bei Titan, Zirkon und andern umwandlungsfreien Werkstoffen wurde die bessere Zähigkeit aber nachgewiesen.

2.3 Pulsen im hohen Frequenzbereich

Dies ist das eigentliche Thema dieses Beitrages und wird deshalb jetzt ausführlicher behandelt.

3. Verfahrensprinzip

Beim WIG-Schweißen mit Impulsraten zwischen etwa 2 – 8 kHz, kommt es gegenüber dem ungepulsten Schweißen zu einer starken Einschnürung des Lichtbogens und durch die dadurch bedingte Energiekonzentration im Lichtbogen zu einem tieferen Einbrand. Wo der tiefe Einbrand nicht genutzt werden soll, z.B. beim Schweißen dünnerer Bleche, kann die Schweißgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden. Diese Einschnürung des Lichtbogens kommt folgendermaßen zustande: Das sich um den Lichtbogen ausbildende konzentrische Magnetfeld **Bild 3**, hat auch eine radial nach innen gerichtete Kraftkomponente, die Lorentzkraft.

Diese ist es, die beispielsweise beim MAG-Sprühlichtbogen- oder Impulslichtbogenschweißen einzelne Tropfen von der Elektrodenspitze abkneift (Pincheffekt). Die Lorentzkraft drückt auch den Lichtbogen zusammen, weil sie mit der Stromdichte ansteigt, in der Impulsphase mehr als in der Grundphase. Bei niedrigen Impulsfrequenzen kann sich der in der Impulsphase eingeschnürte Lichtbogen in der Grundphase wieder ausdehnen. Bei sehr hohen Frequenzen im kHz-Bereich verhindert dies aber weitgehend seine mechanische Trägheit, sodaß er eingeschnürt bleibt.

Zu dem schon beschriebenen besseren Einbrandverhalten kommt als weitere Vorteil des eingeschnürten Lichtbogens hinzu, daß er stabiler ist.

Er wird beispielsweise durch die magnetische Blaswirkung oder durch äußere Magnetfelder weniger abgelenkt. Ähnliches ist vom ebenfalls eingeschnürten Plasmalichtbogen bekannt.

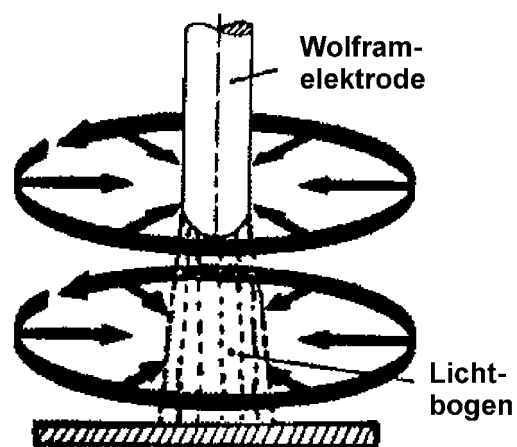


Bild 3 Magnetische Einschnürung des Lichtbogens bei hoher Schweißstromstärke

Der Lichtbogen "klebt" auch weniger am flüssigen Schweißgut, was sich bei höheren Schweißgeschwindigkeiten positiv auswirkt [3]. Diese Kleben beruht darauf, daß der Lichtbogen bei positiv gepolter Elektrode am hoherhitzen flüssigen Schmelzbad bessere Ausbreitungsbedingungen vorfindet, weil durch die thermische Ionisation hier besonders viele Elektronen emittiert werden. Es führt u.a. dazu, daß durch diese Ablenkung entgegen der Schweißrichtung bei Überschreiten einer gewissen Grenzgeschwindigkeit der Fluß abreißt und eine unbrauchbare, stark überwölbte Naht mit seitlichen Einbrandkerben entsteht. Die Schnellschweißgrenze des Prozesses ist damit erreicht. Diese Schnellschweißgrenze ist beim WIG-Impulsschweißen mit höheren Impulsfrequenzen wesentlich höher als beim Schweißen mit gleichförmigem Strom. Beim WIG-Impulsschweißen mit niedrigen Frequenzen ist dagegen wegen des im durchschnitt kleineren Schmelzbades sogar in vielen Fällen gegenüber dem Schweißen mit gleichförmigem Strom eine Verringerung der Schweißgeschwindigkeit erforderlich. Das Kleben des Lichtbogens am Bad zeigt sich u.a. in der Ausbildung eines ausgeprägten "Schwänzchens" am rückseitigen Ende des Lichtbogens. In den **Bildern 4** und **5** wird versucht dieses fotografisch abzubilden, was aber nicht unproblematisch ist.



