

Zusammenhänge bei der Messung, Steuerung und Regelung moderner MSG-Lichtbogenschweißprozesse und deren Verständnis

Dr.-Ing. Birger Jaeschke, Lorch Schweißtechnik GmbH, Auenwald, Deutschland, 22.01.2014

Gegenüber den klassischen MSG-Lichtbogenschweißprozessen weisen deren Weiterentwicklungen und Modifikationen einige Besonderheiten auf, deren Verständnis für die richtige Bewertung der vorteilhaften Eigenschaften dieser neuen Prozessregelvarianten für den Anwender wichtig ist. Die richtige Bewertung von verfahrensrelevanten Größen bei energiedynamischen Lichtbögen beginnt bei der korrekten elektrischen Lichtbogenleistungsmessung und ist nicht nur die einfache Messung von Schweißstrom und Schweißspannung. Die Prozessregelungen der Stromquellen bewirken spezifische Verbesserungen am Lichtbogen, führen jedoch auch zur Neuordnung von Grundzusammenhängen im Schweißprozess, die dem Anwender bekannt sein sollten. An Beispielen des Impulsschweißens, der Intervall-Schweißtechnik, sowie einer geregelten sektorgesteuerten Kurzlichtbogen-Schweißprozessvariante werden ausgewählte Zusammenhänge erläutert, deren Verständnis dem wirtschaftlichen Einsatz moderner MSG-Lichtbogenschweißprozesse dient.

1 Herausforderung der elektrischen Leistungsmessung

Motivation:

- Anzeige und „Prozesswerte“ U, I
- Warum ist Leistungsmessung wichtig?
- Impulsschweißen ist verdächtig!
- Warum Anstrengungen zum genauen Prozesswirkungsgrad, wenn energetische Leistungsermittlung ungenau ist?
- Hochfeste Feinkornbaustähle zunehmend, Leistungsgenauigkeit!
- Neue Prozessregelvarianten, neue Zusammenhänge...

DIN/EN1011-1 berechnet sich die eingebrachte Wärme als Produkt von Schweißstromstärke, Schweißspannung, Zeit und einem spezifischen Prozesswirkungsgrad η_s .

Es wird davon ausgegangen, dass Schweißstrom und Schweißspannung sich sehr genau ermitteln lassen, um die elektrische Lichtbogenleistung zu erhalten. Eine hohe Genauigkeit ist erforderlich z.B. für die Verifikation der $t_{8/5}$ -Zeiten bei hochfesten Stählen in der Schweißfertigung, wo das Verarbeitungsfenster klein ist, siehe auch [7]. Was heißt "sehr genau"?

Die elektrische Lichtbogenleistung ist im zeitlichen Verlauf $p(t)$ (siehe **Bild 1**) und als Mittelwert P für den Zeitbereich von t_1 bis t_2 allgemein bestimmt durch:

$$p(t) = u(t) \times i(t) , P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (\text{Gl.1}).$$

Bei der praktischen Messung von P kommen Näherungsverfahren zum Einsatz, im einfachsten Fall werden nur die geglätteten Spannungs- und Stromwerte (arithmetische Mittelwerte) miteinander multipliziert.

Beim Schweißen im stabilen Sprühlichtbogen weisen diese eine geringe Dynamik auf und der so ermittelte Leistungswert entspricht in guter Näherung der wirklichen elektrischen Lichtbogenleistung. Ganz anders sieht das jedoch bei dynamischen Lichtbogentypen aus.

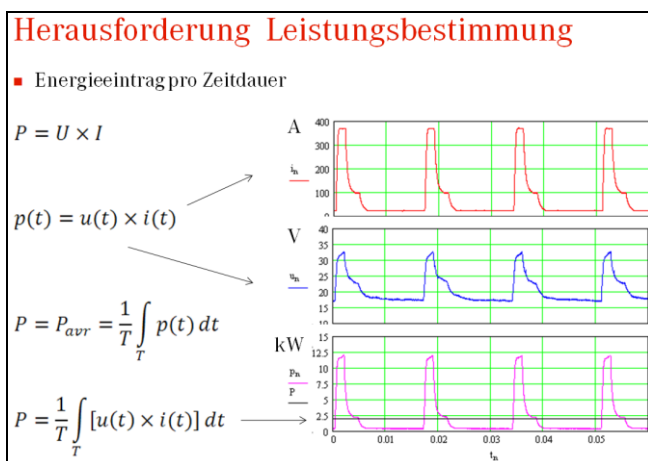


Bild 1: Darstellung der richtigen Wirkleistungsbestimmung

In [1] werden neue Forschungsergebnisse zur indirekten Abschätzung der in das Werkstück eingebrachten Wärmeleistung bzw. der eingebrachten Wärmemenge Q dargelegt. Nach

Der kurzschlussfreie Impulslichtbogen weist im Wesentlichen zwei Zeitbereiche auf, Impulsphase und Grundstromphase, in denen unterschiedliche Werte von Strom und Spannung zu deutlich unterschiedlichen partiellen Leistungseinträgen in den Lichtbogen führen.

Werden Schweißstrom und Lichtbogenspannung durch einzeln geglättete (gefilterte) Kenngrößen erfasst, als arithmetischer Mittelwert oder als Effektivwert mit entsprechenden Strom- oder Spannungs-Messgeräten, geht die Zeitinformation über differenzierte kurze Prozessphasen unwiederbringlich verloren. Dieser Informationsverlust ist aus den Kenngrößen nicht mehr rekonstruierbar und kann zur energetischen Fehlinterpretation des Schweißprozesses und der geschweißten Naht führen, **Bild 2**.

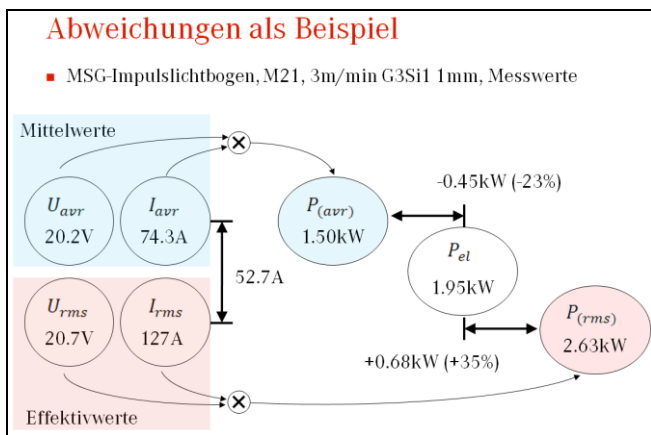


Bild 2: Praktisches Beispiel für die Unsicherheiten bei der Leistungsbestimmung mit Kennwerten

Wie ist diese Fehlinterpretation zu erklären? Mittelwerte oder Effektivwerte, mögen sie auch noch so genau gemessen sein, repräsentieren eine bestimmte Bewertung der gemessenen physikalischen Größe. Sie drücken eine bestimmte Kenngröße aus, die für eine bestimmte mittlere Wirkung der physikalischen Größe innerhalb eines bestimmten betrachteten Zeitbereiches gilt.

