

Nutzung von Mittelwerten und Effektivwerten zur elektrischen Modellparameter- und Leistungsbestimmung von überwiegend kurzschlussfreien dynamischen Lichtbogenschweißprozessen

Dr.-Ing. Birger Jaeschke, Lorch Schweißtechnik GmbH, Auenwald, Deutschland, 22.01.2014
 Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Kruscha, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Die korrekte elektrische Leistungsbestimmung von Lichtbogenschweißprozessen stellt den mit der Aufgabe betrauten fúgetechnischen Anwender oft vor das Problem, hierfür keine geeigneten elektrischen Messgeräte zu besitzen, zumal deren Anschaffung finanziell nicht als besonders notwendig für das Kerngeschäft angesehen wird. In dieser Fachdokumentation wird eine Methodik aufgezeigt, welche die Nutzung von relativ einfach bestimmbar Kennwerten zur elektrischen Modellparameter- und Leistungsbestimmung von überwiegend kurzschlussfreien dynamischen Lichtbogenschweißprozessen nahelegt.

1 Herausforderungen der elektrischen Leistungsbestimmung

Die Bestimmung der von der Schweißstromquelle in den Lichtbogenschweißprozess eingebrachten elektrischen Leistung ist für viele Zwecke erforderlich:

- Ermittlung von Streckenenergie, Wärmeeinbringung;
- Verifizierung der Schweißung hinsichtlich vorgegebener Leistungsparameter;
- Einschätzung des Energieverbrauchs des Fúgeprozesses.

Als allgemeine Definition der elektrischen Leistung P gilt das Produkt aus Spannung U und Strom I . Für zeitvariante Größen gilt dann:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (G.1)$$

Für die in den Lichtbogen eingebrachte elektrische Leistung wird sehr häufig für einen bestimmten Bereich der Schweißnaht nur ein Zahlenwert betrachtet, dies ist der arithmetische Mittelwert der elektrischen Leistung. Wenn der Bereich durch die Zeitfenster t_1 bis t_2 begrenzt wird, gilt:

$$\bar{P} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (G.2)$$

Diese korrekte Bestimmung der elektrischen Leistung nach (G.1) und (G.2) ist mit geeigneten Messgeräten möglich, wobei dabei Spannung und Strom gleichzeitig gemessen werden müssen.

Auf Grund der Einfachheit der Messung werden jedoch im Allgemeinen nur die Mittelwerte von Schweißprozessspannung und Lichtbogenstrom bestimmt. Sie finden sich auch in den Soll- und Istwert-Anzeigen der Schweißstromquelle und in Schweißverfahrensprüfungen und Schweißanweisungen. Rechnerisch werden sie bestimmt durch

$$\bar{U} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \quad (G.3)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (G.4).$$

Es ist aber ein Irrtum zu glauben, dass das Produkt der Mittelwerte \bar{U} und \bar{I} allgemein dem Mittelwert von P entspreche, denn aus (G.1) bis (G.4) ergibt sich:

$$\int_{t_1}^{t_2} [u(t) \cdot i(t)] dt \neq \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (G.5).$$

Das Produkt der Mittelwerte von U und I ergibt nur dann mathematisch korrekt den Mittelwert von P , wenn wenigstens einer der beiden Multiplikatoren $u(t)$ und $i(t)$ zeitinvariant ist und damit zu jedem Zeitpunkt seinem eigenen Mittelwert entspricht. Unter Erfüllung dieser Bedingung kann angewandt werden:

$$\bar{P}_{avr} = \bar{U} \cdot \bar{I} \quad (G.6).$$

Bei dynamischen Lichtbogenschweißprozessen sind Spannung und Strom im relativ zur Prozessdynamik betrachteten großen Zeitfenster zeitvariant, so dass das Produkt der Mittelwerte von U und I einen systematischen Fehler zum korrekten Mittelwert von P aufweist und (G.6) nicht angewandt werden sollte.

