

SpeedUp – ein äußerst wirtschaftlicher MSG-Lichtbogenschweißprozess

Dr.-Ing. Birger Jaeschke, Lorch Schweißtechnik GmbH, Auenwald, Deutschland, 23.01.2014

Die leistungsfähigen Steuerungen der S-Serie, die langjährigen Erfahrungen und nicht zuletzt die Innovationskraft der Mitarbeiter von Lorch haben eine neue Qualität und Wirtschaftlichkeit beim MSG-Schweißen in Zwangslagenpositionen mit der Prozessregelvariante „SpeedUp“ geschaffen. Diese Fachdokumentation beleuchtet Hintergründe und erreichbare Vorteile.

1 Einleitung

Beim MSG-Schweißen sind im praktischen Einsatz die schweißtechnisch gut beherrschbaren Wannen- oder Horizontalpositionen oft nicht möglich. Schweißnähte in vertikaler Position stellen erhöhte Anforderungen an den Verfahrensablauf, da Erdanziehungskräfte auf das flüssige Material des Schmelzbades wirken.

Vertikale Kehlnähte geringer Stärke können gegebenenfalls (wenn zulässig) mit relativ hoher Schweißgeschwindigkeit von oben nach unten (fallend, Position PG) geschweißt werden, wobei das flüssige Schmelzgut von oben in den Lichtbogenbereich hineindrängt.

Beim Schweißen von vertikal steigenden Kehlnähten (Position PF), insbesondere im Blechdickenbereich ab 5mm, wird der Effekt der Schmelzbadabstützung durch bereits erstarrtes Schweißgut genutzt. Oft ist eine besondere Elektrodenbewegung (vergl. **Bild 1**) erforderlich, um das nötige Gleichgewicht bezüglich der Einbringung von schmelzflüssigem Schweißgut und Wärmeenergie einerseits und der Schmelzbadabstützung durch erstarrtes Material und dem Schweißfortschritt (Schweißgeschwindigkeit) andererseits zu halten. Auf Grund dieser Komplexität besteht eine erhöhte Gefahr von Schweißnahtfehlern.

Hilfreich kann für das MSG-Steignachtschweißen auch eine durch erstarrende Schlacke gebildete Schmelzbadabsicherung sein, wobei hierfür überwiegend rutilhaltige Fülldrähte verwendet werden. Dabei treten jedoch unerwünschte Nebeneffekte gegenüber Volldrahtelektroden auf, z.B. deutlich stärkere Rauchemission. Ebenso verändert sich die Kostenrechnung durch höhere Drahtkosten, weiterhin ist das Arbeiten im erforderlichen Sprühlichtbogenbereich bei dünneren Blechstärken nicht mehr einsetzbar.

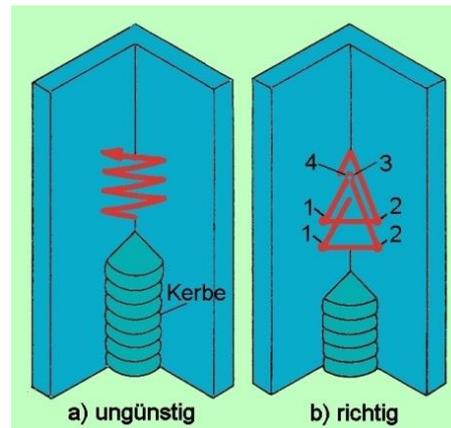


Bild 1: Empfehlungen zur Elektrodenführung für das Steignachtschweißen; Bildquelle: Der Schweißer / Informationen für Praktiker, DVS-Verlag, 9/2009

Generell nehmen die Schwierigkeiten beim Schweißen von Steignähten mit geringerer Blechstärke zu. Die teilweise oder vollständige Automatisierung von Schweißaufgaben, die Steignähte erfordern, ist aus den genannten Gründen sehr problematisch.

2 Stand der Technik vor SpeedUp

Das Steignachtschweißen war vor der Einführung von SpeedUp eine riskante Sache, denn dem Schweißer wurde beim Steignachtschweißen ein sehr hohes Maß an Können und Verantwortung abverlangt. Manche sind damit überfordert. **Bild 2** zeigt das Laienstück einer Steignacht in Stahl.

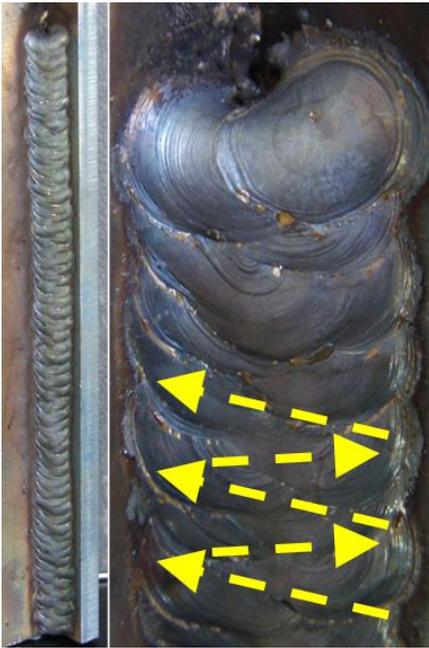


Bild 2: Fehlerhafte Steignachtschweißung durch ungünstige Elektrodenführung (Stahl 8mm, M21, 1mm G3Si1)

Der unbedarfte Anwender hat durch ein Links-Rechts-Pendeln das Gleichgewicht zwischen Einbringung und Erstarrung von schmelzflüssigem Werkstoff so gesteuert, dass die notwendige Schmelzbad-Stütze entstand und die Naht vertikal geschweißt und oberflächlich geschlossen werden konnte. Es entstand sogar eine optisch ansprechende Oberfläche.

Eine Untersuchung der gebrochenen Naht zeigt jedoch, dass an die Festigkeit der Naht keine hohen Ansprüche gestellt werden dürfen, **Bild 3**.

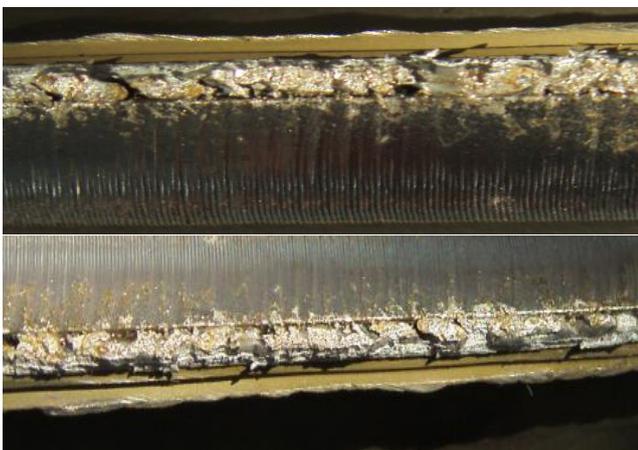


Bild 3: Einfräsung und Bruch zur Untersuchung der fehlerhaften Schweißung von Bild 2.

Die Wurzel des T-Stoßes wurde überhaupt nicht erfasst, auf Grund der verborgenen Bindefehler ist diese Naht sogar sehr gefährlich, denn das Oberflächenbild suggeriert eine vermeintliche Sicherheit.

Man kann nur jedem Auftraggeber wünschen, dass ihm solche Schweißfehler nicht unterkommen, oder wenigstens, dass er sie durch entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen ausschließen kann. Aber einmal geschweißte Kehlnähte kann man nicht so einfach röntgen oder mit Ultraschall untersuchen.

Für das Steignachtschweißen ist also unbedingt eine entsprechende Qualifizierung des Schweißers und regelmäßige Übung erforderlich. Bei genügender Übung und Ansporn kann die empfohlene Dreiecksbewegung recht schnell und raumgreifend ausgeführt werden. Obwohl schön regelmäßig geschuppt, das äußere Nahtbild (**Bild 4**) zeigt bereits, dass hier zu schnell gemacht wurde. Die Nahtschuppung ist zu grob.

