

Technische Universität Berlin (3/3)

Name der Forschungsstelle

14607 BG / GAG 4

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.02.06 bis 31.12.07

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.02.06 bis 31.12.07

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Forschungsthema:

**Optimierung des Energieeintrags
gepulster Lichtbogenfügeprozesse
mittels spektralsensitiver Sensorik**

(Gepulste Lichtbogenfügeprozesse)

Laufzeit des Vorhabens: 1.2.2006 bis 31.12.2007

Berichtszeitraum: 1.2.2006 bis 31.12.2007

Zuwendungsempfänger: GFal e.V.

Forschungsstelle 3 von 3:

1 GFal Berlin, 2 INP Greifswald, 3 TU-Berlin, IWF

Anschrift der Forschungsstelle:

Technische Universität Berlin

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb

Fachgebiet Fügetechnik und Beschichtungstechnik

Pascalstraße 8-9

10587 Berlin

Berlin, den 12.1.2008

- Lutz Dorn -

Ort, Datum

Unterschrift Projektleiter

Inhalt

Projektüberblick	57
1 Anforderungsanalyse.....	57
2 Konzeption des Versuchsstandes	58
3 Prozessauswahl.....	59
3.1 Versuche mit Kurzlichtbogen.....	59
3.2 Versuche mit Impulslichtbogen	60
4 Untersuchungen mit 6-Kanal- Breitband- Spektrometer	61
5 Entwicklungsbegleitung für 2-Kanal-Spektralregler	62
5.1 Reglerstrategie.....	62
5.2 Kopplung des Spektralreglers mit der Stromquelle	63
5.3 Inbetriebnahme des Spektralreglers	64
6 Fügen mit dem Spektralregler	64
7 Spektral geregelte Schweißversuche an AlMg4,5Mn	65
7.1 Schweißen mit Norm-Parametern	65
7.2 Schweißen im Grenzbereich.....	68
8 Lötversuche an verzinktem Stahlblech mit AlBz5Ni2-Lot.....	69
9 Zusammenfassung	71
10 Literatur, Vorträge, Veröffentlichungen	71
 ANLAGE Versuchsdurchführung TU-IWF	 73
dRec- Kanalbelegung Sensorkopf und Prozessregler ab Datum.....	73
Vorversuche und Experimente	73
Experimente mit dem 6-Kanal Spektrometer zur Entwicklung Spektralregler.....	74
Versuchsprogramm mit 2-Kanal Spektralregler	75

Projektüberblick

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war die Regelung des Energieeintrages beim Lichtbogenschweißen und -löten anhand von optischen Informationen aus der Spektralverteilung des Lichtbogens. Die Bearbeitung erfolgte an der TU-Berlin im Zeitraum 01.02.2006 – 31.12.2007 durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter. Die Arbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen.

Für viele Anwendungszwecke, u.a. das Löten verzinkter Bleche, das Schweißen von Aluminium-Magnesium-Legierungen und das Fügen dünnwandiger Bauteile allgemein ist eine Begrenzung des Energieeintrages beim Fügeprozess sinnvoll um Prozessstörungen zu minimieren. Basierend auf Versuchen zur Parameteroptimierung wurden spektrale Messungen über den zeitlichen Verlauf von gepulsten Fügeprozessen in einem breiten Wellenlängenbereich durchgeführt. Anhand dieser Übersichtsmessungen wurde der im Pulsverlauf steigende ultraviolette und fallende infrarote Spektralverlauf als geeignete Eingangsgröße für eine Prozessregelung ausgewählt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde von der GFaI ein 2-kanaliger Spektralregler entworfen und an der TU-Berlin in Zusammenarbeit mit der Fa. Cloos mit einer Schweißstromquelle gekoppelt. Mit Hilfe dieser Kombination konnte für 2 Fügeverfahren ein spektral geregelter Pulsprozess realisiert werden der relativ unabhängig von den an der Stromquelle eingestellten Prozessparametern Pulsdauer und Pulsstrom arbeitet.

1 Anforderungsanalyse

Der Projektbeginn war geprägt von der Auswahl der einzusetzenden Verfahren, Werkstoffe, Geräte und Anlagen, basierend auf den im Projektantrag definierten Anforderungen und Zielstellungen (**AP1**). Der Auswahl einer geeigneten Stromquelle kam dabei besondere Bedeutung zu. Die Möglichkeit extern in die Steuerungsrouinen der Stromquelle einzugreifen um die vorhandenen Schweißprogramme zu modifizieren bzw. um die Steuerung zeitweise an einen zu entwickelnden Spektralregler abzugeben, war dabei das Hauptkriterium. Für hochauflösende spektroskopische Untersuchungen am INP in Greifswald war es zudem erforderlich, das die Stromquelle entweder transportabel oder besser noch ein 2. identisches Gerät verfügbar ist.

Von den an der TU-Berlin zur Verfügung stehenden Geräten ELMA P30, Rehm MegaPuls und Cloos Quinto fiel die Wahl auf die Cloos Quinto GLC403. Sie deckte den angestrebten Versuchsbereich zum MIG/MAG-Schweißen und -Löten sowohl im Impuls- als auch im Kurzlichtbogenbereich ab, bot die Möglichkeit des externen Eingriffs in den Programmablauf und war zudem transportabel. Durch die Mitarbeit der Fa. Carl Cloos Schweißtechnik im projektbegleitenden Ausschuss wurde außerdem die Bereitstellung einer 2. Stromquelle in Aussicht gestellt. Die analoge Stromquelle ELMA P30 war nur einmal verfügbar und aufgrund ihrer mechanischen Anfälligkeit schwer zu transportieren. Bei der Rehm MegaPuls mangelte es an der Möglichkeit zur Einbindung eines externen Spektralreglers.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Lichtbogenfügeprozesse wurde aufgrund der eng begrenzten Projektdauer die Beschränkung auf jeweils ein Löt- und ein Schweißprozess als sinnvoll erachtet.

Es wurden zwei Fügeprozesse ausgewählt, bei denen Abweichungen von den optimalen Prozessparametern schnell zum Auftreten von Nahtfehlern führen.

1. MIG- bzw. MAG-Löten verzinkter Stahlbleche (Dicke 0,8 mm; Zinkschichtdicke 7µm elektrolytisch verzinkt) mit Aluminiumbronzelot AlBz5Ni2 Ø0,79 mm. Als Schutzgase wurden Argon4.6 und Arcal12 (Ar + 2% CO₂) eingesetzt. Mit zunehmendem Energieeintrag kommt es beim Lichtbogenlöten zum Verdampfen der Zinkschicht (> 907°C) und damit zu Poren, starker Spritzerwirkung und einem unruhigen Lichtbogen [1].

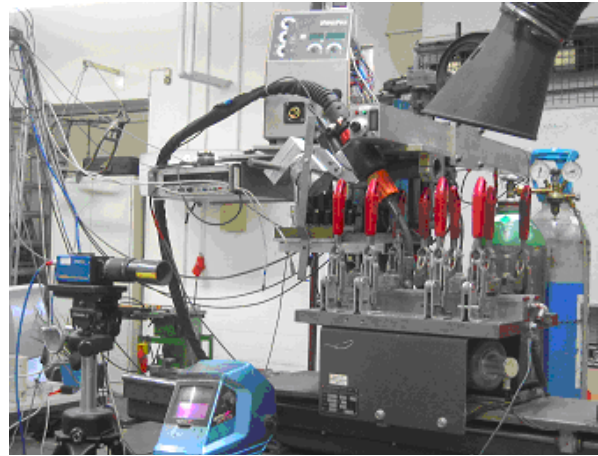


Abb.1: Schweißversuchsstand

2. MIG-Schweißen von Aluminiumblechen AlMg4,5Mn einer Dicke von 1,2mm mit artgleichem Zusatzdraht Ø1,2 mm. Beim Schweißen von AlMg4,5Mn besteht bei Überhitzung des Fügeprozesses aufgrund des niedrigeren Siedepunktes von Magnesium gegenüber Aluminium die Gefahr des Zerplatzens des Tropfens durch rasch expandierenden Metaldampf. Spritzer- und Porenbildung durch Turbulenzen im Schutzgasschleier sind die Folge [2].

2 Konzeption des Versuchsstandes

Die Basis des für die Versuchsdurchführung erforderlichen Versuchsstandes (AP2) bildet ein Linearfahrwerk PLS509S der Fa. Heiss. Es ermöglicht die Realisation von Schweißgeschwindigkeiten zwischen 0...1,5 m/s. Zur besseren Kamera-beobachtung wird mit feststehendem Brenner und fahrbarem Spanntisch gearbeitet. Die Schweißstromquelle GLC 403 Quinto wird ergänzt durch eine Roboterschweißpistole MRW500-31 mit 3-Meter Schlauchpaket sowie dem Drahtantrieb CK118RK und einem weiteren Schlauchpaket von 5 m zur Stromquelle. Zur genauen Ausrichtung des Schweißbrenners wurde dieser an einem in 2-Achsen verfahrbaren Portal befestigt.

In die Installation einbezogen ist ein Datenrekorder der GFaI mit 9 isolierten Kanälen und einer maximalen Abtastrate von 192kHz bei einer Aufnahmedauer von 2s, sowie eine Hochgeschwindigkeitskamera Typ Weinberger SpeedCam Visario mit maximal 10.000 Bildern pro Sekunde bei 512x192 Pixel. Über einen Trafoshunt LABO300A Fa. LEM wird der Schweißstrom gemessen und zusammen mit der Schweißspannung vom Datenrekorder aufgezeichnet.