Bild 4 Lichtbogausbildung beim WIG- Impulsschweißen mit höheren Frequenzen



Bild 5 Lichtbogausbildung beim ungepulsten WIG- Schweißen

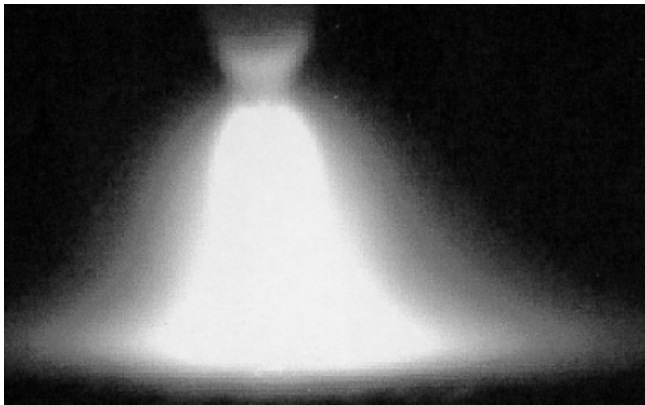
Die unterschiedlich langen "Schwänzchen" bei gleicher Schweißgeschwindigkeit sind aber deutlich zu erkennen. Dagegen erscheint auf den ersten Blick beim Vergleich der beiden Bilder der Impulslichtbogen nicht wesentlich schmaler zu sein als der ungepulste Lichtbogen obwohl man beim Nachmessen feststellen kann, daß sein Durchmesser im unteren Teil etwa 25 % kleiner ist. Was man auf dem Foto sieht, sind nur die Leuchterscheinungen des Lichtbogens. Eingeschnürt ist aber hauptsächlich der stromführende Lichtbogenkern. Bei einem weiteren Versuch wurde deshalb der auf einem dickeren Blech stehende Lichtbogen noch einmal in der Grundphase fotografiert, wobei aber durch Filter die schwächeren Leuchterscheinungen weitgehend ausgeblendet wurden. Nun ist der Kern des Lichtbogens deutlich zu erkennen.

Das Ergebnis sieht man in **Bild 6**. Beim Impulsschweißen mit einer Frequenz von 1 kHz ist noch kein wesentlicher Unterschied im Durchmesser des Lichtbogens gegenüber dem ungepulsten Schweißen zu erkennen. Ab 2 kHz beginnt die Einschnürung, die sich bei 4 kHz verstärkt. Die Erhöhung auf 6 kHz bringt dann nicht mehr viel. Diese Ergebnisse unterstützen die vorher erwähnte Theorie, daß der Lichtbogen infolge seiner mechanischen Trägheit bei sehr hohen Frequenzen auch in der Grundstromphase eingeschnürt bleibt. Wenn allerdings die Trägheitsschwelle überschritten ist, dann kann eine weitere Erhöhung der Frequenz keine weiteren Auswirkungen mehr haben.

Die durch das Einschnüren erhöhte Schnellschweißgrenze ist ein weiterer Vorteil des WIG-Schweißens mit Impulsen im kHz-Bereich. Auf einer Versuchsanlage zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Rohren aus Edelstahl, **Bild 7** konnte damit eine Verdoppelung der Schweißgeschwindigkeit gegenüber dem ungepulsten WIG-Schweißen erreicht werden.