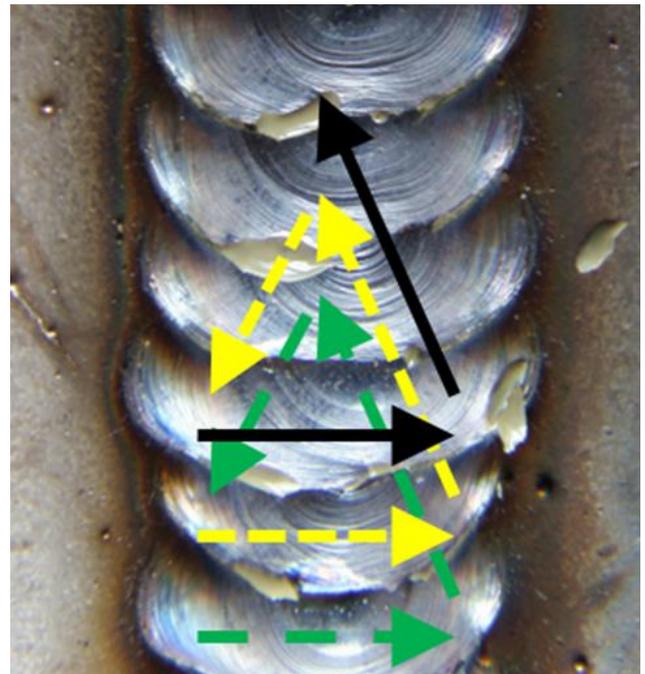


Bild 4: Steignacht zu hastig geschweißt (Stahl 8mm, M21, 1mm G3Si1)

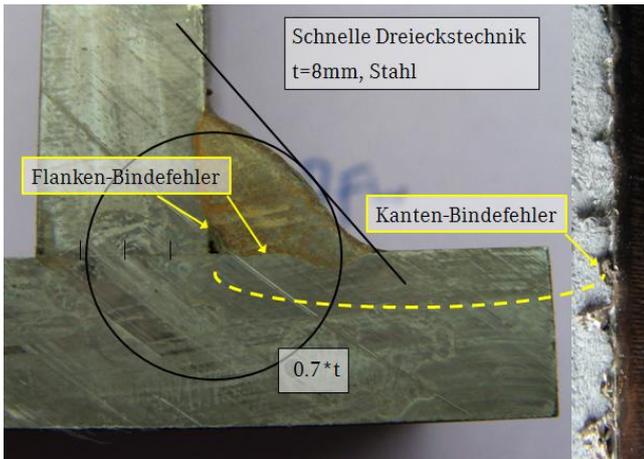


Bild 5: Steignaht zu hastig geschweißt, Bindefehler im Bruch und Schliff erkennbar (Stahl 8mm, M21, 1mm G3Si1)

Was äußerlich schon zu befürchten war, bestätigt sich im **Bild 5** auch im Bruch und Schliff. Die Bruchprobe zeigt auch hier Bindefehler. Die zu hastige Brennerbewegung hat zu einer mangelhaften Naht geführt. Der zum Vergleich angedeutete Bereich der maximal empfohlenen Nahtdicke ($0.7 \cdot t$) dient zur Orientierung bei der Einschätzung der Nahtdicke (a-Maß).

Eine weitere Schweißung (von einem anderen Schweißer) ist in **Bild 6** dargestellt, das Ergebnis der Bruchprobe in **Bild 7**. Der Schweißer hat mit hoher Lichtbogenwärme gearbeitet und das Schmelzbad dennoch im Griff behalten, die Schuppung der Nahtoberfläche deutet darauf hin. Im Bruch zeigt sich eine starke Wellenförmigkeit des Einbrandes.

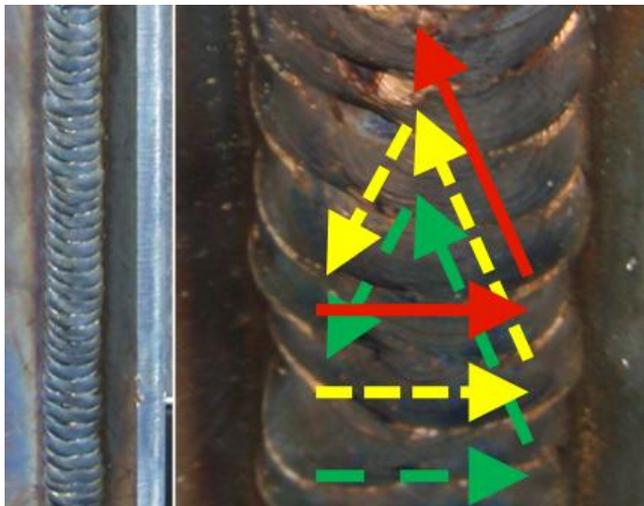


Bild 6: Ein anderer Schweißer mit mehr Energie (Stahl 8mm, M21, 1mm G3Si1)

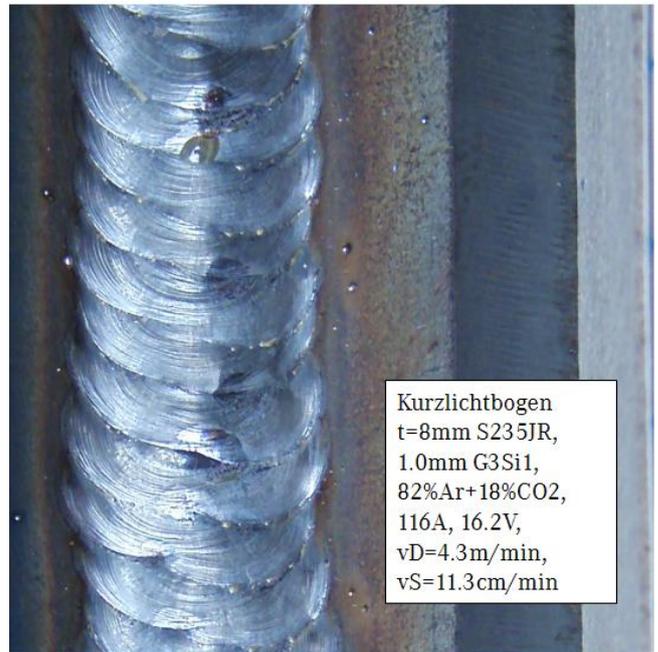


Bild 8: Sehr sorgfältige Steignahtschweißung

Das Ergebnis einer sehr sorgfältigen Brennerführung ist in **Bild 8** dargestellt. Aber auch hier zeigt die Bruch- und Schliffprobe in **Bild 9** noch Bindefehler.

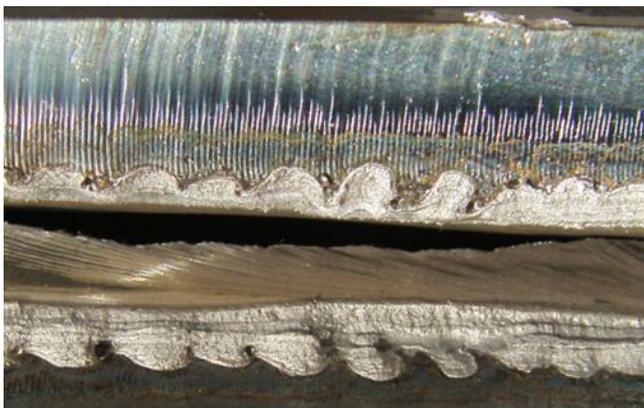


Bild 7: Ansicht der (eingeschliffenen) Bruchkante der Schweißung von Bild 6.

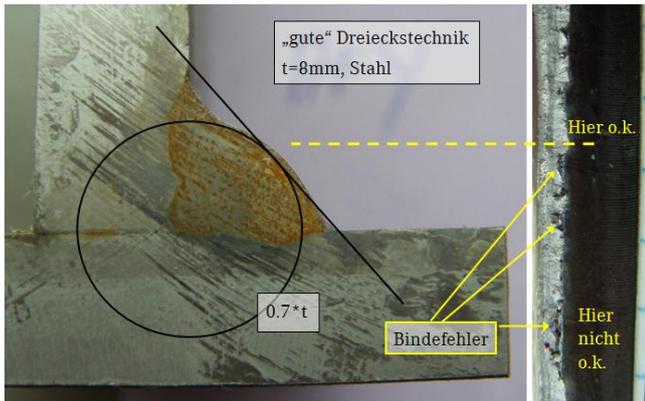


Bild 9: Ergebnisse der sorgfältigen klassischen Steignachtschweißung von Bild 8

Steignachtschweißen mit der Dreieckstechnik ist anspruchsvoll und nicht sicher fehlerfrei ausführbar. Zudem ist die erreichbare Schweißgeschwindigkeit (Fortschrittsgeschwindigkeit) relativ gering, da das abgeschmolzene Material durch die raumgreifende Brennerbewegung auf einen relativ großen Nahtquerschnitt verteilt wird.

Im Vergleich zu einer horizontalen Kehlnaht entsteht durch die Dreiecksbewegung und die relativ geringe Schweißgeschwindigkeit (v_S) beim Aufbau der Steignacht bereits in der ersten Lage ein vergleichsweise großer Nahtquerschnitt. Wenn die Naht diesen großen Querschnitt aus Festigkeitsgründen aufweisen soll, oder sogar ohnehin mehrlagig geschweißt werden muss, um einen entsprechend großen Nahtquerschnitt zu erreichen, dann erscheint dies nicht weiter störend, evtl. sogar vorteilhaft. Auf den zweiten Blick hingegen stellen sich bestimmte Fragen, die nicht immer positiv zu beantworten sind. Wie sieht es mit der Wärmeeinbringung oder Streckenenergie aus? Ist der Verzug des Werkstückes ein Problem? In all den Fällen, wo die entstehende Nahtdicke größer wird, als erforderlich, stellt sich die Frage: Ist das zusätzlich eingebrachte Material verschwendet? Im Allgemeinen soll die maximale Nahtdicke das 0,7-fache der Mindestwanddicke nicht überschreiten, da sie nicht weiter zur Festigkeit beiträgt und nur verschwendet ist.