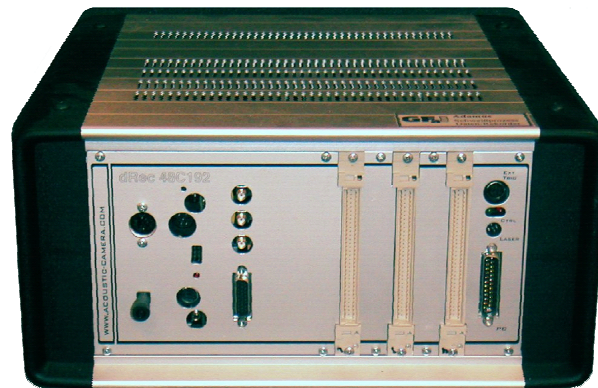


Abb.2: GFaI- Datenrekorder mit 3x3 isolierten Eingängen

Hochgeschwindigkeits-Kamera und Datenrekorder werden gemeinsam gestartet über einen isolierten Synchronschalter, der von der GFaI speziell entwickelt werden musste. Eine vorhandene Notlösung mit Relais lieferte keine ausreichende Synchronität.

Der Versuchsaufbau wird vervollständigt mit einer mobilen Rauchabzugseinrichtung um die insbesondere beim Löten von verzinkten Stahlblechen entstehenden Schweißrauche abzusaugen.

Mit Inbetriebnahme des Versuchsstandes erfolgte eine Überprüfung der Parameter der Messtechnik (AP3) sowie der variablen Prozessgrößen, wie z.B. der Schweißgeschwindigkeit. Anhand von Vergleichsmessungen wurde die durch Strom- und Spannungswandler bedingte Messungenauigkeit der aufgezeichneten Signale ermittelt.

3 Prozessauswahl

Da bekannt ist, dass mit Kurzlichtbogen bislang beste Ergebnisse in der Verringerung des Energieeintrages erreicht wurden, erschien dieser zunächst als Favorit zur Erreichung der Zielstellung.

3.1 Versuche mit Kurzlichtbogen

Der Kurzlichtbogen befindet sich im unteren Leistungsbereich der Lichtbogenverfahren und wird u.a. zum Fügen dünner Bleche bei geringem Energieeintrag eingesetzt.

Aus diesem Grund bildete er an der TU die Ausgangsbasis zur Durchführung erster Lötversuche mit dem Ziel stabile Prozessparameter auszuarbeiten.

Die ermittelten Parameter wurden genutzt, um am INP in Greifswald erste Übersichtsspektren und Vergleichsmessungen aufzunehmen.

Für das Lot AlBz5Ni2 wurde ein erster stabiler Fügeprozess unter Argon bei den Parametern

$v\text{-Schweiß} = 0,35 \text{ m/min}$; $v\text{-Draht} = 3,75 \text{ m/min}$; Spannung = 15,5V und Drossel = 25 gefunden.

Aufgrund der vorerst an TU-Berlin und INP-Greifswald vorhandenen unterschiedlichen Stromquellen-Ausstattung wurde es notwendig, die für die jeweiligen Werkstoffpaarungen experimentell ermittelten Parametersätze der Quinto aus Berlin an die Rehm Megapulse in Greifswald anzupassen.

Den zeitlichen Verlauf von Schweißstrom und Spannung für den Kurzlichtbogen zeigt Abb. 3., die Veränderungen im Lichtbogenprofil Abb. 4. Die Versuche am INP zeigten schnell, dass der Kurzlichtbogen mehr Probleme als Lösungen aufwarf.

Die für Vergleichsmessungen erforderliche konstante Bogenleistung war aufgrund der schwankenden Kurzschlussstromstärken und variierender Lichtbogenlängen nicht erreichbar.

Durch Zinkabdampfung verursachte wandernde Kathodenansätze und nicht zuletzt Tropfenabschattungen verhinderten reproduzierbare

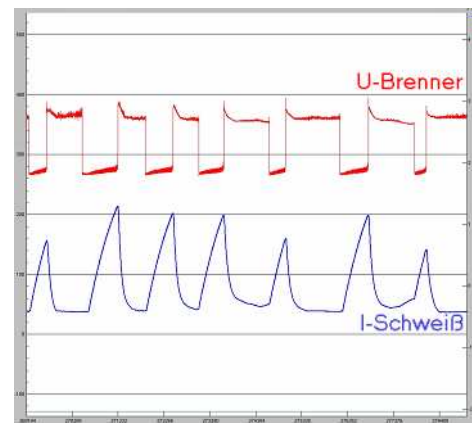


Abb. 3: Gemessener Strom- und Spannungsverlauf am Kurzlichtbogen

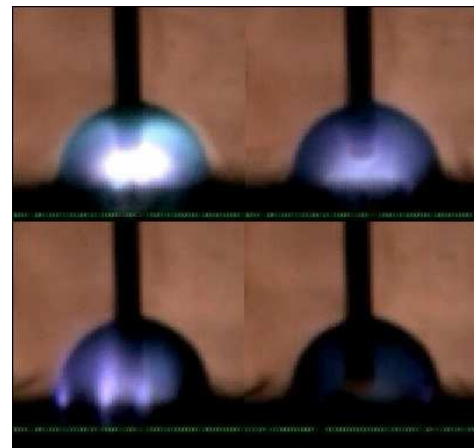


Abb. 4: Unkontrollierbare Schwankungen der Lichtintensität für den kurzschlussbehafteten Tropfenübergang bedeuteten das Aus für Kurzlichtbogen

Spektralmessungen. Eine Korrelation zwischen Emissionsintensität und Werkstoffübergang war beim Kurzlichtbogen spektroskopisch kaum möglich. Aus diesem Grund entschieden wir uns, die Entwicklung des Spektralreglers auf Impulslichtbogen zu orientieren [4].

3.2 Versuche mit Impulslichtbogen

Durch den Wechsel von Kurz- zu Impulslichtbogen mit fest vorgegebener Pulsdauer und Stromstärke erhalten wir einen reproduzierbaren Prozess der auch mit Spektrometer am INP weiter analysiert werden konnte.

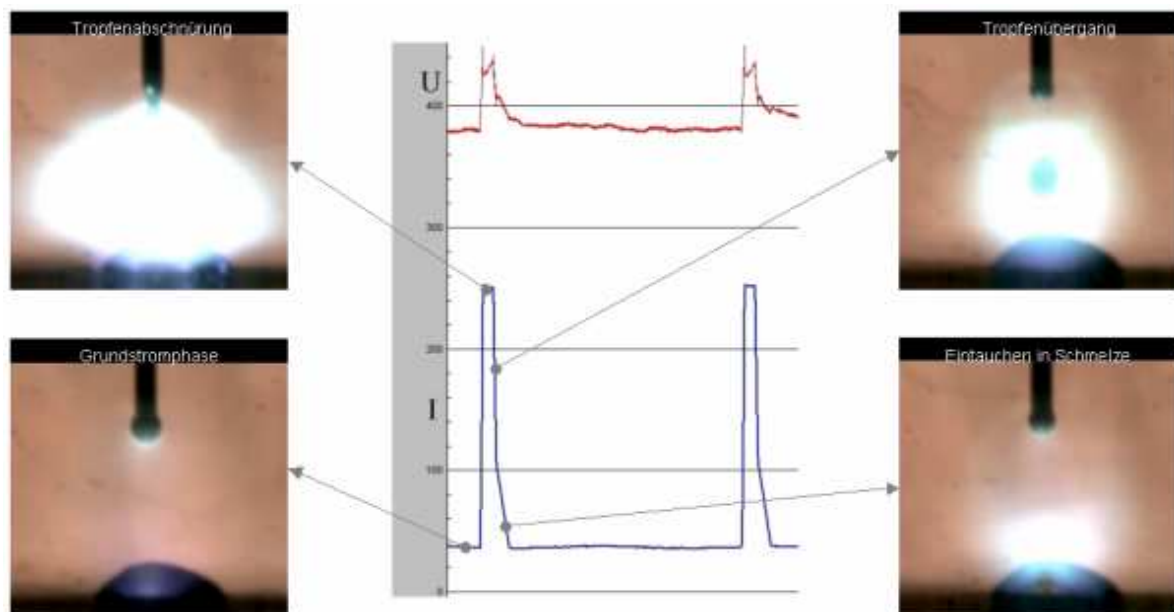


Abb. 5: Strom- /Spannungsverlauf für Impulslichtbogen [5]

Einen typischen Strom-/Spannungsverlauf mit Tropfenablösung für den Pulsprozess zeigt Abb. 5. In der Grundstromphase wird der Tropfen am Drahtende angeschmolzen, schnürt sich während der Pulsphase ab und löst sich mit der fallenden Stromflanke und geht in die Schmelze über.

Als Standard-Prozessparameter für das Impulslichtbogenlöten wurden gefunden:

v-Schweiß = 0,70 m/min; v-Draht = 3,00 m/min; $f = 33\text{Hz}$; I-basis = 28 A; $t_p = 1,5\text{ ms}$ und $I_p = 250\text{A}$.

Für das Impulslichtbogenschweißen von AlMg4,5Mn wurden folgende Prozessparameter für einen stabilen Prozess ermittelt:

v-Schweiß = 1,40 m/min; v-Draht = 4,00 m/min; $f = 130\text{ Hz}$; I-basis = 15 A; $t_p = 1,3\text{ ms}$ und $I_p = 280\text{ A}$.

Gewonnene Prozessparameter bildeten die Grundlage für folgende Untersuchungen mit 6-Kanal- Breitbandspektrometer und 2-Kanal-Spektralregler.

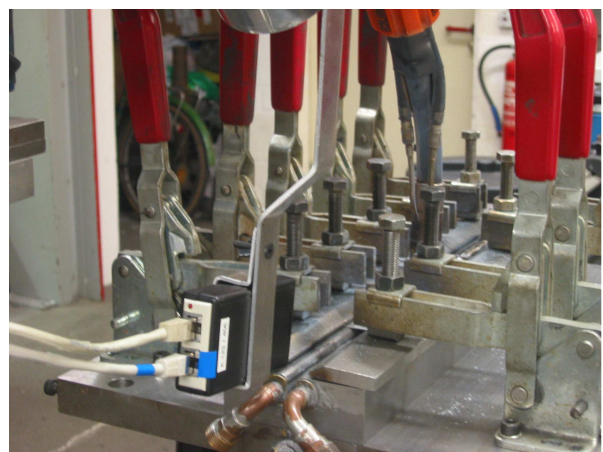


Abb.6: Integration des Spektrometers in den Versuchsstand der TU

4 Untersuchungen mit 6-Kanal-Breitband-Spektrometer

Ergebnisse der am INP durchgeführten Spektrometer- Untersuchungen bestätigten den von Eckhard Metzke am INP gefundenen Sachverhalt (siehe [11], Seite B-41), dass der zeitliche Verlauf einzelner Metaldampflinien im Gegensatz zum Verlauf der Schutzgaslinien im Lichtbogenplasma mit der Pulsdauer tatsächlich zunimmt.

