

**Inhalt:**

- 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

**1 Einleitung**

Das Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG-Schweißen) ist das am häufigsten angewendete Lichtbogenschmelzschweißverfahren.

Im Gegensatz zu den klassischen MSG-Schweißgeräten auf Basis netzfrequenzbetriebener Transformatoren sind die heute auf dem Markt befindlichen Typen überwiegend digital gesteuerte programmierbare Schweißgeräte. Diese Möglichkeiten lassen neue Prozessvarianten mit gezielt angepassten technologischen Eigenschaften zu. Es entstehen neue Begriffe und Namen, welche firmenspezifisch verwendet werden [2]. Für den Anwender ist dadurch das technologische Feld des MSG-Schweißens unübersichtlich geworden.

Dieses Merkblatt soll dem Anwender helfen, sich im Bereich der verschiedenen MSG-Prozessregelvarianten zu orientieren.

**2 Gerätetechnik**

Bei klassischen Stromquellen für das MSG-Schweißen wird das statische und dynamische Verhalten von Strom und Spannung während des Schweißprozesses im Wesentlichen durch den konstruktiven Aufbau des Gerätes (Transformator, die Schweißkreisdrosseln und die Netzspannung und Netzfrequenz (50/60 Hz) bestimmt.

Die Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muss jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Hingegen hat der konstruktive Aufbau elektronischer (moderner) Stromquellen für das MSG-Schweißen nahezu keinen Einfluss auf das Schweißverhalten. Auch die Netzfrequenz ist ohne Bedeutung auf das dynamische Verhalten.

Basis moderner Schweißanlagen sind leistungselektronisch geregelte digital gesteuerte Schweißstromquellen sowie das an die Prozessregelvarianten angepasste technologische Zubehör.

Die Steuerungen messen Schweißstrom sowie Schweißspannung und reagieren entsprechend der prozesstechnischen Auslegung (z.B. mit Triggerpunkten auf Ereignisse), um den Schweißprozess gezielt zu beeinflussen.

Das technologische Umfeld entspricht im Wesentlichen weiterhin dem des klassischen MSG-Schweißens.

**3 Werkstoffübergang (Lichtbogenart)****3.1 Möglichkeiten**

Der Übergang des Werkstoffes von der abschmelzenden Elektrode zum Werkstück erfolgt beim MSG-Prozess dynamisch in Abhängigkeit der energetisch beeinflussenden Größen entweder im Kurzschluss oder Kurzschlussfrei in der Lichtbogenphase.

Auch elektronisch geregelte MSG-Prozessregelvarianten lassen sich auf ihren wesentlichen Eigenschaften den bekannten Lichtbogenarten Kurzlichtbogen, Mischlichtbogen, Sprühlichtbogen und Impulslichtbogen zuordnen.

Im Unterschied zum klassischen MSG-Schweißen werden durch MSG-Prozessregelvarianten die Eigenschaften aber spezifisch verändert, um bestimmte Vorteile zu erschließen.

Diese betreffen zum einen quantitative Aspekte, wie die Erweiterung des für den spezifischen Lichtbogenartyp möglichen Prozessfensters, zum anderen qualitative Aspekte, wie Prozessstabilität und Fehlervermeidung.

Folgende Möglichkeiten werden bezüglich des Werkstoffübergangs überwiegend genutzt:

- Veränderung von Zeitdauer und Häufigkeit des Werkstoffübergangs im Kurzschluss;
- Einschränkung von Ursachen für die Bildung von Spritzern bei Kurzschlussbehaftetem Werkstoffübergang;
- Beeinflussung von Beginn und Ende des Werkstoffübergangs durch Veränderung der Bewegungsrichtung der abschmelzenden Elektrode;
- Verkürzung der überwiegend kurzschlussfrei beherrschbaren Lichtbogenlänge im Sprühlichtbogen
- zeitliche Kombination von verschiedenen Arten des Werkstoffübergangs;
- Beeinflussung von Einbrand- und Nahtgeometrie mittels des Werkstoffübergangs.