Die erforderliche Nahtdicke ergibt sich im Allgemeinen aus den statischen Berechnungen und ist in der technischen Dokumentation angegeben. Mindestnahtdicken werden durch

einschlägige Ausführungsnormen und Vorschriften bestimmt, z.B. nach:

- DIN 1800-1 – Stahlbauten: $a = \text{min. } 2,0\text{mm}$
- DIN EN 15085-3 – Schienenfahrzeugbau: $a = \text{min. } 2,0\text{mm}$ (Stahl) bzw. $a = \text{min. } 3,0\text{mm}$ (Alu)
- RiL 804 – Eisenbahnbrücken: $a = \text{min. } 3,5\text{mm}$ bzw. $a = \text{min. Wurzel(max. Blechdicke)} - 0,5\text{mm}$.

Eine Alternative zum MSG-Steignachtschweißen mit der Dreiecksbewegung ist das Steignachtschweißen mit rutilen Fülldrähten, bei der nur eine einfache Aufwärtsbewegung (Strichraupe) ausgeführt wird, vergl. **Bild 10**.



Bild 10: Impressionen vom Steignachtschweißen mit rutilen Fülldraht

Die schnell erstarrende Schlacke bildet eine Badstütze, so kann im Sprühlichtbogen einfach hochziehend eine Steignacht geschweißt werden. Die Nahtqualität ist sehr gut, es geht mit hoher Abschmelzleistung auch sehr schnell, weshalb diese Art von Steignachtschweißen in bestimmten Anwendungsbereichen auch das ökonomische Maß aller Dinge ist. Es gibt jedoch auch viele Gründe, die gegen das Schweißen mit Fülldrahtelektrode sprechen. Die sehr hohe Rauchemission erfordert das Arbeiten im Freien oder an gut „abgelüfteten“ Arbeitsplätzen. Je nach Fülldraht wird ggf. auch eine hohe Gasmenge (20..25L/min, z.B. RV70 Metrode [Kobe Steel]) erforderlich, so dass die Zeiteinsparung beim Schweißen nicht unbedingt zu einer Verringerung der nötigen Schutzgasmen-

ge führt. Wenn auch recht leicht anzustellen, aber die Schlacke muss entfernt werden. Fülldraht kostet im kg-Preis das 2-3-fache gegenüber Massivdraht (und das erst bei großer Abnahmemenge). Letztendlich ergibt sich durch den notwendigen Sprühlichtbogen auch eine untere Grenze für die schweißbaren Blechdicken, die bei Stahl und 1.2mm Drahtdurchmesser bei ca. 6mm liegt.

Zum Stand der Technik nun eine abschließende Frage: Wie schweißt man geringe Blechdicken, wo eine MSG-Steignaht in Dreiecksbewegung nicht machbar ist, der Sprühlichtbogen des Fülldraht-Schweißens nicht mehr geht, wenn eine Fallnahtschweißung aber auch nicht zulässig ist, letztendlich gut und effektiv?

3 Die Innovation: Steignachtschweißen mit der Prozessvariante „SpeedUp“

Die Überlegung liegt nahe, verschiedene MSG-Lichtbogentechniken zyklisch zu verwenden, und zwar sowohl in unterschiedlicher energetischer Höhe, als auch untereinander vom Typ alternierend.

Zunächst ein kleiner historischer Exkurs: Grundsätzliche Untersuchungen zum MAG-Schweißen in Intervalltechnik und mit Impulslichtbogen wurden bereits in [4] veröffentlicht. Mit der Schweißstromquelle SAPROM C5 und der Prozessregelvariante **TwinPuls** von Lorch standen seit der Messe „Schweißen und Schneiden 1993“ dann auch in Deutschland Pulsschweißstromquellen zur Verfügung, welche die Intervalltechnik grundsätzlich beherrschten. Hauptanwendungsgebiet des TwinPuls war anfangs das Schweißen von Aluminium. Inzwischen gehört die Intervalltechnik für Schweißstromquellen der gehobenen Klasse zum Standard und hat bei Spezialisten vielfältige Anwendung gefunden [5].

Bei Betrachtung der zu Grunde liegenden technischen Probleme hierfür gelangt man zu der Erkenntnis, dass ganz einfach Widersprüche vorliegen (vergl. **Bild 11**). Für die Wurzelerschließung/Kantenerfassung wird ein (1) heißer, kurzer, konzentrierter Lichtbogen benötigt; für die Erfassung der seitlichen Blechflanken wird (2) die Energie auf den Flächen benötigt; und damit das schmelzflüssige Material nicht nach unten wegläuft, muss es durch bereits erstarr-

tes Material aufgehalten werden, was eine (3) entsprechende Abkühlung erforderlich macht.

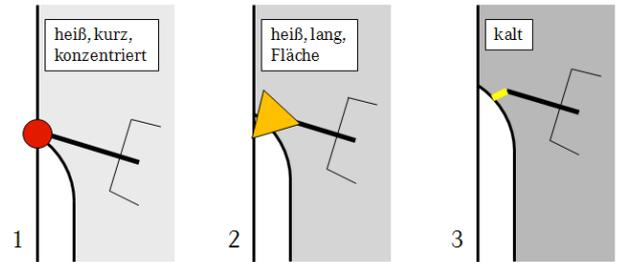


Bild 11: Konträre Anforderungen beim MSG-Steignachtschweißen

Die Idee ist nun, alles geeignet zeitlich nacheinander von der Schweißstromquelle zu steuern, während der Schweißer oder die automatisierte Brennerführung nur eine einfache Aufwärtsbewegung auszuführen braucht. In der Praxis ist bei modernen MSG-Inverter-Stromquellen bereits durchaus eine Art „Intervalltechnik“ mit diversen unterschiedlich wirkenden Parametern einsetzbar. Nur wer findet sich außer den Anwendungsspezialisten des Herstellers in der Parametervielfalt zurecht. Ist eine derartige Steuerung dann für die jeweilige Aufgabe wirklich optimal im Feld einstellbar?

Auf der Messe „Schweißen und Schneiden 2009“ wurde die innovative Prozessregelvariante **SpeedUp**® vorgestellt, welches das MSG-Schweißen von Steignähten unter Berücksichtigung obiger Überlegungen deutlich vereinfacht und verbessert. Konsequenterweise wird hierzu die anspruchsvolle Dreiecksbewegung der Drahtelektrode durch eine einfache Aufwärtsbewegung (Strichraupentechnik) ersetzt [6].

Die Prozessführung der Schweißstromquelle steuert alle notwendigen Parameter für den neuen MSG-Prozess, so dass der Nutzer mit einer sehr einfachen Einstellung eines einzigen synergetischen Führungsparameters – nämlich der zu Grunde liegenden Blechdicke – diese Prozessregelvariante wirklich in der täglichen Arbeit nutzen kann.

Beim SpeedUp werden hoch- und niederenergetische Prozessintervalle zyklisch abgewechselt, um ein ausgewogenes Aufschmelzen der Wurzel, Einbringen des Zusatzwerkstoffes, Binden der Flanken und Stützen des Schmelzbades durch Erstarrung von Material im niederenergetischen Intervall zu erreichen.

Das hochenergetische Prozessintervall bewirkt den sicheren Einbrand und bringt Abschmelzleistung.

Das niedrigerenergetische Prozessintervall sorgt für das notwendige Abkühlen der Schmelze und füllt Material nach, vergl. **Bild 12**.

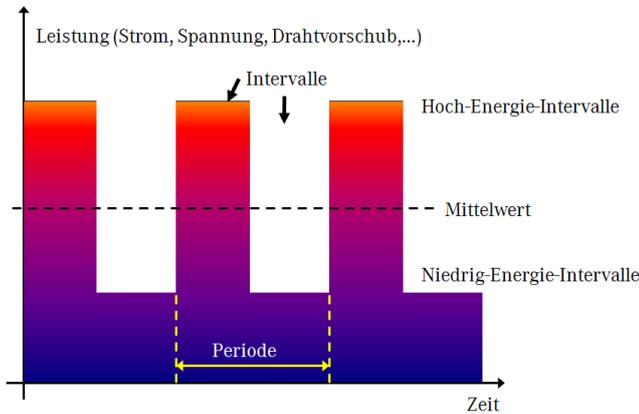


Bild 12: Grundlegendes Prinzip des SpeedUp ist die energetische Intervalltechnik

Das zyklische Wiederholen der sequentiellen Abfolge eines hochenergetischen und eines niederenergetischen Prozessintervalls beschreibt allerdings nur sehr vereinfacht die steuerungstechnischen Handlungen und erforderlichen Parameter, die bei der Prozessführung eine Rolle spielen. Tatsächlich regelt die Stromquelle innerhalb der Teilintervalle sowohl gleichzeitig als auch sequenziell eine große Anzahl von Parametern, um die gesetzten Ziele zu erreichen.

