

Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse

B. Jaeschke, Auenwald, Deutschland, 23.01.2014
 W. Ernst, M. Luritzhofer, voestAlpine, Linz, Österreich

Viele moderne Lichtbogenschweißprozesse sind gekennzeichnet durch eine starke dynamische Steuerung und Regelung von Schweißstrom und Schweißspannung. Dadurch entstehen bei der Bewertung der Wärmeeinbringung und Streckenenergie beachtliche Differenzen, je nachdem welche Mess- und Bewertungsmethodik angewandt wird. Dies kann zu einer falschen $t_{8/5}$ -Abkühlzeit-Berechnung, zu fehlerhaften vergleichenden Bewertungen unterschiedlicher Lichtbogenprozesse, bis hin zur fehlerhaften Einstellung des Schweißprozesses außerhalb des zulässigen Parameterfensters des Grundwerkstoffs führen. Der Artikel geht bezüglich mehrerer Lichtbogenschweißprozesse auf die Ursachen und auf die typische Größe dieser Fehler ein und gibt praxisnahe Hinweise zur Fehlervermeidung.

1 Einführung und Problemstellung

Moderne hochfeste Werkstoffe erfordern beim Fügen mittels Lichtbogenschweißen eine definierte Wärmeführung zur Sicherstellung der mechanisch-technologischen Eigenschaften im Bereich der stoffschlüssigen Verbindung und der Wärmeeinflusszone. Eine Abweichung von den Angaben des Stahlherstellers zur empfohlenen Wärmeführung hat zur Folge, dass die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindung (z.B. Zugfestigkeit, Kerbschlagarbeit, ...) nicht mehr den Anforderungen entsprechen.

Daher ist die Verringerung von Fehlern bei der Bestimmung der Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse eine wichtige technologische Aufgabe, um das Parameterfenster des Grundwerkstoffs zu treffen. Die Kontrolle der Wärmeführung durch Messung von Temperaturverläufen ist bei der Qualifizierung des Fügeprozesses die direkteste Methode. Sehr häufig muss jedoch auf indirekte Methoden zurückgegriffen werden, da das Einbringen von Sensoren seinerseits ein technologisches Problem darstellt. Eine verbreitete indirekte Methode ist die Rechnung mittels Streckenenergie und Wärmeeinbringung.

Die Streckenenergie ist definiert durch:

$$E = \frac{P}{v} \quad (\text{Gl.1}),$$

mit der elektrisch in den Lichtbogen eingebrachten Leistung P und der Schweißgeschwindigkeit v.

Die in der Praxis verwendeten Größen führen zur zugeschnittenen Größengleichung:

$$E / \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right] = \frac{P / [\text{W}] \times 60}{v / \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \times 1000} \quad (\text{Gl.2}).$$

Die Wärmeeinbringung Q ergibt sich mit:

$$Q = E \times \eta \quad (\text{Gl.3}).$$

Der thermische Wirkungsgrad η (griechisch: Eta) berücksichtigt die nicht in das Werkstück gelangende Energie (Abstrahlung, Konvektion, ...) und ist (bei Ausschluss exothermer chemischer Reaktionen) kleiner 1.

Für niedrig legierte Stähle wird nach EN 1011-2 [2] zur Abschätzung der $t_{8/5}$ -Zeit bei zweidimensionaler Wärmeableitung nun die zugeschnittene Größengleichung empfohlen:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \times T_0) \times 10^5 \times \frac{Q^2}{d^2} \times \dots \\ \dots \left[(500 - T_0)^{-2} - (800 - T_0)^{-2} \right] \times F_2 \quad (\text{Gl.4}),$$

bzw. bei dreidimensionaler Wärmeableitung:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \times T_0) \times Q \times \dots \\ \dots \left[(500 - T_0)^{-1} - (800 - T_0)^{-1} \right] \times F_3 \quad (\text{Gl.5}).$$

Mit der Vorwärmtemperatur T_0 /[°C], der Wärmeeinbringung Q /[kJ/mm], der Blechdicke d /[mm] und den Formfaktoren F ergibt sich $t_{8/5}$ als berechnete Zeit in Sekunden, während der das Material von 800°C zu 500°C abkühlt und welche von den Stahl-Herstellern bevorzugt zur Charakterisierung der empfohlenen Wärmeführung werkstoffspezifisch angegeben wird.