In der Elektrotechnik existiert für die Leistungsbestimmung an rein ohmschen Lasten, d.h. für lineare elektrische Widerstände R , der Begriff des Effektivwertes von Spannung und Strom:

$$\tilde{U} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t)^2 dt} \quad (G.7)$$

$$\tilde{I} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t)^2 dt} \quad (G.8).$$

Nur wenn das Ohmsche Gesetz gilt:
 $u(t) \sim i(t) \rightarrow u(t) = R \cdot i(t) \quad (G.9).$

ergibt sich aus (G.1), (G.2), (G.7), (G.8) und (G.9):

$$\bar{P}_{eff} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R \cdot i(t) \cdot i(t) dt \quad (G.10)$$

$$\bar{P}_{eff} = R \cdot \tilde{I}^2 = R \cdot \bar{I} \cdot \tilde{I} \quad (G.11)$$

$$\bar{P}_{eff} = \tilde{U} \cdot \bar{I} \quad (G.12).$$

Die Messung der Effektivwerte von u(t) und i(t) ist technisch auch für das Lichtbogenschweißen mit sogenannten True-RMS-Messgeräten möglich und die Anwendung von (G.12) wird daher gelegentlich auch als „Alternative“ zur Nutzung von (G.6) betrachtet. Da der Lichtbogenschweißprozess jedoch physikalisch zu komplex ist, um dem einfachen ohmschen Gesetz (G.9) zu entsprechen, entsteht bei der Anwendung von (G.12) auch ein signifikanter systematischer Fehler.

Da die Problematik der Anwendung von (G.6) und (G.12) bei dynamischen Lichtbogenschweißprozessen bekannt ist, existieren empirische und durchaus als abenteuerlich zu bezeichnende Methoden, die „Mittelwertleistung“ (G.6) und „Effektivwertleistung“ (G.12) zu „mischen“. Um dieser fehlerbehafteten intuitiven Vorgehensweise zu begegnen, soll im Folgenden eine mathematisch begründete Methodik dargestellt werden.

2 Betrachtungen am elektrischen Ersatzmodell des Lichtbogenschweißprozesses

Für den Lichtbogenschweißprozess ist ein einfaches lineares elektrisches Ersatzmodell etabliert, welches die Realität annähernd bezüglich der wesentlichen statischen elektrischen Eigenschaften beschreiben soll.

$$U_{mod} = U_{mp} + R_{mp} \cdot I \quad (G.13).$$

Die messbare Schweißprozessspannung wird gleich der Modellspannung U_mod gesetzt und das Modell setzt sich zusammen aus dem Anteil einer konstanten Modellparameterspannung U_mp, sowie aus einem vom Strom I und dem differentiellen elektrischen Modellwiderstandsparameter R_mp abhängigen Anteil. Die Werte für die Modellparameter U_mp und R_mp sind von den technologischen Randbedingungen des jeweiligen Lichtbogenschweißprozesses abhängig.

Zur standardisierten Prüfung und Beurteilung von professionellen Lichtbogenschweißstromquellen sind diese Modellparameter für verschiedene Lichtbogenschweißverfahren international genormt in IEC/EN60974-1 [1]. Die Modellparameterwerte für das MSG-Schweißen sind dort angegeben mit U_mp=14V

und R_mp=0.05Ohm; für das WIG-Schweißen mit U_mp=10V und R_mp=0.04Ohm; für das MMA-Schweißen mit U_mp=20V und R_mp=0.04Ohm. Diese Angaben entsprechen natürlich nur ungefähr den Modellparameterwerten, welche durch Messungen am konkreten Lichtbogenschweißprozess bestimmbar wären.

Ausgehend davon, dass U_mp und R_mp zunächst unbekannt sind, und dass das Modell auch für zeitlich veränderliche Größen u_mod(t) und i(t) gilt, lässt sich (G.13) formal in (G.1) und (G.2) einsetzen und es ergibt sich die mittlere elektrische Leistung P_mod für das Modell:

$$\bar{P}_{mod} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [U_{mp} + R_{mp} \cdot i(t)] \cdot i(t) dt \quad (G.14)$$

$$\bar{P}_{mod} = \frac{U_{mp}}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt + \frac{R_{mp}}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t)^2 dt \quad (G.15)$$

Mit Einsatz von (G.4) und (G.8) ergibt sich:

$$\bar{P}_{mod} = U_{mp} \cdot \bar{I} + R_{mp} \cdot \tilde{I}^2 \quad (G.16).$$

Das Ergebnis (G.16) ist nicht weiter verwunderlich, kommt man doch auch durch einfache Überlegung, wie die Leistungsanteile am elektrischen Ersatzschaltbild des Modells (G.13) durch Stromkennwerte quantifizierbar sind, zur selben Formel.

