

Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens

Dr.-Ing. Birger Jaeschke, Lorch Schweißtechnik GmbH, Auenwald, Deutschland, 12.09.2016

Im Bereich des MSG-Schweißens können Anwender und Entscheider inzwischen aus einer Vielzahl von Prozessvarianten die für sie wirtschaftlichste Lösung wählen. Die Anbieter von Schweißstromquellen unterscheiden durch Wahl unterschiedlicher Begriffe ihre Prozessvarianten jedoch nicht nach einer abgestimmten Systematik, sondern nach Gesichtspunkten des Wettbewerbs. Diese unübersichtliche Situation greift das neue DVS-Merkblatt 0973 [1] auf. Es schlägt für die Teilmenge der elektronisch geregelten Prozessvarianten unter dem Begriff "Prozessregelvarianten" eine systematische Klassifizierung nach wettbewerbsneutralen technischen Kriterien vor. Unter Beteiligung von Herstellern und Institutionen wurde eine erste Übersicht bei Begriffen und Namen geschaffen. Erstmals veröffentlicht unter [6], geht dieses ergänzte und aktualisierte Dokument auf die wichtigsten Aspekte des Merkblattes ein, um Verständnis und Anwendung zu erleichtern.

1 Einführung

In den letzten Jahren sind von Schweißstromquellenherstellern viele neue Begriffe und Namen für Varianten des MSG-Schweißens geprägt worden. Die prägnanten Bezeichnungen sind verbunden mit Erwartungshaltungen der Anwender bezüglich besonderer schweißtechnischer Eigenschaften.

Das Merkblatt ist das Ergebnis einer intensiven Abstimmung von Fachleuten im Rahmen der Arbeitsgruppe V2.4 „Schutzgasschweißen mit abschmelzender Elektrode“ des Ausschusses für Technik (AFT) des DVS. Es soll in kompakter Form dem Anwender eine Übersicht geben zu den in den letzten Jahren auf den Markt gelangten Prozessvarianten des Metall-Schutzgasschweißens. Die knappen Darstellungen setzen schweißtechnisches Grundwissen beim Leser voraus.

Es hätte den Umfang des Merkblatts gesprengt, wesentlich breiter, tiefer und detaillierter auf die Vielfalt aller nur denkbaren schweißprozesstechnischen Möglichkeiten einzugehen. Es soll an dieser Stelle durchaus erwähnt werden, dass während der Entstehung des Merkblatts teilweise sehr kontroverse Diskussionen über Inhalt, Darstellung und Begriffswahl geführt wurden. Dass die Fachleute sich auf einen „kleinsten gemeinsamen Nenner“ einigen konnten, wenn auch mit Kompromissen auf vielen Seiten, lässt hoffen, dass das vorliegende Merkblatt als Basis für eine klarere Darstellung und Begriffswahl akzeptiert und regelmäßig aktualisiert wird.

Der Inhalt des Merkblattes wird hier nicht wiedergegeben. Zum Verständnis aller folgenden Erläuterungen wird dessen Lektüre daher sehr empfohlen.

Der Überblick der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens kann auf Grund laufender Weiterentwicklungen nicht vollständig sein. Daher entschieden sich die Autoren des Merkblattes für eine kombinierte Darstellung ausgewählter Schwerpunkte. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf einer Reduktion der vielen gewachsenen Begrifflichkeiten auf technisch korrekte wenige Begriffe geringer Redundanz, also kurz Vereinfachung.

Das Merkblatt betrachtet Prozessregelvarianten, welche in enger Beziehung zur elektronischen Regelung der verwendeten MSG-Schweißstromquelle stehen. Die klassischen elektronisch ungeregelten Prozessvarianten werden in der Übersicht nicht aufgeführt, da sie schon lange zum Stand der Technik und zum Inhalt der schweißtechnischen Grundausbildung gehören.

