

Echtzeit- Spektralregler für Pulsschweißmaschinen (MIG/MAG)

Gerd Heinz (GFal Berlin), Frank Hofmann (TU Berlin), Heinz Schöpp und Gregor Gött (INP Greifswald)

Bemühungen, spektrale Informationen für eine Regelung des Energieeintrages in Echtzeit zu nutzen, scheitern bisher an großer, numerischer Komplexität der Linienauswertung bei extrem kurzen, zur Verfügung stehenden Zeiten. Bei Pulsverfahren liegt die Änderung der Plasma- Temperatur im Bereich von mehreren Millionen Kelvin pro Sekunde. Man muß in den Bereich weniger Mikrosekunden vordringen, um Pulsabschaltungen rechtzeitig zu realisieren. Auch bringt die Auswertung von Einzellinien eine komplexe Abhängigkeit vom Emissionsspektrum des Materials mit sich. Im Team konnte nun gezeigt werden, daß Gruppen von Linien größerer Spektralbereiche (GFal Berlin/TU Berlin) ein analoges Zeitverhalten der Emissionen zeigen können, wie Zeitfunktionen einzelner Linien (INP Greifswald). Darauf aufbauend wird ein differentielles Regelverfahren vorgestellt, welches schnell genug ist, um in Echtzeit einen Pulsschweißprozeß zu regeln, und welches durch ein Differenzprinzip unabhängig von optischen Problemen arbeitet. Dabei wird der Energieeintrag für jeden Impuls gesteuert. Die Sensorik arbeitet mit zwei Photodioden. Es werden Reaktionszeiten von unter 10 µs erreicht. Seit November 2007 arbeitet ein Prototyp des Spektralreglers im Schweißlabor der TU Berlin.

1 Motivation

Beim Fügen von Mischverbindungen im Leichtbau bereiten geringe Siedepunkte und Verdampfungstemperaturen (insbes. Zn, Mg, Al) Probleme. Gelänge es, den Energieeintrag ins Plasma zu messen bzw. zu regeln, so sollte sich die Qualität verbessern lassen.

Element	Zn	Mg	Al	Cu	Fe
Schmelzpunkt in K	693	923	933	1358	1808
Siedepunkt in K	1180	1380	2740	2840	3023

Tab.1 Schmelz- und Siedepunkte

Auch ist zu erwarten, daß sich die Prozeßstabilität erhöhen läßt, insbesondere bei geringen Materialdicken.

Gelten landläufig der Sprühlichtbogen oder der Kurzlichtbogen als Kandidaten für die Minimierung des Energieeintrages, so läßt deren diskontinuierliche Lichtemission kaum Möglichkeiten, das Spektrum des Plasmas für Regelaufgaben heranziehen zu können. Für experimentelle Untersuchungen wurde daher ein klassischer Pulslichtbogen mit 2...4 mm Elektrodenabstand gewählt (MIG/MAG). Dieser bietet die Möglichkeit, ein durch Abschaltungen oder Kurzschlüsse ungestörtes Plasma beobachten zu können.

Arbeiten mit Linienspektrometern, z.B. [5], [6] zeigen, daß aus spektralen Emissionen eines Schweißplasmas wertvolle Informationen über Parameter des Metall-Inertgas (MIG) Pulsschweißprozesses, wie Zeitverlauf der Plasmatemperatur, Energieeintrag sowie Schweißbadtemperatur gewonnen werden können.

Allerdings scheint der spektrometrische Ansatz wenig praxistauglich, will man das Spektrometer in ein Schweißgerät integrieren. Auch entstehen im Mikrosekundenbereich Probleme mit ansteigendem Quantisierungsrauschen photonischer Art.

Um so höher die spektrale Auflösung ist, um so höher sind bei gleichem Rauschen geforderte Integrationszeiten der Zeilensensoren und um so höher ist der Berechnungsaufwand und die dafür nötige Zeit. Um schneller entscheiden zu können, ist minimale, spektrale Auflösung erforderlich, um große Photonenzahlen in kurzer Zeit pro Photosensorelement zu erhalten.

Unter der Annahme von Temperatur- Transienten bis zu 10.000 Kelvin pro Millisekunde lassen sich notwendige Grenzfrequenzen aller Bestandteile eines Regelkreises von über 100 kHz abschätzen. Ein Regler muß in der Lage sein, nach etwa 10 µs eine Entscheidung über Pulsabschaltung zu treffen.

Um beiden Forderungen zu genügen, sind möglichst breitbandige und großflächige Sensoren gefordert, die viele Photonen in kurzer Zeit aufnehmen. Andererseits ist von der Lösung zu fordern, daß sie ohne Rechenzeit auskommt.

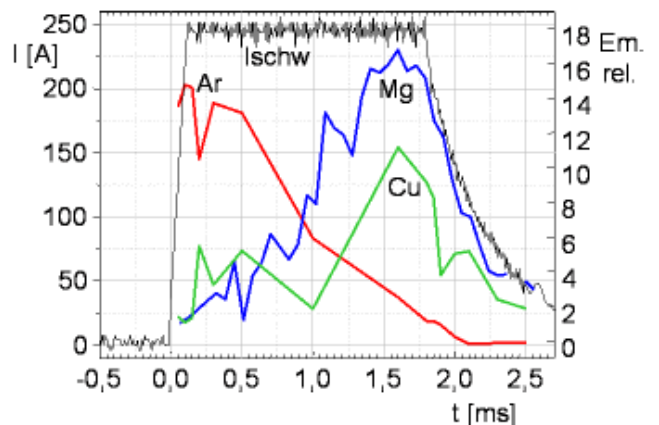


Abb. 1 Stroboskopisch schmalbandige, spektrale Emissionsänderungen im Zeitverlauf eines Schweißimpulses für Argon, Magnesium und Kupfer (Schweißstrom Ischw) [2]

Will man nun aber mit breiteren Spektralbändern, also mit Photodioden arbeiten, so ist Neuland zu betreten. Um so erfreulicher ist es, daß den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses in der Abschlußveranstaltung des Förderprojekts¹ am 30.11.2008 erste Schweißversuche mit dem Prototyp eines Spektralreglers vorgestellt werden konnten.