In den letzten Jahren zeigen sich nun zunehmend Differenzen zwischen berechneten $t_{8/5}$ -Zeiten und realen praktischen Temperatursensor-Messungen in der erstarrenden Schmelze, welche als besonders kritisch im Zusammenhang mit dem Schweißen moderner Werkstoffe mit einem engen Parameterfenster für die $t_{8/5}$ -Zeit zu sehen sind.

Einhergehend damit sind fehlerhafte vergleichende Bewertungen unterschiedlicher Lichtbogenprozesse zu bemerken, welche einer ansonsten wirtschaftlich vorteilhaften Verwendung zunächst im Wege stehen.

2 Ursachen der Fehler

Eine Ursache der Fehler liegt in der ungenauen Bestimmung der Wärmeeinbringung Q . Abweichungen im Wert von Q haben durch das Quadrieren in Gl.4 große Auswirkungen auf die berechnete $t_{8/5}$ -Zeit für zweidimensionale Wärmeableitung. Zur Verdeutlichung: 5% mehr Q führt hier zu 10% mehr $t_{8/5}$, 10% zu 21% und 20% mehr Q zu 44% mehr $t_{8/5}$ -Zeit.

Bei angesetzter dreidimensionaler Wärmeableitung nach (Gl.5) quadriert sich die Unsicherheit von Q zwar nicht, geht aber immer noch voll linear ein.

Die Hauptunsicherheit liegt bei der in Übereinstimmung mit EN 1011-1 [1] und EN1011-2 [2] verwendeten Formel zur Berechnung der Streckenenergie:

UNSICHER:

$$E / \left[\frac{kJ}{mm} \right] = \frac{U / [V] \times I / [A] \times 60}{v / \left[\frac{mm}{min} \right] \times 1000} \quad (Gl.6).$$

Falsch bezüglich dieser Formel ist die Annahme, das Produkt eines ermittelten Wertes für

die Schweißspannung U in Volt und eines weiteren ermittelten Wertes für den Schweißstrom I in Ampere entspräche immer der korrekten elektrischen (Wirk-)Leistung in Watt. Dies trifft jedoch pauschal nur auf zeitlich unveränderliche Größen zu.

Dennoch ist diese Formel mit guter Genauigkeit auch auf zeitlich veränderliche Prozessgrößen für das MSG-Schweißen anwendbar, aber nur:

- wenn eine „klassische“ Schweißstromquelle mit einer U/I-Kennlinie in konstant-Spannungs-Charakteristik und einer physikalisch realen Schweißstromdrossel vorliegt (bzw. wenn eine geregelte Stromquelle dies genau nachbildet)
- und wenn mit den arithmetischen Mittelwerten der Messwerte von Spannung und Strom gerechnet wird.

Obige Besonderheiten erlauben eine in der Praxis hinreichende Genauigkeit bei der Anwendung von (Gl.6) aus der Verkettung folgender Gründe:

- bei einer vernachlässigbaren U/I-Kennlinienneigung und vernachlässigbaren energetischen Verlusten in der Schweißstromdrossel kann zur Ermittlung der an den Lichtbogen gelieferten elektrischen Leistung der vor der Schweißstromdrossel (im Innern der Schweißstromquelle) identifizierbare idealisierte Spannungswert in (Gl.6) als „konstant“ eingesetzt werden;
- da über einer idealen physikalischen Schweißstromdrossel keine Gleichspannung abfallen kann, ist dieser idealisierte konstante Wert dem am Lichtbogen bestimmbaren arithmetischen Mittelwert der Spannung sehr nahe;
- wenn U in (Gl.6) als Konstante angesehen werden kann, ist I als arithmetischer Mittelwert einsetzbar und führt zu einer mathematisch korrekten Bestimmung des Mittelwertes der elektrischen Leistung.