Für Prozessregelvarianten, welche nicht im Merkblatt aufgeführt sind, können die getroffenen Aussagen nicht automatisch angewandt, aber auch nicht ausgeschlossen werden. Die Merkmalsangaben zu den namentlich aufgeführten Prozessregelvarianten erfolgen in Zusammenarbeit und Abstimmung mit den engagierten Schweißstromquellenherstellern. Die Merkmalsklassen basieren auf eindeutig messbaren physikalischen Größen. Das Merkblatt soll und darf keine qualitativen Bewertungen der Prozessregelvarianten zwischen den Wettbewerbern vornehmen.

2 Kriterien zur Abgrenzung

Die knappe Konzentration des Merkblattes auf eine Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens erfordert eine klare Abgrenzung zum weiten Feld der Schweißtechnik.

Erste Grenze ist die alleinige Betrachtung der elektronisch geregelten Schweißstromquelle mit den physikalischen Größen von Strom, Spannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit. Ausgeschlossen sind also Museumstücke, Werkstoffe, Prozessgase, Hilfsmaterialien und Zubehör.

Zweite Grenze ist die Beschränkung auf einen alleinigen Lichtbogen als Prozessenergiequelle. Ausgenommen sind also Prozessvarianten mit mehreren Drähten, mehreren Energiequellen oder Hybride.

Die dritte, erklärungsbedürftigste und auch etwas unscharfe Beschränkung erfolgt durch den Focus auf „besondere“ Prozessregelvarianten. Eingeschlossen in die Betrachtung sind physikalische Effekte und Merkmale, welche zu unterschiedlichen Prozesseigenschaften führen können.

Das „klassische“ MSG-Schweißen soll hierbei als Referenz dienen. Allein die Begrifflichkeit ist hier eine erste Hürde.

Alternative Begriffe für „klassisch“ sind: Standard, normal, manuell, konventionell, ungeregelt, historisch und andere mehr. Im weltweit angewandten Standard IEC/EN 60974-1 [2] für professionelle Schweißstromquellen ist eine genormte Lastkennlinie $U = 14V + 0,05\Omega \cdot I$ für vergleichbare Typprüfungen von MSG-Schweißstromquellen vorgegeben, aber als Referenz für den realen MSG-Schweißprozess ist sie nicht vorgesehen und auch nicht für alle Material-, Draht- und Schutzgaskombinationen geeignet. Hinzu kommt weiterhin, dass elektronisch geregelte (auch digitale) Schweißstromquellen dieses „klassische“ Schweißstromquellenverhalten fast perfekt nachbilden können und in manchen Prozessregelvarianten dies auch wirklich tun.

Das heißt, allein die Bauart der elektronisch geregelten Schweißstromquelle legt noch nicht fest, ob diese Schweißstromquelle eine besondere Prozessregelvariante im Betrachtungsbe- reich dieses Merkblattes aufweist.

3 Leistungsbestimmung als Kriterium

Derzeit in Diskussion als mögliches Abgrenzungskriterium ist die Art der erforderlichen Leistungsbestimmung.

Es lässt sich elektrotechnisch begründen, dass die historisch angewandte Formel zur Bestimmung der elektrischen Leistung durch Multiplikation von Strom- und Spannungsmittelwert unter praktischen Bedingungen tatsächlich eine hinreichende Genauigkeit über alle Leistungsbereiche nur für das „klassische“ MSG-Schweißen aufweist.

Ebenso lässt sich mathematisch herleiten, dass für komplexere Prozessregelvarianten eine korrekte Leistungsbestimmung durch Multiplikation von Strom- und Spannungsmittelwert definitiv nicht erfolgen kann, siehe [3], [4], [5].