Bild 7 Versuchsanlage zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre



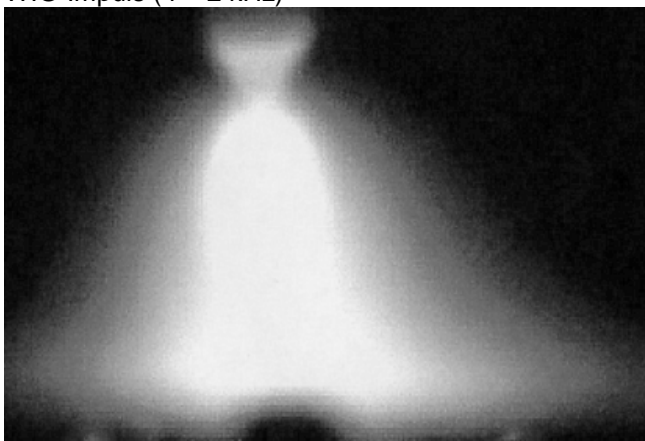
WIG-Gleichstrom (- Pol)



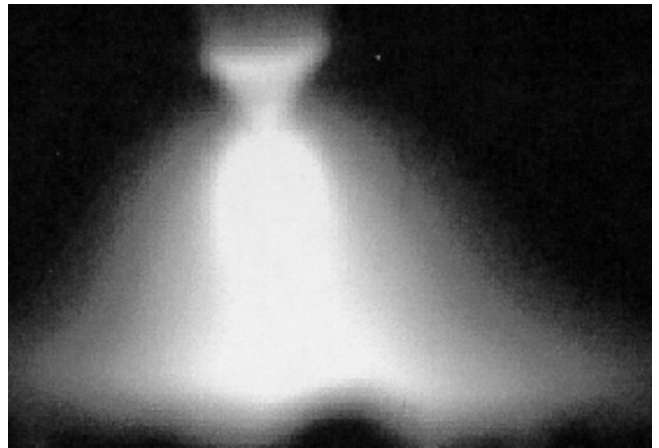
WIG-Impuls (f = 1 kHz)



WIG-Impuls (f = 2 kHz)



WIG-Impuls (f = 4 kHz)



WIG-Impuls (f = 6 kHz)

- W-Elektrorendurchmesser: 4,8 mm
- Anschleifwinkel: 30°
- Stromstärke (eff.): 300 Ampere
- Spannung: 25 V
- Schutzgas: Argon (12 l/min.)

Bild 6 WIG-Impulsschweißen – Einschnürung des Lichtbogens bei höheren Impulsfrequenzen

Natürlich kann das Verfahren nicht konkurrieren mit dem WIG-Mehrkatodenschweißen, aber für die Herstellung von Rohren in kleineren Losgrößen kann es wegen des geringeren Investitionsaufwandes und der leichteren Einstellbarkeit der Parameter gegenüber diesem eine Alternative sein.

Ein Nachteil des Pulsens im kHz-Bereich darf aber nicht verschwiegen werden. Die Schwingungen des Lichtbogens verursachen ein frequenztypisches Geräusch, das als unangenehm empfunden wird und nur durch Abkapselung des Lichtbogenbereiches verringert oder beseitigt werden kann.

Beim vollmechanischen Schweißen bereitet dies in der Regel keine Schwierigkeiten, weil mit dieser Kapselung gleichzeitig auch ein Blendschutz für in der Nähe arbeitende Mitarbeiter geschaffen wird.

4. Ausrüstung zum Schweißen mit hohen Impulsfrequenzen

Für die schweißtechnische Anwendung stehen zwei Stromquellentypen zur Verfügung, die für einen maximalen Schweißstrom von 500 A bzw. 1000 A ausgelegt sind, **Bild 8**.