Es konnte gezeigt werden, daß es möglich ist, z.B. das Pulsstromniveau erheblich zu variieren, ohne daß

¹ Das Projekt wurde gefördert unter dem Titel „Gepulste Lichtbogenfügeprozesse“ BMWi IGF 14607 BG (AiF), Laufzeit von 02/2006 bis 12/2007. Beteiligt waren die GFal Berlin (Projektleitung Dr. G. Heinz), das IWF der TU Berlin (Fügetechnik, Prof. Lutz Dorn) und das INP Greifswald (Leitung Prof. Weltmann).

sich die Nahtqualität wesentlich verändert. Das vorgestellte Verfahren konnte patentiert werden.

Seitens der Gerätehersteller verbindet sich mit dem vorgestellten Verfahrensansatz perspektivisch auch die Vision, Information aus dem Spektrum zu erhalten, um die Zahl von Einstellparametern und Einschweißkennlinien bei Pulsschweißgeräten zu reduzieren.

Der Prototyp des Spektralreglers kommt mit etwa 100 Bauelementen und 12 Operationsverstärkern aus. Die Pulsschweißstromquelle wird über eine RS485-Schnittstelle gesteuert. Der Spektralregler arbeitet sowohl im quasi-kontinuierlichen, als auch im Pulsbetrieb.

Ziel weiterer Arbeiten ist ein besseres Verständnis für physikalische Aussagen zu Liniengruppenintegralen verschiedener Materialkombinationen zur Optimierung von Regelstrategien für Mischverbindungen, sowie eine Reduktion von Steuerparametern (Pulsstrom, Grundstrom, Steuerzeiten).

Lag das gesamteuropäische Umsatzvolumen für MIG/MAG/WIG- Geräte 2002 bei etwa 750 Mio. €, so ist bei einem prozentualen Anteil von 5% in 2012 etwa mit einem europäischen Marktvolumen von etwa 50 Mio. € für spektral geregelte Geräte zu rechnen.

2 Stand der Forschung

Steigende Kosten für Rohstoffe und Energie führen gerade im Maschinen- und Fahrzeugbau zur konsequenten Umsetzung des Leichtbaugedankens. Neue Werkstoffe, ob hochfest oder dünnwandig, erfordern jedoch neue, optimierte Fertigungstechnologien z.B. hinsichtlich des Verzuges und Energieeintrages beim Fügen. Insbesondere zielt man auf sog. ‚kalte‘ Prozesse.

Die Reduktion des Energieeintrages beim Schweißen dünnwandiger Bleche erfolgt heute zum Beispiel durch Umpolung des Lichtbogens, das Schweißen mit Wechselstrom, die Begrenzung der Lichtbogenleistung beim Zünden oder durch mechanischen Eingriff in die Drahtförderung. Stand der Technik sind Schweißstromquellen, die aus elektrisch meßbaren Parametern (Schweißstromverlauf, Schweißspannungsverlauf) ein Maximum an Informationen ziehen (CMT (Fronius), ColdArc (EWM), CP (Cloos)). Dieses Know-how ist meist firmenspezifisch.

In verschiedenen Arbeiten z.B. [1] wurde versucht, die Grenzen rein elektrischer Diagnostik und Steuerung mit modernen Mitteln der Signalanalyse (neuronalen und statistische Ansätze) hinauszuschieben. Es setzt sich die Erkenntnis durch, dass zusätzliche Prozeßinformationen gebraucht werden, um eine signifikante Verbesserung der Prozeßsteuerung erreichen zu können. Allerdings wurden Auffälligkeiten in der Dynamik bei spektral gefilterten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet.

In einer Reihe von Arbeiten werden nun Ansätze der spektroskopischen Diagnostik genutzt, um ‚kalte‘ Schweißlichtbogen verstehen und modellieren zu können. Von einem Spektrometer- basierten Ansatz [5] ist bekannt, daß Regelzeiten von 20 Millisekunden erreicht werden. Dies gestattet zwar eine Prozeßregelung, aber es ist noch nicht möglich, die Energie jedes einzelnen Pulses spektrometrisch auszuregeln.

3 Spektren von Liniengruppen

Zur Untersuchung der Dynamik einzelner Emissionslinien im Zeitverlauf des Schweißpulses wurde am INP eine stroboskopisch arbeitende Meßapparatur aufgebaut, deren Kernstück ein schnelles Spektrometer darstellt [2]. Einzellinien werden beobachtet. Puls für Puls wird der Triggerpunkt um einige Mikrosekunden weitergerückt. Damit gelingt es, die Zeitfunktionen der am Schweißprozeß beteiligten Materialien in hoher Zeitaufösung aufzuzeichnen, Abb.1.

Da jeder Punkt der Kurven jeweils vom nächsten Schweißimpuls stammt, sind die Kurven zwar etwas verrauscht, aber sie gestatteten wichtige, qualitative Aussagen: Steigender Energieeintrag in das Plasma – sei es als Konzentration der Metallatome oder als Temperatur – dokumentiert sich in einem Ansteigen der Metallmissionen. Dagegen fallen Schutzgaslinien, hier Argon, mit steigendem Energieeintrag ab.