Wird das Modell (G.13) in die Definition des Mittelwertes der Spannung (G.3) eingesetzt, ergibt sich:

$$\bar{U} = U_{mod} = U_{mp} + R_{mp} \cdot \bar{I} \quad (G.17).$$

Der Einsatz des Modells (G.13), als Approximation, in die Definition des Effektivwertes der Spannung (G.7) lässt sich wie folgt schrittweise vereinfachen:

$$\tilde{U} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [U_{mp} + R_{mp} \cdot i(t)]^2 dt} \quad (G.18)$$

$$\tilde{U}^2 = U_{mp}^2 + \frac{2 \cdot U_{mp} R_{mp}}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt + \frac{R_{mp}^2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t)^2 dt \quad (G.19)$$

$$\tilde{U}^2 = U_{mp}^2 + 2 \cdot U_{mp} R_{mp} \cdot \bar{I} + R_{mp}^2 \cdot \tilde{I}^2 \quad (G.20),$$

und durch quadratische Ergänzung:

$$\tilde{U}^2 = (U_{mp} + R_{mp} \cdot \bar{I})^2 + R_{mp}^2 (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2) \quad (G.21).$$

Aus (G.17) folgt:

$$U_{mp} = \bar{U} - R_{mp} \cdot \bar{I} \quad (G.22).$$

Aus (G.21) und (G.22) folgt:

$$\tilde{U}^2 = \bar{U}^2 + R_{mp}^2 (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2) \quad (G.23).$$

Damit ist aus (G.23) der bisher quantitativ unbekannt Parameter R_{mp} bestimmbar:

$$R_{mp} = \sqrt{\frac{\tilde{U}^2 - \bar{U}^2}{\tilde{I}^2 - \bar{I}^2}} \quad (G.24).$$

Aus (G.17) und (G.24) ergibt sich auch der andere quantitativ unbekannt Parameter des Modells:

$$U_{mp} = \bar{U} - \bar{I} \cdot \sqrt{\frac{\tilde{U}^2 - \bar{U}^2}{\tilde{I}^2 - \bar{I}^2}} \quad (G.25).$$

Aus (G.16) und (G.22) erhält man:

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + R_{mp} (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2) \quad (G.26).$$

Aus (G.24) und (G.26) ergibt sich zudem:

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + \frac{1}{R_{mp}} (\tilde{U}^2 - \bar{U}^2) \quad (G.27).$$

Weiterhin folgt aus (G.26) und (G.22):

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + (\bar{U} - U_{mp}) \frac{\tilde{I}^2 - \bar{I}^2}{\bar{I}} \quad (G.28),$$

und aus (G.27) und (G.22):

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + \frac{\tilde{U}^2 - \bar{U}^2}{\bar{U} - U_{mp}} \cdot \bar{I} \quad (G.29).$$

Aus (G.24) und (G.26) ergibt sich die erstaunlich einfache Form:

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + \sqrt{(\tilde{U}^2 - \bar{U}^2) \cdot (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2)}, \quad (G.30)$$

deren praktische Bedeutung darin besteht, dass die Leistung ohne direkte Bestimmung von Modellparametern in guter Näherung direkt messbar wird.

3 Fehlerbetrachtung

P_{mod} beschreibt mit (G.16) die am einfachen linearen elektrischen Ersatzmodell (G.13)[1] des Lichtbogenschweißprozesses auftretende elektrische Leistung. Das statische Modell geht dabei von zeitinvarianten Parameterwerten für U_{mp} und R_{mp} aus. Kurzschlussbehaftete Lichtbogenschweißprozesse erfüllen diese Voraussetzung in mikroskopischer Betrachtung (zeitliche Auflösung $\mu s..ms$) zunächst nicht, denn der Lichtbogen erlischt durch die prozesscharakterisierenden Kurzschlüsse immer wieder, der Strom-

kreis wird kurzgeschlossen, und damit ändern sich jedes Mal U_{mp} und R_{mp} .