„Klassische“ annähernd horizontale Ausgangsspannungskennlinie:

Schweißstromquellen für das „klassische“ MSG-Schweißen besitzen überwiegend eine lineare, leicht fallende, fast horizontale Ausgangsspannungskennlinie, welche nicht ganz korrekt auch als Konstantspannungskennlinie (engl. CV, Constant Voltage) bezeichnet wird. Zur Beeinflussung der Dynamik des Schweißstromes besitzen diese „klassischen“ MSG-Schweißstromquellen eine reale Drossel (mit Eisenkern), welche energetisch symmetrisch ist, d.h. die vom Magnetfeld der Drossel während einer Kurzschlussphase aufgenommene Energie wird ab Beginn der nächsten Lichtbogenphase auch wieder in den Schweißstromkreis abgegeben, siehe insbesondere detailliertere Erläuterungen in [3].

Die mittlere Ausgangsspannung \bar{U} der Schweißstromquelle entspricht dann folgender Funktion:

$$\bar{U} = U_K - R_i \cdot \bar{I} \quad (\text{G.1}).$$

Hierbei ist U_K die (unbelastete) Konstantspannung der Schweißstromquelle und R_i bestimmt als modellhafte Widerstandsgröße die stromabhängige lineare U-I-Kennlinienneigung. U_K entspricht bei derartigen „klassischen“ MSG-Schweißstromquellen in etwa auch der Leerlaufspannung der gewählten Transformatorstufe.

\bar{U} und \bar{I} sind die arithmetischen Mittelwerte von Schweißspannung und Schweißstrom. Derartige Schweißstromquellen interagieren mit dem MSG-Schweißprozess im Sinne der bekannten „klassischen“ inneren Regelung und erlauben eine korrekte Leistungsbestimmung \bar{P} des Lichtbogens mit der Beziehung:

$$\bar{P} = \bar{U} \cdot \bar{I} - R_i \cdot (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2) \quad (G.2).$$

\tilde{I} ist der Effektivwert (quadratischer Mittelwert) des Schweißstromes. Im praktischen Gebrauch wird der Term $R_i \cdot (\tilde{I}^2 - \bar{I}^2)$ sehr klein und wird üblicherweise vernachlässigt.

Somit kann für „klassische“ MSG-Schweißprozesse die bekannte Formel zur Leistungsbestimmung angewandt werden:

$\bar{P} \approx \bar{U} \cdot \bar{I}$ wenn Schweißstromquelle „klassisch“.

Im Umkehrschluss mit besonderem Hinweis auf das Ungleichheitszeichen lässt sich folgern:

$\bar{P} \neq \bar{U} \cdot \bar{I} \rightarrow$ besondere Prozessregelvariante.

Überwiegend kurzschlussfreie dynamische Prozessregelvarianten:

Für das überwiegend kurzschlussfreie Impulsschweißen, für das gerade durch das klassische Vorgehen die Leistungsbestimmung am ungenauesten ist, erschließt sich eine andere Möglichkeit der vereinfachten Leistungsbestimmung.

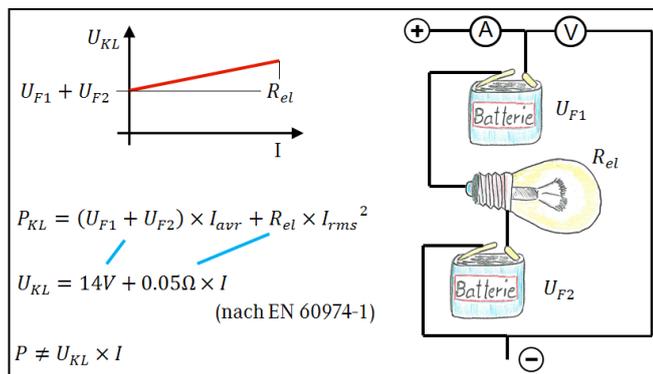


Bild 1: Elektrisches Ersatzschaltbild für ein einfaches Lichtbogenschweißprozessmodell

Für überwiegend kurzschlussfreie Prozesse kann unter Annahme eines linearen Lichtbogenschweißprozessmodells (Bild 1)

$$U_{\text{mod}} = U_{mp} + R_{mp} \cdot I$$

folgende Gleichung (Gl.3) nach [4] hergeleitet werden:

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

Der Ergebniswert \bar{P}_{mod} ist der Mittelwert der Leistung, der am linearen Lichtbogenschweißprozessmodell ermittelt wird.