Erster Aspekt: Der Wechsel zwischen den unterschiedlichen energetischen Intervallen beinhaltet auch den Wechsel der Drahtvorschubgeschwindigkeiten, wobei Art und Weise der Änderung der Motorgeschwindigkeit gegenüber der Änderung der verschiedenen energetischen Intervalle von Strom und Spannung genau abgestimmt sein müssen.

Zweiter Aspekt: Während der energetischen Intervalle muss die Lichtbogenlänge gezielt verändert werden, um neben einer sicheren Wurzelerfassung auch eine saubere Seitenbindung ohne Kerben und eine möglichst flache Naht zu erhalten.

Dritter Aspekt: Die Idee der energetischen Intervalltechnik impliziert die Nutzung gleichartiger oder auch unterschiedlicher Übergangsarten des Werkstoffs im Lichtbogen (vergl. Bild 11), d.h. gleicher oder unterschiedlicher Lichtbogengrundprozesse, wie z.B. Kurzlichtbogen,

Sprühlichtbogen, Pulslichtbogen, aber auch moderne modifizierte Kurz-, Sprüh- („SpeedArc“) und Puls- („SpeedPulse“) Prozessregelvarianten. Von diesen Möglichkeiten wird bei SpeedUp in Abhängigkeit von der zu Grunde gelegten Material-/Draht-/Gaskombination der Steignachtschweißaufgabe Gebrauch gemacht, wodurch eine weitere Vielzahl von Parameterkombinationen entsteht.

Vierter Aspekt: Da der Werkstoff von der abschmelzenden Elektrode zu bestimmten Zeitpunkten durch Tropfen, Sprüh- oder Kurzschlussvorgänge in das Schmelzbad übergeht, erfordert der Wechsel von einem energetischen Intervall zum anderen die Berücksichtigung dieser Ereignisse.

Fünfter Aspekt: Zur Einschätzung der technologischen Gesamtwirkung der Prozessregelvariante hinsichtlich Wärmeinbringung (Streckenenergie) und wirksamer Drahtvorschubgeschwindigkeit (Abschmelzleistung) sind die Einstell- und Istwert-/Hold-Anzeigewerte von der Intervallsteuerung besonders sorgfältig zu behandeln und auf die Summe beider Intervalle als Mittelwert umzurechnen. Dies verbessert auch das Verständnis durch den Anwender.

Die Festlegung dieser vielen Parameter-Werte bei verschiedenen Material-/Draht-/Gaskombinationen erfordert deren qualifizierte systematische schweißtechnische Ermittlung, sowie entsprechende steuerungstechnische Hard- und Software-Strukturen zu deren Verwaltung und algorithmischen Nutzung. Der Anwender wäre mit der einzelnen Einstellung all dieser Parameter völlig überfordert.

Die digitalen Steuerungen der S- und P-Serie von Lorch bieten zur Berücksichtigung all dieser Aspekte die notwendige Struktur und wurden im Rahmen der Entwicklung der Prozessregelvariante entsprechend angepasst. In der internen Datenbank der Steuerung sind alle erforderlichen Parameter bereits optimiert für breite Anwendungsbereiche synergetisch abgespeichert. Der Anwender braucht lediglich der Steuerung mitteilen, welche Materialdicke er schweißen möchte, und die Maschine ist auf die Schweißaufgabe „Kehlnaht steigend mit SpeedUp“ eingestellt.

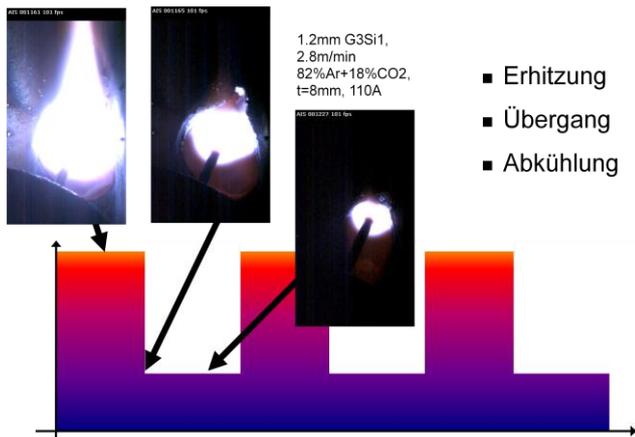


Bild 12: Unterschiedliche energetische Intervalle des SpeedUp. Hier im Beispiel besteht das hochenergetische Intervall aus einem Pulslichtbogen und das niedrigerenergetische Intervall aus einem Kurzlichtbogenprozess

4 Untersuchungsbedingungen zu den technologische und wirtschaftliche Wirkungen des SpeedUp

Während der Theoriebildung, den ersten Versuchen und der systematischen Entwicklung der Prozessregelvariante bei der Lorch Schweißtechnik GmbH in Auenwald wurden umfangreiche prozesstechnische Untersuchungen durchgeführt, um die Vielzahl von Freiheitsgraden bei der algorithmischen Beschreibung der Steuerungs- und Regelungsfunktionen und bei der Parameterfindung in einer klaren Dokumentation verfolgen zu können.

Teil dessen waren Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen eines Teils der Schweißung (ca. 3cm) mit bis zu 12000 Bildern pro Sekunde, die bildsynchrone Messwertaufnahme von Schweißstrom, Spannung und der Drahtvorschubgeschwindigkeit für die Schweißzeit der gesamten Schweißprobe, die Kennzeichnung der Proben, die Durchführung unterschiedlicher Untersuchungen an den Proben, die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten der gesamten Schweißung und die Auswertung der Videoaufnahmen, das Einbinden von Schliffproben und bestimmten externen Untersuchungen und Prüfungen, sowie natürlich Vergleiche und Schlussfolgerungen. **Bild 13** zeigt die Haltevorrichtung mit Probe, Kamera und Schweißgerät bei der Datenaufnahme einer Handschweißung mit SpeedUp.

Als Stromquelle für die hier dargestellten Untersuchungsergebnisse wurde eine Lorch S5 SpeedPulse (400A) verwendet.



Bild 13: Arbeitsplatz zur Handschweißung während der Entwicklung und Untersuchung der Prozessregelvariante SpeedUp.

5 SpeedUp ist einfach automatisierbar

Zur Untersuchung der Automatisierbarkeit der neuen Steignacht-Prozessregelvariante wurde ein vertikales Längsfahrwerk zur Brennerbewegung mit Sichtfenster aufgebaut, welches auch auf Messen als Demonstrator eingesetzt wurde.

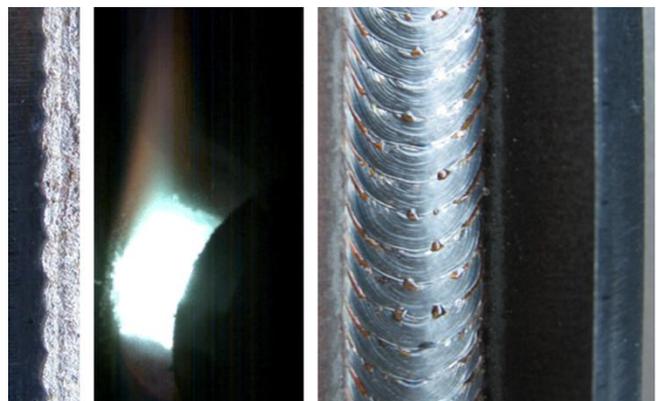


Bild 14: Automatisierte Steignachtschweißung mit SpeedUp (Stahl 8mm, M21, 1.2mm G3Si1, vS=18cm/min).

SpeedUp ist sehr gut bei automatisierter einfacher linearer Brennerführung einsetzbar, wie

Videoaufnahmen (4-fach Zeitlupe) bzw. das Standbild in **Bild 14** zeigen.

Gut sind die hoch- und niedrigerenergetischen Intervalle auszumachen. Die nebenan gestellten Bilder vom Einbrandverlauf (links) und vom äußeren Nahtaussehen (rechts) sind maßstabsgerecht zum Videobild angeordnet, so dass gut die Wirkung der Intervalle auf Einbrandverlauf und Nahtschuppung projizierbar ist.

Durch Verwendung des modifizierten Pulsprozesses „SpeedPulse“ in einem Teil des Hochenergie-Intervalls konnte der wellenförmige Einbrand insbesondere bei Stahl und CrNi-Stahl sicher und gleichmäßig gestaltet werden. **Bild 15** zeigt hier die charakteristischen Phasen der gepulsten Tropfenablösung und des sprühlichtbogenartigen sekundären Werkstoffübergangs, vergl. hierzu auch [3].