Der arithmetische Mittelwert (Average, avr) des Stromes I_{avr} kann z.B. verwendet werden, um die mittlere Leistung $P_{(avr)}$ zu bestimmen, die einer Quelle mit konstanter Spannung U_{avr} entnommen wird, siehe auch **Bild 3**:


$$I_{avr} = \frac{1}{T} \int i(t) dt, \quad P_{(avr)} = U_{avr} \times I_{avr} \quad (\text{Gl.2}).$$

Kenngröße Mittelwert

- Arithmetisches Mittel, „Durchschnittswert“

$$U_{avr} = \frac{1}{T} \int u(t) dt$$

$$I_{avr} = \frac{1}{T} \int i(t) dt$$



$$P = P_{avr} = \frac{1}{T} \int p(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int [u(t) \times i(t)] dt$$

Nur wenn $u(t) = const. = U = U_{avr}$
 oder $i(t) = const. = I = I_{avr}$
 dann: $P_{(avr)} = U_{avr} \times I_{avr}$

Galvanischer, elektrolytischer Mittelwert
 Kenngröße/ Äquivalent für elektrochemische Prozesse
 (Elektrochemische Spannungsreihe)


Bild 3: Definition der Kenngröße Mittelwert

Kenngröße Effektivwert

- Quadratisches Mittel, „Root Mean Square“ (rms)“

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u(t)^2 dt}$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i(t)^2 dt}$$



$$P = P_{avr} = \frac{1}{T} \int p(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int [u(t) \times i(t)] dt$$

Nur wenn $u(t) = R \times i(t)$
 dann: $P_{(rms)} = U_{rms} \times I_{rms}$

Wärmeeffekt
 Kenngröße/ Äquivalent für elektrische Widerstandserwärmung
 (Ohmsches Gesetz $R = U / I$)

Bild 4: Definition der Kenngröße Effektivwert.

Der Effektivwert des Stromes I_{rms} kann verwendet werden, um die mittlere effektive Leistung $P_{(rms)}$ zu bestimmen, die an einer Last mit konstantem elektrischem Widerstand R_{el} umgewandelt wird in Wärme. Dabei fällt über dem Widerstand R_{el} eine elektrische Spannung ab. Der Effektivwert (Root Mean Square, rms) dieser Spannung U_{rms} multipliziert mit dem Effektivwert des Stromes I_{rms} ergibt für den betrachteten Zeitraum die mittlere umgesetzte Leistung $P_{(rms)}$. Der Effektivwert wird (nicht nur im Englischen) auch als quadratischer Mittelwert bezeichnet, **Bild 4**.

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u(t)^2 dt} , I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i(t)^2 dt} ,$$

$$P_{(rms)} = U_{rms} \times I_{rms} = I_{rms}^2 \times R_{el} \quad (Gl.3).$$

Die Leistung $P_{(avr)}$, als auch die Leistung $P_{(rms)}$, ergibt jeweils multipliziert mit der Zeitdauer die wirklich umgesetzte Energie innerhalb des betrachteten Zeitraumes für die beiden unterschiedlichen physikalischen Vorgänge. D.h. die der Batterie nach Bild 3 entnommene Leistung wurde richtig unter Nutzung der Mittelwerte U_{avr} und I_{avr} bestimmt, wogegen die Nutzung der Effektivwerte U_{rms} und I_{rms} hierfür falsch wäre. Hingegen wurde die der Glühbirne zugeführte Leistung nach Bild 4 richtig unter Nutzung der Effektivwerte U_{rms} und I_{rms} bestimmt, wogegen hier die Nutzung der Mittelwerte U_{avr} und I_{avr} falsch wäre.

Zu welchem Typ gehört jetzt der Lichtbogen? Historisch gesehen wird gerne Gl.2 mit den Mittelwerten von Spannung und Strom verwendet, weil diese sich relativ einfach messen lassen. Aber ist das richtig?

Von außen gemessen weist aber der Lichtbogen weder einen einzigen rein konstanten Spannungswert U_{avr} , noch einen einzigen rein konstanten Widerstandswert R_{el} auf, vergl.

Bild 5. Damit sind Berechnungen der Leistung und der Energie auf Basis von arithmetischen Mittelwerten oder Effektivwerten nach Gl.2/3 am Lichtbogen prinzipiell fehlerbehaftet - außer wenn Strom und Spannung in beliebiger zeitlicher Auflösung konstant sind. Nur in diesem besonderen Fall sind Mittelwerte und Effektivwerte numerisch gleich, es ist dann egal, ob Gl.2 oder Gl.3 angewandt wird.

Doch beim realen Schweißen existiert eine Dynamik von Strom und Spannung; immerhin kann der kurzschlussfreie Lichtbogen sehr vereinfacht als Reihenschaltung eines "Konstant"-Spannungs-Verbrauchers und eines elektrischen Widerstandes angesehen werden. Die plasmaphysikalischen Zusammenhänge sind komplex und deren wissenschaftliche Durchdringung ist Gegenstand ständiger Forschung und Diskussion. Zudem sind die vereinfachten

Modellwerte für Feldspannung U_F und elektrischer Widerstand R_{el} des Lichtbogens nicht konstant, sondern hängen von sehr vielen Randbedingungen ab, u.a. auch von der Lichtbogenlänge.

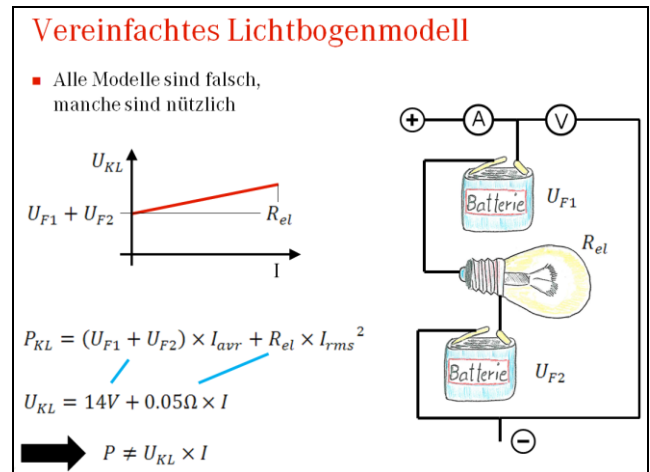


Bild 5: Vereinfachtes lineares Lichtbogenmodell

Werden vereinfachend konstante Werte für Feldspannung und Widerstand angenommen, z.B. die nach EN60974-1 genormten Typrüfungswerte von 14V und 0.05 Ohm für den MSG-Prozess, kann die elektrische Lichtbogenleistung als Summe zweier gedanklich getrennter physikalischer Vorgänge nach Gl.2/3 bestimmt werden:

$$P_{(KL)} = U_F \times I_{avr} + I_{rms}^2 \times R_{el} \quad (Gl.4).$$

Der erste Term entspräche der in die Feldspannungen eingetragenen Leistung, der zweite Term der im Lichtbogen- und Elektrodenwiderstand umgesetzten Leistung.