Um den Werkstoffübergang anzuregen, wird die Drahtelektrode durch den Stromfluss erhitzt (Widerstandserwärmung). Zusätzlich erwärmt der Lichtbogenansatz an der abschmelzenden Elektrode diese so weit, dass sich dort ein schmelzflüssiges Volumen bildet. Das Aufschmelzen der Drahtelektrode durch den Lichtbogen gestaltet sich in Abhängigkeit des vorliegenden Stromverlaufes und der elektrischen Polarität der abschmelzenden Elektrode.

Bei MSG-Prozessregelvarianten wird oft in den Prozess eingegriffen, um den Beginn des Werkstoffübergangs gezielt und regelmäßig auszulösen. Dies kann z.B. geschehen durch:

- einen hohen (Impuls-)Strom zur Auslösung eines projektilen Werkstoffübergangs, der sowohl kurzschlussfrei, als auch gewollt kurzschlussbehaftet erfolgen kann;
- oder durch gezielte Bewegung des Drahtes zur Verkürzung des Lichtbogens bis zum Kurzschluss;
- oder durch besondere Absenkung des Stromes zur Provokierung eines Kurzschlusses.

### 3.2 Werkstoffübergang im Kurzschluss

Kurzschluss entsteht bei Berührung der vorwärtsbewegten geschmolzenen Drahtelektrodenspitze mit der Werkstückoberfläche (Schmelzbad). Der Werkstoffübergang wird durch die Oberflächenspannung aufrechterhalten, d.h. es erfolgt ein Überfließen des Tropfens in das Bad. Trägheitskräfte des zuvor beschleunigten flüssigen Werkstoffs führen zu einem schnelleren Werkstoffübergang.

Folgende Effekte können zur Beendigung der Kurzschlussphase bei kurzschlussbehafteten Werkstoffübergängen wirken:

- durch den Stromfluss hervorgerufene elektromagnetische Kräfte schnüren die schmelzflüssige Brücke ein (strombedingter Pinch-Effekt);
- die flüssigen Brücke zwischen Elektrode und Schmelze kann durch strombedingte Widerstandserwärmung mit teilweise explosiver Verdampfung „durchbrennen“;
- wenn der überwiegende Anteil des flüssigen Volumens vom Draht übergegangen ist, kann eine Wegbewegung des Schmelzbades (durch Eigenschwingung) die Kurzschlussbrücke trennen;
- ein Stoppen und mechanisches Zurückziehen der Drahtelektrode aus dem Schmelzbad trennt ebenso die Kurzschlussbrücke.

Über die Art der Beendigung des kurzschlussbehafteten Werkstoffübergangs können vielfältige Wirkungen bezüglich des Gesamterscheinungsbildes des Prozesses erreicht werden.

### 3.3 Kurzschlussfreier Werkstoffübergang

Die elektromagnetischen Kräfte an der stromdurchflossenen abschmelzenden Elektrode bewirken bei hinreichendem Größe (Strom, Stromdichte) einen Transport von flüssigem Elektrodenmaterial in Richtung Schmelzbad durch den Lichtbogenraum hindurch. Beim klassischen Sprühlichtbogen liegt ein natürlicher (ungesteuerter) Beginn des Übergangs vor, während ein künstlicher (gesteuerter) Beginn des Übergangs beim Impulslichtbogen gezielt ausgelöst wird. Der von der schmelzflüssigen Elektrode abgelöste Werkstoff durchfliegt die Strecke bis zur Schmelzbadoberfläche. Es wirken die Trägheitskräfte des zuvor beschleunigten flüssigen Werkstoffs, Kräfte durch Metalldampf-, Plasma- und Gasströmungen, sowie elektromagnetische Kräfte. Es treten komplexe Wechselwirkungen im Bereich des Lichtbogens auf, welche sich durch Steuerung des Stromverlaufes während dieser zeitlichen Phase in ihrer Wirkung gezielt beeinflussen lassen.

## 4 Technologische Wirkungen

### 4.1 Wärmeeinbringung

Die gesamte Wärmeeinbringung lässt sich 4 physikalischen Effekten zuordnen:

- der Widerstandseinbringung des stromdurchflossenen Drahtendes;
- der Erwärmung des Lichtbogenvolumens;
- des Energieumsatzes an der Kathode (-);
- und des Energieumsatzes an der Anode (+).