Bild 15: Detailaufnahmen verschiedener Zeitpunkte des Prozesses, von links nach rechts: (1) Ende des niedrigerenergetischen Intervalls; (2) gepulste Führungstropfenablösung und (3) sekundärer Werkstoffübergang des SpeedPulse [3]; (4) langer breiter Lichtbogen zur Flanken- erfassung; (5) Abschluss des hochenergetischen Intervalls (letzter Tropfen) und Beginn des niedrigerenergetischen Intervalls. Automatisierte Steignachtschweißung mit SpeedUp (Stahl 8mm, M21, 1.2mm G3Si1, vS=18cm/min).

Eine weitere Darstellung des Einbrandverlaufes gemeinsam mit der eingetragenen elektrischen Lichtbogenleistung und dem Drahtvorschub als signifikante energetische Größen zeigt **Bild 16**. Die sichere Kantenerfassung des T-Stoßes ist deutlich erkennbar.

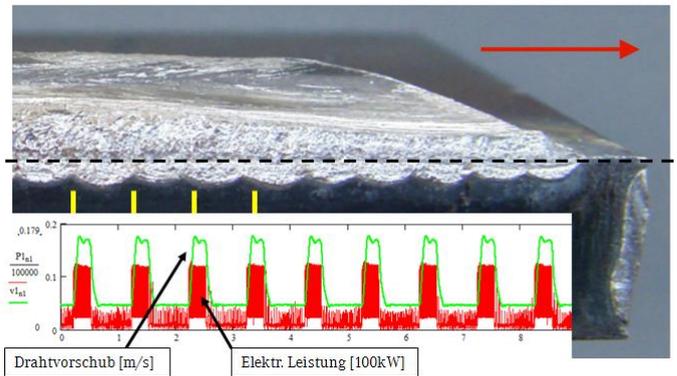


Bild 16: Bruchkante und Messauswertung der automatisierten Steignachtschweißung von Bild 15.

5 Hohe Schweißgeschwindigkeit und kalkulierbarer Energieeintrag

Die Grunddaten zur Einschätzung der SpeedUp- Prozessregelvariante hinsichtlich des Energieeintrages, insbesondere im Vergleich zur klassischen Schweißung mit Dreiecksbewegung des Brenners, wurden durch eine Reihe von Messungen an Stahl, CrNi-Stahl und Aluminium bei unterschiedlichen Blechdicken im Handschweißbetrieb ermittelt.

Bild 17 zeigt für Stahl den zeitlichen Verlauf der eingetragenen elektrischen Lichtbogenleistung an einer 200mm langen steigend geschweißten Kehlnaht, einmal in herkömmlicher Kurzlichtbogentechnik mit Dreiecksbewegung, im Vergleich dazu SpeedUp.

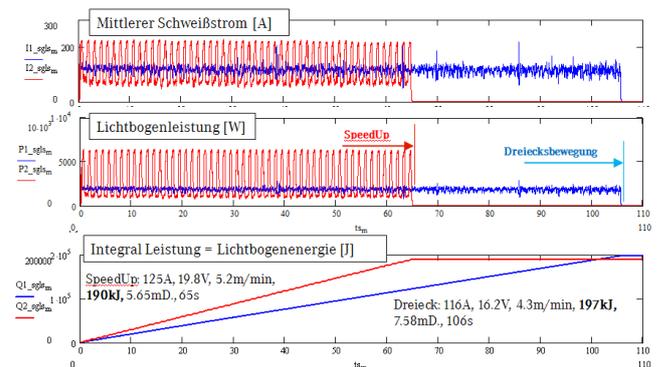


Bild 17: Geglättete Verläufe von Strom, Leistung und elektrischer Lichtbogenenergie vom klassischen Steignachtschweißen in Dreiecksbewegung (blau) im Vergleich zu SpeedUp (rot). Stahl 8mm, 1mm G3Si1, M21, Länge der Nähte = 200mm.

Es sind der Schweißstrom (Mittelwertverlauf) und das Produkt der zeitlichen Momentanwerte von Schweißstrom und Schweißspannung als Lichtbogenleistung dargestellt. Die blauen Kurven sind die Verläufe für das Schweißen mit der Dreiecksbewegung, die roten Kurven sind für SpeedUp.

Zunächst fallen die energetischen Intervalle des SpeedUp im Strom und der Leistung auf. Es ist weiterhin erkennbar, dass die Schweißung mit SpeedUp bereits nach 65 Sekunden die 200mm langen Bleche hoch ging, während mit der Dreiecksbewegung 106 Sekunden erforderlich waren. Bei SpeedUp war eine etwas höhere Drahtvorschubgeschwindigkeit mit 5.2m/min eingestellt, und in 65 Sekunden wurden ca. 5.65m Draht (mD) abgeschmolzen. Mit der Dreiecksbewegung wurde während der längeren Schweißzeit 7.58m Draht abgeschmolzen, das zeigt, dass das Nahtvolumen größer ist.

Die Darstellung des Integrals der Leistung, welches die elektrisch in den Lichtbogen eingetragene Energie ab Beginn der Schweißung zeigt, ist im unteren Diagramm dargestellt. Es ist erkennbar, dass die elektrische Leistung des SpeedUp höher ist, denn die rote Kurve der eingetragenen Lichtbogenenergie steigt steiler an, als bei der blauen Dreiecksbewegung. Die Schweißung mit SpeedUp ist jedoch früher beendet, während bei der Dreiecksbewegung längere Zeit die Leistung eingetragen wird.

Es wird somit deutlich, dass das Hochenergie-Intervall des SpeedUp kurzzeitig und zyklisch erkennbar mehr elektrische Leistung einbringt als in gleicher Zeit bei der Kurzlichtbogentechnik, während im Niedrigenergie-Intervall sich die Verhältnisse umkehren und weniger elektrische Leistung als bei der Kurzlichtbogentechnik eingebracht wird.

Betrachtet man die über mehrere Intervalle integrierten Leistungen, so ergibt sich für SpeedUp ein schnellerer Anstieg des Integrals, also ein insgesamt höherer Wert der in den Lichtbogen eingebrachten elektrischen Leistung. In Relation gesetzt zur abgeschmolzenen Drahtmenge bleibt weiter diese Aussage bestehen, denn zum Abschmelzen einer vergleichbaren Drahtmenge verwendet SpeedUp mehr Energie als die Kurzlichtbogentechnik. Dies ist damit erklärbar, dass der Bereich der flüssigen

Schmelze bei SpeedUp ausgebreiteter ist, als beim in Dreiecksbewegung ständig wandernden Kurzlichtbogen; die mittlere Lichtbogenlänge und damit der Spannungsbedarf ist auch größer.

Wie ist es aber jetzt zu bewerten, dass die Schweißzeit für die Naht mittels SpeedUp deutlich geringer war als in Kurzlichtbogentechnik mit Dreiecksbewegung? Wird die in den Lichtbogen eingebrachte elektrische Energie für die gesamte Naht durch die Integration der Leistung ermittelt, zeigt sich, dass SpeedUp, obwohl für kürzere Zeit heißer, im Endergebnis aber weniger Energie für die gesamte Naht aufgewendet hat, als die Kurzlichtbogentechnik mit Dreiecksbewegung. Möglich war dies, weil mit SpeedUp ein geringeres Nahtvolumen erzeugt wurde.

Wir halten fest: SpeedUp lässt sich bei Stahl so anwenden, dass eine Steignaht möglich wird, die durch eine geringere Schweißzeit und weniger eingebrachtes Nahtvolumen auch weniger Energie einbringt.

Nach Auswertung vieler Messungen mit unterschiedlichsten Materialien (Stahl, rostfreier CrNi-Stahl, Alu) und verschiedenen Materialdicken (2..15mm) lässt sich allgemein als Grundaussage formulieren, dass der Energieeintrag vom bisherigen Dreiecksschweißen und SpeedUp in das Werkstück insgesamt ziemlich ähnlich ist. Dasselbe lässt sich über die mittlere Abschmelzgeschwindigkeit sagen, auch wenn im vorangegangenen Beispiel SpeedUp etwas höher lag. Tendenziell erlaubt SpeedUp durch schmalere Nähte mit geringerer Nahtdicke jedoch die Einstellung insgesamt für das Werkstück „kälterer“ und „schnellerer“ Schweißvorgänge, als mit der Dreiecksbewegung möglich wäre. Dies kann in vielfältiger Weise vorteilhaft für das Steignachtschweißen eingesetzt werden.

Unabhängig von den Untersuchungen bei Lorch wurden von der SLV Fellbach verschiedene Steignacht-Schweißungen für Stahl, CrNi-Stahl und Aluminium an 5mm Blechdicke durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Grundaussage ist, dass die Schweißung mit SpeedUp generell bei allen Materialien, insbesondere aber bei Stahl und CrNi-Stahl, schneller durchführbar ist, als mit herkömmlichen Prozessregelvarianten, vergl. **Bild 18**.