Sie besitzen ein Inverterleistungsmodul, das sich durch einen hohen Wirkungsgrad und die Unempfindlichkeit gegenüber Netzschwankungen auszeichnet.



Bild 8 WIG- Impulsschweißstromquelle *inverter*
TIG 1000 DC zum Pulsen im höheren Frequenzbereich

Die Einstellung der Impulsparameter erfolgt über einen Fernsteller, **Bild 9**. Mit diesem Fernsteller können Pulsfrequenzen bis zu 8 kHz eingestellt werden. Die Voraussetzung für optimale Stromformen (hohe, rechteckförmige Stromimpulse) erfüllt eine Stromquelle nur dann, wenn sie über sehr gute dynamische Eigenschaften verfügt. Besondere Aufmerksamkeit muß dem Schweißbrenner geschenkt werden.



Bild 9 Fernsteller zum hochfrequenten WIG- Impulsstromschweißen, Bedienelemente

Die Elektrodenspitze soll eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen, um lange Standzeiten bei der hohen Strombelastung zu erzielen. Die Ausrüstung

des wassergekühlten Brenners mit einer Gaslinse ist anzuraten.

Von der elektrischen Seite stellt sich das Problem des schnellen Pulsens eines Stromes wie folgt dar. Die Geschwindigkeit der Stromänderung gehorcht folgender Gleichung.

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{L}{U}$$

- Δi = Stromänderung
- Δt = Zeit
- U = Treibende Spannung
- L = Induktivität des Kreises

Aus diesem Zusammenhang läßt sich erkennen, daß die Stromänderung je Zeit von zwei Größen abhängig ist, von der Induktivität des Kreises und der treibenden Spannung des Systems. Beachtet man als erste Größe die Induktivität so sollte diese möglichst gering gehalten werden. Für die Auswahl der Stromquelle kommen somit nur getaktete Inverterstromquellen mit geringer Ausgangsinduktivität in Frage. Hier sind Werte um die 20 μH typisch.

Beim Aufbau der Schweißvorrichtung soll zur Vermeidung zu großer externer Induktivitäten auf kurze Leitungswege zum Brennen geachtet werden, **Bild 10**.

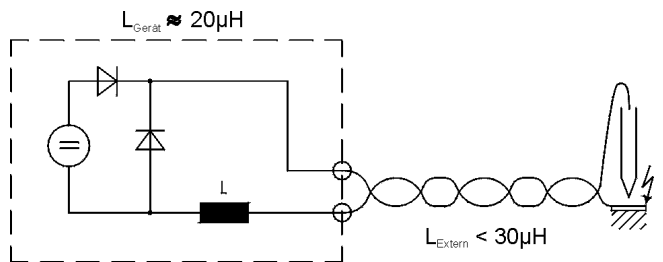


Bild 10 Brenner- Leitungswege

Zusätzlich sollten alle Leitungen verdreht sein, so daß eine Gesamtinduktivität der Stromquelle mit Schweißvorrichtung kleiner 50 μH eingehalten werden kann. Rechnet man mit einer Inverterspannung von 80 V und einer gewünschten Stromamplitude von 100 A so ergibt sich eine mögliche Pulsfrequenz von ca 8 kHz.

$$\Delta t = \Delta i \cdot \frac{L}{U} = 100\text{A} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6} \text{H}}{80\text{V}} = 62\mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 62\mu\text{s}} \approx 8\text{kHz}$$

Leider wird dieser Wert aber nicht erreicht. Betrachtet man den Stromverlauf des Pulsstromes wie im **Bild 11** dargestellt, so sieht man, das die abfallende Flanke des Stromes wesentlich flacher verläuft als die steigende Flanke.