Zur ersten PbA-Sitzung [13] wurde dann das Schutzgas als Referenzlinie vorgeschlagen (Dr. Schöpp, INP). Gleichzeitig wurde deutlich, dass bei jedem Schweiß- oder Lötvorgang eine Metalllinie anwesend ist. Auch kristallisierte sich heraus, dass Metalllinien interessierender Metalle in Gruppen gehäuft auftreten oder dicht beieinander liegen.

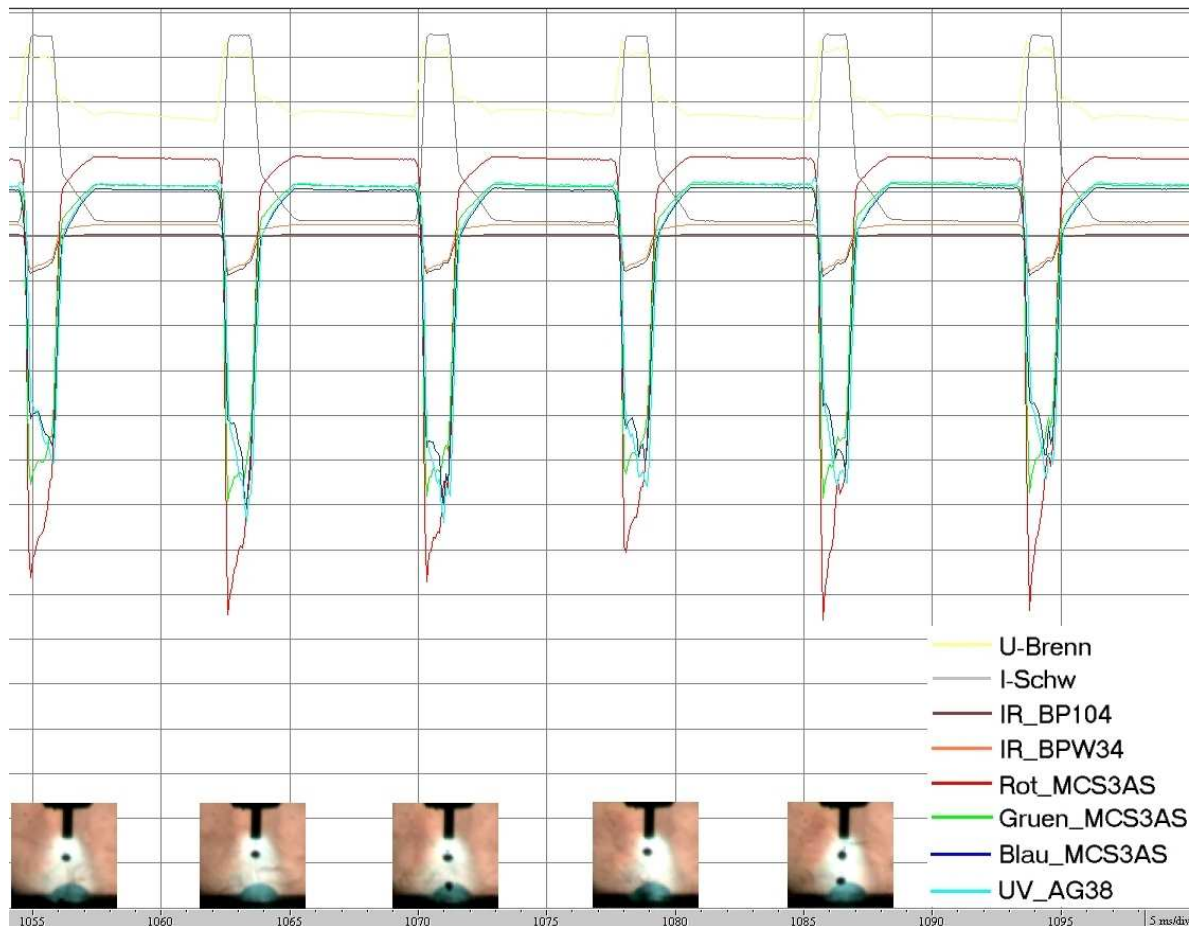


Abb.7: AlMg4,5Mn-Schweißprozess mit Tropfenübergang ohne Regler

Damit entstand die Idee, viele (oder noch besser alle) betreffenden Metalllinien als Gruppe zu detektieren. Dr. Heinz unterbreitete den damals als Scherz aufgenommenen Vorschlag, mit zwei Photodioden zu arbeiten. Eine sollte breitbandig alle Metalllinien erfassen, während die andere die Schutzgaslinien (Argon) breitbandig referenziert.

Aufbauend entstand die Idee, zunächst ein breitbandiges Fotodioden- Spektrometer zur Echtzeit-Prozessanalyse zu entwickeln. Mit dem 6-Kanal-Breitbandspektrometer wurde ein Werkzeug geschaffen für Experimente mit Fotodioden, der die Ausgangsbasis für den zu entwickelnden Spektralregler schuf.

Das 6-Kanal-Spektrometer wurde entsprechend Abb. 6 am Versuchsstand der TU in Betrieb genommen und getestet. Versuche zur Bestimmung des Einflusses von externen Lichtquellen auf die Messung wurden durchgeführt. Dabei wurde eine Beeinflussung durch die Raumbeleuchtung und das Gegenlicht der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahme

ausgeschlossen. Das Spektrometer wurde mit der Analyse der Messergebnisse weiterentwickelt. Dabei wurde die Verstärkerschaltung optimiert. Variation der Fotodioden-Paare ließ Rückschlüsse auf Eignung für den zu entwickelnden Regler erkennen.

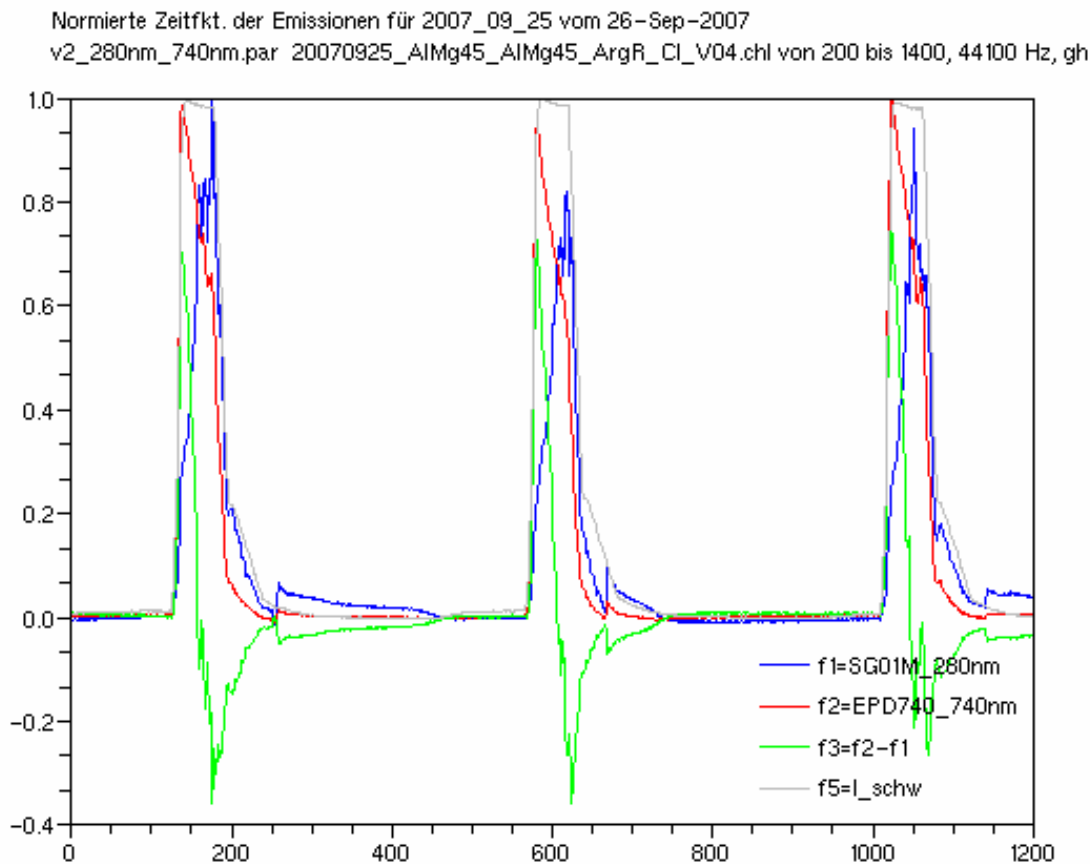


Abb.9: Zeitfunktion der Signale IR (rot); UV (blau) und Differenzsignal (grün)

Mit der nun vorhandenen Versuchsausrüstung wurden für die 2 ausgewählten Fügeprozesse über den von den 6 eingesetzten Fotodioden abgedeckten Wellenlängenbereich von 280...950nm die spektralen Signalverläufe aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte in Verbindung mit den Strom- / Spannungsverläufen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Abb. 7+8). Auch in diesen Versuchen bestätigte sich der im Pulsverlauf fallende infrarote Signalverlauf (roter Graph) und steigende ultraviolette Signalverlauf (blauer Graph). Es zeigte sich, dass die Dioden, welche einen teilweise übereinstimmenden Wellenlängenbereich abdeckten, auch einen ähnlichen Signalverlauf aufweisen.