Probe Nr.	Material *	Verfahren	Strom (A)	Lichtbogen (m/mm)	Tastverhältnis (%)	Welligkeit	Frequenz (Hz)	Schweißzeit pro Naht ** (s)	Einbrand (oben/unten) (mm)	a-Maß (mm)	Nahtbreite b (mm)	Bruchprobe # / na
1	S235 schwarz	Standard	105	4,0	-	-2	-	-	-	-	-	-
2	S235 schwarz	Speed up	100	7,7	30	0	1,0	-	-	-	-	-
Das empfohlene a-Maß bei t=5mm wäre 0,7*5mm = 3,5mm									1,12 / 1,18	3,3	4,4	e
Material									0,97 / 0,90	4,8	6,8	e
Verfahren									1,23 / 0,91	3,9	5,3	e
Schweißzeit pro Naht [s]									0,34 / 0,3	3,4	5,0	e
Nahtdicke a-Maß [mm]									0,73 / 0,69	4,0	5,7	e
S235									0,91 / 0,78	3,6	5,2	e
Standard									1,1 / 1,2	5,5	8,0	e
SpeedUp									1,2 / 0,9	6,1	8,7	e
CrNi									1,45 / 1,6	5,2	7,1	e
Standard									0,5 / 1,2	3,9	5,3	e
Puls									0,4 / 0,7	4,1	5,7	e
SpeedUp									1,7 / 1,7	3,5	5,1	e
Alu									1,9 / 1,6	4,0	5,8	e
Speed up									-	-	-	-
CrNi-Stahl									-	-	-	-
Puls									-	-	-	-
Aluminium									-	-	-	-
Speed up									-	-	-	-
Aluminium									-	-	-	-
Puls									-	-	-	-

Bild 18: Untersuchungsergebnisse der SLV-Fellbach zum Steignahtschweißen mit SpeedUp an 5mm dicken Blechen im T-Stoß (Kehlnaht).

6 Brennerführung und Nahtqualität

Die Abbildungen in **Bild 19** (und die verfügbaren Videos) zeigen im direkten Vergleich unter gleichen Bedingungen die Unterschiede bei der Brennerführung und dem mit dem bloßen Auge sichtbaren Lichtbogenverhalten von SpeedUp und der herkömmlichen Dreiecksbewegung (**Bild 20**).

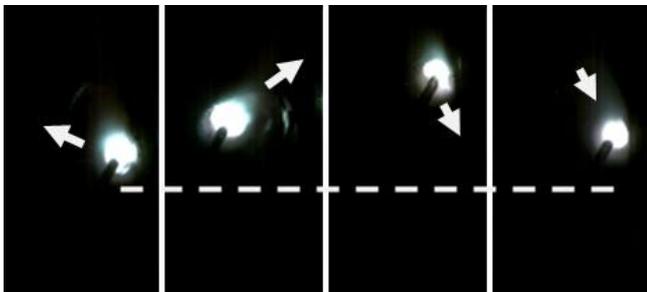


Bild 19: Kurzlichtbogen, 116A, 16.2V, 1.9kW, 4.3m/min, Stahl 8mm, 1mm G3Si1, M21, vS=11.3cm/min, 9.85kJ/cm -Steignahtlänge

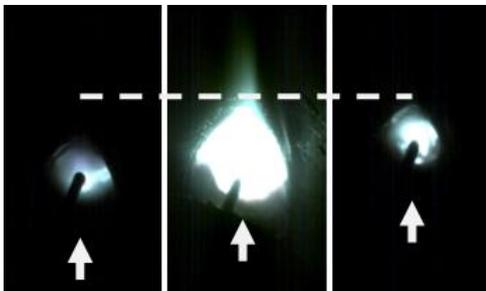


Bild 20: SpeedUp, 124A, 19.7V, 2.9kW, 5.22m/min, Stahl 8mm, 1mm G3Si1, M21, vS=18.5cm/min, 9.45kJ/cm -Steignahtlänge

Die Pfeile deuten die Bewegungsrichtung der Elektrode an. Anhand der gestrichelten Hilfslinie ist die erreichte Steigung der Naht nach

einem Bewegungszyklus der Elektrode abschätzbar. Das dritte Teilbild des SpeedUp entspricht zeitlich auch dem dritten Teilbild der Dreiecksbewegung. Es wird deutlich, dass die erreichte Steigung der Naht mit einem SpeedUp-Zyklus deutlich größer ist, als der zeitlich längere Zyklus der Dreiecksbewegung. Interessant in diesem Zusammenhang ist, wenn man die Wegstrecke der Brennerbewegung beim Dreiecksschweißen anhand der Bilder misst, addiert und zur Schweißnahtfortschrittsgeschwindigkeit ins Verhältnis setzt. Diese Operation an den 4 Teilbildern in Bild 19 angewandt, führt zum Ergebnis, dass dieses Verhältnis ca. 12 ist. Das heißt, um 1cm Steignahtlänge aufzubauen, muss der Schweißer in den wechselnden Richtungen der Dreiecksbewegung den Lichtbogen ca. 12cm möglichst fehlerfrei führen. Es ist einleuchtend, dass dies fehleranfälliger und für Brennerschlauchpaket und Schweißer ermüdender ist, als nur einfach 1cm aufwärts zu führen.

Die in diesen Videos geschweißten 200mm langen Proben wurden dann weiter untersucht. Beide Nähte sehen von außen gut aus, vergl. **Bild 21**, weisen auch keine Kerben auf. Die Naht von SpeedUp ist aber flacher und etwas schmaler. Mehr Silikate/Ausschwemmungen an den Schuppungskanten bei SpeedUp zeigen, dass dieses Material zumindest nicht mehr in der Naht drin sein kann, während das bei der Dreiecksbewegung die Frage ist.

Die Bruchbilder in **Bild 22** sind eindeutig: SpeedUp (rechts) zeigt keine Bindefehler und keine Einschlüsse, während diese beim herkömmlichen Schweißen im Bruch als Nahtfehler sichtbar werden (und der Schweißer war wirklich gut). Ähnliche Untersuchungen wurden auch an rostfreiem CrNi-Stahl, AISi und AlMg durchgeführt und zeigten durchweg positive Ergebnisse bei Verwendung des SpeedUp-Prozesses.

7 Beispiele für das Leistungsvermögen von SpeedUp bei Stahl

Für Stahl t= 5mm sind in **Bild 23** Impressionen aus dem Lorch Verfahrenslabor dargestellt. Das Nahtprofil und die flache Oberflächenstruktur sind für eine Steignaht außergewöhnlich gut, aber auch das Innere der Naht ist frei von sichtbaren Fehlern.

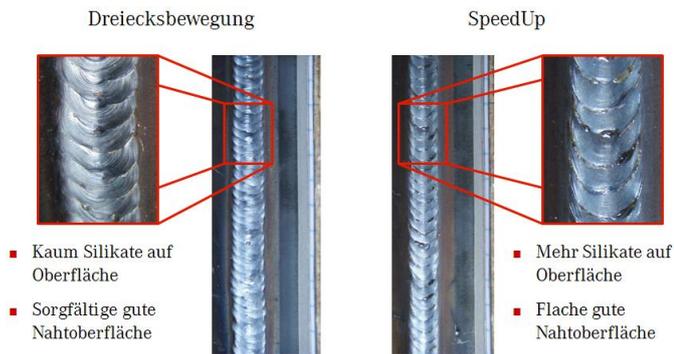


Bild 21: Vergleich äußeres Nahtaussehen der beiden Proben Blech t=8mm S235JR, 1mm G3Si1, 82%Ar+18%CO2

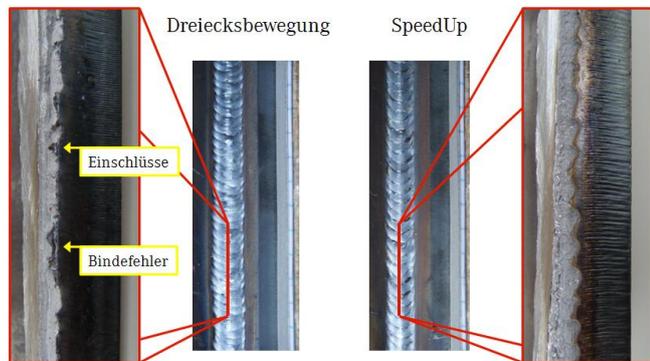


Bild 22: Bruchbilder der Proben von Bild 21



Bild 23: Anwendungsstudie SpeedUp, Blech t=5mm S235JR, 1mm G3Si1, 82%Ar+18%CO2, vD=4.4m/min, vS=20.3cm/min, 108A, 18.2V, 2.4kW, 7kJ/cm



Bild 24: Anwendungsstudie SpeedUp, Blech t=3mm S235JR, 1.2mm G3Si1, 92%Ar+8%CO2, automatisiert

Das Vermögen, mit SpeedUp an dünnen Blechen Steignähte mit geringer Nahtdicke auch mit 1.2mm-Draht zu schweißen, wird in **Bild 24** demonstriert. An den 3mm dünnen Stahlblechen, hier automatisiert geschweißt, zeigt der SpeedUp seine gleichmäßige Prozesssicherheit.