Dieses Vorgehen sollte auch bei dynamischen, aber kurzschlussfreien, Prozessen ein hinreichend genaues Ergebnis für die elektrische Lichtbogenleistung liefern, vorausgesetzt, die Werte von U_F und R_{el} würden den realen Verhältnissen nahekommen. Das große Problem ist in der Tat die richtige Abschätzung von U_F und R_{el} , denn auch wenn es in der Norm so steht, der Lichtbogen hat seine eigene Realität.

Wie hoch können allgemein die Abweichungen sein? **Bild 6** zeigt im Vergleich die Ergebnisfehler für einen simulierten Impulsprozess. Es wird deutlich, dass die Abweichung zusätzlich auch noch stark von der Impulsfrequenz abhängig ist. Diese wird von vielen Impulsstromquellen

zur Lichtbogenlängenregelung verändert (II-Modulation [2]), damit verändert sich auch der Ergebnisfehler. Dieser ist außer bei sehr kleinen Impulsfrequenzen bei Verwendung der Effektivwerte nach Gl.3 (Kurve B) geringer, als bei Verwendung der Mittelwerte nach Gl.2 (Kurve A), weshalb bei der Leistungsbestimmung von Impulsprozessen häufig auch die Verwendung von Effektivwerten nach Gl.3 empfohlen wird. Der Fehler nach Gl.3 gaukelt dann jedoch einen erheblich höheren Leistungsumsatz vor, als real vorliegend. Die Mittelwerte nach Gl.2 (Kurve A) liefern eine viel zu geringe Leistung. Die Bewertung nach Gl.4 (Kurven C, D) ist genauer, doch der hier nur simulierte, in der Praxis aber vorhandene Varianzbereich von U_F und R_{el} ist ungewiss.

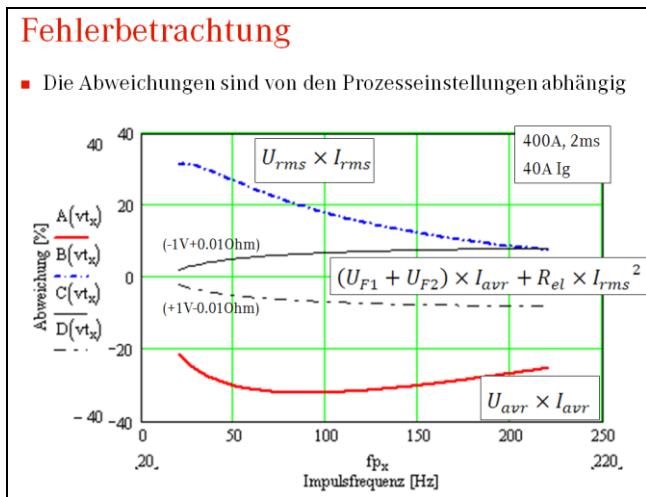


Bild 6: Darstellung von simulierten Abweichungen der ermittelten Lichtbogenleistung zur wirklichen Leistung als Funktion der Frequenz beim Impulslichtbogen

A: $P_{(avr)} = U_{avr} \times I_{avr}$ B: $P_{(rms)} = U_{rms} \times I_{rms}$

C, D: $P_{(KL)} = U_F \times I_{avr} + I_{rms}^2 \times R_{el}$

Simulationsparameter:

C: $U_F = 13V$, $R_{el} = 0.06\Omega$; D: $U_F = 15V$, $R_{el} = 0.04\Omega$; Pulsstrom Rechteck 400A, 2ms, Grundstrom 40A, Lichtbogenmodell $U_F = 14V$, $R_{el} = 0.05 \Omega$

In [6] wurde mathematisch hergeleitet, dass mit guter Genauigkeit für überwiegend kurzschlussfreie Prozesse, wie z.B. dem Impulslichtbogen, wurde folgende Formel für die umgesetzte Leistung P_{mod} am linearen Lichtbogenmodell (vergl. Bild 5) verwendet werden können:

$$\overline{P_{mod}} = U_{avr} \times I_{avr} + \sqrt{(U_{rms}^2 - U_{avr}^2)(I_{rms}^2 - I_{avr}^2)} \quad (Gl.5).$$

Für Prozesse mit signifikantem Kurzschlussanteil sind hingegen die Verhältnisse komplizierter, und Gl.5 nicht anwendbar, weil unterschiedlich differenzierte Prozessphasen sich energetisch abwechseln.

Einfachstes Beispiel hierfür ist das klassische Kurzlichtbogenschweißen, bei welchem das Material während der Kurzschluss- und Werkstoffübergangsphase einen deutlich geringeren elektrischen Energieeintrag erfährt, als über den Lichtbogen während der Lichtbogenphase. Dies ist mit Gl.4 prinzipiell damit erklärbar, dass für die Kurzschlussdauer der erste Term mit der Feldspannung in der Leistungsbilanz fehlt. Es wäre messtechnisch sehr aufwendig, die Mittelwerte und Effektivwerte für Kurzschluss- und Lichtbogenphase und deren Zeitverhältnisse einzeln zu erfassen, um dies zu berücksichtigen.

Typischerweise sind beim Kurzlichtbogen die kurzzeitigen hochenergetischen Zeitbereiche nicht so ausgeprägt, wie beim Impulsschweißen, so dass die Abweichung der Mittelwertrechnung nach Gl.2 beim weit verbreiteten Kurzlichtbogenschweißen (zum Glück) deutlich geringer ausfällt. Dennoch sollte im Bewusstsein bleiben, dass systematische Fehler bei der Ermittlung der elektrischen Lichtbogenleistung gemacht werden.

2 Richtige Wirkleistungsmessung

Wie kann nun bei all diesen Problemen korrekt gemessen werden? Für die Stromquelle ist die Forderung richtig: "das sollen die Stromquellenhersteller machen". Es wird Elektronik und Rechentechnik benötigt, aber die haben digital gesteuerte Stromquellen ohnehin schon drin. Wird unabhängig von der Stromquelle gemessen, gilt auch: "geeignete Mess-Systeme haben ihren Preis".

Zweite Frage: was soll gemessen und ausgegeben werden? Offensichtlich sind weder die Mittelwerte, noch die Effektivwerte von Strom und Spannung geeignet, um nach Gl.2/3/4 für jeden Schweißprozess die richtige Lichtbogenleistung zu bestimmen. Ein weiterer Korrekturwert? Eine "Modifikation" des Mittel- oder Effektivwertes, damit Gl.2/3 funktionieren? Das würde jeden Physiker entsetzen!