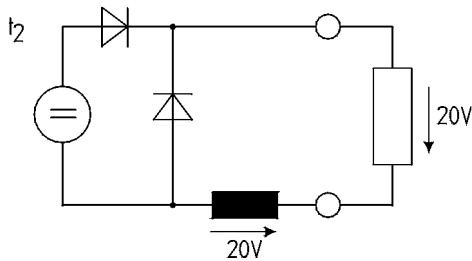
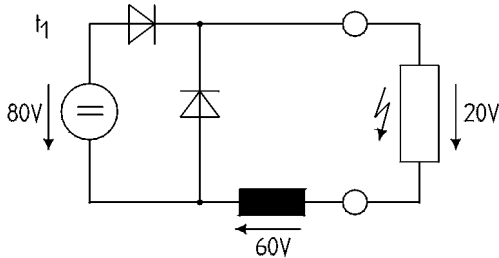
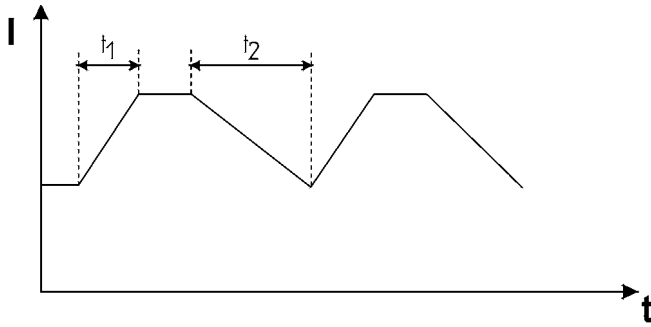


Bild 11 Stromverlauf beim Pulsen

Dies liegt an der niedrigeren treibenden Spannung beim Absenken des Stromes. Hier wirkt nicht die Spannung des Inverters, sondern die Prozessspannung im Lichtbogen. Diese ist aber wesentlich geringer als die Inverterspannung und beträgt nur ca 20 V. Hieraus ergibt sich eine maximale Pulsfrequenz von nur noch etwa 3,2 kHz.

$$\Delta t_1 = \Delta i \cdot \frac{L}{U} = 100A \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6} H}{60V} = 83 \mu s$$

$$\Delta t_2 = \Delta i \cdot \frac{L}{U} = 100A \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6} H}{20V} = 250 \mu s$$

$$f = \frac{1}{83 \mu s + 250 \mu s} = 3,0 kHz$$

Um eine Verbesserung zu erzielen muß beim Absenken des Stromes eine größere Gegenspannung erzeugt werden. Hierzu werden Stromquellen mit einer speziellen Schaltungstechnik verwendet [4]. In solchen Anlagen wird über zusätzliche Logik das Absenken des Stromes adaptiert und eine Gegenzelle eingeschaltet, welche die benötigte Spannung zum Stromabsenken zur Verfügung stellt, **Bild 12**.

Mit solchen Stromquellen ist es möglich Pulsfrequenzen bis 8 KHZ zu erreichen.

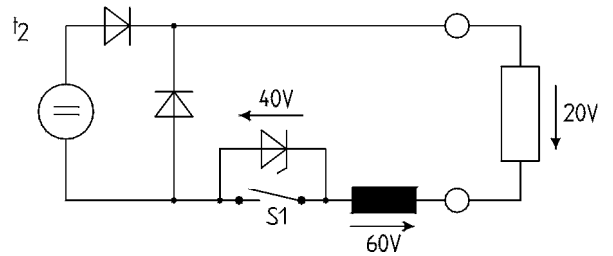
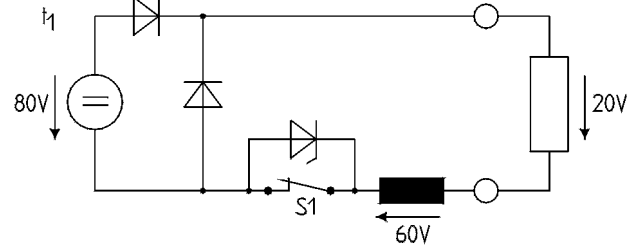
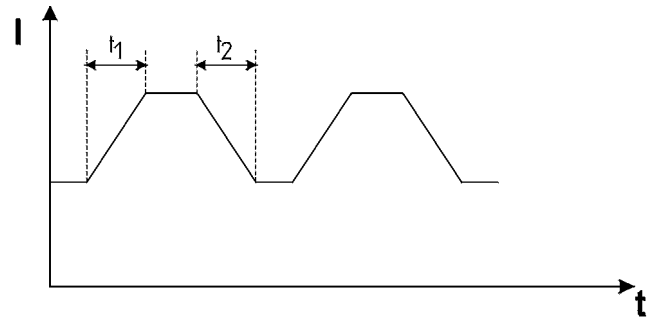