Obwohl der reale Schweißprozess gewiss Abweichungen gegenüber dem linearen Lichtbogenschweißprozessmodell aufweist, ist mit (Gl.3) eine deutliche Verringerung des Fehlers bei der Bestimmung der elektrischen Leistung möglich. Es ist aber unbedingt zu beachten, dass (Gl.3) nur für überwiegend kurzschlussfreie Lichtbogenschweißprozesse gültig ist.

Alle anderen Prozessregelvarianten, oder allgemeine Lösung:

Die elektrische Lichtbogenleistung für besondere Prozessregelvarianten ist unbedingt als realer Wirkleistungswert nach (G.4) zu messen, um die energetischen Wirkungen verschiedener Einstellungen und Prozessregelvarianten vergleichen zu können:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int [u(t) \cdot i(t)] dt \quad (G.4).$$

Es wird hier auch verwiesen auf die ISO/TR 18491: Guidelines for measurement of welding energies [7]. Sie benennt betroffene Prozessregelvarianten als „waveform controlled welding processes“ oder „if any doubt exists“ und bezeichnet die entsprechende richtige Berechnung nach (G.4) als "instantaneous energy, instantaneous power". Verwendet im amerikanischen Sprachraum wird anstelle von "instantaneous" auch "true" oder "real".

4 Inhalt des Merkblattes

Das Merkblatt greift (im Stand vom Jahr 2015) Themenpunkte in folgender Kapitelstruktur auf:

1. Einleitung
2. Gerätetechnik
3. Werkstoffübergang (Lichtbogenart)

- 3.1. Möglichkeiten
- 3.2. Werkstoffübergang im Kurzschluss
- 3.3. Kurzschlussfreier Werkstoffübergang
4. Technologische Wirkungen
 - 4.1. Wärmeeinbringung
 - 4.2. Kraftwirkungen
 - 4.3. Komplexe Zusammenhänge
5. Prozessregelvarianten
 - 5.1. Innere und äußere Regelung
 - 5.2. Ungeregelter Kurzlichtbogen
 - 5.3. Geregelter / modifizierter Kurzlichtbogen
 - 5.3.1. Spritzerarmer Kurzlichtbogen
 - 5.3.2. Energiereduzierter Kurzlichtbogen
 - 5.3.3. Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen
 - 5.4. Sprühlichtbogen
 - 5.5. Modifizierter Sprühlichtbogen
 - 5.6. Konventioneller Impulslichtbogen
 - 5.7. Modifizierter Impulslichtbogen
 - 5.8. Wechselstromprozesse
 - 5.9. Kombinierte Prozessvarianten
 - 5.10. Zyklische Drahtbewegung
6. Anwendung
 - 6.1. Technologische Zuordnung
 - 6.2. Wärmeeinbringung, Streckenenergie
 - 6.3. Einstellung und Bedienung
7. Herstellerbezeichnungen
8. Schrifttum
 - 8.1. Regelwerk
 - 8.2. Literatur

Ergänzt wird das Merkblatt durch eine tabellarische Übersicht von herstellerspezifischen Prozessregelvarianten und deren Zuordnung zu Merkmalsklassen, welche aus obiger Kapitelstruktur entstehen.

5 Energiereduzierte Prozessregelvarianten

Mit dem medialen Schlagwort „Energiereduktion“ werden derzeit unterschiedliche Aspekte verbunden:

- energiereduziert (energieeffizient) im Sinne eines geringen Energieverbrauchs beim Schweißen zur Ressourcenschonung;
- energiereduziert im Sinne eines geringen Wärmeeintrages in das Werkstück.