In makroskopischer Betrachtung (zeitliche Auflösung in Sekunden) kann man U_{mp} und R_{mp} jedoch bereits als gemittelte Werte eines laufenden Kurzlichtbogenprozesses ansehen, d.h. die Wirkung der Kurzschlüsse ist bereits in U_{mp} und R_{mp} berücksichtigt. Daher ist aus makroskopischer Sicht die Verwendung eines derartigen einfachen linearen elektrischen Ersatzmodelles des Lichtbogenschweißprozesses durchaus praktikabel. Der Standard IEC/EN60974-1 [1] macht hier für das MSG-Schweißen auch keine Ausnahme bei kurzschlussbehafteten Prozessen und empirische Messungen bestätigen die praktische Anwendbarkeit dieser makroskopischen Vereinfachung.

Bei kurzschlussbehafteten Lichtbogenschweißprozessen entsteht jedoch bei zeitlich mikroskopischer Betrachtung eine Verzerrung der Strom- und Spannungsverhältnisse, denn beim konventionellen Kurzlichtbogenschweißen ist während eines Kurzschlusses die Spannung gering, während der Strom steigt, wogegen in der Lichtbogenphase die Spannung hoch ist und der Strom sinkt. Bei modifizierten elektronisch geregelten Kurzlichtbogenprozessen können die Verhältnisse noch komplexer sein. Aus diesem Grund ist die Betrachtung von kurzschlussbehafteten Lichtbogenschweißprozessen mit dem einfachen linearen elektrischen Ersatzmodell des Lichtbogenschweißprozesses (G.16) zum Zwecke der Leistungsbestimmung nicht zulässig. Die Betrachtungen (G.14) bis (G.30) gelten daher nur für überwiegend kurzschlussfreie Lichtbogenschweißprozesse.

Die Verwendung von (G.16) beinhaltet nur die am einfachen linearen elektrischen Ersatzmodell des Lichtbogenschweißprozesses auftretende elektrische Leistung. Bei der Leistungsbestimmung mit (G.30) entsteht ein Restfehler P_{rest} durch die Spannungs-differenz der realen Schweißprozessspannung zum Modell. Der Mittelwert des Restfehlers für den kurzschlussfreien Lichtbogenschweißprozess ist formal:

$$\bar{P}_{rest} = \frac{1}{t2 - t1} \int_{t1}^{t2} \{u(t) - [U_{mp} + R_{mp} \cdot i(t)]\} \cdot i(t) dt$$

(G.31).

Die fehlerfreie reale mittlere elektrische Schweißprozessleistung P ist demnach:

$$\bar{P} = \bar{P}_{mod} + \bar{P}_{rest} \quad (G.32).$$

4 Exakte Herleitung der Leistungsformel

So intuitiv verständlich nachvollziehbar (G.30) auch erscheinen mag, der unerwünschte Restfehler (G.31) entsteht, weil die bisher nicht berücksichtigten Residuen

$$u_{res}(t) = u(t) - [U_{mp} + R_{mp} \cdot i(t)] \quad (G.33)$$

auch einen Beitrag zum Integral (G.31) erbringen.

Zur Vermeidung des Restfehlers ist jeweils eine lineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate für beide Abbildungsrichtungen anzusetzen. Ausgehend davon, dass bezüglich diskreter Messwerte bei hinreichend enger zeitlicher Abtastung (n Abtastwerte von t1 bis t2) gilt:

$$\frac{1}{t2 - t1} \int_{t1}^{t2} x(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{X} \quad (G.34)$$

lässt sich für eine Regressionsgerade

$$y = a_{yx} + b_{yx} \cdot x \text{ der Beziehung } y_i = f(x_i)$$

der Regressionskoeffizient b nach [3] beschreiben:

$$b_{yx} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i x_i y_i - \bar{Y} \cdot \bar{X}}{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2 - \bar{X}^2} \quad (G.35).$$

Entsprechend vertauscht ergibt sich für

$$x = a_{xy} + b_{xy} \cdot y \text{ der Beziehung } x_i = g(y_i)$$

$$b_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i x_i y_i - \bar{Y} \cdot \bar{X}}{\frac{1}{n} \sum_i y_i^2 - \bar{Y}^2} \quad (G.36).$$