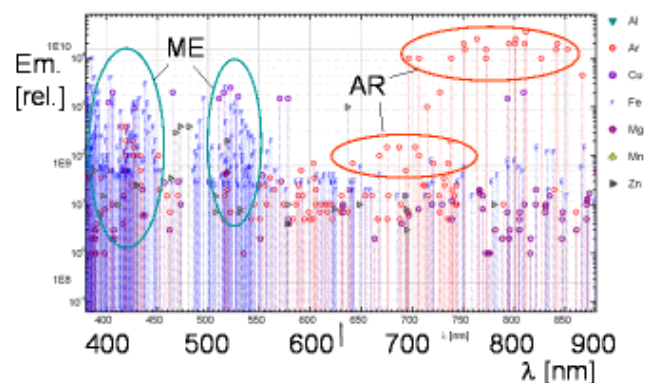


Abb. 2 Spektren und Liniengruppen von Metallatomen (ME, blau) und Argonatomen (AR, rot), [2]

Betrachten wir nun das Spektrum, so sind Emissionsgruppen bestimmter Atome erkennbar, Abb.2, die sich in der Stärke der Emission abheben. Während im Infrarotbereich Argon dominiert, sind unterhalb von 550 nm die Metalllinien dominant.

In jeder Metallgruppe finden wir aber wiederum dominante Emissionen verschiedener Metalle, so finden wir in der 520 nm Gruppe neben Kupfer auch Eisen.

Wenn wir uns vorwiegend für einen mittleren Energieeintrag der irgend vorhandenen Metallatome interessieren, genügt sogar eine Integration über die Gruppe.

Um eine Information über Argon zu erhalten, genügt eine Integration über das gesamte Band oberhalb von 650 nm. So liegt die Argon-Gruppe bei 780 nm mit einer Breite von 160 nm (Abb.2 rechts oben) um den Faktor 3 über zwei einzelnen Cu-Linien und um etwa 30 über restlichen Emissionen.

Offenbart nun eine einzelne Linie z.B. über deren Boltzmann-Verteilung [5,6] die Elektronentemperatur, so liefert Integration über vergleichsweise breite Bänder mittels Photodioden (Abb.2) einen Mittelwert über Emissionen verschiedener Atome gleichzeitig.

Die Dynamik der beobachtbaren Emission eines Bandes charakterisiert i.a. mehrere Übergänge verschiedener Atome, auch wenn deren Zeitverlauf sich qualitativ kaum unterscheidet.

Theoretisch ist es nun möglich, wechselseitig die unerwünschten Anteile herauszurechnen. Dieser Weg wurde nicht weiterverfolgt, da er stets eine größere Zahl zu verrechnender Gruppen bei zu langen Rechenzeiten erfordern würde.

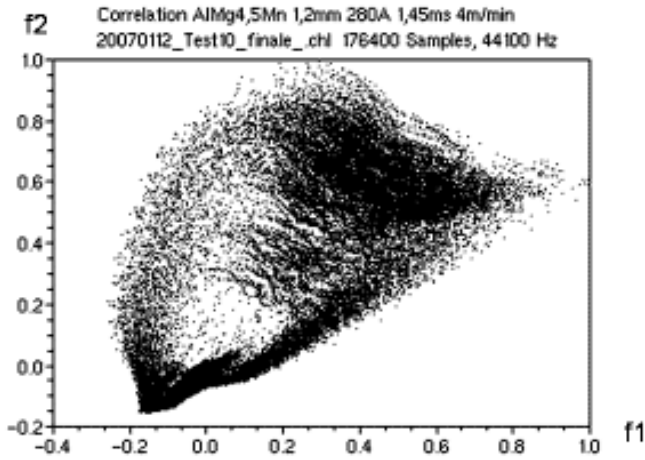


Abb. 3 Korrelationsplot der Zeitfunktionen der Gruppen L1 (950 nm) gegen L2 (380 nm), [4]

Statt dessen wurden Korrelationen von Gruppen mit dominanten Metallen und Argon untersucht, Abb.3. Zeitfunktionen verschiedener Liniengruppen wurden dazu mehrkanalig parallel mit Photodioden verschiedener Spektralcharakteristik aufgezeichnet [4]. Deren paarweise Korrelation miteinander zeigt nun ein erstaunliches und unerwartetes Phänomen: Je größer der spektrale Abstand der zueinander betrachteten Liniengruppen von einer gedachten Mittellinie bei etwa 600 nm ist (Abb.2), desto größer ist die Divergenz der Punktwolken (Abb.3).

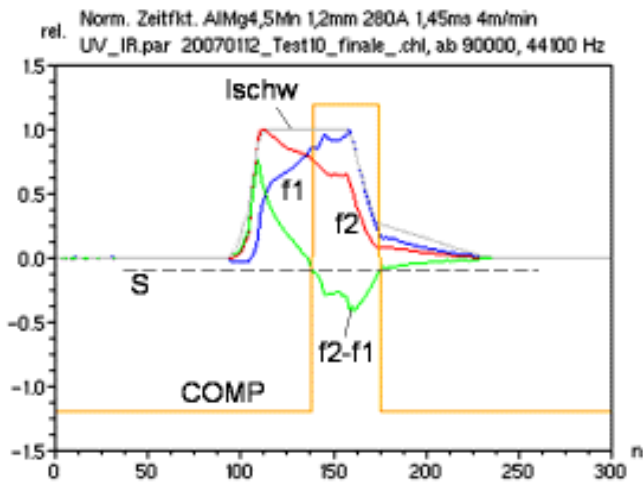


Abb. 4 Zeitfunktionen von Photodioden f1(L1, rot) und f2(L2, blau), Differenz f3 = f2 - f1, Schwellwertfunktion COMP, Schweißstrom Ischw. Abtastrate 1/n = 44 kHz, [4]

So sind zum Beispiel die beobachtbaren, orthogonalen Korrelationen der Zeitfunktionen für eine Diodenkombination Infrarot/UV wesentlich divergenter, als für Rot/Blau.