Diese Besonderheiten der klassischen MSG-Schweißstromquellen, welche eine pauschale Nutzung von (Gl.6) für alle MSG-Lichtbogentypen mit hinreichender Genauigkeit erlaubt, weisen moderne geregelte Schweißstromquellen kaum noch auf, da zur Optimierung des Schweißprozesses regelungstechnisch davon abgewichen wird.

Vielmehr sind die meisten modernen Schweißprozesse zeitlich besonders veränderliche Prozesse, so dass die Formel (Gl.6) mit guter Genauigkeit nur für gering dynamische Prozesse mit hinreichender Genauigkeit anwendbar ist, wie z.B. WIG, MMA und dem MSG-Sprühlichtbogen.

Ein weiterer Fehlereinfluss bei Berechnung der Wärmeeinbringung liegt in der notwendigen Annahme eines bestimmten thermischen Wirkungsgrades η (siehe Abschnitt 7).

3 Größenordnung der Fehler

Für die Werte von U und I wird im Allgemeinen der arithmetische Mittelwert (average, avr) verwendet, weil, wie eben begründet, bei „klassischen“ Anwendungen mit (Gl.6) eine hinreichende Genauigkeit erreichbar ist.

Das Einsetzen der quadratischen Mittelwerte (Effektivwerte, rms) in (Gl.6) wird für Prozessvarianten mit starken Stromänderungen (wie z.B. dem Impulsschweißen) in manchen Literaturstellen empfohlen, auch wenn hierfür anstelle einer wissenschaftlichen eher eine empirische Begründung gegeben wird.

Die Größenordnungen der Fehler bei der Bestimmung der Streckenenergie hängen sowohl vom Schweißprozess, als auch vom angewandten Verfahren bei der Bestimmung von U und I ab. Bei Verwendung arithmetischer Mittelwerte wird ein vermeintlich geringerer Leistungswert berechnet, bei Verwendung quadratischer Mittelwerte (Effektivwerte) ein höherer.

Für das MSG-Standard-Schweißen und für das Impulsschweißen sind beispielhaft in **Bild 1** Abweichungen bezogen auf die korrekt ermittelte elektrische Leistung (Null-Linie) für die Materialkombination G3Si/1,2mm/M21 dargestellt.

Sowohl das Produkt der Mittelwerte als auch das Produkt der Effektivwerte von U und I weichen am stärksten im unteren bis mittleren Drahtvorschubbereich von der korrekten elektrischen Leistung ab. Für das Impulsschweißen sind die Abweichungen im unteren Bereich so groß, dass die Anwendung von (Gl.6) mit arithmetischen oder quadratischen Mittelwerten hier völlig sinnlos ist.

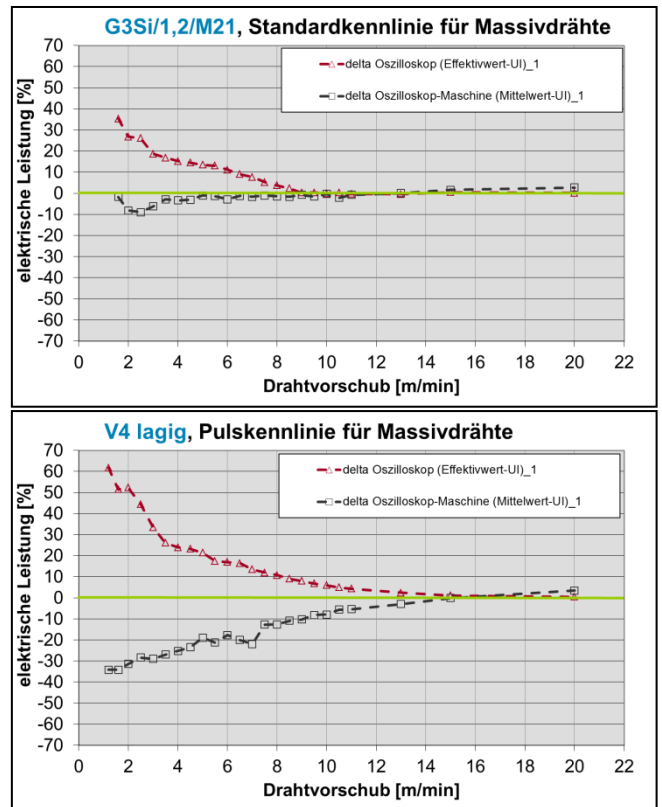


Bild 1: Darstellung der prozentualen Fehler bei der Leistungsbestimmung mit arithmetischem Mittelwert und quadratischem Mittelwert von U und I im Vergleich zur korrekt ermittelten Leistung