Beide Aspekte stehen in einem Zusammenhang, bedingen sich aber nicht zwangsläufig

gegenseitig. Bei der Bewertung energiereduzierter Prozessregelvarianten ist daher stets genau zu definieren, welcher Aspekt betrachtet wird und auf was die Energiereduktion bezogen wird. Daher enthält das Merkblatt keine allgemeine Klasse zu energiereduzierten Prozessregelvarianten.

Eine Energiereduktion im Sinne eines geringen Energieverbrauchs beim Schweißen zur Ressourcenschonung ist auf vielfältige Weise erreichbar, sogar schon vorbereitend bei der fütgetechnischen Planung.

Explizit wird im Merkblatt auf den energiereduzierten Kurzlichtbogen eingegangen, weil die Energiereduktion im Sinne eines geringen Wärmeeintrages in das Werkstück hier am stärksten ausgeprägt ist.

Für diese besonderen Prozessregelvarianten gilt bei der Leistungsbetrachtung unbedingt $\bar{P} \neq \bar{U} \cdot \bar{I}$ (Ungleichheit) zu beachten.

Das bedeutet, dass ein Vergleich untereinander und zu anderen Prozessregelvarianten über die Mittelwerte (Anzeigewerte) von Strom und Spannung nicht fehlerfrei möglich ist. Hierfür ist unbedingt die tatsächliche (wahre) elektrische Wirkleistung nach (G.3) zu messen, bzw. von der Schweißstromquelle korrekt anzeigen zu lassen.

6 Technologische Zuordnung

Die MSG-Prozessregelungsvarianten gehören prinzipiell zum Metall-Schutzgasschweißen (13) – Metall-Inertgas-Schweißen (MIG, 131) / Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG, 135).

Die Prozessregelvarianten sind entsprechend den Empfehlungen des jeweiligen wissenstragenden Herstellers einzusetzen und in ihren Eigenschaften zu bewerten.

Das mögliche Prozessfenster des MSG-Schweißens wird durch die Prozessregelvarianten erweitert, vergl. **Bild 2**.

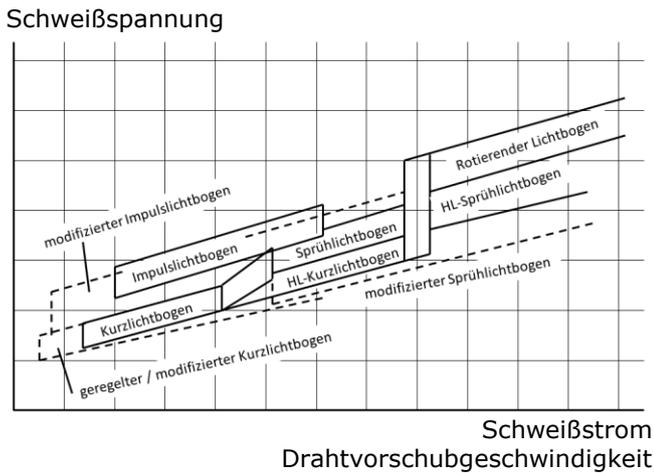


Bild 2: Prinzipielle Lage von Prozessfenstern und deren Erweiterungen durch modifizierte Prozessregelvarianten

7 Austauschbarkeit

Sind Prozessregelvarianten verschiedener Hersteller oder unterschiedlichen historischen Entwicklungsstandes austauschbar? Können Schweißprozessanweisungen, die auf Grund von Arbeitsproben einer Prozessregelvariante A entstanden sind, auf eine Prozessregelvariante B übertragen werden?