Durch Betrachtung von (G.2), (G.3), (G.4), (G.7) und (G.8) lassen sich diese Ausdrücke auf elektrische Größen übertragen. Für die Abhängigkeit $y_i = f(x_i)$

$$u(t) = U_0 + R_{rk} \cdot i(t) \quad (G.37),$$

welche (G.13) ähnelt, ist der Regressionskoeffizient R_{rk} , der auf der Basis des Minimums der Summe der quadratischen Spannungsabweichungen vom linearen Modell berechnet wird, physikalisch ein elektrischer differentieller Widerstand, denn er beschreibt den Anstieg der Spannung mit wachsendem Stromwert. Die Anwendung von (G.35) auf $U(I)$ führt zu (Bild 5):

$$R_{rk} = \frac{\bar{P} - \bar{U} \cdot \bar{I}}{\bar{I}^2 - \bar{I}^2} \quad (G.38).$$

Umgekehrt führt (G.36) mit $x_i = g(y_i)$ physikalisch zu einem elektrischen differentiellen Leitwert und es ergibt sich der Regressionskoeffizient für das Minimum der Summe der quadratischen Stromabweichungen:

$$G_{rk} = \frac{\bar{P} - \bar{U} \cdot \bar{I}}{\bar{U}^2 - \bar{U}^2} \quad (G.39).$$

Aus (G.38) und (G.39) folgt:

$$\frac{R_{rk}}{G_{rk}} = \frac{\bar{U}^2 - \bar{U}^2}{\bar{I}^2 - \bar{I}^2} \quad (G.40)$$

Durch Einsetzen von (G.40) in (G.38) und Auflösen nach P erhält man nunmehr eine fehlerfreie Formel für die mittlere Schweißprozessleistung in allgemeiner Form:

$$\bar{P} = \bar{U} \cdot \bar{I} + k \cdot \sqrt{(\bar{U}^2 - \bar{U}^2) \cdot (\bar{I}^2 - \bar{I}^2)} \quad (G.41).$$

Sie unterscheidet sich von (G.30) durch den Korrekturfaktor

$$k = \sqrt{R_{rk} \cdot G_{rk}} \quad (G.42).$$

5 Diskussion der Gleichungen

Im Vergleich zu (G.6)

$$\bar{P}_{avr} = \bar{U} \cdot \bar{I}$$

enthält (G.30)

$$\bar{P}_{mod} = \bar{U} \cdot \bar{I} + \sqrt{(\bar{U}^2 - \bar{U}^2) \cdot (\bar{I}^2 - \bar{I}^2)}$$

einen Korrekturterm für kurzschlussfreie dynamische Lichtbogenschweißprozesse:

$$\bar{P}_{kor} = \sqrt{(\bar{U}^2 - \bar{U}^2) \cdot (\bar{I}^2 - \bar{I}^2)} \quad (G.43).$$

Aber (G.30) ist selbst nur eine fehlerbehaftete Näherung, denn erst (G.41) beschreibt mit (G.42) exakt die fehlerfreie reale mittlere Schweißprozessleistung.

Die Bestimmung des Korrekturfaktors k für einen bestimmten Schweißprozess kann nun nach (G.38) bis (G.42) leider nicht allein durch Kenntnis der Mittelwerte und Effektivwerte von Spannung und Strom erfolgen. Damit wird der Nutzen von (G.41) eingeschränkt. Messungen (vergl. Beispiele, Tabelle 1) zeigen aber, dass der Korrekturfaktor k für einen überwiegend kurzschlussfreien Impulsschweißprozess nahe 0,9 bis 1 ist und dadurch mit guter Genauigkeit die Näherung (G.30) zur Leistungsabschätzung angewandt werden kann. Damit ist (G.30) näher an der tatsächlichen Leistung P (G.2), als die „Mittelwertleistung“ (G.6).

Aus dem Wert von (G.43) kann zudem ein vereinfachtes Vergleichsmaß für die elektrisch leistungsrelevante Dynamik des konkreten Lichtbogenschweißprozesses abgeleitet werden.