5 Entwicklungsbegleitung für 2-Kanal-Spektralregler

5.1 Reglerstrategie

Basierend auf den Erkenntnissen der Messungen mit dem 6-Kanal-Spektrometer wurde für den Spektralregler eine Regelstrategie (**AP4**) mittels Differenzbildung aus IR- und UV-Signal entwickelt. Anhand der im Pulsverlauf abfallenden IR- und ansteigenden UV-Kennlinien wird ein Differenzsignal gebildet, welches bei Unterschreitung eines vorher festgelegten Schwellwertes über mehrere Zwischenschritte ein Stoppsignal zur Strompulsabschaltung erzeugt (Abb.9).

Dieses Stoppsignal ist mittels einstellbarer Pulsverzögerung und vorgewählter Signaldauer sowie über die Verstärkungsfaktoren von IR-, UV- und Summensignal beeinflussbar. Die Pulsabschaltung führt zu einer Begrenzung des Energieeintrages pro Stromimpuls. Die zugeführte Energie muss dabei ausreichend für einen stabilen Tropfenübergang sein, soll zugleich aber z.B. ein Aufplatzen des Tropfens verhindern. Aufgrund der hohen Anforderungen (Pulszeiten von 1...2 ms) in denen die Messwerte aufgenommen, verarbeitet und ein entsprechendes Steuersignal in den Prozess rückgekoppelt werden muss, wurde der Aufbau eines Hardwarecontrollers zur Ansteuerung der Stromquelle erforderlich.

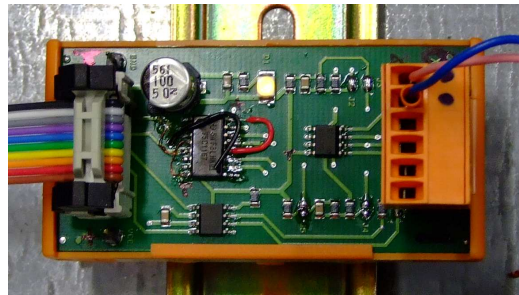


Abb.10: RS422-Schnittstelle der Quinto GLC403 'Master-Slave'

5.2 Kopplung des Spektralreglers mit der Stromquelle

Für die Kopplung des Spektralreglers mit der Stromquelle Quinto GLC403 (Abb.11) wurde von Fa. Cloos eine zusätzliche RS422-Schnittstelle vorbereitet, die mit dem Spektralregler kommuniziert (**AP5**). Sie besteht aus einer sog. Master/Slave- Platine Abb.10 und einer angepassten Firmware für die Stromquelle. Mit der Platine sind die Ausgabe des Pulssynchronsignales und die Einspeisung des Pulsstoppsignales möglich. Die Modifikation erlaubt einen externen Eingriff in das Stromprogramm, um den Stromimpuls in Abhängigkeit von der Intensität der ultravioletten und infraroten Strahlungsbestandteile des Lichtbogens individuell zu beenden. Spezielle DSP-Anpassungen wurden von Fa. Cloos bereitgestellt.

Da es nicht möglich ist, DSP und Programmierung einer so komplexen Schweißstromquelle für ein Experiment komplett neu zu entwickeln, waren Anpassungen zu finden.

Der Anschluss des Master/Slave- Moduls gestattete die Einrichtung einer RS422-Schnittstelle, über die der Spektralregler auf zwei bidirektionalen Leitungen kommunizieren kann. Daraus entstehende Probleme mit der Software konnten noch nicht abschließend behoben werden. Es blieben einige Betriebseinschränkungen. So kann das Master-Slave Modul erst nach dem vollständigen Start der Stromquellensoftware zugeschaltet werden, da es sonst vom Prozessregler nicht erkannt wird. Auch muss die Stromquelle im Pulsmodus I/I mit vorgegebenem Basis- und Pulsstrom betrieben werden, der



Abb. 11: Erste, mit Spektralregler ausgerüstete Schweißmaschine

Betrieb in anderen Modi ist ohne weitere Modifikationen der Stromquellensoftware zur Zeit noch nicht möglich.

Parallel zum Anschluss an die Stromquelle kann an den Spektralregler zur Datenaufzeichnung der Mehrkanal- Datenrekorder angeschlossen werden (Abb.3). Neben dem Strom- und Spannungsverlauf können damit die Signalverläufe IR, UV, das Differenzsignal SUM, das Zwischensignal COMP und das Stoppsignal, sowie das intern erzeugte Synchronsignal aufgezeichnet werden. Die Spannungsversorgung des Spektralreglers kann sowohl über die Schweißstromquelle als auch über den Datenrekorder erfolgen. Um Störeinstrahlungen zu minimieren, werden die Geräte mittels CAT5-Netzwerkkabel im differentiellen Betrieb verbunden. Analog zu den Versuchen mit dem 6-Kanal-Breitbandspektrometer wird der Spektralregler am Brenner montiert.

5.3 Inbetriebnahme des Spektralreglers

Die Inbetriebnahme des Spektralreglers erfolgte in 2 Schritten:

- Funktionsprobe ohne Verbindung zur Stromquelle
- Test der Stromquellenansteuerung

Erste Funktionstests haben die prinzipielle Funktion des Spektralreglers bestätigt. Mittels Datenrecorder erfolgte die Aufzeichnung und Auswertung der Signalverläufe. Nach erforderlicher Grobeinstellung der Verstärkungsfaktoren für die Signale UV; IR und IR+UV wurden vom Controller reproduzierbare Stopimpulse erzeugt (**AP6**). Zur Inbetriebnahme sind die Verstärkungen und Delays am Spektralregler zu justieren.

Im 2.Schritt erfolgt die Verbindung des Spektralreglers mit der Stromquelle. Zum Nachweis einer erfolgreichen Pulsabschaltung wird an der Schweißmaschine ein überlanger Impuls eingestellt, der dann vorzeitig vom Spektralregler abgeschaltet wird. So wurde z.B. beim Schweißen von AlMg4,5Mn die Pulsdauer von 1,2 (ermittelter Optimalwert) auf 3,0 ms erhöht.

Sämtliche Messungen wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera begleitet, die über eine von Dr. Heinz entwickelte, isolierte Synchronschaltung (IsoSwitch oder Syncswitch) mit dem Datenrecorder zusammen gestartet wird. Anfangs gab es Probleme, die Geräte zeitlich exakt zu synchronisieren. Das enorm hohe Störpotential der Schweißstromquelle macht die Kopplung von mehr als zwei Geräten, die noch dazu schutzgeerdet sind, nahezu unmöglich.

6 Fügen mit dem Spektralregler

Nach der Fertigstellung des Spektralreglers und erfolgreicher Kopplung mit der Stromquelle stand die Durchführung von Versuchen zur Optimierung und Anpassung der Parametereinstellungen an verschiedene Fügeprozesse an (**AP7-9**). Einflussmöglichkeiten zur Prozessbeeinflussung ergeben sich über die Stromquelle mit Frequenz, Drahtvorschub, Pulsstrom und Grundstrom sowie über den Spektralregler der die individuelle Pulsdauer durch Variation der Verstärkungsfaktoren bestimmt.

Es wurden Auftragsnähte in PA-Position unter Argon-Schutzgas geschweißt. Dazu fahren die eingespannten Probenbleche auf einem Linearfahrwerk unter dem fest montierten Brennerkopf hindurch. Es wurden wieder 2 Werkstoffkombinationen untersucht, das Schweißen von Aluminiumblechen AlMg4,5Mn 1,2mm mit artgleichem Zusatzdraht Ø1,2mm, sowie das Löten von verzinktem Stahlblech 0,8mm (Zinkschichtdicke 7µm elektrolytisch verzinkt) mit AlBz5Ni2 Ø0,79mm.

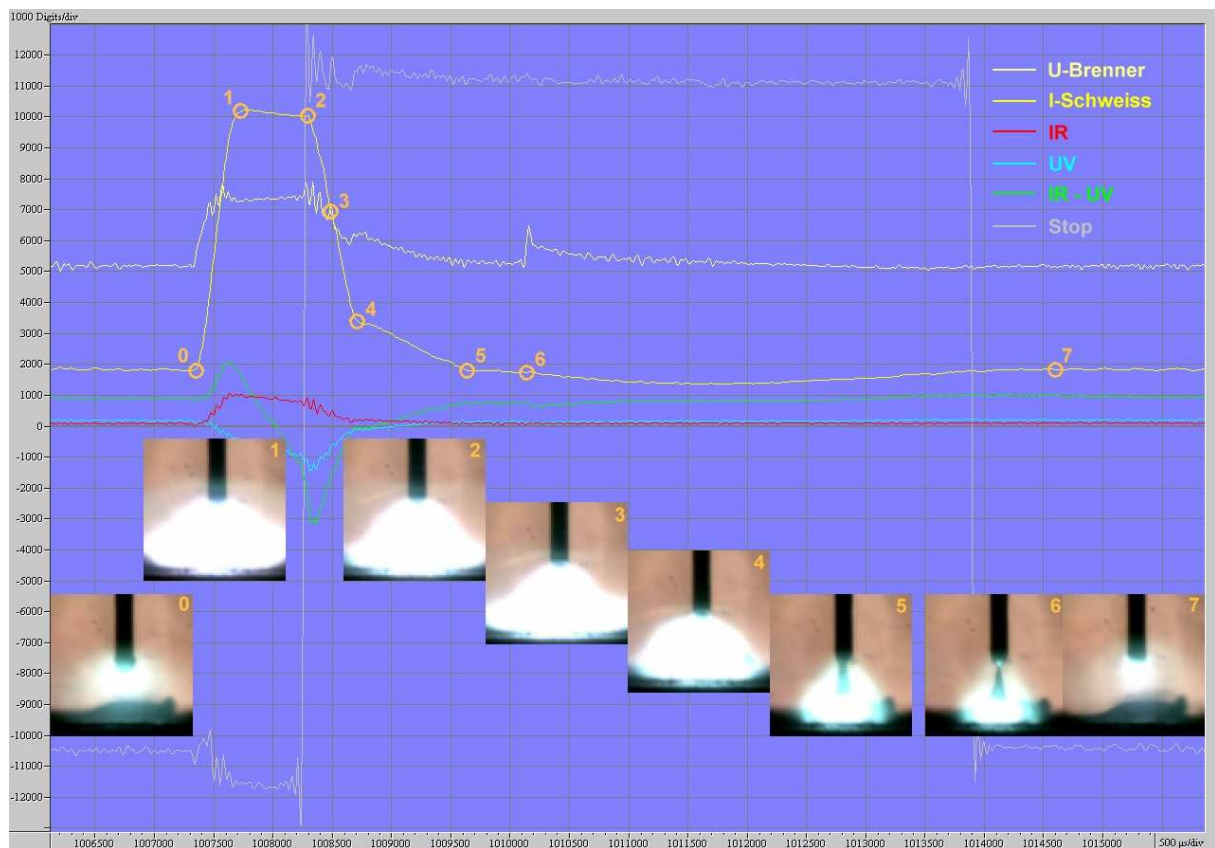


Abb.12: Strom-/Spannungsverlauf in Korrespondenz zu Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera. Man beachte die Fotonummerierung. Der Spannungsanstieg bei 6 zeigt den Tropfenübergang (AlMg4,5Mn).