Bild 25: 1.4301, t=4mm, 1mm ER308, konventionell gepulst 110A/22V fallend geschweißt.

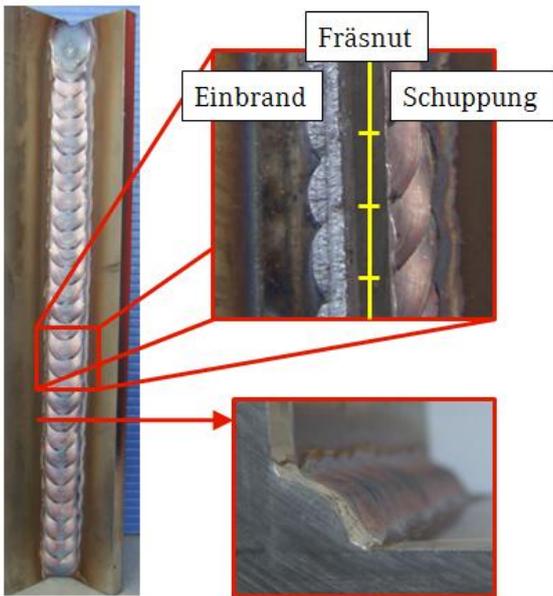


Bild 26: SpeedUp CrNi-Stahl 1.4301 t=4mm, Draht 1mm 1.4316 (ER308) 4.7m/min, 98%Ar+2%CO₂, 104A, 15V, 1.8kW, Schweißgeschwindigkeit 20cm/min, 5.4kJ/cm, handgeschweißt.

8 Beispiele für das Leistungsvermögen von SpeedUp an nichtrostendem CrNi-Stahl

Das MSG-Schweißen von vertikalen Nähten an nichtrostenden CrNi-Stählen ist auf Grund des Fließverhaltens des flüssigen Metalls sehr problematisch. Der Versuch, den gängigen 1.4301 (X5CrNi18-10) mit Dreieckstechnik oder ähnlichen Bewegungen unter MSG als Steignacht zu schweißen, führt zum Zusammenlaufen des Materials in der dadurch stark überhöhten Nahtmitte und im Gegensatz dazu zu seitlichen Bindefehlern durch ablaufendes Material. Ab mittleren Blechdicken werden Vertikalnähte an CrNi-Stahl daher überwiegend mit WIG (entsprechend langsam) geschweißt.

Bei geringeren Blechdicken wird gelegentlich die Fallnahttechnik (PG) mit Impulslichtbogen angewandt. Das kann gutgehen, muss aber nicht (**Bild 25**). Die Naht ist außen optisch i.O., weist innen aber deutliche Bindefehler auf.

Der Einsatz von SpeedUp ermöglicht hier nun eine wesentliche Effektivitätssteigerung, denn die ausgeklügelte SpeedUp-Prozessführung erlaubt nun auch das einfache Steignachtschweißen in Strichraupentechnik von CrNi-Stahl. **Bild 26** zeigt das eindrucksvolle Ergebnis der Schweißung mit dem für dieses Material

speziell abgestimmten SpeedUp, wobei an der Stromquelle nur Material, Draht, Gas und Blechdicke eingestellt werden muss. Das Bild zeigt als Vergrößerung neben der Naht den vom Stegblech durch Fräsnut und anschließendem Bruch befreiten Nahtbereich auf dem Grundblech. Deutlich ist der gleichmäßige, wellenförmige Einbrandverlauf in Konjunktion zur äußeren Nahtschuppung zu sehen. Das Schlibbild zeigt eine gute Nahtgeometrie und keine Fehler. Dass das Ganze auch automatisiert geht, zeigt **Bild 27**.



Bild 27: Automatisiert geschweißte Steignacht mit SpeedUp an 1.4301 t=4mm, Draht 1mm 1.4316 (ER308) 98%Ar+2%CO₂

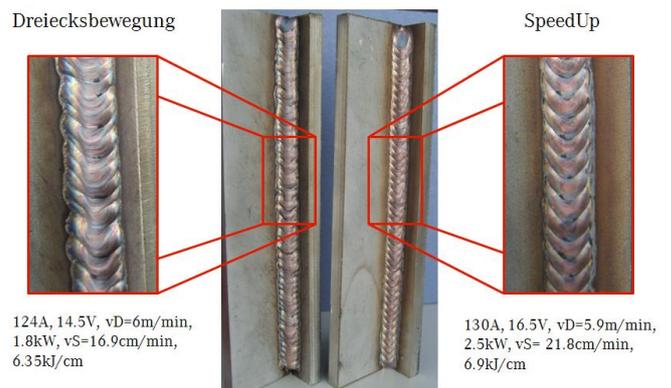


Bild 28: Probe einer Steignachtschweißung an CrNi-Stahl mit der Dreiecksbewegung im direkten Vergleich zur Schweißung mit SpeedUp. Bleche 1.4301 t=8mm, Draht 1mm 1.4316 (ER308) 98%Ar+2%CO₂

Gute Schweißer geben nicht schnell auf, und so zeigt **Bild 28** die Gegenüberstellung eines Ver-

suchs einer handgeführten Steignachtschweißung an einem 8mm-T-Stoß „so gut es geht“ konventionell, im Vergleich zur problemlos geschweißten Naht mit SpeedUp. Die energetischen Verhältnisse lassen bei SpeedUp bereits eine qualitativ bessere Naht erwarten. Die elektrische Lichtbogenleistung ist zwar höher bei ähnlicher Drahtvorschubgeschwindigkeit, dafür wird schneller geschweißt, was zu einer vergleichbaren Streckenenergie führt. Das bessere Nahtbild spricht deutlich für SpeedUp.

Abschließend zu den Anwendungsbeispielen des SpeedUp bei CrNi-Stahl zeigt **Bild 29** die automatisierte Schweißung der 8mm-Bleche und ein Bruchbild.



Bild 29: Bleche 1.4301 t=8mm, Draht 1mm 1.4316 (ER308) 98%Ar+2%CO₂, SpeedUp automatisiert

Das Ergebnis einer metallurgischen Untersuchung durch die SLV-Fellbach zeigt **Bild 30**. Es galt die Frage zu beantworten, ob durch die zyklische energetische Prozessführung des SpeedUp evtl. ungünstige Effekte hinsichtlich der Legierungselemente (Abbrand) auftreten. Dies konnte jedoch nicht festgestellt werden. Laut SLV-Fellbach ist die metallurgische Struktur der Verbindung sehr ähnlich zu jener, welche bei normalem Schweißen in Horizontaler Position (PB) entsteht und in der Praxis hinreichend beherrscht wird.

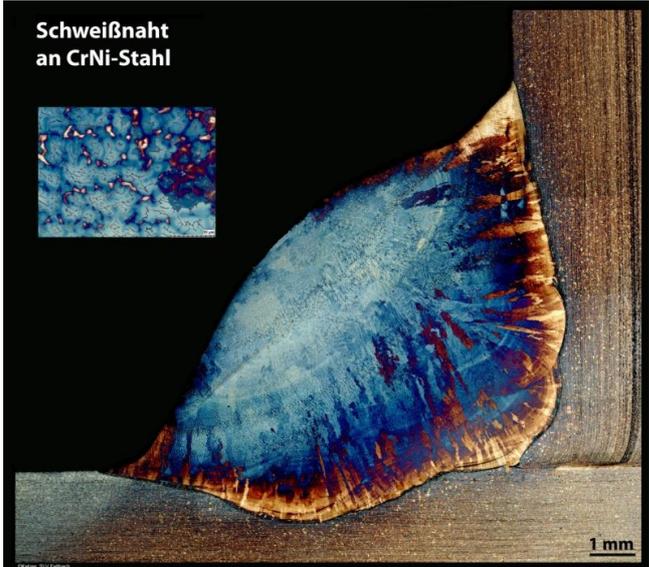


Bild 30: Aus 25 Einzelbildern zusammengesetzte Gesamtaufnahme einer mit SpeedUp geschweißten Naht zur metallurgischen Begutachtung (SLV-Fellbach). Grundwerkstoff 1.4301, Zusatz 1.4316, Schutzgas 98/02

9 Beispiele für das Leistungsvermögen von SpeedUp bei Aluminium

Aluminium kann ähnlich wie Stahl auch mit entsprechender Brennerbewegung bedingt im Sprüh- oder Pulslichtbogen in der Kehlnaht steigend geschweißt werden. Seit den 90’er Jahren ist es auch möglich, in Intervalltechnik (z.B. mit der Lorch „Twinpuls“- Prozessregelvariante) Steignähte in Aluminium mit der Strichraupentechnik zu schweißen. Die Einstellung der Parameter für die Intervalltechnik bei einer bestimmten Schweißaufgabe (Frequenz des Energieintervallwechsels, zeitliches und energetisches Verhältnis der Intervalle zueinander, Einstellung der optimalen Lichtbogenlänge) erfordert aber viel Erfahrung und Zeit zum Probieren.