Interessant sind auch die Gleichungen zur Abschätzung der Modellparameter:

$$R_{mp} = \sqrt{\frac{\tilde{U}^2 - \bar{U}^2}{\tilde{I}^2 - \bar{I}^2}} \quad (G.24),$$

$$U_{mp} = \bar{U} - \bar{I} \cdot \sqrt{\frac{\tilde{U}^2 - \bar{U}^2}{\tilde{I}^2 - \bar{I}^2}} \quad (G.25).$$

Verschieden eingestellte kurzschlussfreie Lichtbogen-schweißprozesse öffnen sich damit einem relativ einfachen Vergleich ihrer Modellparameter.

Die Gleichungen (G.26) bis (G.29) sind anwendbar, wenn einer der Effektivwerte von Spannung oder Strom nicht hinreichend genau messbar ist, aber hingegen einer der beiden Modellparameter U_{mp} oder R_{mp} abschätzbar ist. Mit (G.31) ist dabei die Fehlerbetrachtung möglich.

Mit Hilfe von (G.38) und (G.39) lässt sich nunmehr auch eine exakte Interpretation für (G.24) als geometrisches Mittel der beiden Regressionsgeraden in der $U(I)$ -Darstellung feststellen,

$$R_{mp} = \sqrt{R_{rk} \cdot \frac{1}{G_{rk}}} \quad (G.44),$$

wobei die Leitwert-Regressions-Linie im $U(I)$ -Diagramm (Bild 5) die Form annimmt:

$$U = -\frac{S_{rk}}{G_{rk}} + \frac{1}{G_{rk}} \cdot I \quad (G.45)$$

(S_{rk} – Intercept der Leitwert-Regressions-Linie),

$$i(t) = S_{rk} + G_{rk} \cdot u(t). \quad (G.45)$$

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass (G.41) von allgemeiner Bedeutung für die Bewertung von elektrischen Prozessen mit quasistationärer $U(I)$ -Verteilung ist. Der k -Korrekturkoeffizient kann unmittelbar bestimmt werden über die beiden linearen Modellanpassungen. Andererseits bietet sich für solche quasistationären Prozesse für den Praktiker dann auch eine Direktbestimmung der Mittleren Leistung gemäß (G.1), (G.2) an, um den k -Koeffizienten gemäß (G.41) über den „modellparameterfreien“ Weg mit einer vorherigen Messung zu bestimmen.

6 Beispiele

In [2] wurden Beispiele für elektrische Messwerte und Leistungsabweichungen eines realen Impulsschweißprozesses gegeben. Die Zeitreihen der Messwerte

eines weiteren Impulsschweißprozesses im höheren Leistungsbereich sind im Bild 1 dargestellt. Tabelle 1 zeigt Messwerte und Ergebnisse der Rechnungen für diese 3 Beispiele.

Es zeigt sich in allen 3 Beispielen eine deutliche Verringerung des Fehlers bei der Leistungsbestimmung mit (G.30) im Vergleich zu (G.6) und (G.12). Bei Messung B1 liegt der Fehler zur korrekt nach (G.2) gemessenen Leistung unter 1%. B2 zeigt bei Messung an den Stromquellenbuchsen den Einfluss der Schweißstromkabel, insbesondere ist R_{mp} dadurch höher als bei B1. Bei allen 3 Messungen liegt R_{mp} aber nahe am in [1] angegebenen Wert von 0,05 Ohm. Die ermittelte Modellspannung U_{mp} ist jedoch deutlich höher, als die in [1] angegebenen 14V für MSG. Dies zeigt, dass die Modellparameter von [1] nur zur Orientierung dienen können und die realen Modellparameter am Prozess ermittelt werden müssen.

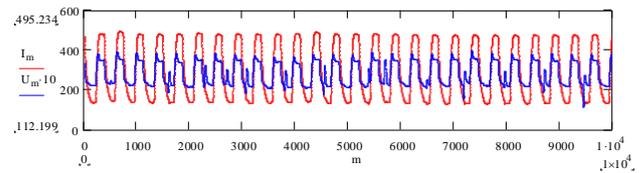


Bild 1: Zeitreihen der Messwerte eines Impulsschweißprozesses im höheren Leistungsbereich. $u(t)=U_m$, $i(t)=I_m$.