Anhand der aufgezeichneten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Signaldaten sollte erkannt werden, wie der Fügeprozess durch die Pulsabschaltung modifiziert wird. Eine Gegenüberstellung der Signalverläufe zu den High-Speed-Kameraaufnahmen zeigt Abb.8 für das Aluminiumschweißen. Zum Pulsbeginn ist an der Drahtspitze ein während der Grundstromphase aufgeschmolzenes Materialvolumen vorhanden. Mit Pulsbeginn steigt die Intensität des Lichtbogens stark an bis der Strom sein Maximum erreicht hat, es wird weiterer Elektrodenwerkstoff aufgeschmolzen. Unmittelbar nachdem der Spektralregler das Stoppsignal erzeugt, wird der Pulsstrom von der Stromquelle abgeschaltet. In der fallenden Stromflanke beginnt sich dann an der Elektrodenspitze ein Tropfen auszuformen der dann ca. 1...2 ms nach Pulsabschaltung sich von der Elektrodenspitze löst und in die Schmelze übergeht. Der Lichtbogen befindet sich wieder in der Grundstromphase und der Pulsprozess beginnt von neuem.

7 Spektral geregelte Schweißversuche an AlMg4,5Mn

7.1 Schweißen mit Norm-Parametern

Anhand der in Vorversuchen ausgearbeiteten Parametersätze wurden Versuche unternommen um die Funktion des Spektralreglers zu verifizieren. Es wurde dabei unter anderem untersucht, wie er auf Parameterabweichungen (z.B. Erhöhung des Pulsstromes / Grundstromes) reagiert.

Begonnen wurde mit der Versuchsreihe zum MIG-Schweißen mit AlMg4,5Mn-Blechen. Die Basis dazu bildeten die in den Vorversuchen manuell optimierten Einstellwerte (Tabelle 1). Mit diesen Einstellwerten war unter konstanten Laborbedingungen ein stabiler Schweißprozess möglich. In der praktischen Anwendung dieses Fügeverfahrens kommt es jedoch gerade im Dünnblechbereich aufgrund der fixen Prozessparameter durch Prozessstörungen und –schwankungen häufig zu Nahtfehlern. Diese können sowohl in einem Energieüberschuss und damit dem Aufplatzen der Metalltropfen, als auch in einem Energiedefizit mit unregelmäßiger Tropfenablösung bis hin zum kurzschlussbehafteten Tropfenübergang begründet sein.

Gas	Argon R
v-Tisch [m/min]	1,40
v-Draht [m/min]	3,80
Frequenz f [Hz]	60
Basisstrom Ib [A]	30
Pulsdauer tp [ms]	1,2
Pulsstrom Ip [A]	300

Tab. 1: Schweißparameter

Diese Problematik wurde mit Spektralregler untersucht. Da eine individuelle, von den aktuellen Vorgängen im Lichtbogen abhängige Pulsdauer und damit Prozesstemperatur für jeden Strompuls generiert wird, ergeben sich komplexe, im Moment noch sehr schwer überschaubare Veränderungen in den wesentlichen Prozessparametern.

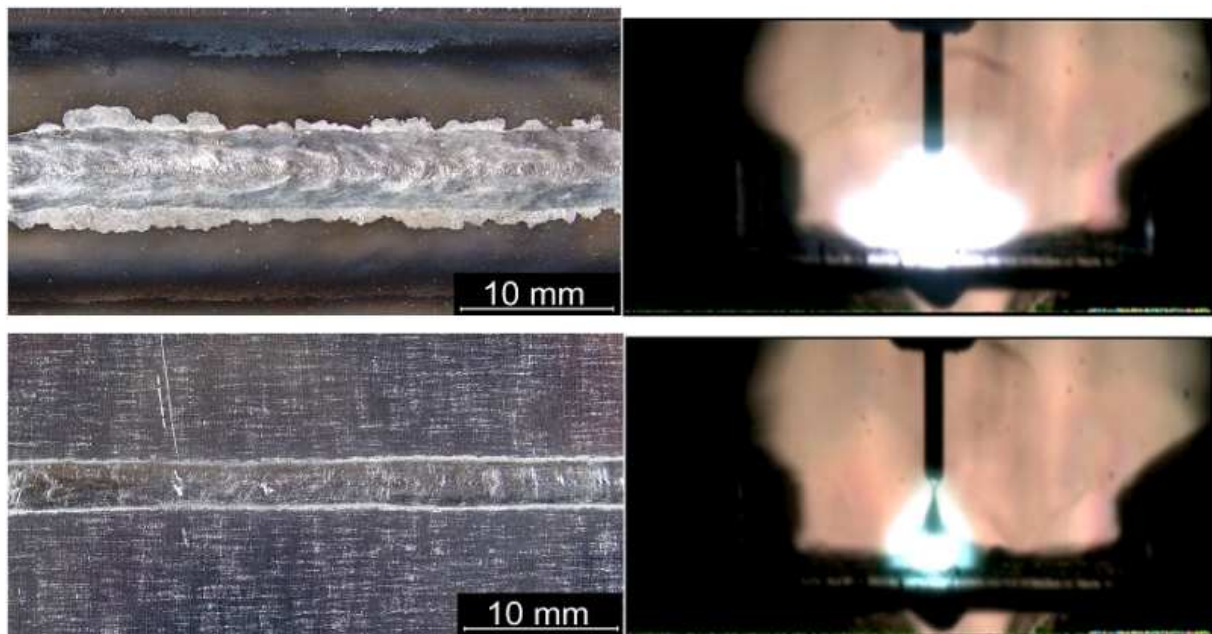


Abb.13: Schweißungen mit Spektralregler. Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter), Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie bei Tropfenübergang (darunter)

So scheint der Prozess akustisch instabiler zu laufen. Ein Blick auf die Daten und Schweißergebnisse aber zeigt, dass er im Gegenteil meist stabiler läuft, als ein vergleichbarer, unregelmäßiger Prozess.

Durch den Einsatz des Spektralreglers wird bei AlMg4,5Mn die mittlere Pulsdauer bei gleich bleibender Prozessstabilität und Nahtoptik von 1,2 ms auf 1,04 ms gesenkt. Dabei bewegen sich die erzeugten Strompulse im Bereich zwischen 0,92... 1,16 ms. Das Nahtbild und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dieses Prozesses sind in Abb. 13 dargestellt.

Ein abschließendes Urteil ist derzeit noch nicht möglich, da wir den spektral geregelten Prozess noch nicht gut genug verstehen. Noch fehlt der Stoff, der in Berufsjahren entsteht: Erfahrung im Umgang mit diesem neuen Regelkreis, der Wissen über den Haufen wirft, welches ein Schweißingenieur mit unregelmäßigen Prozessen erworben hat.

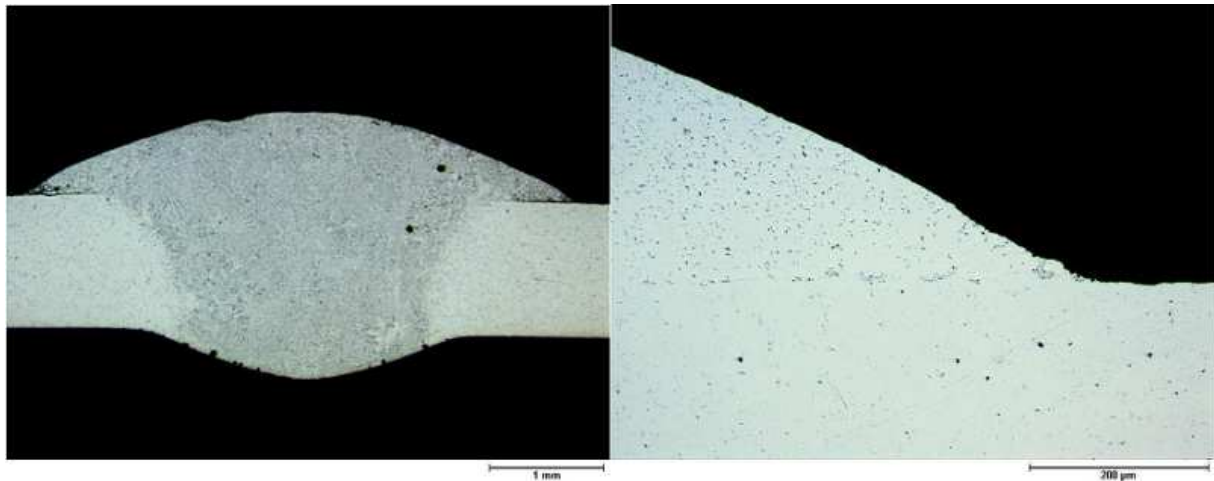


Abb.14: Eine mit Spektralregler geschweißte Probe zeigt eine saubere Schliifffläche (3:40min in 33% HNO₃ geätzt)