4 Korrekte Bestimmung der Streckenenergie

Eine korrekte Bestimmung der Streckenenergie bedingt zunächst eine korrekte Bestimmung der in den Lichtbogen eingebrachten elektrischen Leistung. Die dabei auftretenden Herausforderungen und nützliche Lösungsansätze hierzu sind in [7] beschrieben, **Bild 2**.

Eine unter allen Randbedingungen sichere und messtechnisch fehlerarme Bestimmung der elektrischen Lichtbogenleistung ist nur durch direkte Leistungsmessung am Lichtbogen möglich.

Die allgemeine Leistungsdefinition $P = U \times I$ entspricht bei zeitlich veränderlichen Größen $p(t) = u(t) \times i(t)$. Hierzu sind Lichtbogenspannung $u(t)$ und Schweißstrom $i(t)$ gleichzeitig zu erfassen und zu jedem einzelnen Messzeitpunkt (t) zu multiplizieren, um die elektrische Leistung $p(t)$ für diesen Messzeitpunkt selbst zu ermitteln. Um aus diesem zeitlichen Leistungs-

verlauf einen einzigen Wert zu generieren, erfolgt die Integration zum Mittelwert der elektrischen Leistung

$$P = \frac{1}{T} \int p(t) dt \quad \text{bzw.} \quad P = \frac{1}{T} \int u(t) \times i(t) dt \quad (\text{Gl.7}).$$

Das Ergebnis ist der korrekte mittlere (Wirk-) Leistungswert.

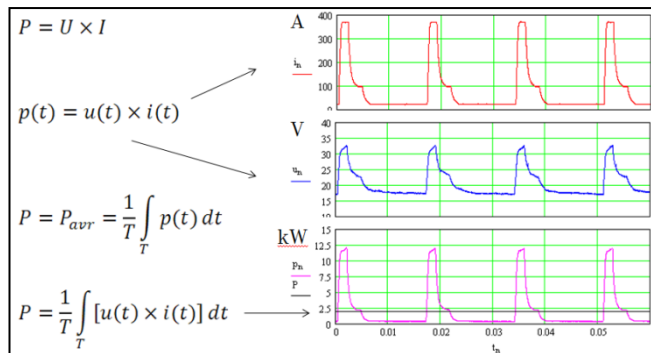


Bild 2: Korrekte Bestimmung der elektrischen Wirkleistung zeitlich veränderlicher Größen durch Integration

Der Schweißstrom kann im Werkstück-Massekabel zwischen Stromquelle und Werkstück an beliebiger Stelle gemessen werden, da der Strom im Schweißstromkreis überall gleich ist. Etwaige Bedenken hierzu, dass Stromverschleppungen über Erdleitungen, Kriechströme über verschmutzte Isolierungen oder kapazitive Ströme bei getakteten Stromquellen die Messung wesentlich beeinflussen, können im allgemeinen zerstreut werden, denn diese Einflüsse sind bei halbwegs intakter Technik vernachlässigbar gering.

Die Lichtbogenspannung hingegen sollte bei eigenständiger Messung so nah es geht örtlich am Lichtbogen abgegriffen werden, auch wenn dies technisch schwierig ist. Denn die räumliche geometrische Fläche, welches durch die Messanschlüsse zur Spannungsmessung mit dem Strompfad im Lichtbogenbereich gebildet wird, muss so klein wie möglich sein, ansonsten induziert das vom Schweißstromkreis in die Messleitungen eingekoppelte Magnetfeld unerwünschte Fehlerspannungen. Empfehlenswert ist die Verdrillung der Messleitungen, **Bild 3**.

Eine Verdrillung des Schweißstrommassenkabels mit dem Brennerkabel wäre im Interesse eines möglichst kleinen äußeren Magnetfeldes auch

wünschenswert, lässt sich in der Praxis aber kaum umsetzen.