Bild 12 Stromverlauf beim Pulsen mit Zusatzschaltung

5. Ergebnisse von Schweißversuchen

An 2 mm dicken Blechen aus CrNi-Stahl (1.4301) wurden I-Stöße mit und ohne Impulse geschweißt. Das Ergebnis zeigen die **Bilder 13** und **14** [5].

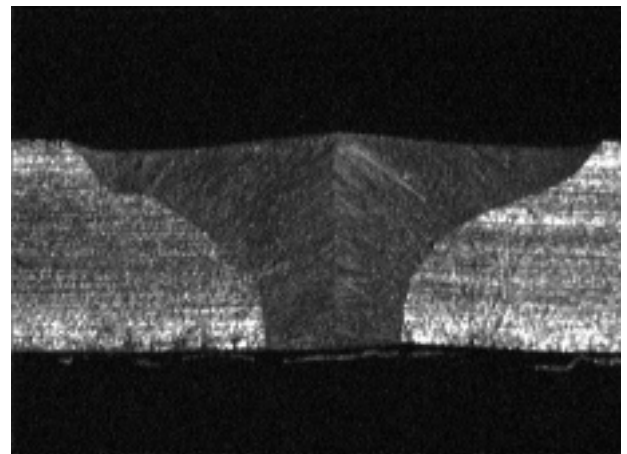


Bild 13

Nahtausbildung beim WIG- Impulslichtbogenschweißen einer I- Naht [5], Grundwerkstoff: 1.4301, t = 2 mm, f = 6 kHz, I_P = 375 A, I_m = 292 A, v_S = 2,4 m/min, Schutzgas: 95% Ar + 5% H₂, kein Zusatzwerkstoff

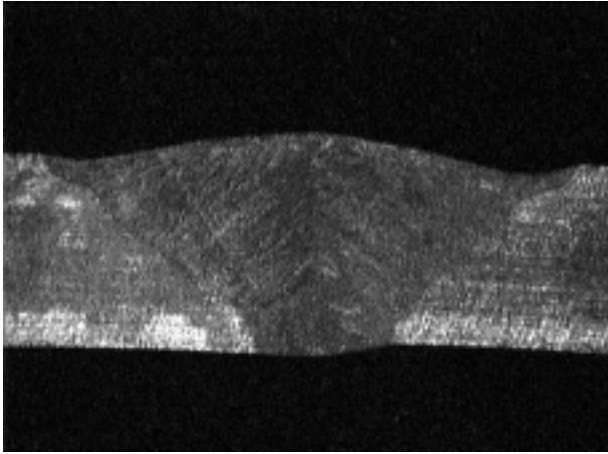


Bild 14

Nahtausbildung beim ungepulsten WIG-Schweißen einer I-Naht [5], Grundwerkstoff: 1.4301, $t = 2 \text{ mm}$, $I_S = 292 \text{ A}$, $v_S = 1,6 \text{ m/min}$, Schutzgas: 95% Ar + 5% H₂, kein Zusatzwerkstoff

Man erkennt im **Bild 14** das typische Einbrandprofil der konventionellen WIG-Schweißung. Die im kHz-Bereich gepulste Naht (**Bild 13**) zeigt dagegen im unteren Teil ein Einbrandprofil, daß eher an eine Plasmaschweißung erinnert.