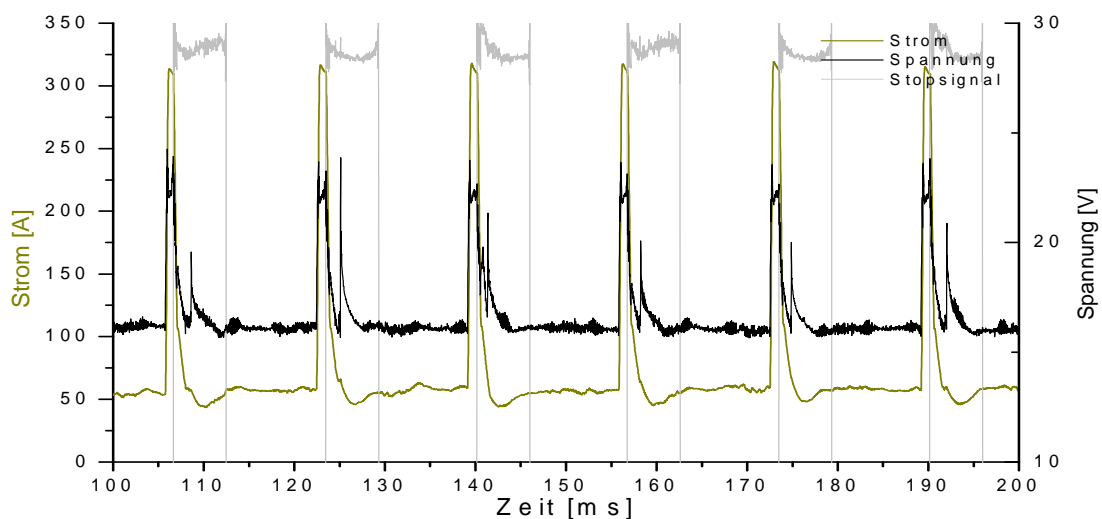


Abb. 15: Signalverlauf von Strom, Spannung und Stoppsignal

	manuell optimiert	mit Prozessregler		
		I _p = 400 A I _b = 40 A		
Ø Pulsdauer [ms]	1,2 (Einstellwert)	1,04	0,84	0,92
min. Pulsdauer [ms]		0,92	0,74	0,82
max. Pulsdauer [ms]		1,16	0,93	1,03

Tab. 2: Veränderung der Pulszeiten mit Spektralregler (Parameter nach Tab. 1)

Der Querschliff einer mit Spektralregler geschweißten Probe ist in Abb. 14 dargestellt. Durch Ätzung in 33%iger HNO₃-Lösung konnte die Wärmeeinflusszone sichtbar gemacht werden.

Abbildung 15 zeigt den Signalverlauf von Schweißstrom, –spannung und Stoppsignal für den geregelten Prozess. Deutlich ist hier 1..2 ms nach Pulsabschaltung durch den Spektralregler ein Spannungsausschlag erkennbar, der den Tropfenübergang ins Schweißbad kennzeichnet.

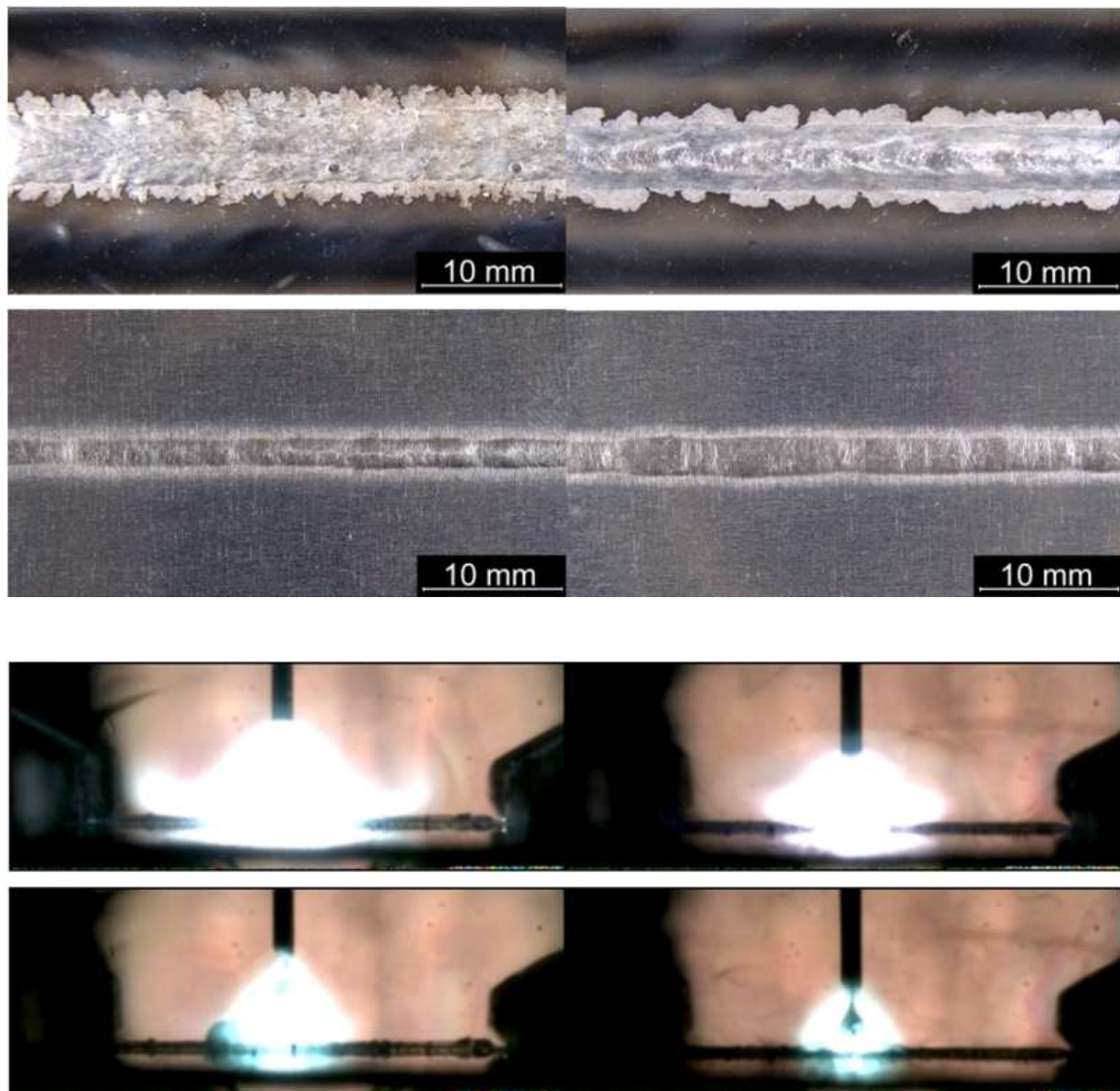


Abb.16: a) Schweißungen mit Spektralregler. Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter), b) Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie bei Tropfenübergang (darunter), linke Seite mit überhöhtem Pulsstrom 400A; rechte Seite bei überhöhtem Basisstrom 40A

7.2 Schweißen im Grenzbereich

Um die Möglichkeiten des Controllers auszuloten, wurden Versuche mit extremer Variation des Schweißstromes durchgeführt. Sowohl bei Erhöhung des Pulsstromes um 100 auf 400 A als auch bei Anhebung des Basisstromes von 30 auf 40 A wurde durch den Spektralregler ein stabiler Prozess aufrecht erhalten. Bei 400 A Pulsstrom stellte sich eine mittlere Pulsdauer von 0,84 ms mit einem Minimum von 0,74 ms und einem Maximum von 0,93 ms ein, für den Versuch mit 40 A Basisstrom lagen die Werte bei 0,92 ms mit Min. 0,82 ms und Max. 1,03

ms. Wie erwartet wird durch den Spektralregler der überhöhte Strom durch eine verkürzte Pulsdauer ausgegelt.

Die Nahtoptik und das Lichtbogenprofil sind in Abb.16a/b dargestellt. Bei erhöhtem Pulsstrom tritt eine stärkere Oxydation der Nahtoberfläche auf. Der erhöhte Pulsstrom wird deutlich im Profil des Lichtbogens der Hochgeschwindigkeitsaufnahme sichtbar.

Ohne Spektralregler käme es bei diesen Extremparametern durch den vorhandenen Energieüberschuss zu Nahtfehlern und zu starker Niederschlagsbildung aufgrund zahlreicher, explodierender Tropfen. Die im Lichtbogen entstehenden Metaldämpfe oxidieren hierbei durch den Kontakt mit Sauerstoff und setzen sich neben der Naht als schwarzer Niederschlag auf der Blechoberfläche ab. Die Schicht haftet allerdings nicht, sie lässt sich mit einem Pinsel entfernen.