Kann man nicht den echten Mittelwert der Leistung einfach numerisch bestimmen?

„Richtige“ Leistungsermittlung

- Gleichartige Vorfilterung der Mess-Signale von Strom und Spannung (ca. 100µs TP1)
- Signalabtastung $u(n)$, $i(n)$ und Produktbildung $p(n)$ (ca. 500kS/s)
- Mittelwert der Leistung berechnen

$$P = \frac{1}{T} \int [u(t) \times i(t)] dt \approx \frac{1}{n2 - n1} \sum_{n = n1}^{n2} [u(n) \times i(n)] = P_{el}$$

Bild 7: Numerische Wirkleistungsbestimmung

Eine praktikable Näherung der Definition Gl.1 ist:

$$P_{el} = \frac{1}{n2 - n1} \sum_{n=1}^{n2} [u_n \times i_n] \quad (Gl.6).$$

Der Index n (vergl. **Bild 7**) adressiert diskrete äquidistante Abtastzeitpunkte der gemessenen Werte über den Zeitraum $t1$ bis $t2$, das Ergebnis ist die echte elektrische Leistung gemittelt über diesen Zeitraum. Die Messwerte dürfen sich von einer Abtastung zur folgenden nicht stark ändern, so dass eine deutlich höhere Abtastfrequenz verwendet werden muss, als die spektral höchste signifikante Signalfrequenz. Eine vorherige Filterung (Glättung) der Messwerte erlaubt eine tiefere Abtastfrequenz, verzerrt aber die Messwerte und bewirkt auch einen Ergebnisfehler von Gl.6 zu Gl.1.

Getaktete Stromquellen (z.B. Inverter) liefern keinen glatten Ausgangsstrom, sondern als Ergebnis der Taktung sind Ausgangsstrom und Ausgangsspannung regelmäßig höher und tiefer als der mittlere Wert. Dies spielt für das Schweißergebnis kaum eine Rolle, ist jedoch nun für die Feststellung der spektral höchsten signifikanten Signalfrequenz zu berücksichtigen. Als Ergebnis entstehen sonst sogenannte "Aliasing"-Effekte, welche die Messergebnisse stark verfälschen können.

Der Zeitraum, für welchen der mittlere Leistungswert berechnet wird, sollte ebenfalls mit Bedacht gewählt werden. Es ist aus mehreren Gründen vorteilhaft, wenn dieser Zeitraum möglichst groß ist. Kurzzeitige Lichtbogen-schwankungen, die sich energetisch ausgleichen und deren Einzeleinfluss auf das Schweißergebnis gering ist, interessieren bei der Wärmebilanz der Schweißung wenig. Es entsteht


auch eine geringere Datenmenge, die übertragen und ausgewertet werden muss. Auf der anderen Seite darf der Zeitraum nicht zu groß sein, denn eine Änderung der Leistung ist schweißtechnisch relevant.

Eine Besonderheit stellen zyklisch kombinierte Prozessregelvarianten dar [2], z.B. von Lorch "SpeedUp" [3],[4] (**Bild 8**) oder "SpeedTwinPulse".

Achtung bei zyklischen Verfahren

- „Ich sehe was, was Du nicht siehst“ → Aliasing
- Synchronisierte Betrachtung erforderlich
- „richtige“ Leistung über eine Zykluszeit gemittelt
- Oder:

$$P_{el,z} = \frac{1}{\sum_i t_{si}} \sum_i (P_{eli} \times t_{si})$$

- 

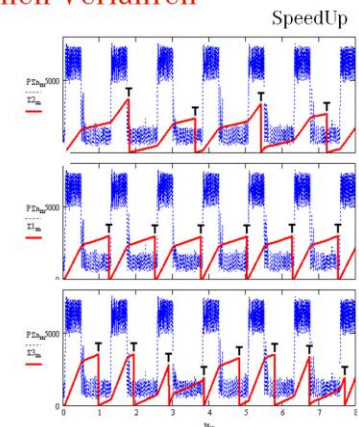


Bild 8: Zyklische Prozesse sollten synchronisiert betrachtet werden

Bei dem für Zwangspositionen PF und PE prädestinierten "SpeedUp" wechseln sich hoch- und niedrigerenergetische Intervalle ca. im Sekundentakt ab, um das notwendige Gleichgewicht zwischen Auf-/Abschmelzung und Erstarrung zu erreichen. "SpeedTwinPulse" kombiniert zyklisch Intervalle unterschiedlicher Impulslichtbögen um weitergehenden Einfluss auf Einbrandprofil und Nahtschuppung zu erlangen. Die möglichen Interpretationen der Kennwerte I_{avr} , I_{rms} , U_{avr} , U_{rms} sind hier noch vielfältiger, die Anwendungen von Gl.2/3/4 noch fragwürdiger. Die Wechselfrequenz zwischen den energetisch unterschiedlichen Lichtbögen liegt hier durchaus bereits im auch für die Leistungserfassung erforderlichen Bereich.

Zwei Aspekte der Messgrößenerfassung sind hier von besonderem Interesse:

Die zyklischen energetischen Intervalle werden einzeln erfasst, z.B. zur nachfolgenden Datenauswertung;

Es werden ablesbare Anzeigewerte erzeugt, z.B. für ein Display.

Um dem ersten Aspekt zu genügen, ist eine leistungsfähige Signalverarbeitungseinheit er-

forderlich, welche Gl.6 in einem hinreichend kurzen Beobachtungszeitraum verarbeitet, damit die unterschiedlichen energetischen Intervalle im übermittelten Signalverlauf erfasst werden.

Bei Darstellung in einer ablesbaren Anzeige wäre der schnell wechselnde Zahlenwert verwirrend. Der Zeitraum zur Summenbildung nach Gl.6 muss hier deutlich größer sein und erreicht die Zykluszeit der energetischen Intervallwechsel. Bild 8 zeigt das Ergebnis der Summenbildung (Σ) in Abhängigkeit von der relativen Lage des Beobachtungszeitraums (T) zum Signalverlauf (P).

Da die von der Schweißstromquelle gesteuerten Zykluszeiten vom Anwender an die Schweißaufgabe anpassbar sind, haben von der Stromquelle unabhängig messende Systeme es schwer, sich auf die Zykluszeiten zu synchronisieren. Für die Stromquellensteuerung ist es hingegen kein Problem, die prozesstechnisch wirkenden Zykluszeiten ts_i mit dem Beobachtungszeitraum zu verbinden, die Rechnung nach Gl.6 durchzuführen und den Mittelwert zu bilden:

$$P_{el-z} = \frac{1}{\sum_i ts_i} \sum_i (Pel_i \times ts_i) \quad (Gl.7).$$

Äquivalent wird Gl.7 z.B. auf die Anzeigewerte von Spannung und Strom für die zyklisch kombinierten Prozesse bei Lorch angewendet.