Tabelle 1: Beispiele realer Mess- und Rechenwerte

	B1	B2	B3
B1	Impulsprozess, M21, 3m/min, G3Si1, nahe am Lichtbogen gemessen, [2]		
B2	Impulsprozess, M21, 3m/min, G3Si1, an der Schweißstromquelle gemessen, 20m Schweißkabellänge, 70mm ² , [2]		
B3	Impulsprozess im höheren Leistungsbereich, nach Bild 1, nahe am Lichtbogen gemessen		
	B1	B2	B3
U_{avr} [V] (G.3)	20,2	20,6	28,1
U_{eff} [V] (G.4)	20,7	21,4	28,8
I_{avr} [A] (G.7)	74,3	74,3	289
I_{eff} [A] (G.8)	127	127	323
$U_{avr} \cdot I_{avr}$ [kW] (G.6)	1,50	1,53	8,12
$U_{eff} \cdot I_{eff}$ [kW] (G.12)	2,63	2,72	9,29
P [kW] (G.2), (G.41)	1,95	2,03	8,9
P_{mod} [kW] (G.30)	1,97	2,13	9,0
P_{avr}/P [%] (G.6/G.2)	76,97	75,4	91,3
P_{eff}/P [%] (G.12/G.2)	134,82	133,88	104,4
P_{mod}/P [%] (G.30/G.2)	100,85	104,8	101,2
R_{mp} [Ohm] (G.24)	0,044	0,056	0,042
U_{mp} [V] (G.25)	16,9	16,4	15,9
k (G.42)	0,964	0,837	0,883

Zu den Messungen B1 wird nun der entstehende Fehler diskutiert. Bild 2 zeigt den Stromverlauf $i(t)$ eines ausgewählten Zeitbereiches in hoher Auflösung. In Bild 3 sind die Zeitverläufe von Schweißprozessspannung $u(t)$ und Spannung des Modells nach (G.13) dargestellt. Die deutlichen dynamischen Unterschiede zeigen, dass (G.13) wirklich ein nur einfaches Modell darstellt, um den Prozess annähernd zu beschreiben. Aus den aus (G.13) ableitbaren Residuen (G.33) in Bild 4 ist aber erkennbar, dass durch den Vorzeichenwechsel größtenteils eine Aufhebung im Mittel stattfindet.