Zur Durchführung der korrekten Leistungsbestimmung ist unter Laborbedingungen ein Oszilloskop mit der Möglichkeit der Multiplikation von 2 Messkanälen und der Möglichkeit der Integration des Ergebnisses geeignet. Diese, oft auch als mathematische Leistungsbestimmung bezeichnete Funktion, ist häufig auch in der Form CH3=INT(CH1*CH2) einstellbar. Es muss an dieser Stelle auf die Notwendigkeit der Verwendung geeigneter Filter zur Vermeidung von „Aliasing“-Effekten verwiesen werden, siehe hierzu [3].

Die Verwendung von einfachen Messgeräten zur elektrischen Leistungsbestimmung von 50..60 Hz-Netzverbrauchern kann nicht empfohlen werden, da sie nicht für die hohen Amplituden und für das Frequenzspektrum dynamischer Schweißprozesse ausgelegt sind.

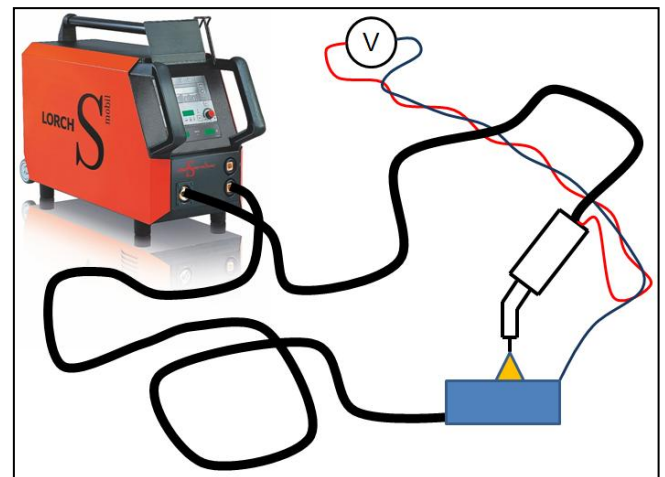


Bild 3: Idealer Anschluss einer eigenständigen Lichtbogenspannungsmessung (V)

5 Vereinfachte Bestimmung

Der nicht mit leistungsfähiger elektrischer Messtechnik ausgestattete Anwender kann mit Abstrichen an die Genauigkeit zu vereinfachten Methoden der Leistungsbestimmung greifen. Bei Einsatz „klassischer“ Schweißstromquellen für das Standard-MSG-Schweißen kann, wie in Kapitel 2 begründet, durchaus (Gl.6) mit arithmetischen Mittelwerten in hinreichender Genauigkeit angewendet werden. Dasselbe gilt für geregelte Stromquellen und MSG-Schweißprozesse mit geringer Stromdynamik, z.B. im Sprühlichtbogenbereich.

Für das überwiegend kurzschlussfreie Impuls-schweißen, für das gerade durch das klassische Vorgehen mit (Gl.6) die Leistungsbestimmung am ungenauesten ist, erschließt sich nach [4] eine andere Möglichkeit der vereinfachten Leistungsbestimmung.

Denn für überwiegend kurzschlussfreie Prozesse kann unter Annahme eines linearen Lichtbogenschweißprozessmodells

$$U_{\text{mod}} = U_{\text{mp}} + R_{\text{mp}} \times I \quad (\text{Gl.8})$$

(vergl. **Bild 4**) folgende Gleichung hergeleitet werden:

$$\bar{P}_{\text{mod}} = U_{\text{avr}} \times I_{\text{avr}} + \sqrt{(U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2) \times (I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{avr}}^2)} \quad (\text{Gl.9})$$

Der Ergebniswert \bar{P}_{mod} ist der Mittelwert der Leistung, der am linearen Lichtbogenschweißprozessmodell (Gl.8, vergl. auch **Bild 4**) ermittelt wird.