Gleichzeitig erfolgt ein Energieabfluss in die Umgebung, so dass nur ein Teil der elektrischen Energie in das Werkstück eingebracht wird (thermischer Wirkungsgrad des Prozesses). Die Wärme-

einbringung verändert sich durch die Stromrichtung, Stromhöhe, Lichtbogenlänge und Schweißgeschwindigkeit. Die im Zusammenhang mit dem Lichtbogen existierende hohe Temperatur führt zur Metalldampfbildung im Lichtbogenbereich. Vom Lichtbogenvolumen abgestrahlte Energie trägt zur Erwärmung von Werkstoffoberflächen bei.

### 4.2 Kraftwirkungen

Die stromdurchflossenen Lichtbogenbereiche üben elektromagnetische Kraftwirkungen auf die Umgebung aus. Es entstehen Wechselwirkungskräfte mit dem schmelzflüssigen Material, sowie mit dem umgebenden elektromagnetischen Feld. Der Lichtbogen wirkt als Generator für Strömungen und Druckwellen im Lichtbogenplasma, im umgebenden Schutzgas und der Schmelze. Das übergehende schmelzflüssige Material bringt sich mit Impuls und kinetischer Energie in das Schmelzbad ein und beeinflusst dessen Strömungen.

### 4.3 Komplexe Zusammenhänge

Zusammen mit dem übergehenden schmelzflüssigen Material hat der Lichtbogen Einfluss auf das Aufschmelzen des Grundmaterials (Einbrand) und das Erstarrungsverhalten.

Durch die Lichtbogenansatzfläche entstehen weitere Oberflächenwirkungen:

- z. B. bei Aluminium eine „Reinigungswirkung“ bezüglich der Oberflächen-oxidchicht;
- Beeinflussung des physikalisch-chemischen Verhaltens.

Im Allgemeinen bestehen folgende Wirkzusammenhänge:

- kürze Länge → Energiedichte steigt, Energie menge sinkt;
- die Polariät (+/-) der abschmelzenden Drahtelektrode beeinflusst die geometrische Lichtbogenform, die Wärmebilanz und den Werkstoffübergang;
- elektromagnetische Kraftwirkungen steigen mit der Stromstärke an (z. B. Einschnürung);
- Die Lichtbogenspannung entsteht in komplizierter Wechselwirkung mit der Lichtbogenlänge, dem Lichtbogenplasma, physikalischen Oberflächen- und Feldwirkungen. Sie ist damit vielfältig abhängig von allen im Lichtbogenbereich existierenden chemischen Elementen und Verbindungen.

## 5 Prozessregelvarianten

### 5.1 Innere und äußere Regelung

Die Grundprinzipien des klassischen MSG-Schweißens sind mit den Begriffen der „inneren“ und „äußeren Regelung“ verbunden. Eine Schweißstromquelle mit nur schwach geneigter U-I-Kennlinie reagiert bei sinkender Lichtbogenspannung mit einer Erhöhung des mittleren Schweißstromes und bei steigender Lichtbogenspannung mit dessen Verringerung. Dieses Verhalten der Schweißstromquelle, aus den elektrischen Gegebenheiten von innen heraus den Schweißprozess zu stabilisieren, wird klassisch auch „innere Regelung“ (oder Delta-I-Regelung) genannt. Im Sinne der allgemeinen technischen Beschreibung des Begriffs Regelung (Systemtheorie) ist das jedoch keine echte Regelung. Die klassischen Schweißstromquellen werden im Folgenden daher als „ungeregelt“ bezeichnet, um eine technisch und begrifflich korrekte Unterscheidung zu den tatsächlich elektrisch geregelten Schweißstromquellen zu treffen. Das Prinzip der klassischen „inneren Regelung“ wird in optimierter Form zur Stabilisierung des Prozesses auch bei geregelten Schweißstromquellen angewandt, oftmals jedoch in Kombination mit weiteren Methoden.

Als „äußere Regelung“ werden Eingriffe von außen, z.B. auf die Drahtvorschubgeschwindigkeit, bezeichnet, welche die Lichtbogenlänge stabilisieren. In moderner Form wird dieses Prinzip mit hochdynamischen Drahtvorschubeinrichtungen angewandt.

### 5.2 Ungeregelter Kurzlichtbogen

Bei dieser klassischen Lichtbogenart wird der Kurzschlussstrom