Anders ausgedrückt, sind die ‚parasitären‘ Anteile der jeweils anderen Seite um so deutlicher im Spektrum enthalten, je näher die beobachteten Gruppen beieinander liegen.

Bis auf einen Faktor (Verstärkung) sind die Zeitfunktionen breiter Bänder denen der einzelnen Metallatome um so ähnlicher, je kleiner die Wellenlänge des Maximums der Empfindlichkeit (Lx) ist.

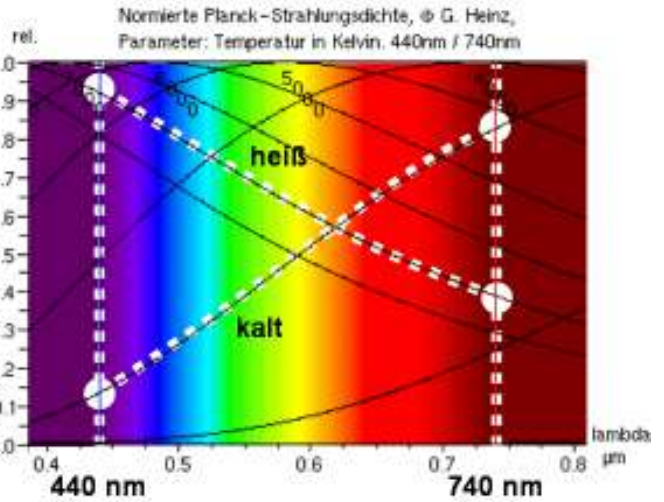


Abb. 5 H-Funktion der Liniengruppenmaxima L1 = 440 nm, L2 = 740 nm, Parameter T in Kelvin, [4]. Erwartbare Emissionen für 740 nm und 440 nm unterscheiden sich je nach Temperatur.

Die Untersuchungen zeigen damit, daß zur Detektion der Metalle eine Integration über ein relativ breites Band unterhalb von 550 nm genügt. Zur Detektion von Argon genügt eine Integration über alles oberhalb von 650 nm. So liegt es nahe, eine Breitband-Sensorik mit Photodioden einzuführen.

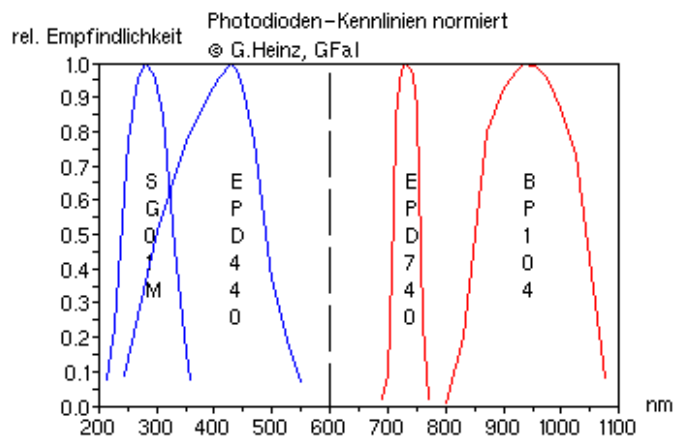


Abb. 6 Relative, spektrale Empfindlichkeit ausgewählter Fotodioden-Paare, [4]. Beste Ergebnisse werden symmetrisch zu 600 nm erzielt.

Da jeder Schweißimpuls ein dynamisches Aufheizen des Plasmas bewirkt, legt die intensive Beschäftigung mit Korrelationen von Liniengruppen nur einen Schluß nahe: die gegen Ende eines Pulses (Abb.4) beobachtbare, maximale Divergenz ist (in den Grenzen erster

Experimente und einer materialabhängigen Normierungskonstante) weder von den in der Gruppe wirkenden Atomen, noch von der Gruppenbreite abhängig. Vielmehr ist sie Ausdruck einer Verteilung, die einer Planckschen Strahlungsgleichung ähnelt, sie ist Ausdruck von Temperatur, Energieeintrag oder Metall-dampfkonzentration im Plasma.

4 Ein Gedankenexperiment

Es ist bekannt [6] u.a., das sich Atome im Plasma im lokalen, thermischen Gleichgewicht befinden, Kollisionsprozesse dominieren über Strahlungsprozesse, wir haben es nicht einmal mit einem grauen Strahler zu tun: Plancks Strahlungsformel ist nicht anwendbar. Gehen wir aber in einem Gedankenexperiment davon aus, daß es eine empirische Funktion H gäbe, die bis auf Normierungskonstanten einer auf gleiche Amplitude normierten, Planckschen Strahlungsgleichung identisch ist, so zeigt eine Kurvenschar dieser Funktion ein Verhalten, welches bis auf eine Verstärkungskonstante den mit den Photodioden gemessenen Zeitfunktionen entspricht, Abb.5.