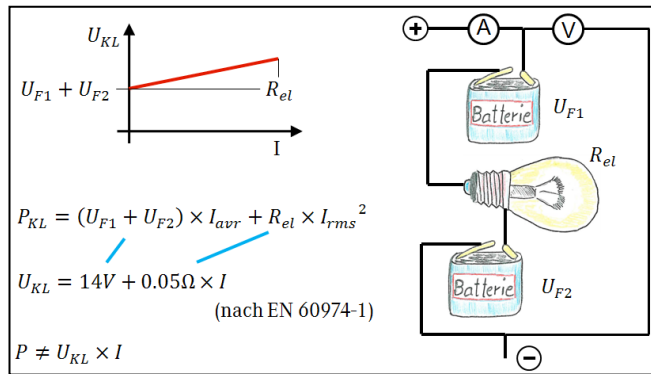


Bild 4: Elektrisches Ersatzschaltbild für ein einfaches Lichtbogenschweißprozessmodell

Obwohl der reale Schweißprozess gewiss Abweichungen gegenüber dem linearen Lichtbogenschweißprozessmodell aufweist, ist mit (Gl.9) eine deutliche Verringerung des Fehlers bei der Bestimmung der elektrischen Leistung möglich. Es ist aber unbedingt zu beachten, dass (Gl.9) nur für überwiegend kurzschlussfreie Lichtbogenschweißprozesse gültig ist. Die Effektivwertmessung von Strom I_{rms} und Spannung U_{rms} ist in der Anwendungspraxis weniger geläufig, als die Messung der Mittelwerte U_{avr} und I_{avr} . Zur Messung sind sogenannte „trueRMS-Meter“ zu verwenden.

Falls nur ein Effektivwert gemessen werden kann, besteht die Möglichkeit, alternativ zu (Gl.9) folgende Beziehungen zu nutzen [4]:

$$\bar{P}_{\text{mod}} = U_{\text{avr}} \times I_{\text{avr}} + \frac{U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2}{R_{\text{mp}}} \quad (\text{Gl.10}),$$

$$\bar{P}_{\text{mod}} = U_{\text{avr}} \times I_{\text{avr}} + \frac{U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2}{U_{\text{avr}} - U_{\text{mp}}} \cdot I_{\text{avr}} \quad (\text{Gl.11}).$$

Hierzu ist Kenntnis über einen Parameterwert des Lichtbogenschweißprozessmodells erforderlich. Die Produktnorm EN 60974-1 [5] definiert zur Typprüfung von MSG-Schweißstromquellen U_{mp} mit 14V und R_{mp} mit 0,05 Ohm.

Der reale Schweißprozess wird von diesen Werten natürlich etwas abweichen. Im Rahmen einer Voruntersuchung können die Modellparameter nach [4] berechnet werden mit:

$$R_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2}{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{avr}}^2}} \quad (\text{Gl.12}),$$

$$U_{\text{mp}} = U_{\text{avr}} - I_{\text{avr}} \times \sqrt{\frac{U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2}{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{avr}}^2}} \quad (\text{Gl.13}).$$

Angewandt auf einen MSG-Impulsprozess im unteren Leistungsbereich [3], wo die Abweichungen zwischen der korrekt nach (Gl.7) ermittelten Leistung und der stark fehlerbehafteten Methode der einfachen Multiplikation von Mittelwerten oder Effektivwerten von U und I besonders groß sind ($U_{\text{avr}}=20.2\text{V}$, $U_{\text{rms}}=20.7\text{V}$, $I_{\text{avr}}=74.3\text{A}$, $I_{\text{rms}}=127\text{A}$, $P=1.95\text{kW}$, $U_{\text{avr}}I_{\text{avr}}=1.5\text{kW}$, $U_{\text{rms}}I_{\text{rms}}=2.63\text{kW}$) ergibt sich mit (Gl.9) ein \bar{P}_{mod} von 1.97kW, womit die Abweichung zum korrekten P weniger als 1% beträgt. Zum Vergleich, die Abweichung von $U_{\text{avr}}I_{\text{avr}}$ zu P beträgt -23% und von $U_{\text{rms}}I_{\text{rms}}$ zu P sogar +35%.

Damit wird deutlich, dass die Verwendung von (Gl.9) für die vereinfachte Bestimmung der elektrischen Leistung von MSG-Impulsprozessen gegenüber der Methodik der einfachen Multiplikation von U und I (Gl.6) unbedingt vorzuziehen ist.

