

GFal e.V. (1/3)

Name der Forschungsstelle

14607 / BG

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.

Forschungsstellen:

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

Anschrift der Forschungsstelle:

GFal e.V.
Rudower Chaussee 30
12489 Berlin

Berlin, den 27.02.2008

- G. Heinz -

Ort, Datum

Unterschrift Projektleiter

Inhalt

1	Projektergebnisse im Überblick.....	3
2	Auf einen Blick	6
2.1	Forschungsziel.....	6
2.2	Projektpartner und Arbeitsteilung.....	6
2.3	Projektdurchführung in Stichpunkten	7
3	Urheberrechtlicher Hinweis	7
	ANLAGE 1: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschuss	8
	ANLAGE 2: Teilnehmerlisten Sitzungen des PbA	9
	ANLAGE 3: Vorhabensbezogene Leistungen der Wirtschaft, Bereitstellung von Versuchsanlagen und Geräten (BV)	10
	ANLAGE 4: Vorhabensbezogene Leistungen der Wirtschaft, vorhabensbezogene Dienstleistungen (DL).....	11
	Abschlußbericht der GFal Berlin	Teil A, Seiten 12 - 43
	Abschlußbericht des INP Greifswald	Teil B, Seiten 44 - 54
	Abschlußbericht der TU-Berlin, IFW	Teil C, Seiten 55 – 75

1 Projektergebnisse im Überblick

Als Ergebnis des AiF-Projekts schweißt seit dem 20.11.2007 an der TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, die erste, spektral geregelte MIG-/MAG¹-Pulsschweißmaschine der Welt, Abb.1.

Nahezu unabhängig von Pulsstrom und Pulsdauer überhitzt und explodiert kein Schweißtropfen mehr, die Schweißergebnisse sind nahezu parameterunabhängig.

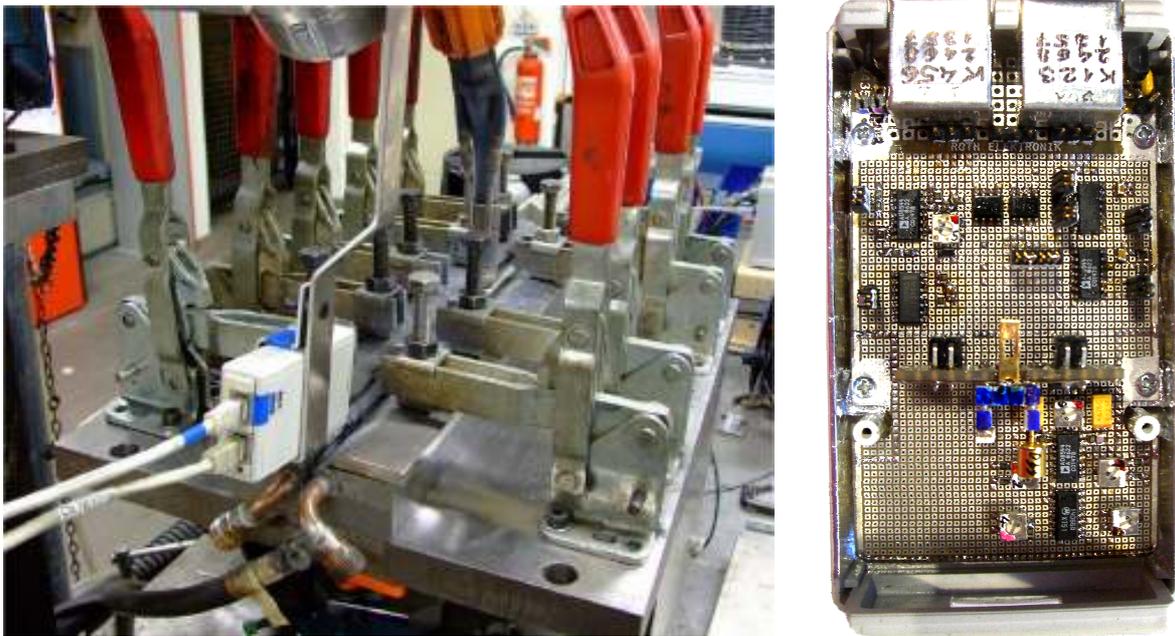


Abb.1: Versuchsanlage auf Basis einer Cloos-Quinto GLC 403 an der TU Berlin (links). Der im Projekt entwickelte Spektralregler schaut direkt in den Lichtbogen (Brennerkopf teils verdeckt im Hintergrund). Rechts: Blick in das Gehäuse des Spektralreglers (Versuchsaufbau).