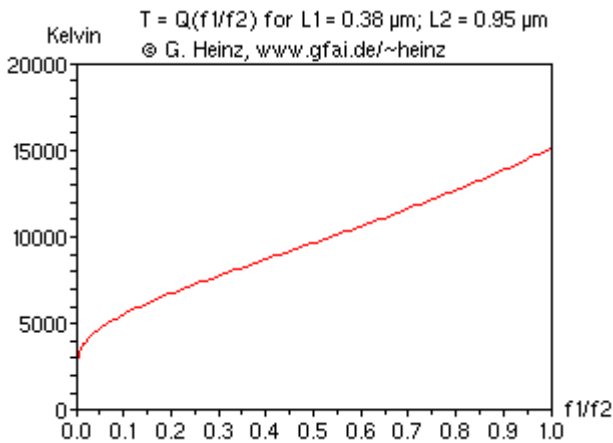


Abb. 7 Quotientenfunktion $T = Q(f_1/f_2)$ für zwei Liniengruppen $L_1 = 380 \text{ nm}$ und $L_2 = 950 \text{ nm}$ [4]

Im Zustand ‚kalt‘ (hier 3000 K) ist die L_2 -Emission hoch, die L_1 -Emission gering. Im Zustand ‚heiß‘ (hier 7000 K) ist die L_1 -Emission hoch, aber die L_2 -Emission gering.

Die relative Intensität läßt sich dann als Funktion der Temperatur T beider Liniengruppen L_1, L_2 darstellen

$$(1) \quad f_1 = H(L_1, T);$$

$$(2) \quad f_2 = H(L_2, T).$$

Division beider Funktionen ergibt eine Funktion Q^*

$$(3) \quad f_1/f_2 = Q^*(T, L_1, L_2).$$

Inversion von Q^* liefert eine monotone und eindeutige Funktion Q der gewünschten Abhängigkeit

$$(4) \quad T = Q(f_1/f_2, L_1, L_2)$$

für definierte Gruppenschwerpunkte L_1 und L_2 , siehe Abb.7. Damit wäre die Temperatur T im Plasma prinzipiell als Funktion Q des Quotienten der von zwei

Photodioden meßbaren Zeitfunktionen f_1 und f_2 ausdrückbar.

Mathematisch gilt diese Herleitung allerdings nur für Liniengruppen vernachlässigbarer Breite. Physikalisch hingegen nur für schwarze Strahler. Beide Annahmen schließen sich streng genommen gegenseitig aus, da die unendlich dünne Einzelinie des schwarzen Strahlers nicht einer Statistik genügen kann. Der Regler aber funktioniert. Hier ist sicher noch Grundlagenarbeit im Verständnis zwischen Quantenmechanik, Quantenstatistik und Lichtbogenphysik zu leisten.

Unter der Annahme, die benötigte H -Funktion möge sich auch theoretisch interpretieren lassen, wäre eine durchschnittlich meßbare Elektronentemperatur T aus der Quotientenfunktion Q der Zeitfunktionen f_1, f_2 ablesbar.

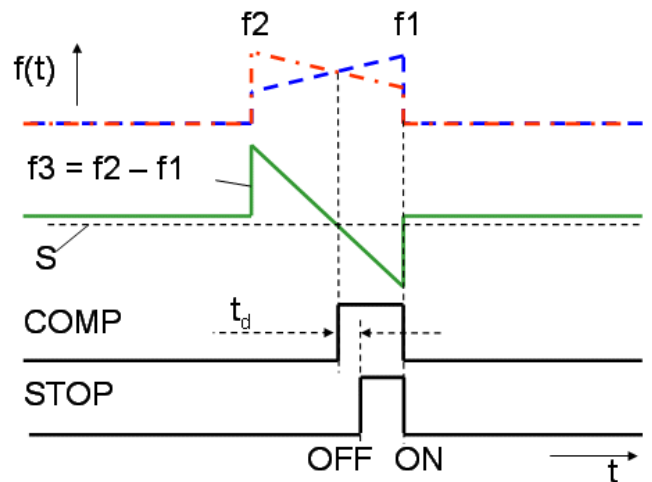


Abb. 8 Zur Funktion des Spektralreglers.

Der Spektralregler soll nun den Energieeintrag jedes Pulses dadurch ausregeln können, daß bei Überschreiten einer kritischen Temperatur T der Puls abgeschaltet wird. Gleichzeitig soll er ebenfalls dafür sorgen können, daß bei Unterschreiten dieser Temperatur wieder ein Puls gestartet wird. Dahinter steht die Forderung, das Plasma in einem definierten Temperaturintervall zu halten.

Die Entscheidung läßt sich in Quotientenform ausdrücken:

$$(5) \quad g \frac{f_1}{f_2} = 1?$$

wenn $g = g_1/g_2$ einen Verstärkungsquotienten darstellt, über den die Schaltschwelle eingestellt wird.

Sei die Zeitfunktion der Photodioden f_1' und f_2' und die eingestellte Verstärkung der Vorverstärker g_1 und g_2 , so läßt sich aus der Bedingung

$$(6) \quad f_2/f_1 = (f_2'g_2) / (f_1'g_1)$$

eine Ein- und Ausschaltbedingung in zwei Varianten formulieren

➤ in Quotientenform

$$(7) \quad (f_2'g_2) / (f_1'g_1) = f_2/f_1 = 1?$$

➤ in Differenzform

$$(8) \quad f_2 - f_1 = 0? \text{ (für } f_2/f_1 = 1).$$

Beide Varianten favorisieren bestimmte Applikationen. So ist die Quotientenform geeignet, um die Plasmatemperatur analytisch über eine Temperaturfunktion $T(f_2, f_1)$ zu bestimmen, Abb.10. Die Differenzform hingegen ist für die schaltungstechnische Realisierung des Reglers geeignet, Abb.8.

5 Der Spektralregler

Die Zeitfunktionen der Photodioden f_1 (z.B. UV) und f_2 (z.B. IR) werden zunächst U/I- gewandelt und verstärkt. Um dynamische Offsetdrift zu vermeiden, wurde ein spezieller Choppverstärker entwickelt, der nur in der Pulspause die Offsetdrift nachregelt. Ein dafür benötigtes Taktsignal wird aus dem letztlich gewonnenen Regelsignal rückgewonnen.