3 Einfluss der Schweißstromleitungen

Die Messung der Spannung möglichst nahe am Lichtbogen zwischen abschmelzender Drahtelektrode und dem Werkstück erfordert einen erhöhten Aufwand. In der Praxis wird daher häufig entfernt vom Lichtbogen gemessen, im einfachsten Fall direkt an den Ausgangsklemmen der Stromquelle. Dabei erfolgt ein systematischer Messfehler, denn zusätzlich zur Lichtbogenspannung wird nun auch noch der Spannungsabfall über der Impedanz der Schweißstromleitungen gemessen. Während die Spannungsabfälle über dem induktiven (imaginären) Anteil der Impedanz überwiegend eine Aufgabe für die Schweißstromquelle darstellen, die Prozesszustände auch bei hohen Stromänderungsgeschwindigkeiten richtig zu erkennen, bewirkt der reale ohmsche Widerstand der Schweißstromleitungen auch einen leicht von außen messbaren Effekt: Die middle-

re gemessene Spannung, egal ob arithmetischer Mittelwert oder Effektivwert, erscheint höher, als am Lichtbogen vorliegt. Die nach Gl.2/3/6 bestimmte Leistung ist in Folge dessen auch höher, denn zusätzlich zur elektrischen Lichtbogenleistung wird auch noch die Verlustleistung der Schweißstromkabel gemessen, die sich stromabhängig erwärmen. Gleichung Gl.4 hätte hier bessere Chancen für eine davon unbeeinflusste Bestimmung der Lichtbogenleistung, wenn da nicht die Probleme mit der Parametrierung von U_F und R_{el} wären.

Für überwiegend kurzschlussfreie dynamische Prozesse liefert wiederum [6] Lösungsansätze, denn an Stelle von U_F und R_{el} können die Modellparameter U_{mp} und R_{mp} durch Testmessungen nahe am Lichtbogen bestimmt und in Gl.4 für Näherungsrechnungen eingesetzt werden.

$$R_{mp} = \sqrt{\frac{U_{rms}^2 - U_{avr}^2}{I_{rms}^2 - I_{avr}^2}} \quad (Gl.8),$$

$$U_{mp} = U_{avr} - R_{mp} \times I_{avr} \quad (Gl.9).$$

4 Einfluss des Prozesswirkungsgrades

Die Untersuchungen in [1] zeigen unterschiedliche Prozesswirkungsgrade η_s für verschiedene Schutzgasschweißverfahren, mit deren Hilfe die Wärmeeinbringung während der Schweißzeit t_s in das Bauteil abgeschätzt werden kann:

$$Q = P_{el} \times t_s \times \eta_s \quad (Gl.10).$$

Der Prozesswirkungsgrad η_s ist außer vom Typ des Prozesses noch von anderen Rahmenbedingungen abhängig. Es ist deutlich zu betonen, dass mit Gl.10 die Wärmeeinbringung nicht genau berechnet, sondern nur "abgeschätzt" wird. Für die vollständige Qualifizierung von wärmeempfindlichen Schweißaufgaben sind reale Temperaturmessungen erforderlich. Gl.10 hilft aber für Vergleiche und bei der Qualitätssicherung.

Für zyklisch kombinierte Prozesse ist wiederum zu beachten, dass die energetisch unterschiedlichen Intervalle auch unterschiedliche Prozesswirkungsgrade besitzen, **Bild 9**.

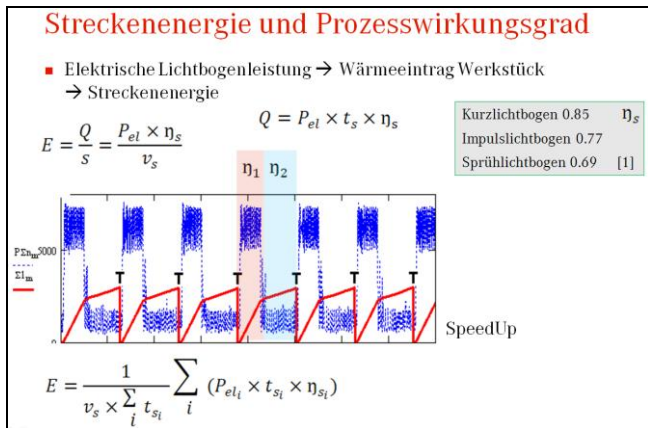


Bild 9: Streckenenergie und Prozesswirkungsgrad

Mit dem Ziel einer möglichst genauen Abschätzung der Wärmeeinbringung ist es theoretisch möglich, für die einzelnen Intervalle deren Zeiträume t_{si} und mittlere Leistungen P_{eli} mit dem jeweiligen Prozesswirkungsgrad η_{si} zu bewerten:

$$Q = \sum_i (P_{eli} \times t_{si} \times \eta_{si}) \quad (Gl.11).$$

Es bleibt derzeit aber weiterhin eine messtechnische Aufgabe, die einzelnen Prozesswirkungsgrade unterschiedlicher Lichtbogentypen, bzw. Arten des Werkstoffübergangs, zu ermitteln.

5 Geregelter sektorgesteuerter Kurzlichtbogen

Dieser moderne Lichtbogenschweißprozess erreicht seine besonderen Eigenschaften durch einen sektorgesteuerten Kurzlichtbogenablauf, wie er ursprünglich in [5] beschrieben ist und inzwischen weiter verbessert wurde, **Bild 10**.

Durch den verringerten Strom beim Aufreißen des Kurzschlusses nach dem Werkstoffübergang ergibt sich ein beruhigter gleichmäßiger Schweißprozess, der sehr gut u.a. für spaltüberbrückende Wurzelschweißungen eingesetzt werden kann.