Mit dem entwickelten Spektralregler scheint die Verwirklichung eines uralten Traums der Schweißtechnik zu gelingen: Die Schaffung eines Regelverfahrens, welches pulsbezogen und unabhängig von kleinen Oxidstellen, Einschlüssen, Verspannungen, Unreinheiten, überhöhtem Strom oder Materialveränderungen die Plasmatemperatur nicht über einen einstellbar-kritischen Wert wachsen lässt.

Verschiedene Untersuchungen in der Vergangenheit hatten gezeigt, dass die Regelung der Plasmatemperatur eine Voraussetzung darstellt, um in den Bereich des Schweißens sehr dünner Bleche (< 0,5 mm) vorstoßen zu können.

¹ MIG: Metall-Inertgas, MAG: Metall-Aktivgas

Die Entwicklung ist Ergebnis dieses AiF-Projekts im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF).

Im Institut für Plasmaphysik Greifswald wurden plasmaphysikalische Grundlagen untersucht, im Schweißlabor der TU Berlin (IWF) fanden experimentelle Schweißuntersuchungen statt und an der GFal wurde der Spektralregler entwickelt. Entsprechend gegliedert waren die Arbeitspakete.

Herr Queren-Lieth vom Deutschen Verbands für Schweißtechnik (DVS) Düsseldorf schätzte das Projektergebnis als bahnbrechend und als eine Basisinnovation der Schweißtechnik des letzten Jahrzehnts ein. Er überreichte anlässlich einer Vorführung zum Projektabschlussstreifen am 30.11.2007 die Bewerbungsunterlagen für den DVS-Abicor- Innovationspreis.

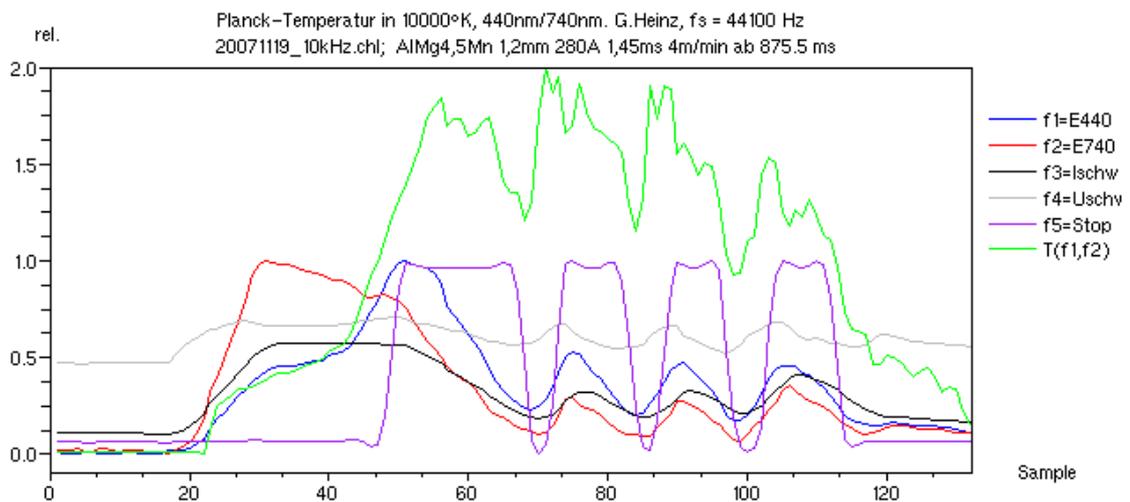


Abb.1: Geregelter, intermittierender Pulsschweißprozess mit Temperaturschätzung $T(f1,f2)$. Siehe GFal-Part. An- und Abschalten verhindert eine Überhitzung des Plasmas.

Bei der Vorführung, zu der auch die Entwicklungsleiter der Schweißgerätehersteller Cloos, EWM und Rehm erschienen waren, konnten die Teilnehmer selbst an den Knöpfen der Schweißmaschine drehen. Staunend klopfte man uns auf die Schulter: "Man könne fast nicht glauben, dass auf einem seit Jahrzehnten so intensiv erforschten Feld noch fundamentale Innovationen möglich sind!". Mit Unterstützung von Firma Cloos konnte eine Pulsschweißmaschine vom Typ Quinto 403 entsprechend modifiziert und um den im Projekt entstandenen Spektralregler erweitert werden.