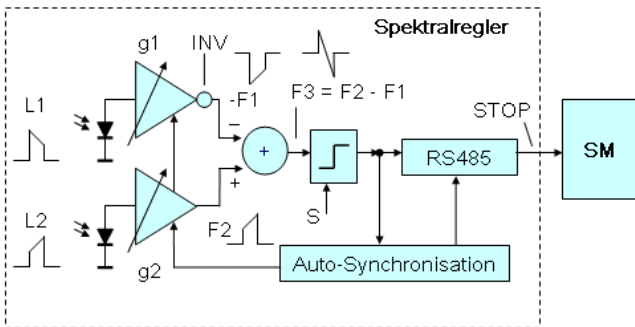


Abb. 9 Prinzipschaltung des Spektralreglers [4]

Damit entfällt die Notwendigkeit, ein Pulssynchronsignal von der Schweißmaschine zu beziehen. Man kann sowohl im Pulsbetrieb bei Vorgabe des Pulsstarts durch die Schweißmaschine, als auch im quasi-kontinuierlichen Betrieb arbeiten (Abb.14), wobei der Regler selbst den Pulsstart und den Pulsstop vorgibt. Zur Schweißmaschine SM (Abb.9) geht nur ein einziges Signal STOP, welches den internen Timer nachbildet. Bei der verwendeten Cloos Quinto GLC403 kann ein Mode für den Synchronbetrieb mehrerer Schweißmaschinen für die Signaleinkopplung über einen sog. Master-Slave Modul genutzt werden.



Abb. 10 Versuchsaufbau an der TU Berlin. Hinten der Brennerkopf, vorn der Spektralregler [3]

Nach der Vorverstärkung wird die Zeitfunktion f_1 invertiert. Die Summe ergibt dann $f_3 = f_2 + (-f_1) = f_2 - f_1$ (Dif-

ferenzform). Die Regeltemperatur wird über das Verhältnis der Verstärkungen beider Kanäle eingestellt. Eine anschließende Komparierung mit einem hier leicht im Negativen liegenden Schwellwert S (Abb.8, Abb.9) liefert ein Komparatorsignal COMP. Um hochfrequente Störungen zu eliminieren (shot noise), filtert ein digitales Tiefpaßglied das COMP- Signal. Dabei entsteht eine geringe Verzögerungszeit TD im Signalweg. Das STOP- Signal steuert dann die Schweißmaschine zur Störungsvermeidung über eine differentielle RS485-Schnittstelle.

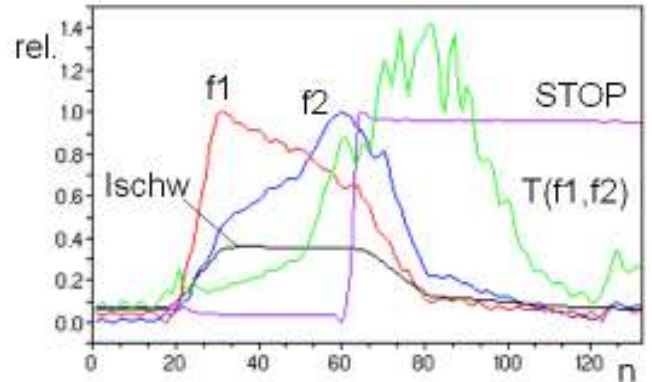


Abb. 11 Pulsabschaltung durch Spektralregler. $L_1 = 440 \text{ nm}$, $L_2 = 740 \text{ nm}$, berechnete Temperatur $T(f_1, f_2)$ in 10000K , Prozeß: $\text{AlMg4,5Mn } 1,2\text{mm } 280\text{A } 1,45\text{ms } 4\text{m/min}$ [4]

Sobald die Schweißmaschine abgeschaltet ist, verschwindet das COMP- Signal, wie auch das STOP-Signal, die Schweißmaschine schaltet wieder ein. Auf diese Weise entsteht ein quasikontinuierlicher Schaltbetrieb vom Typ eines Einpunktreglers.



Abb.12 Blick in das geöffnete Gehäuse [4] des zweiten Prototyps. Ein isolierendes Gehäuse mit innenliegender Schirmung sowie eine vierlagige Leiterplatte schützen vor kapazitiver und induktiver Einkopplung der Schweißmaschine

Soll die Schweißmaschine den Puls vorgeben, wird das STOP- Signal durch ein zusätzliches Halteglied solange verlängert, bis der Timer der Schweißmaschine selbst abgeschaltet hat. Auf diese Weise kann im Pulsbetrieb geschweißt werden. Der Spektralregler schaltet hierbei den Schweißstrom nur ab, die Schweißmaschine schaltet stets ein.

6 Versuchsergebnisse

Bis zum Projektende konnten nur exemplarische Tests an wenigen Materialpaarungen erfolgen [3]. Für jede Materialpaarung (Draht/Grundmaterial) ist die Temperaturschwelle über das Verstärkungsverhältnis der Photodioden einzustellen.

Es zeigt sich, daß bei geeignet gewählter Schaltschwelle eine Prozeß- Stabilisierung erreicht wird. Der Prozeß scheint akustisch zwar instabiler zu laufen, ein Blick auf die Daten und Schweißergebnisse aber zeigt, dass er im Gegenteil stabiler läuft, als ein vergleichbarer, unregelmäßiger Prozeß. Die Parameter für Pulsstrom und Grundstrom können z.B. stark verändert werden (30%), ohne daß es zu Prozeßabbruch kommt, Abb.13. Der Regler korrigiert den Energieeintrag über die Pulsdauer.