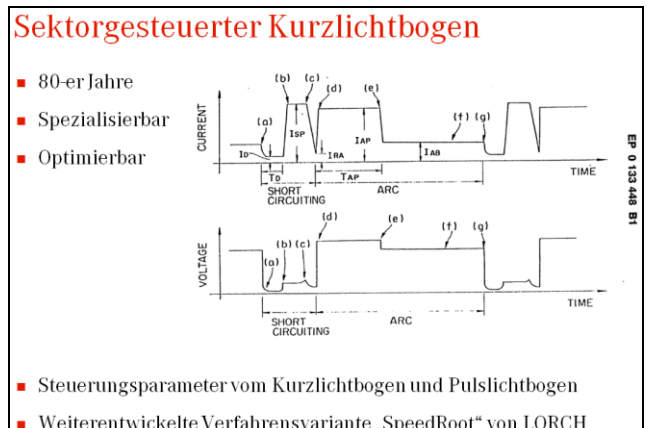


Bild 10: Geregelter sektorgesteuerter Kurzlichtbogenprozess

Die Sektorsteuerung verteilt gezielt den Energieeintrag zwischen dem freien Drahtende und dem restlichen Lichtbogen. In das freie Drahtende gelangen im wesentlichen Leistungsanteile durch Stromwärme des Widerstandswertes $I_{rms}^2 \times R_{dr}$ sowie durch die Feldspannung des Lichtbogens am Draht $U_{Fdr} \times I_{avr}$. In den restlichen Lichtbogenbereich gelangen Anteile durch die Feldspannung des Lichtbogens am Schmelzbad $U_{Fs} \times I_{avr}$ und Stromwärme im elektrischen Lichtbogeneratzwiderstand $I_{rms}^2 \times R_{lb}$. Lichtbogenbrennphasen und Kurzschlussphasen wechseln sich in ihren Zeitdauern prozessabhängig ab. Um den Energieeintrag in den prozessabhängigen Phasen gezielt zu steuern, werden diese in Sektoren mit verschiedenen Strom- und Spannungsverläufen und damit unterschiedlich steuerbaren Leistungsanteilen aufgeteilt. Der Gesamtleistungseintrag ist daher am besten nach Gl.7 bestimmbar.

Der energetische Anteil der Lichtbogenbrennphase wird durch einen Impuls im Anschluss an die sanfte Kurzschlussauflösung gesteuert. Dieser Impuls soll im Gegensatz zum Impulsschweißen jedoch keinen einen Tropfen von der Elektrode ablösen, sondern nur ein schmelzflüssiges Einzelvolumen an der Elektrode schaffen, welches beim nächsten Kurzschluss in die Schmelze übergeht.

In **Bild 11** ist modellhaft der Verlauf von Strom I , Spannung U , elektrischer Lichtbogenleistung P_{el} und der elektrisch umgesetzten kumulierten Energie Q beispielhaft dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Impuls (in der Mitte der

Zeitachse dargestellt) einen wesentlichen Anteil an der Energiebilanz hat. Somit ist eine wesentliche energetische Steuerbarkeit des Prozesses gegeben.

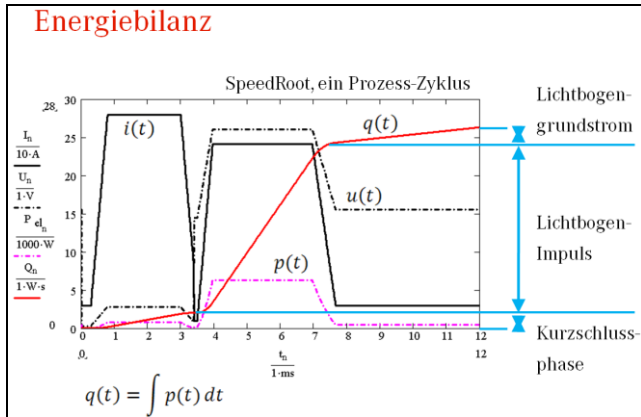


Bild 11: Phasen unterschiedlichen Energieeintrags bei SpeedRoot, periodische Modellverläufe von I , U , P_{el} und Q

Die Wirkung des Impulses beeinflusst direkt das schmelzflüssige Einzelvolumen an der Drahtelektrode, welches während des folgenden Kurzschlusses von der Drahtelektrode in die Schmelze übergeht. Weil Einzelvolumen, Häufigkeit (Frequenz) des Werkstoffübergangs und Drahtvorschubgeschwindigkeit bei einem quasistationären Schweißprozess in einer festen Beziehung stehen, beeinflusst die Ausbildung des Impulses unmittelbar die Kurzschlussfrequenz der Prozessregelvariante.

Eine besonders für das Wurzelschweißen optimierte Variante des sektorgesteuerten Kurzlichtbogenprozesses wird von Lorch als "SpeedRoot"- Prozessregelvariante angeboten und gepflegt. Obwohl der Anwender einerseits den Komfort einer einfach über Draht/Material/Gas-Parameter einstellbaren synergetischen Steuerung mit den bekannten Führungsparameter "Drahtvorschubgeschwindigkeit" oder "Spannung" genießen kann, besteht weiterhin die Möglichkeit der einfachen Anpassung des Prozesses an besondere Erfordernisse der Schweißung durch Veränderung des Lichtbogenimpulses.

Die Ausbildung dieses Impulses ist bei "SpeedRoot" durch den Anwender als dimensionsloser numerischer Korrekturwert an die spezifische Schweißaufgabe in sinnvollen Grenzen durch Bedienung an der Maschine vor und während des Schweißens anpassbar.

Der nutzbare Korrekturbereich ist naturgemäß begrenzt. Denn der genaue Zeitpunkt eines Kurzschlusses zwischen den sich aufeinander zubewegenden Oberflächen von Drahtelektrode und Schmelzbad hängt von der Relativbewegung dieser Oberflächen ab, insbesondere von wellenförmigen Schwingungen des Schmelzbades. Die Regelmäßigkeit des Gesamtprozesses wird durch adaptive Abstimmung von Impuls und Schmelzbadeseigenschaften stabilisiert.

Die praktische Wirkung der Korrektur wird in **Bild 12** dargestellt. Eine Erhöhung der Energie des Lichtbogenimpulses durch einen höheren Korrekturwert bewirkt die Ausbildung eines größeren schmelzflüssigen Werkstoff-Volumens an der Drahtelektrode. Bei gleichbleibender Drahtvorschubgeschwindigkeit stellt sich bei höherer mittlerer Lichtbogenleistung damit eine geringere Kurzschlussfrequenz des Prozesses ein. Als Folge davon sinkt der mittlere Schweißstrom etwas, die gesamte elektrische Lichtbogenleistung ist dennoch mit dieser Korrektur höher. Die Naht wird "heißer" aufgetragen und liegt flacher am Werkstück an. Eine Verringerung der Energie des Lichtbogenimpulses wirkt genau gegensinnig.