Gas	Argon R
v-Tisch [m/min]	0,80
v-Draht [m/min]	4,40
Frequenz f [Hz]	75
Basisstrom Ib [A]	25
Pulsdauer tp [ms]	1,5
Pulsstrom Ip [A]	260

Tab. 3: Lötparameter

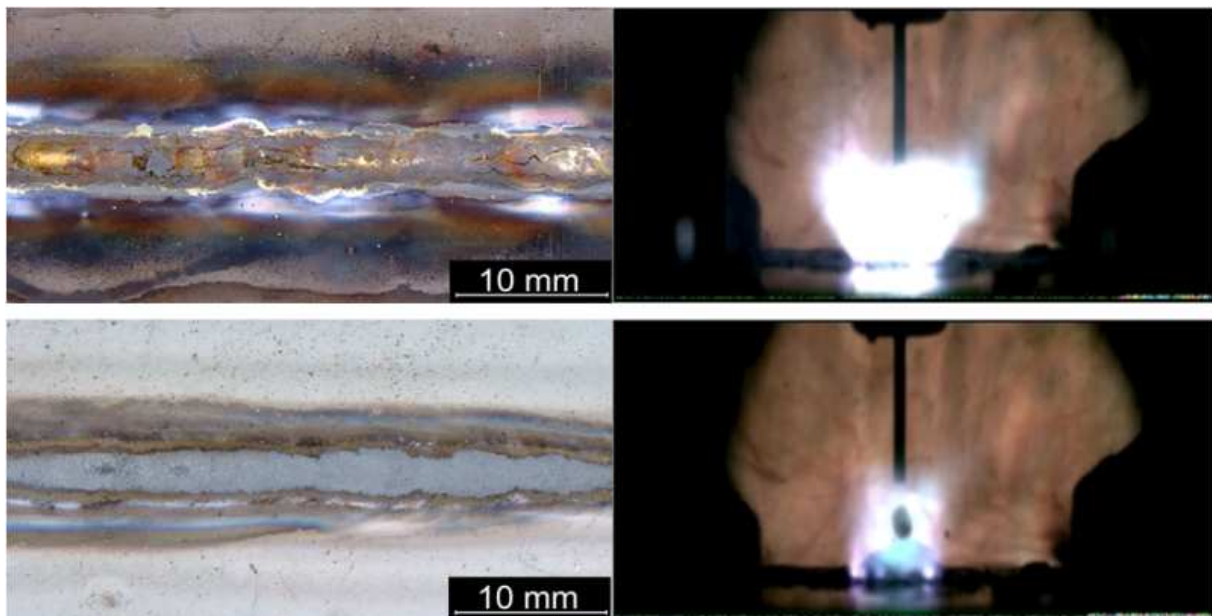


Abb.17: Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter). Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie Tropfenübergang mit aktivem Prozessregler (darunter)

8 Lötversuche an verzinktem Stahlblech mit AlBz5Ni2-Lot

Analog zum Schweißprozess wurde der Spektralregler auch auf seine Eignung zum MIG-Löten untersucht. Im Gegensatz zum MIG-Schweißen wird hier nur der zugeführte Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen, dessen Schmelztemperatur unter der des Grundwerkstoffes liegt. Darin ist auch die geringere erforderliche Streckenenergie für dieses Fügeverfahren begründet. Im Lichtbogen kommt es trotzdem partiell zur Verdampfung der aus Korrosionsschutzgründen auf die Blechoberfläche elektrolytisch aufgetragenen Zinkschicht.

Die Zinkverdampfung vermag den Fügeprozess wesentlich zu beeinflussen indem es zu Turbulenzen in der Schutzgasströmung und Porenbildung im Lötgut führen kann. Die experimentelle Optimierung der Versuchsparameter gestaltete sich deshalb wesentlich aufwendiger.

Um diese Prozessstörungen zu minimieren ist mit möglichst geringer Energiezufuhr zu lüten. Die auf Vorversuchen basierenden Ausgangsparameter für den Lötprozess zeigt Tab.3, wobei hier in jedem 2.Puls eine Tropfenablösung erfolgt. Aufgrund der veränderten Streckenenergie im Vergleich zum Aluminiumschweißen, die sich natürlich auch auf die Lichtbogenausbildung und dessen Strahlungsintensität auswirkt, wird für den Lötprozess eine Anpassung der Kanalverstärkungsfaktoren im Spektralregler notwendig. Die Verringerung des Energieinputs erfordert eine höhere Signalverstärkung.

In den Versuchsreihen scheinen sich auch für den Lötprozess gewisse Vorteile eines spektral geregelten Fügeverfahrens zu bestätigen.

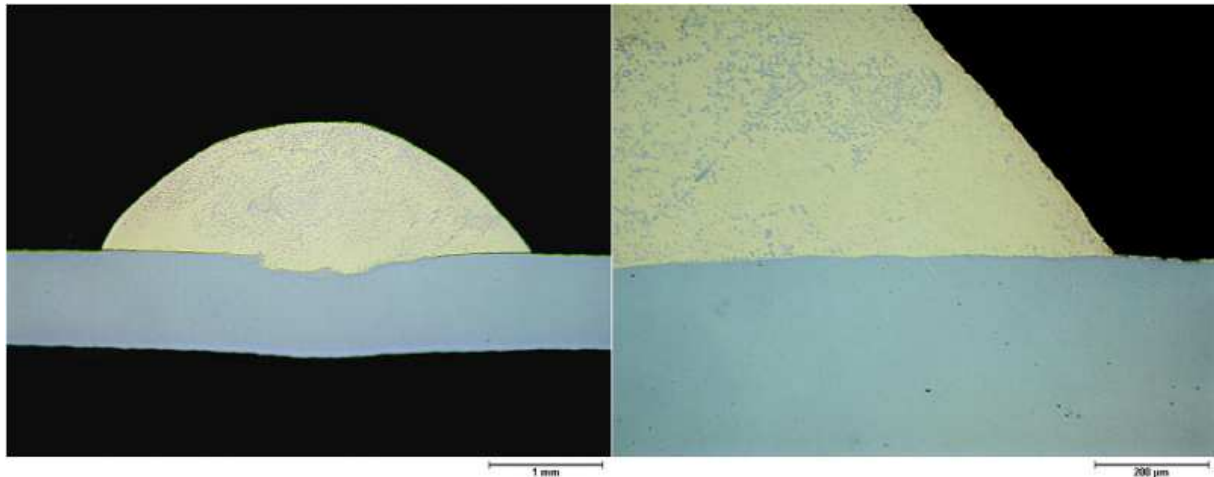


Abb. 18: Schliffbild einer mit Spektralregler gelöteten Probe. Es zeigt eine wenig durchmischte, recht abrupte Übergangszone

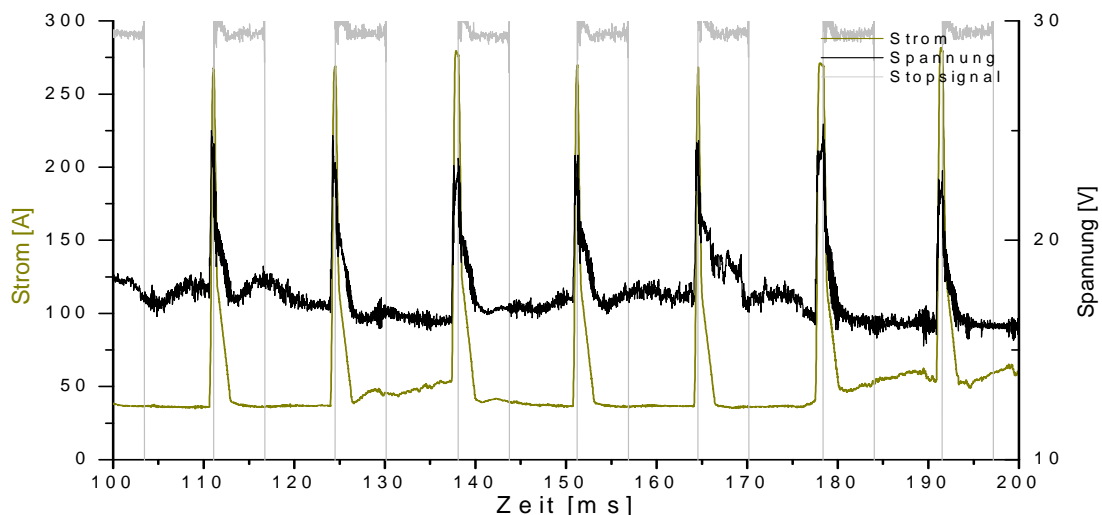


Abb. 19: Signalverlauf von Strom, Spannung und Stopsignal für den geregelten Lötprozess (Strom und Spannungsverlauf schwarz, Stop-Signal grau)

Statt einer fixen Pulsdauer von 1,5 ms wird pulsindividuell vom Spektralregler die erforderliche Pulsdauer bestimmt um den Lötprozess auch bei Prozessschwankungen in einem stabilen Parameterfeld zu halten. Der Regelbereich für die Pulsdauer stellte sich dabei zwischen dem Minimum von 0,54 ms und dem Maximum von 1,32 ms ein. So konnte auch

bei diesem Verfahren die mittlere Pulsdauer und damit der Energieeintrag verringert werden ohne dass der Prozess schon bei geringen Schwankungen instabil wird und Nahtfehler entstehen.

Nahtbild und Lichtbogenprofil sind in Abb.17 dargestellt. Gegenüber dem unregelmäßigen Prozess geht aufgrund der reduzierten Pulsdauer auch die Entstehung von Zinkoxiden neben der Naht zurück. Es ist nur noch ein leichter weißer Schleier an der Nahtoberseite sichtbar.

Das Schweißbild einer entsprechenden Lötverbindung zeigt Abb. 18. Trotz der vorhandenen Zinkabdampfung ist die Lötnaht porenfrei. Der entsprechende Strom-, Spannungs- und Stop-Signalverlauf ist in Abb. 19 dargestellt. Die sich in der Versuchsauswertung herauskristallisierte größere Variation im Regelbereich der Pulsdauer gegenüber dem Schweißprozess kann in mehreren Ursachen begründet sein und bedarf weiterer Prozessanalysen.

In einem Folgeprojekt sollte deshalb auch die Auswirkung der Sensorabschattung durch Rauchbildung beim Löten, die Auswirkung unterschiedlicher Sensorpositionierungen und damit Lichtaustrittswinkel Brenner/Prozessregler sowie der Einfluss der Tropfensynchronisation weiterführend analysiert werden.

9 Zusammenfassung

Vorversuche mit Kurzlichtbogen zeigten nicht beherrschbare Helligkeitsschwankungen, wobei der Tropfenübergang im Kurzschluss bei minimaler Lichtemission erfolgt. Schwerpunkt der Untersuchungen wurde deshalb der Impulslichtbogen.

Experimente mit Impulslichtbogen und 6-Kanal-Breitbandspektrometer führten im Januar 2007 zu der Entdeckung, dass sich die Plasmatemperatur anhand zweier Spektrallinien schätzen lässt. Weiterhin wurde entdeckt, dass ein Verhältnissignal zweier Photodioden (z.B. Infrarot und Ultraviolett) im Zeitverlauf diese Temperaturentwicklung dokumentiert.

Basierend darauf konnten Parameter und Funktion des im Projekt zu entwickelnden Spektralreglers fixiert werden.