6 Nutzung der Funktionalität der Stromquelle

Moderne Schweißstromquellen können die abgegebene elektrische Leistung nach (Gl.7) korrekt direkt bestimmen. Auf dem Bussystem mehrmals pro Sekunde nach außen gegeben, dienen diese Werte auch externen Datenerfassungs- und Auswertungssystemen zur Schweißdatenüberwachung. Zu beachten ist jedoch, dass die derart ermittelten Leistungswerte bei längeren Schweißstromkabeln deren Wärmeverluste mit beinhalten, wenn die Spannungsmessung durch die Stromquelle dies nicht berücksichtigt.



Bild 5: Anzeige der abgegebenen elektrischen Leistung einer Schweißstromquelle der S- und P-Serie von Lorch.

Ähnlich wie mit der „Hold-Anzeige“ von Strom und Spannung kann die abgegebene elektrische Leistung P bei Schweißstromquellen der S- und P-Serie von Lorch am Display (im Untermenü, **Bild 5**) auch angezeigt werden und unterstützt damit den Anwender bei der richtigen Bestimmung der Streckenenergie nach (Gl.1, Gl.2) wesentlich. Somit schlagen diese Stromquellen auch gleich die Brücke zwischen den angebotenen modernen Lichtbogen-schweißprozessen und den Erfordernissen moderne hochfester Werkstoffe hinsichtlich der kontrollierbaren Wärmeführung.

7 Der thermische Wirkungsgrad

Zur Bestimmung der Wärmeeinbringung Q ist nach (Gl.3) auch der thermische Wirkungsgrad η erforderlich. Abweichungen des tatsächlich vorliegenden vom angenommenen thermischen Wirkungsgrades schlagen sich, wie bei der Leistungsbestimmung auch, quadratisch (zweidimensionale Wärmeableitung, Gl.4) bzw. proportional (dreidimensionale Wärmeableitung,

Gl.5) in die Bestimmung der $t_{8/5}$ -Zeiten nieder. Die Unsicherheit bei der Bestimmung von η zeigen sich auch in der Literatur: [1] und [2] geben unterschiedliche Werte für thermische Wirkungsgrade an. In [6] wurde durch kalorimetrische Messungen an verschiedenen Schweißverfahren unter variierten Bedingungen festgestellt, dass der effektive thermische Wirkungsgrad durch Veränderung der Schweißparameter beim MSG-Schweißen um mehr als 10% verändert werden kann. Auszüge der Ergebnisse aus [6] sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Gemessener mittlerer thermische Wirkungsgrad nach [6] beim MAG-Schweißen von Stahl, Kurzlichtbogen (KLB), Sprühlichtbogen (SLB), Impulslichtbogen (ILB).

Variante	KLB	SLB	ILB
EN 1011-1	0,8		
Andere, [2]	0,85		
Gemessen	0,845	0,745	0,770
Sinkt bei (umgekehrt steigend)	<ul style="list-style-type: none"> • steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit • steigender Lichtbogenlänge • verringertem Aktivgasanteil • verringerter Gasdurchflussmenge • verringertem Kontaktrohrabstand • besserer Wärmeleitfähigkeit des Zusatzwerkstoffes 		

Die mögliche Varianz des effektiven thermischen Wirkungsgrades führt zu einer realen Unsicherheit bei der Wärmeführung, wenn eine rechnerische Abschätzung der $t_{8/5}$ -Zeit nach (Gl.4, Gl.5) erfolgt.

Die Unsicherheit kann verringert werden, wenn zwei Rechnungen erfolgen: 1. mit einem minimalen und 2. mit einem maximalen effektiven thermischen Wirkungsgrad. Liegen die Ergebnisse beider Rechnungen im Verarbeitungsparameterfenster des Grundwerkstoffes, kann diese Unsicherheit ausgeräumt werden.