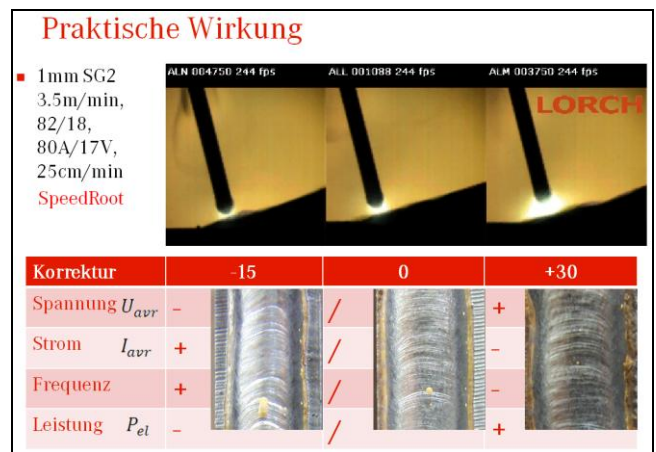


Bild 12: Praktische Wirkung des Bedienparameters „Korrektur“ auf das Schweißergebnis von SpeedRoot

Bild 13 zeigt die prinzipielle Wirkung der Korrektur des Impulses auf bestimmte Kenngrößen bei verschiedenen Drahtvorschubgeschwindigkeiten (Stahl, M21). Die steigende Drahtabschmelzgeschwindigkeit zieht zunächst, wie beim konventionellen Kurzlichtbogen-schweißen gewohnt, eine Erhöhung der Kurzschlussfrequenz für einen stabilen Prozess nach

sich. Eine Verringerung des Impulses (Kor. -15) verkleinert das an der Elektrode gebildete schmelzflüssige Volumenelement (Tropfen) und verkürzt so die sich einstellende Zeitdauer zwischen den Kurzschlüssen, erhöht also allgemein die Kurzschlussfrequenz.

Weiterhin ist zu bemerken, dass sich im mittleren und oberen Leistungsbereich die elektrische Lichtbogenleistung bei gleichbleibender Drahtvorschubgeschwindigkeit verringert.

Damit eröffnen sich Möglichkeiten, weniger Wärme in den Nahtbereich zu bringen, das Grundmaterial weniger aufzuschmelzen, dünnere Bleche zu schweißen, Spalte zu überbrücken, u.a.m.

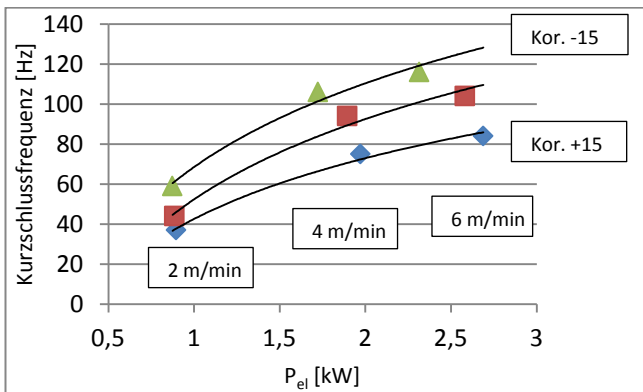


Bild 13: Wirkung der Korrektur auf Wärmeleistung und Kurzschlussfrequenz

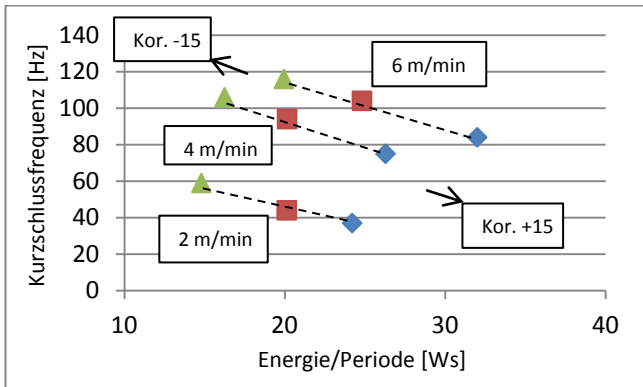


Bild 14: Wirkung der Korrektur auf pro Werkstoffübergang eingebrachte Wärmeenergie und auf die Kurzschlussfrequenz

Eine andere Darstellung gibt **Bild 14**. Gegenüber Bild 13 wurde die mittlere umgewandelte Energie (Quotient von mittlerer elektrischer Leistung und Kurzschlussfrequenz) als Abszisse ausgewählt. Es ist erkennbar, dass die mittlere umgewandelte Energie für den Bereich von 2m/min bis 4 m/min sich nur unwesentlich verändert, während die Kurzschlussfrequenz sich fast verdoppelt.

Dies ist plausibel für ein nahezu konstantes Tropfenvolumen, welches bei jedem Kurzschluss übergeht und zu seiner Bildung hauptsächlich durch den Lichtbogenimpuls eine etwa konstante Energiemenge benötigt.

Im höheren Leistungsbereich kann die Kurzschlussfrequenz nicht einfach so weiter steigen, so dass eine Vergrößerung des Tropfenvolumens erforderlich ist. Erkennbar ist dies neben einer nur noch geringen Frequenzerhöhung an einer dafür umso deutlicheren Erhöhung der Energie/Periode für die Messung bei 6m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit.

6 Praktische Vergleiche

Schweißstromquellenhersteller sind mit den in diesem Artikel beschriebenen messtechnischen Herausforderungen vertraut.

Tabelle 1 und **Bild 15** zeigen die Ergebnisse von Messungen an realen Schweißprozessen und vermittelt eine Vorstellung von den sich ergebenden Abweichungen bei unterschiedlicher Leistungsbestimmung.

Tabelle 1: Messergebnisse realer Schweißprozesse

M21, 3m/min G3Si1 1mm, 20m Schweißkabelänge 70mm², (Mess- und Rechenwerte gerundet)

- a: Kurzlichtbogenprozess am Lichtbogen gemessen
- b: Kurzlichtbogenprozess an Schweißbuchsen gemessen
- c: Impulsprozess am Lichtbogen gemessen
- d: Impulsprozess an Schweißbuchsen gemessen
- e: "SpeedRoot" am Lichtbogen gemessen
- f: "SpeedRoot" an Schweißbuchsen gemessen

| | | | Gl.2 | Gl.3 | Gl.5 | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | U _{avr} | U _{rms} | I _{avr} | I _{rms} | P _(avr) | P _(rms) | P _{el} |
| | V | | A | | kW | | |
| a | 18.7 | 19.9 | 98.0 | 103 | 1.83 | 2.05 | 1.81 |
| b | 19.2 | 20.3 | 98.0 | 103 | 1.88 | 2.10 | 1.86 |
| c | 20.2 | 20.7 | 74.3 | 127 | 1.50 | 2.63 | 1.95 |
| d | 20.6 | 21.4 | 74.3 | 127 | 1.53 | 2.72 | 2.03 |
| e | 16.9 | 17.8 | 89.6 | 104 | 1.51 | 1.86 | 1.44 |
| f | 17.3 | 18.7 | 89.6 | 104 | 1.55 | 1.96 | 1.49 |