Die Antwort lautet: Nicht einfach so. Allein theoretische Schlussfolgerungen reichen für verlässliche Aussagen nicht aus. Grund für diese ernüchternde Aussage ist, dass selbst Prozessregelvarianten exakt identischer Merkmalsausprägung in besonderen Details

oder in einzelnen Parameterwerten sich energetisch unterscheiden können. Der Anwender kommt also um Versuche und Vergleichsmessungen nicht herum. Hilfreich ist das Merkblatt dennoch. Identische Merkmalsausprägungen von Prozessregelvarianten können das Versuchsfeld eingrenzen. Hingegen weisen viele unterschiedliche Merkmale auf eine geringe Verwandtschaft hin.

Der Einfluss der Geräte auf die Anwendbarkeit bei Standardverfahrensprüfungen (WPS) kann ein strittiger Punkt sein. In [8] klar hervorgehoben, dass Verfahrensprüfungen gerätespezifisch sein müssen, ansonsten ist mindestens die elektrische Vergleichbarkeit bei der Anwendung anderer Geräte nachzuweisen.

8 Übersicht der MSG-Prozessregelvarianten

Die in der Tabelle aufgelisteten Prozessregelvarianten sind alphabetisch nach Namen sortiert.

Die Kreuze in den jeweiligen Spalten geben an, dass die betreffende Prozessregelvariante dieses Merkmal aufweist. So entsteht für jede Prozessregelvariante eine Merkmalsausprägung. Prozessregelvarianten identischer Merkmalsausprägung sind funktionell einander verwandt. Sie sind jedoch nicht identisch, denn die Hersteller können sie unterschiedlich parametrisiert haben.

Eingetragene Prozessregelvarianten von Lorch im DVS Merkblatt 0973, Beiblatt 1 (2015)

Bezeichnung	Hersteller	Merkmalsklassen									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
SpeedArc	Lorch	X			X	X					
SpeedCold	Lorch	X		X							
SpeedPulse	Lorch						X	X			
SpeedRoot	Lorch	X	X								
SpeedUp	Lorch	X					X	X		X	X

Merkmalsklassen:	
(A) Geregelter Kurzlichtbogen, Kapitel 5.3	(F) Impulslichtbogen, Kapitel 5.6
(B) Spritzerarmer Kurzlichtbogen, Kapitel 5.3.1	(G) Modifizierter Impulslichtbogen, Kapitel 5.7
(C) Energiereduzierter Kurzlichtbogen, Kapitel 5.3.2	(H) Wechselstromprozess, Kapitel 5.8
(D) Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen, Kapitel 5.3.3	(I) Kombinierte Prozessvariante, Kapitel 5.9
(E) Modifizierter Sprühlichtbogen, Kapitel 5.5	(J) Zyklische Drahtbewegung, Kapitel 5.10

9 Quellenangaben

- [1] DVS-Merkblatt 0973 „Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens“, DVS-Media; auch veröffentlicht in Schweißen und Schneiden 66 (2014), Heft 9, S. 538 ff., DVS Media GmbH, Düsseldorf
- [2] 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
- [3] B. Jaeschke, J. Kruscha: Leistungs- und Modellparameter kurzschlussbehafteter Lichtbogenprozesse, Schweißen und Schneiden 67 (2015), Heft 11, S. 674ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 2015.
- [4] B. Jaeschke, J. Kruscha: Leistungs- und Modellparameter kurzschlussfreier Lichtbogenprozesse. Fachzeitschrift „Schweißen und Schneiden“ 65 (2013), Heft 9, S. 616ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 2013.
- [5] 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.
- [6] B. Jaeschke: Durchblick verloren? - Übersicht der Prozessregelvarianten zum MSG-Schweißen, DVS-Berichte Band 315, DVS-Congress 2015, S. 76 ff., DVS Media, Düsseldorf 2015.
- [7] ISO/TR 18491:2013, Guidelines for measurement of welding energies
- [8] DVS-Verband, Zentralverband der Elektroindustrie (ZVEI): Merkblatt "Übertragbarkeit von Standardschweißverfahrensprüfungen (WPS)", Juli 2015