8 Vergrößerung des Parameterfensters durch geeigneten Schweißzusatz

Nicht nur die korrekte Bestimmung der Wärmeeinbringung bzw. der $t_{8/5}$ -Zeit bei modernen Schweißprozessen, sondern auch eine optimale Abstimmung von Grundwerkstoffen und Schweißzusatzwerkstoffen kann zur Absicherung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Schweißverbindungen beitragen. Die **voestalpine** Stahl GmbH hat gemeinsam mit **böhler welding** für hoch- und ultrahochfeste thermomechanisch hergestellte Stähle das **alform welding system** entwickelt [7, 8]. Abgestimmte Schweißzusatzwerkstoffe ermöglichen ein breiteres Prozessfenster und tragen somit zur erhöhten Produktivität als auch Fertigungssicherheit bei.

9 Zusammenfassung

Zur Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse wird empfohlen, das in vielen Definitionen und Formeln verwendete Produkt $U \times I$ nicht unüberlegt zur Leistungsberechnung zu verwenden. Es ist bedenkenlos nur für „klassische“ MSG-Schweißprozesse mit unregelmäßigen Stromquellen anwendbar.

Es wurden Hinweise zur korrekten Leistungsbestimmung gegeben. Hierbei ist vorteilhaft auch das Vermögen moderner Schweißstromquellen zur Leistungsanzeige anwendbar.

Für überwiegend kurzschlussfreie Prozesse, wie dem MSG-Impulsschweißen, steht mit

$$\bar{P}_{\text{mod}} = U_{\text{avr}} \times I_{\text{avr}} + \sqrt{(U_{\text{rms}}^2 - U_{\text{avr}}^2) \times (I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{avr}}^2)}$$

eine relativ einfache und genaue Methode zur Verfügung, allein über die Mittelwerte und Effektivwerte von Strom und Spannung den Leistungswert zu bestimmen.

Auf die Notwendigkeit der richtigen Annahmen zum thermischen Wirkungsgrad wurde hingewiesen.

Abschließend wurde auf die Möglichkeit der vorteilhaften Verwendung moderner Werkstoffe mit erweitertem Prozessfenster hingewiesen.

10 Literatur

Diese Fachdokumentation wurde erstmalig veröffentlicht durch: B. Jaeschke, W. Ernst, M. Luritzhofer: Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse. DVS-Berichte zum DVS Congress 2013. DVS Media, Düsseldorf 2013.

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, Y00.0050.0-00.PDF
- B. Jaeschke: Zusammenhänge bei der Messung, Steuerung und Regelung moderner MSG-Lichtbogenschweißprozesse und deren Verständnis, Y00.0030.0-00.PDF

Weitere Literaturstellen:

[1] DIN EN 1011-1:2009-7, Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[2] DIN EN 1011-2:2001-5, Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[3] B. Jaeschke: Zusammenhänge bei der Messung, Steuerung und Regelung moderner MSG-Lichtbogenschweißprozesse und deren Verständnis. DVS-Berichte Band 275, DVS Congress 2011, S. 250ff. DVS Media, Düsseldorf 2011.

[4] B. Jaeschke, J. Kruscha: Leistungs- und Modellparameter kurzschlussfreier Lichtbogenprozesse. Schweißen und Schneiden 09/2013, S. 616ff. DVS Media, Düsseldorf 2013

[5] DIN EN 60974-1 (VDE 0544-1): 2006-07, Lichtbogenschweißeinrichtungen – Teil 1:

Schweißstromquellen, Beuth Verlag GmbH,
Berlin

[6] Abschlussbericht „Wirkungsgradbestimmung von Schutzgasschweißverfahren“, TU Chemnitz – IFS, IGF-Vorhaben-Nr. 15.562 BR, 01.07.2008-30.06.2010

[7] [www.voestalpine.com/stahl/Produkte/Marken/ Submarken/alform-R-welding-system](http://www.voestalpine.com/stahl/Produkte/Marken/Submarken/alform-R-welding-system).

[8] Ernst W., Simader-Marksteiner G., Wagner J., Rauch R., Schnitzer R.: Das alform® welding system ist die weltweit erste Systemlösung für hoch- und ultrahochfeste Schweißkonstruktionen. Schweiß- und Prüftechnik 10 (2012), S. 157-161, Österreichische Gesellschaft für Schweißtechnik (ÖGS).