Die Prozessregelvariante SpeedUp bietet für das Steignachtschweißen von Aluminium bereits optimierte synergetische Programme, wodurch komplizierte Einstellvorgänge entfallen. Je nach Erfordernis wählt SpeedUp im Hintergrund auch unterschiedliche Lichtbogentypen (Puls-Puls/ Puls-Kurzlichtbogen/ Puls-Sprühlichtbogen) für die einzelnen energetischen Phasen aus, so dass sich eine breite Abdeckung der möglichen Schweißaufgaben auch bei Aluminium ergibt.

Es ist bekannt, dass die Anwendung des Pulslichtbogens zur Ausgasung der Schmelze und

damit zur Verminderung der Porenanfälligkeit von Aluminium beiträgt. Dies wird bei SpeedUp mit ausgenutzt.

Einige diesbezügliche Details der optimierten Prozessführung für Aluminium sind in **Bild 31** dargestellt. Der gepulste Werkstoffübergang im hochenergetischen Intervall ist so eingestellt, dass eine gute Flankenbenetzung und eine sichere Wurzel erfassung erfolgt. Teilbild 1 zeigt den Beginn der Tropfeneinschnürung und das Aufheizen der Schmelze durch den intensiven Lichtbogen, Teilbild 2 zeigt die Tropfenablösung und das noch ruhige ausgebreitete Schmelzbad, Teilbild 3 zeigt das Einschlagen des Tropfens in das Schmelzbad und die dadurch ausgelöste, sich kreisförmig ausbreitende Schockwelle. In Teilbild 4 ist die intensive Benetzung noch nicht geschmolzener Bereiche der Flankenflächen durch die eintreffende Schockwelle erkennbar. Teilbild 5 zeigt die starke Badbewegung und das durch den Tropfeneinschlag tiefe Eingraben des Schmelzbades, welches so eine sichere Wurzel erfassung gewährleistet. Teilbild 6 zeigt die Beruhigung des Schmelzbades unter dem noch diffus brennenden langen Lichtbogen, der in Teilbild 7 sich auf die Ausgangslänge wieder verkürzt. Der Prozess verläuft spritzerfrei.

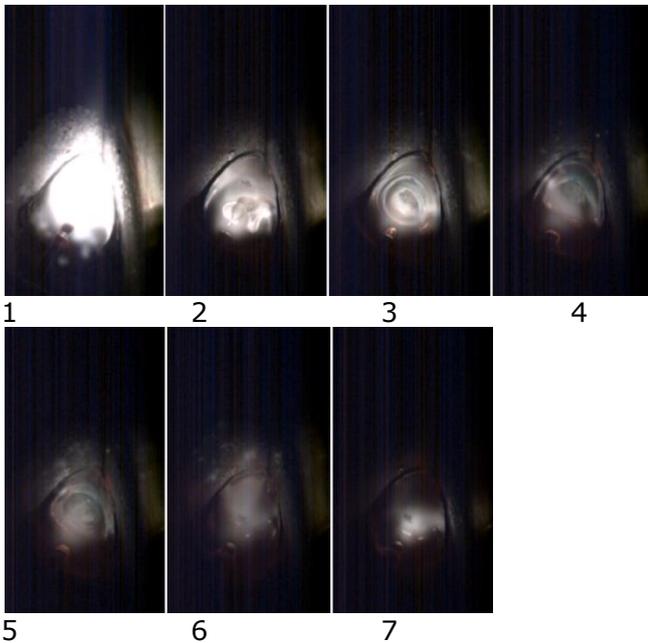


Bild 31: Detailbilder des optimiert gepulsten Werkstoffübergangs bei SpeedUp für 1.2mm AlSi5, t=3mm, 100%Ar; (Teilbilder der Hochgeschwindigkeitskamera, 7575 Bilder/Sekunde)

Das Ergebnis einer handgeführten Steignahtschweißung mit SpeedUp an 3mm dünnem Aluminium ist in **Bild 32** dargestellt.



Bild 32: SpeedUp mit 1.2mm AlSi5, t=3mm, 100%Ar, 100A, 17V, 1.8kW, vD=4m/min, vS=42.6cm/min, 2.6kJ/cm

Beim Verschweißen von AlMg5 wirkt nicht der beruhigende Einfluss von Silizium auf den hoch erhitzten ausgasenden Werkstoff, sodass Gaseruptionen feine Spritzer aus dem Lichtbogenbereich werfen. Dies ist die Ursache für das Aussehen der liegend dargestellten Steignaht in **Bild 33**. Für eine Steignaht an sich hingegen ist dieses Nahtbild als sehr gut zu bewerten.



Bild 33: SpeedUp mit 1.2mm AlMg5, t=3mm, 100%Ar, 106A, 15V, 1.7kW, vD=6m/min, vS=31cm/min, 3.2kJ/cm

10 Zusammenfassung

Das konventionelle Steignachtschweißen mit komplizierter und schlecht zu automatisierender Brennerführung kann durch SpeedUp in breiter industrieller Anwendung vorteilhaft abgelöst werden [4].

Die Prozessregelvariante SpeedUp ist das Ergebnis intensiver systematischer Forschung am Lichtbogen und der Entwicklung leistungsfähiger Steuerungs- und Regelungsstrukturen, sowie von komplexer echtzeitfähiger Software für volldigital gesteuerte Schweißstromquellen.

Im Rahmen der Entwicklung dieser Prozessregelvariante wurden die digitalen Schweißgerätesteuierungen entsprechend angepasst. In der internen Datenbank der Lorch Stromquellen sind alle erforderlichen Parameter bereits optimiert für breite Anwendungsbereiche synergetisch abgespeichert. Der Anwender braucht lediglich der Steuerung mitteilen, welche Materialdicke er schweißen möchte, und die Maschine ist auf die Schweißaufgabe „Kehlnaht steigend mit SpeedUp“ eingestellt.

SpeedUp ist einfacher und bewirkt eine höhere Qualität der Steignähte

- Die Einstellung ist für den Schweißer einfach.
- Die erreichbare Qualität der Nähte ist hoch.
- einfach und sicher für Stahl, CrNi-Stahl und Aluminium
- Es lassen sich Materialien effektiv MSG-Steignachtschweißen, die bisher schlecht realisierbar waren (z.B. CrNi-Stahl).
- Der Wärmeeinfluss auf das Werkstück kann durch Strichraupen und hohe Schweißgeschwindigkeit verringert werden.

SpeedUp ist einfacher und bewirkt eine höhere Effektivität beim Schweißen von Steignähten

- Die Herstellungskosten für Steignähte können durch Strichraupen, hohe Schweißgeschwindigkeit und Einsparung von Zusatzwerkstoff und Schutzgas verringert werden.
- SpeedUp ist für automatisiertes Schweißen von Steignähten besonders geeignet.

SpeedUp ist auch in anderen Zwangspositionen einfach einsetzbar, denn die

Synergiekennlinien lassen sich durch Korrekturparameter auch anpassen für das Schweißen in Querpositionen oder Überkopf-Positionen.

SpeedUp ist einfacher und verbessert die Umweltverträglichkeit des Steignachtschweißens

- Die Rauchemission ist geringer als jene beim Steignachtschweißen mit rutilen Fülldrahtelektroden.
- Die qualitativen und quantitativen Vorteile des SpeedUp lassen sich umwelt- und ressourcenschonend einsetzen.

11 Literatur

Diese Fachdokumentation wurde zum Teil erstmalig veröffentlicht durch: B. Jaeschke: Der wirtschaftliche MSG-Lichtbogenschweißprozess durch moderne Schweißgerätetechnologien. DVS-Berichte Band 267, DVS Congress 2010, S. 328 ff. DVS Media, Düsseldorf 2010.

Eine weitere Teilveröffentlichung liegt vor mit: B. Jaeschke: Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Metall-Schutzgas-Schweißens durch moderne Schweißgerätesysteme. Jahrbuch Schweißtechnik 2013, S. 179-188, ISBN 978-3-87155-609-8, DVS Media, Düsseldorf 2012

Zur Vertiefung der Information wird folgende Lorch Fachdokumentation empfohlen:

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

Weitere Literaturstellen:

[1]: Welz, W., u.a.: Intervallschweißen – eine Verfahrensvariante zum MAG-Steignachtschweißen. DVS-Bericht 131, S. 21/27. DVS-Verlag, Düsseldorf 1990.

[2]: Habenicht, G., u.a.: Metall-Aktivgasschweißen von Steignähten in Intervalltechnik mit Impulslichtbogen, Fachzeitschrift Schweißen und Schneiden 46 (1994), Heft 2, S. 61ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 1994.

[3]: Jaeschke, B., u.a.: SpeedPulse – eine produktivitäts- und effizienzsteigende Weiterentwicklung des MSG-Impulsschweißens, Fach-

zeitschrift Schweißen und Schneiden 61 (2009, Heft 9, S. 548ff. DVS-Verlag, Düsseldorf 2009.

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

[5] Jaeschke, B: 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.