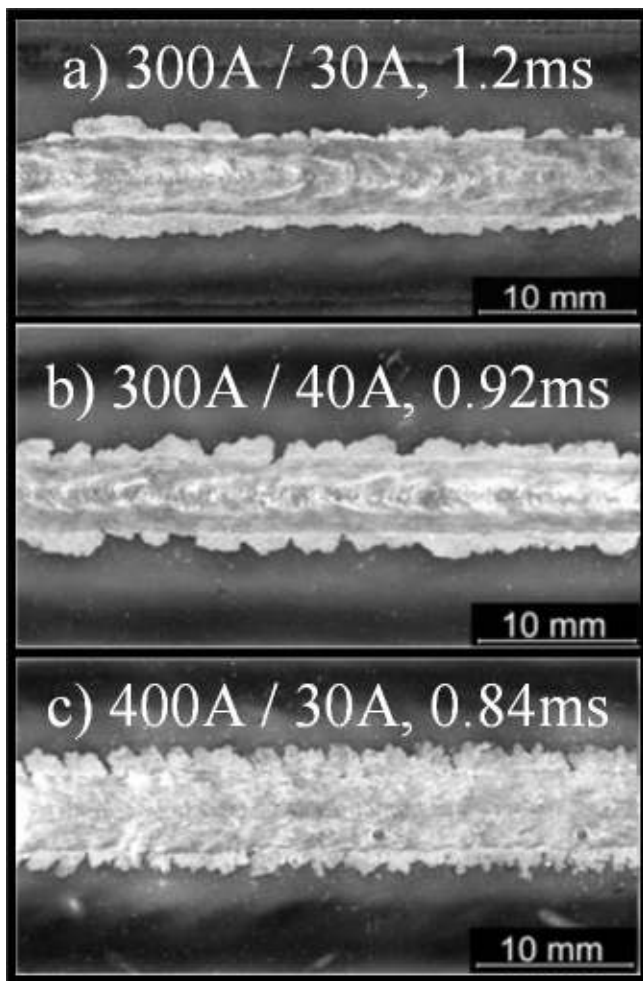


Abb. 13 Schweißen von AlMg4,5Mn mit Spektralregler bei Parametern, unter denen der Prozeß sonst abbrechen würde: Pulsstrom/Grundstrom und resultierende Pulsdauer. a) Norm, b) Grundstrom überhöht, c) Pulsstrom überhöht [3]

In Abb.13 erkennt man eine Veränderung der Rauheit der Naht, die auf veränderten Energieeintrag bzw. auf eine möglicherweise noch nicht optimal eingestellte Schaltschwelle des Spektralreglers hindeutet.

Im Vergleich zum klassischen Pulsschweißprozeß können höhere Stromstärken gewählt werden, damit ist i.a. eine verbesserte Tropfenablösung verbunden

(pinch effect). Die Tropfensynchronisation wird nicht verändert, Drahtvorschub und Pulspause sind weiterhin exakt aufeinander abzustimmen.

Im quasikontinuierlichen Mode treten Modulationseffekte der Helligkeit mit der Tropfenablösung auf, deren Nutzarmachung derzeit noch nicht verstanden wird.

Tests zeigen, daß das Verfahren bei Mischverbindungen, insbesondere bei Anwesenheit von Zink (Beschichtung oder Draht) oder anderen Materialien mit geringer Verdampfungstemperatur geeignet ist, Dampfexplosion zu minimieren und den Prozeß zu stabilisieren.

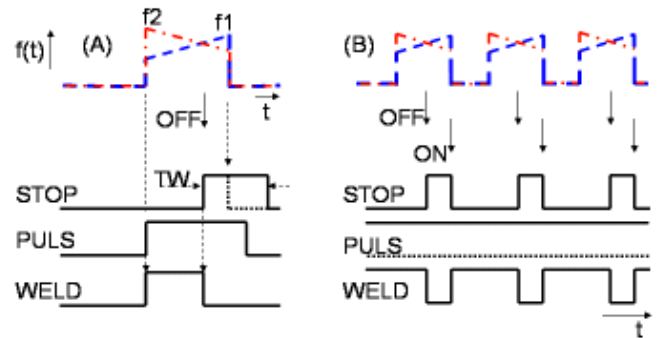


Abb. 14 Betriebsmoden des Spektralreglers: (A) Pulsbetrieb, (B) Quasikontinuierlicher Betrieb [4]

Die Untersuchungen befinden sich im Anfangsstadium. Experimente an dünnen Blechen stehen aus, die Reglerarchitektur bedarf dazu vereinfachter und schnell reproduzierbarer Einstellbarkeit der Verstärkungen zur Festlegung der Schalttemperatur.

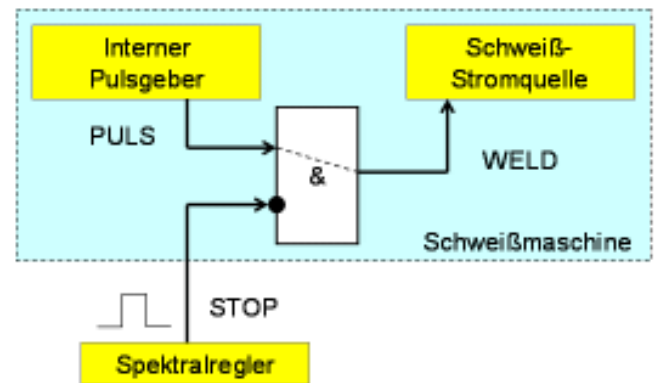


Abb. 15 Prinzip der Ankopplung an die Schweißmaschine. Solange der interne Pulsgeber PULS=1 liefert, schaltet der Spektralregler die Stromquelle ein und aus [4]

Erweiterte, experimentelle Untersuchungen sind im Folgeprojekt 'Spektral gesteuerte Pulsschweißmaschinen' (SPS) ab 7/2008 vorgesehen und auch erst dort möglich. Insbesondere sind Experimente zur Prozeßstabilisierung bei Extrembedingungen, zur Optimierung der Schaltschwelle und zur Vereinfachung der Prozeßsteuerung vorgesehen. Tests erfolgen an dünnen Blechen und Mischverbindungen.