Erste Löt- und Schweißexperimente mit dem Zweikanal-Spektralregler zeigten, dass der mit diesem Projekt eingeschlagene Weg gangbar ist. Zur Zeit sind wir allerdings noch weit vom Verständnis der daraus entstandenen, komplexen, neuen Parameterwelten entfernt. Die momentan wesentlichste Erkenntnis besteht darin, zu sagen: Wir haben Neuland betreten. Und vielleicht: Der Regler schweißt auch noch, wenn wir wichtige Knöpfe verdrehen.

Das Forschungsprojekt wurde erfolgreich abgeschlossen. Das Ziel eines selektiven Energieeintrages für das Lichtbogenfügen wurde durch die Entwicklung einer Prozessregelung mit 2-kanaligem Spektralsensor für den Impulsprozess erreicht.

Die Funktion des Reglers wurde für zwei Werkstoffkombinationen nachgewiesen.

Eine Veröffentlichung der Projekterkenntnisse in entsprechenden Fachzeitschriften ist in Vorbereitung.

10 Literatur, Vorträge, Veröffentlichungen

- [1] Groten, G.: Beitrag zum MSG-Impulslichtbogenschweißen von unbeschichteten und verzinkten Feinblechen. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1991, ISBN 3-87155-894-X, S.25.
- [2] Goecke, S.-F.: Auswirkungen von Aktivgaszumischungen im vpm-Bereich zu Argon auf das MIG-Impulsschweißen von Aluminium. Dissertation, TU-Berlin, Berlin 2004, S.15.

- [3] Dorn, L.: Bericht der TU Berlin "Prozesstechnische Zielstellungen". Vortrag zur 1.Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses, 10.05.2006, PPT, 10 S.
- [4] Hofmann, F.: "Vergleich Kurzlichtbogen / Impulslichtbogen". Beitrag zum Projekttreffen, 28.08.2006, PPT, 8 S.
- [5] Hofmann, F.: Zwischenstand der TU Berlin im Projekt "Gepulste Lichtbogenfüge-prozesse". Vortrag zur 2.Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses, 06.11.2006, PPT, 18 S.
- [6] Dorn, L.: Zwischenbericht der TU Berlin "Gepulste Lichtbogenfügeprozesse". (02/2006-12/2006), PDF, 5 S.
- [7] Hofmann, F.: Zwischenbericht der TU Berlin im Projekt "Gepulste Lichtbogenfüge-prozesse". Vortrag zur 3.Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses, 09.03.2007, PPT, 27 S.
- [8] Hofmann, F.: "Echtzeitregelung des Energieeintrages beim MSG-Löten und -Schweißen mittels spektral-selektiver Sensorik ". Vortrag zur Gemeinschaftsveranstaltung „Tag der Technik 2007“ BAM Berlin, 08.06.2007, PPT, 27 S.
- [9] Hofmann, F.: Bericht der TU Berlin zum Projekt "Optimierung des Energieeintrages gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralselektiver Sensorik ". Vortrag vor dem Fachausschuss Fügetechnik der GFal, 19.10.2007, PPT, 17 S.
- [10] Hofmann, F.: Abschlußbericht der TU Berlin im Projekt "Gepulste Lichtbogenfüge-prozesse". Vortrag zur 4.Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses, 30.11.2007, PPT, 29 S.
- [11] Goecke, S.-F., Metzke, E., Spille-Kohoff, A., Langula, M.: ChopArc – MSG-Lichtbogenschweißen für den Ultraleichtbau. Projekt-Abschlußbericht. TU-Berlin, IWF-FBT. Erschienen im Fraunhofer IRB-Verlag 2005, ISBN 3-8167-6766-4, www.irb.fraunhofer.de, S.B41, siehe auch http://www.choparc.de/ergebnis_inp.pdf
- [12] Patent DE 10 2004 015 553 A1, Offenlegungsschrift vom 16.6.2005: Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, DE, Verfahren und Vorrichtung zum Regeln eines Energieertrags bei einem Fügeprozess. <http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/>, DE102004015553?/PN
- [13] Protokoll der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses Optispek am 10.5.2006

ANLAGE Versuchsdurchführung TU-IWF

dRec- Kanalbelegung Sensorkopf und Prozessregler ab Datum

Sensorkopf		Diodenkonfiguration				
Datum	Kanal 12	Kanal 13	Kanal 15	Kanal 16	Kanal 17	Kanal 19
09.01.2007 SK1	BP104	BPW34	MCS Rot	MCS Grün	MCS Blau	AG38
16.02.2007 SK2	BP104	EPD740	MCS Rot	TW30	MCS Blau	EPD440
21.02.2007 SK3	BP104	EPD740	MCS Rot	SG01M	MCS Blau	EPD440
25.09.2007 SK4	G8423	EPD740	G8376	SG01M	MCS Blau	EPD440
Prozessregler		Reglerkonfiguration				
01.11.2007 PR1	Sync	Stop	Summe	EPD365	EPD740	Comp
19.11.2007 PR2	Sync	Stop	Summe	EPD440	EPD740	Comp

Vorversuche und Experimente

Versuchsaufbau, Parameterfindung, Einstellung der Schweißmaschinen, Synchronisation der Schweißmaschinen INP – TUB

Parameterfindung			
Datum	Drahtwerkstoff	Stromquelle	Programmpunkte
23.05.2006 24.05.2006	SG2	ELMA	Inbetriebnahme des Versuchsstandes mit ELMA-Stromquelle
29.05.2006 31.05.2006	AlBz5Ni2	ELMA	Lötversuche mit ELMA-Stromquelle Kurzlichtbogen
07.06.2006 14.06.2006	AlBz5Ni2	Quinto403	Lötversuche mit Cloos-Stromquelle Kurzlichtbogen
21.06.2006	AlBz5Ni2	MegaPuls400	Inbetriebnahme Rehm MegaPuls in Greifswald
10.07.2006 25.07.2006	CuSi3Mn	Quinto 403	Lötversuche Kurzlichtbogen
01.08.2006 04.08.2006	AlSi5	Quinto 403	Schweißversuche Kurzlichtbogen
22.08.2006 23.08.2006	AlMg4,5Mn	Quinto 403	Schweißversuche Impulslichtbogen
23.08.2006 31.10.2006	AlBz5Ni2	Quinto 403	Impulslichtbogen, Parameteroptimierung, Variation der Pulsform
31.10.2006 21.11.2006	AlMg4,5Mn	Quinto 403	Schweißversuche Impulslichtbogen
22.11.2006	AlBz5Ni2	Quinto 403	Kurzlichtbogen, Variation der Gasmenge
24.11.2006 08.12.2006	AlMg4,5Mn	Quinto 403	Schweißversuche Impulslichtbogen Variation der LBL-Regelung
11.12.2006	AlBz5Ni2	MegaPuls400	gemeinsame Versuche in Greifswald
13.12.2006	AlMg4,5Mn	Quinto 403	Variation der LBL-Regelung

Experimente zur Entwicklung des 6-Kanal Breitband- Spektrometers

Sensorkonfiguration 1...4			
Datum	Drahtwerkstoff Diodenkonfig. Programmpunkte		
09.01.2007 16.01.2007	AlMg4,5Mn	SK1	Inbetriebnahme des Sensorkopfes, Kopplung mit dem Datenrecorder, Funktionsprobe und Fehlersuche
17.01.2007 24.01.2007	AlMg4,5Mn	SK1	Messung der Störimpfindlichkeit des Sensorkopfes gegenüber externen Lichtquellen und induzierten elektrischen Störeinflüssen

Experimente mit dem 6-Kanal Spektrometer zur Entwicklung Spektralregler

Sensorkonfiguration 1...4			
Datum	Drahtwerkstoff Diodenkonfig. Programmpunkte		
25.01.2007 29.01.2007	AlMg4,5Mn	SK1	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
30.01.2007 31.01.2007	AlBz5Ni2	SK1	Parameteroptimierung
16.02.2007 21.02.2007	AlBz5Ni2	SK2	Diodenanpassung im IR und UV-Bereich um höhere Bereichsselektivität zu erreichen
21.02.2007	AlBz5Ni2	SK3	Diodentausch im UV-Bereich
22.02.2007 16.03.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
19.03.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Inbetriebnahme der Cloos-Stromquelle in Greifswald
22.03.2007 13.04.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
16.04.2007 17.04.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Durchführung von Versuchen zur Parameteranpassung in Greifswald
23.04.2007 02.05.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
04.05.2007 02.07.2007	AlBz5Ni2	SK3	Aufnahme von Signalverläufen zum Kurzlichtbogen
02.07.2007 09.07.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
30.07.2007 14.08.2007	S235 X2CrNi19.9	SK3 SK3	Aufnahme von Signalverläufen im hohen Leistungsbereich für S235 und X2CrNi19.9
23.08.2007	AlMg4,5Mn	SK3	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen
25.09.2007 28.09.2007	AlMg4,5Mn	SK4	Diodenanpassung im hohen Infrarotbereich bei 1550 und 2300nm; Anpassung der Verstärkungseinstellungen
04.10.2007 31.10.2007	AlMg4,5Mn	SK4	Parameteroptimierung und Aufnahme von Signalverläufen

Versuchsprogramm mit 2-Kanal Spektralregler

Prozessreglerkonfiguration 1...2			
Datum	Drahtwerkstoff	Reglerkonfig.	Programmpunkte
01.11.2007 13.11.2007	AlMg4,5Mn	PR1	Inbetriebnahme des Prozessreglers, Kopplung mit der Stromquelle, Funktionsprobe und Fehlersuche erste erfolgreiche Ansteuerung der Stromquelle
19.11.2007 03.12.2007	AlMg4,5Mn	PR2	Diodenanpassung im UV-Bereich, erster spektral geregelter Schweißprozess Optimierung der Reglerparameter und Anpassung der Schweißparameter an das Stromquellenupdate Aufnahme von Signalverläufen
05.12.2007 14.12.2007	AlBz5Ni2	PR2	Optimierung der Reglerparameter für den Lötprozess, Anpassung der Prozessparameter, Aufnahme von Signalverläufen