Der Hauptvorteil der mit Impulsen geschweißten Naht liegt aber in der Schweißgeschwindigkeit von $2,4 \text{ m/min}$ gegenüber $1,6 \text{ m/min}$ ohne Pulsen.

6. Anwendung des Verfahrens

Das WIG-Schweißen mit Impulsen im kHz-Bereich kann für eine große Palette von Werkstoffen angewendet werden, vom unlegierten Stahl über hochlegierte Stähle, Nickel, Aluminium, Titan und Kupfer bis zu deren Legierungen.

Neben Argon kommen dabei zur Leistungssteigerung auch, wenn der Werkstoff dies zuläßt, Argon-Wasserstoff- und Argon-Helium-Gemische zur Anwendung.

Anwendungsgebiete liegen nicht nur bei der Verarbeitung von Blechen, Profilen, Rohren, Folien und Bändern bei der Herstellung von Abgasrohren, Faltenbälgen, Pedalhebeln und Hüllen für Koaxialkabel, sondern auch bei der Herstellung längsnahtgeschweißter Rohre. **Bild 15** zeigt eine Längsnaht an einem geschweißten Rohr aus Chrom-Nickel-Stahl.

Die erreichte Schweißgeschwindigkeit betrug in diesem Falle $2,7 \text{ m/min}$.

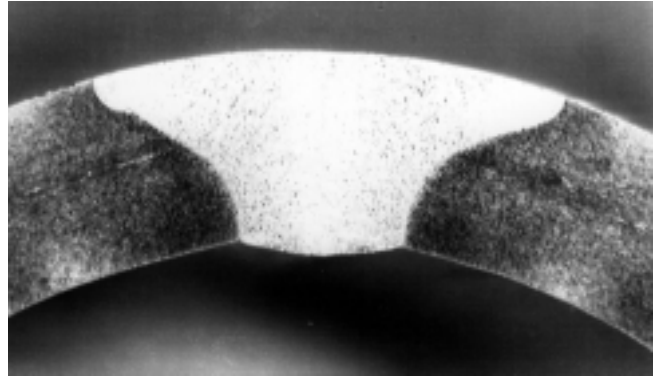


Bild 15 Nahtausbildung beim WIG-Impulslichtbogenschweißen mit höherer Frequenz am Rohr Grundwerkstoff: 1.4301, $t = 2 \text{ mm}$, $v_S = 2,7 \text{ m/min}$, Schutzgas: 95% Ar + 5% H₂, kein Zusatzwerkstoff

7. Zusammenfassung

Das Pulsen im höheren Frequenzbereich führt zu einer Einschnürung des Lichtbogens, was eine Verbesserung des Einbrandverhaltens zur Folge hat. Der tiefere Einbrand kann auch genutzt werden zur Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt im Frequenzbereich zwischen 2 und 6 kHz und läßt sich besonders vorteilhaft beim Schweißen im Dünnschichtbereich nutzen.

Die Anwendung des Verfahrens steigert deshalb die Produktivität und kann zur Senkung der Schweißkosten beitragen.

Schrifttum:

- [1] U. Killing: Geeignete Parameter für das WIG-Impulsschweißen, DVS-Jahrbuch Schweißtechnik '94, S. 108-114, DVS-Verlag Düsseldorf 1993
- [2] R. Killing: Angewandte Schweißmetallurgie – Anleitung für die Praxis, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 113, S. 101, DVS-Verlag Düsseldorf 1996
- [3] D. Dzelnitzki und R. Killing: WIG-Impulsschweißen in verschiedenen Frequenzbereichen, Praktiker H. 3/1999, S. 90-94, DVS-Verlag Düsseldorf
- [4] Patentschrift DE 195 17 875.0-34
- [5] Müller, S.: Untersuchungen zum Hochfrequenz-WIG-Impulsschweißen. Untersuchungsbericht der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Fellbach (1997)