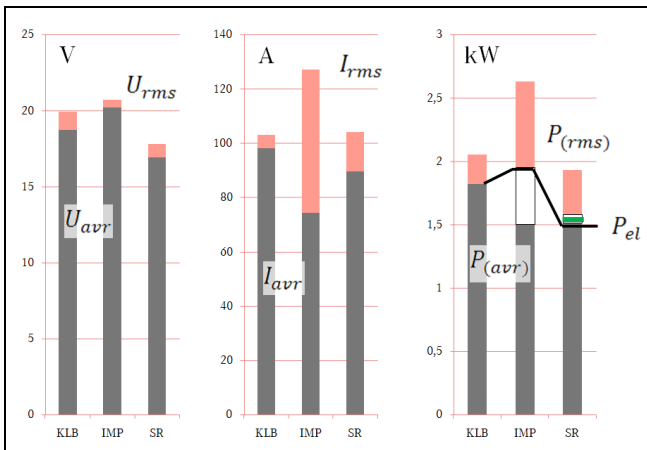


Bild 15: M21, 3m/min G3Si1 1mm, 20m Schweißkabellänge 70mm², nahe am Lichtbogen gemessen

- KLB: normaler Kurzlichtbogenprozess
- ILB: Impulsprozess
- SR: SpeedRoot

Besonders deutlich werden Abweichungen zwischen Mittelwerten und Effektivwerten und darauf beruhende unterschiedliche Leistungsbestimmungen beim Impulsschweißen. Wie bereits im Zusammenhang mit Bild 6 erklärt, bewirkt die große Amplitude des Impulsstromes gegenüber dem geringeren Grundstrom deutliche Unterschiede zwischen Mittelwert, Effektivwert und bei der Leistungsbestimmung am Lichtbogen.

Der konventionelle Kurzlichtbogen zeigte in dieser Einstellung, wie weiter vorn bereits erläutert, seine "zum Glück" erstaunliche Ausgeglichenheit bei der Leistungsbestimmung durch Mittelwerte.

Beim sektorgesteuerten Kurzlichtbogenprozess "SpeedRoot" beeinflusst der beschriebene Lichtbogenimpuls nicht so stark, wie beim Impulsschweißen, aber spürbar, die energetischen Messwerte. Zu bemerken ist auch hier, dass die echte eingetragene elektrische Leistung (P_{el}) geringer ist, als aus der Multiplikation der Mittelwerte ($P_{(avr)}$) und Effektivwerte ($P_{(rms)}$) hervorgeht. Dies ist bei der Bewertung der Prozessvariante für wärmesensible Anwendungen vorteilhaft zu berücksichtigen.

7 Zusammenfassung

Es wurde eine Übersicht über die Problematik der elektrischen Leistungsmessung an ver-

schiedenen Schutzgas-Schweißprozessregelvarianten gegeben.

Eine echte elektrische Leistungsmessung am Lichtbogen vermeidet den teils erheblichen systematischen Ergebnisfehler der bekannten Multiplikation von Mittelwerten oder Effektivwerten von Strom und Spannung. Jegliche Mittelwertbildung ist mit energetischen Zyklen zu synchronisieren, um Aliasing zu verhindern.

Die korrekte Bestimmung der im Prozess umgewandelten elektrischen Leistung erlaubt die detaillierte Bestimmung und Interpretation von Vorgängen im Lichtbogenbereich und ist insbesondere bei der Bewertung moderner Lichtbogenschweißprozessvarianten erforderlich. Dies fördert den richtigen und damit wirtschaftlichen Einsatz moderner Lichtbogenschweißverfahren.

Betrachtungen zur leistungsanteiligen Wirkung der verschiedenen Zeitphasen des sektorgesteuerten Kurzlichtbogenprozesses "SpeedRoot" von Lorch zeigen, dass mit Hilfe eines einzigen Korrekturparameters eine sehr gute energetische Abstimmung auf den konkreten Einsatzfall möglich ist. Damit ist "SpeedRoot" zum Wurzelschweißen prädestiniert, aber auch für andere spaltüberbrückenden Aufgaben und für wärmesensible Anwendungen interessant.

Die Prozessvariante „SpeedCold“ von Lorch, welche nach den guten Erfahrungen bei der Einführung von „SpeedRoot“ entwickelt wurde, ist ebenfalls ein geregelter sektorgesteuerter Kurzlichtbogenprozess, der insbesondere für eine minimale Energieeinbringung optimiert ist. „SpeedCold“ schweißt daher allgemein kälter, als „SpeedRoot“. Die in dieser Dokumentation dargelegten Zusammenhänge lassen sich auch auf „SpeedCold“ äquivalent übertragen.

Die Stromquellen der S-Serie nutzen die korrekten Beziehungen nach Gl. 6 und Gl. 17 zu Bestimmung der abgegebenen Wirkleistung. Damit sind die Grundlagen zur richtigen Einschätzung von energetischen Wirkungen der vorteilhaften „Speed“-Prozesse von Lorch gegeben.



8 Literatur

Teile dieser hier aktualisierten Dokumentation wurden erstmals veröffentlicht in den DVS-Berichten 275 zum DVS-Congress auf der Großen Schweißtechnischen Tagung 2011 in Hamburg in Themenkomplex "Moderne Lichtbogenfügeverfahren 1" auf S. 250 ff., und auf dem hierzu gehaltenem Vortrag.

Zur Vertiefung der Information wird folgende Lorch Fachdokumentation empfohlen:

- B. Jaeschke, J. Kruscha: Nutzung von Mittelwerten und Effektivwerten zur elektrischen Modellparameter- und Leistungsbestimmung von überwiegend kurzschlussfreien dynamischen Lichtbogenschweißprozessen, Y00.0060.0-00.PDF
- B. Jaeschke, W. Ernst, M. Luritzhofer: Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse, Y00.0050.0-00.PDF

Weitere Literaturstellen:

[1] Kusch, M.; Hälsing, A.; Thurner, S.: Bestimmung von Wirkungsgraden an Schutzgas-schweißverfahren, Schweißen und Schneiden 63 (2011) Heft 1-2; Abschlussbericht IGF-Forschungsvorhaben 15.562 BR.

[2]: Merkblatt Impulsschweißen, 0926-3, DVS-Verlag.

[3]: Jaeschke, B.: Der wirtschaftliche MSG-Lichtbogenschweißprozess durch moderne Schweißgerätetechnologien. DVS-Berichte Band 267, DVS Congress 2010, S. 328 ff. DVS Media, Düsseldorf 2010.

[4]: Jaeschke, B.; Rimböck, A.; Vollrath, K.: Steignähte leicht und sicher Schweißen. Der Praktiker 5/2011, S. 190 ff. DVS Media, Düsseldorf 2011.

[5]: Ogasawara, T. et al: Erfinder. Kobe Steel Ltd.: Anmelder; Output control of short circuit welding power source, EP0133448B1, 24.04.1984

[6]: B. Jaeschke, J. Kruscha: Leistungs- und Modellparameter kurzschlussfreier Lichtbogenprozesse. Fachzeitschrift „Schweißen und Schneiden“ 65 (2013), Heft 9, S. 616ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 2013.

[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.