Ziel ist es auch, zusätzliche, relevante Parameter (Badtemperatur) aus spektralen Gegebenheiten zu

erkennen und in Maschinenparameter (Grundstrom, Pulsstrom, Timing) umzusetzen.

7 Danksagung

Unser Dank gilt den Mitarbeitern im projektbegleitenden Ausschuß für wertvolle, fachliche Diskussionen und Ratschläge. Insbesondere gilt unser besonderer Dank Herrn Warmbier und Mitarbeitern der Fa. Cloos für die Anpassung der Schnittstelle und für die Bereitstellung von Schweißmaschinen. Unser Dank gilt ebenso Herrn Kuder von Fa. Rehm für die Bereitstellung von Maschinen und für Hilfe bei der Markteinschätzung und Produktdefinition. Herrn Prof. Dorn (TU-IWF) gilt unser Dank für viele, wertvolle Anregungen und Hinweise.

8 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Spektralregler gelingt es im Bereich von wenigen Mikrosekunden den Energieeintrag in das Plasma zu erfassen und den Pulsstrom der Schweißmaschine zu steuern. Für eine Materialpaarung (Draht/Grundmaterial) ist eine Temperatureinstellung über das Verstärkungsverhältnis von spektralselektiven Photodioden vorzunehmen.

Dampfexplosionen bei Mischverbindungen (St/Zn) können vermieden werden. Der Regler kann in zwei Betriebsarten arbeiten: Im Pulsbetrieb schaltet der Timer der Schweißmaschine jeden Puls ein und der Regler schaltet ab, im quasikontinuierlichen Betrieb steuert der Regler die Schweißmaschine komplett.

Mit Einsatz des Reglers wird es möglich, bei gleicher Qualität den Pulsstrom um bis zu 30% gegenüber Standardwerten zu überhöhen, damit ist eine Verstärkung der magnetischen Einschnürung und eine Verbesserung der Tropfenablösung möglich.

Weitere Forschungen zielen auf ein besseres Verständnis des geregelten Prozesses, der Untersuchung von Mischverbindungen und der Eignung für dünne Materialstärken wie auch der theoretischen Interpretation der Funktion. Einstellparameter der Schweißmaschine sollen reduziert werden. Spektralregler und Regelverfahren konnten patentiert werden.

9 Referenzen

- [1] Goecke, S.-F., Metzke, E., Spille-Kohoff, A., Langula, M.: ChopArc - MSG-Lichtbogenschweißen für den Ultraleichtbau. Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt. 09/2004, ISBN 3-8167-6766-4
- [2] Schoepp, H., Goett, G.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik. BMWi-Projekt IGF 14607 BG, Teilprojekt INP Greifswald, Abschlußbericht v. 21.12.2007
- [3] Hofmann, F., Dorn, L.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik. BMWi-Projekt IGF 14607 BG, Teilprojekt TU-IWF Berlin, Abschlußbericht v. 12.1.2008
- [4] Heinz, G.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik. BMWi-Projekt IGF 14607 BG, Teilprojekt GFal Berlin, Abschlußbericht v. 27.2.2008

- [5] Mirapeix, J., Cobo, A., Ja'uregui, C. and L'opez-Higuera J-M.: Fast algorithm for spectral processing with application to on-line welding quality assurance. Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 2623–2629
- [6] Ancona, A.; Spagnolo, V.; Lugara, P. M.; Ferrara, M.: Optical sensor for real-time monitoring of CO2 laser welding process. Applied Optics 40 (2001) 33, 6019-6025
- [7] Metzke, E.: Welding and plasma physics. EUROJOIN 5, Int. Kongress EWF, Wien, 2004, V35, S. 1-6
- [8] Dorn, L; Goecke, S.-F.: Choparc for superior MAG-welding of thin sheets with a thickness of less than 0,2 mm. JOM, International Conference on the Joining of Materials, Helsingor, 10 (2001) Seite 84-89
- [9] Kim, E.W.; Allemand, C.; Eagar, T.W.: Visible Light Emissions during Gas Tungsten Arc Welding and its Application to Weld Image Improvement. Welding Research Suppl., Dec.1987, pp. 369-377
- [10] Han GuoMing u.a. (Tjanjin Univ. China): Acquisition and pattern recognition of spectrum information of welding metal transfer. Materials & Design, Vol. 24, Issue 8, December 2003, pp. 699-703
- [11] P. J. Li, Y. M. Zhang: Analysis of an Arc Light Mechanism and Its Application in Sensing of the GTAW Process. Welding Research Supplement, Sept. 2000, 252-260
- [12] Li Junyue, Li Zhiyong, Li Huan, Xue Haitao: Basic theory and method of welding arc spectral information, Chinese Journal of Mechanical Engineering 2004/02
- [13] F. Valensi, N. Pellerin, S. Pellerin, K. Musiol, Ch. de Izarra, S. Zielińska, F. Briand: Experimental study of a MIG-MAG welding arc. 13th Congress on Plasma Physics, ICPP 2006, Kiev, May 22-26, 2006
- [14] L. O. Vilarinho and A. Scotti: Proposal for a Modified Fowler-Milne Method to Determine the Temperature Profile in TIG Welding. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. January-March 2004, Vol. XXVI, No.1/35

Kontakt:

Dr. G. Heinz, heinz@gfai.de