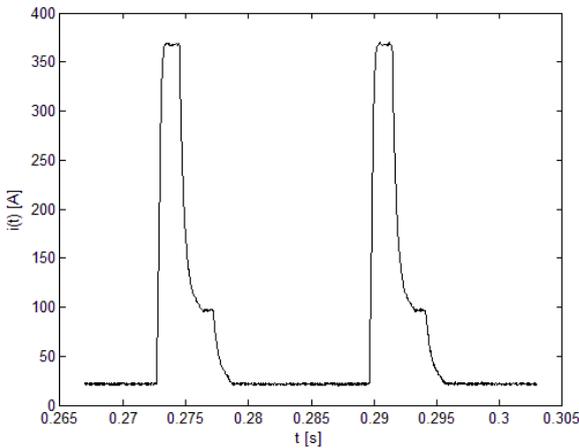


Bild 2: $i(t)$ von B1

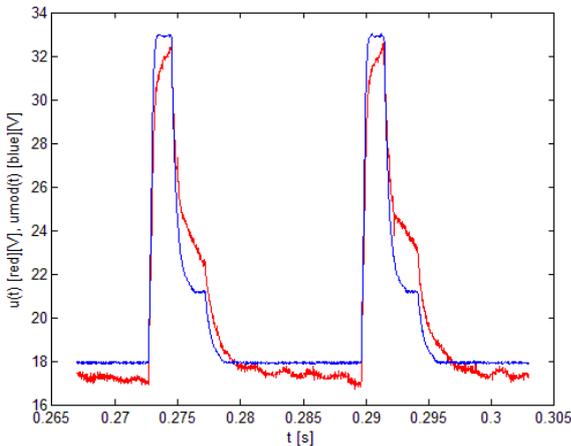


Bild 3: $u(t)$ in Rot, $u_{\text{mod}}(t)$ nach (G.13) in Blau von B1

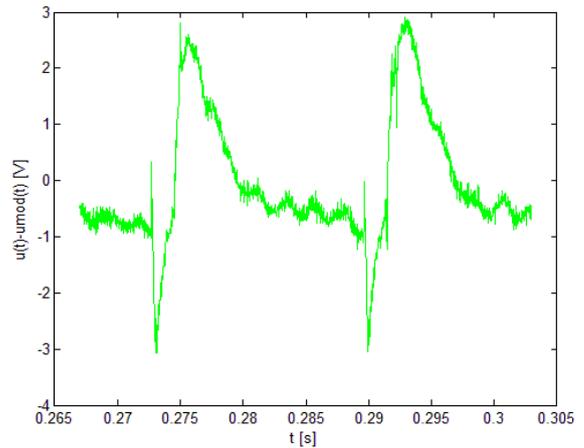


Bild 4: Zeitverlauf der Spannungsresidue (G.33) von B1

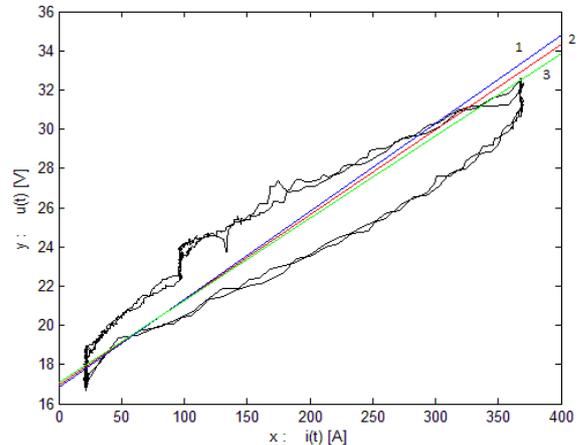


Bild 5: Illustration des geometrischen Mittels nach (G.44): $u(t)=f[i(t)]$ Darstellung von B1, sowie der Regressionsgeraden

- 1 (blau) (G.39): $y=16,8766 + 0,0448 * x$
- 2 (rot) (G.24), (G.25): $y=16,9841 + 0,0433 * x$
- 3 (grün) (G.38): $y=17,088 + 0,0419 * x$

6 Schlussbemerkungen

Die theoretischen Betrachtungen und Untersuchungen zeigen, dass für überwiegend kurzschlussfreie dynamische Lichtbogenschweißprozesse, wie insbesondere das Impulslichtbogenschweißen, durch Messung der Mittelwerte und Effektivwerte von Strom und Spannung mit Hilfe des Ausdrucks (G.30) der Mittelwert der elektrischen Lichtbogenleistung P deutlich genauer bestimmt werden kann, als nur bei Nutzung von Mittelwerten oder Effektivwerten als Leistungsprodukt nach (G.6) oder (G.12). Mit den Messwerten lassen sich auch elektrische Modellparameter für überwiegend kurzschlussfreie dy-

namische Lichtbogenschweißprozesse nach (G.24) und (G.25) einfach abschätzen.

Eine genaue Leistungsbestimmung ist mit (G.41) möglich, voraussetzend prozessabhängiger Korrekturwerte für (G.42).

Die physikalische und prozesstechnische Bedeutung der Modellparameter in (G.13) wird in den IGF-Projektberichten [4] ausführlich diskutiert.

Anwendungstechnische Bedeutung der Erkenntnisse zeigt sich praxisbezogen in [5].

7 Literatur

Diese Fachdokumentation wurde erstmalig veröffentlicht durch: B. Jaeschke, J. Kruscha: Leistungs- und Modellparameter kurzschlussfreier Lichtbogenprozesse. Fachzeitschrift „Schweißen und Schneiden“ 65 (2013), Heft 9, S. 616ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 2013.

Weitere Literaturstellen:

[1] IEC 60974-1 ed.4, Chapter 11.2 (Type test values of the conventional load voltage), INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, ARC WELDING EQUIPMENT, Part 1: Welding power sources, Beuth Verlag GmbH, Berlin

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

[3] G. Ose u.a.: Ausgewählte Kapitel der Mathematik, S.357 ff. Fachbuchverlag Leipzig, 1972.

[4] AiF-Bericht A1 und DFG-Bericht G5 auf www.inverse-modellierung.de

[5] B. Jaeschke, W. Ernst, M. Luritzhofer: Verringerung von Fehlern bei der werkstoffspezifischen Bestimmung von Streckenenergie und Wärmeeinbringung moderner Lichtbogenschweißprozesse. DVS-Berichte zum DVS Congress 2013. DVS Media, Düsseldorf 2013.