Durch eine Überwachung des Spektrums des Lichtbogens wird die Plasmatemperatur gemessen. Überhitzt das Plasma, wird der Strom innerhalb von etwa 100 Mikrosekunden abgeschaltet. Plasmaphysikalische Untersuchungen am INP Greifswald hatten gezeigt, dass sich die Farbe des Plasmas proportional zur Temperatur des Lichtbogens ändert. Metalllinien ändern ihre Helligkeit in Relation zu den Argonlinien. Je heißer das Plasma wird, desto stärker emittieren die Metallionen. Gleichzeitig kommt es zu einer Reduktion der Argon-Emissionen. Der Effekt sollte im Projekt näher untersucht

werden, ein entsprechendes Steuergerät (spektraler Schweißregler, kurz: Spektralregler) war zu entwickeln.

Zunächst wurde untersucht, in welcher Weise dieser Effekt auf das Spektrum der verschiedenen, beteiligten Metallionen wirkt. Als feststand, dass die Spektralverteilung der Linien zwar verschieden, die Wirkung der Temperaturerhöhung aber proportional gleichartig auf Ionen bestimmter Spektralbereiche wirkt, wurde die Frage gestellt, ob es bestimmte Spektralbereiche gibt, in denen interessierende Metalllinien gehäuft auftreten.

Dabei stellte sich heraus, dass eine bestimmte Zweiteilung des Spektralbandes optimale Ergebnisse erbringt. Im Bereich von 650 bis 900 nm sind die Argonlinien dominant, im Bereich zwischen 250 und 600 nm dominieren Metalllinien. Die Bandaufteilung muss nicht einmal, wie ursprünglich im Projekt angenommen, über Integration vieler Einzellinien erfolgen. Vielmehr genügt eine Realisierung mittels zweier Photodioden, die jeweils diese Subbänder bedienen.

Die Vorteile sind gravierend. Wider erwarten wird damit eine Produktorientierung für den Massenmarkt eröffnet. Ursprünglich sollten vorrangig nur Kalibrierungen bei Schweißgeräteherstellern erleichtert werden.

Im Alltagseinsatz sind verschiedene Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung zu Löten oder zu Schweißen, eine Umstellung des Spektralreglers würde zusätzlichen Aufwand bedeuten. Die Lösung erlaubt das Schweißen unterschiedlicher Materialien.

Der Spektralregler kann Pulsschweißmaschinen in zwei Moden steuern: intermittierend-quasikontinuierlich bei großen Blechstärken wie auch pulsartig bei dünnen Blechen. Der Regler hat etwa die Größe einer Zigaretenschachtel. Mit nur neun integrierten Schaltungen (IC) und zwölf Operationsverstärkern ist er äußerst preiswert herstellbar.

Das Grundprinzip der Regelung wird von den anzusteuern den Pulsschweißmaschinen vorgegeben. Der Regler beobachtet das Plasma. Wird es zu heiß, verschiebt sich die Emission in den Ultraviolett-Bereich (UV). Der Puls wird abgeschaltet. Im quasikontinuierlichen Betrieb hingegen wird ebenfalls abgeschaltet, aber nur solange, bis das Spektrum den Blauanteil verloren hat, dann wird wieder eingeschaltet. Auf diese Weise kann nahezu unabhängig von Grundstrom und Schweißstrom eine Explosion der Schweißtropfen verhindert werden. Unabhängig vom eingestellten Schweißstrom wird die Plasmatemperatur auf einem Optimum gehalten.

Für die Schweißgeräteindustrie ergeben sich Einsparungen. Die Vielfalt bislang abzugleichender Einschweißkennlinien verringert sich erheblich, Entwicklungs- und Produktionskosten werden beim Hersteller gespart.

Für Anwender erhoffen wir Vorteile in der Nahtqualität. Beim Schweißen in Kehlen und Winkeln, am Nahtanfang oder Nahtende variieren die Prozessparameter oft unzulässig. Die Folge sind Spratzer, hervorgerufen durch explodierende Schweißtropfen. Dieses Problem gehört nun hoffentlich bald der Vergangenheit an.

Schweißgerätehersteller gehen davon aus, dass die Schweißqualität von MIG/MAG-Geräten in den Bereich der Qualität von Laserschweißgeräten kommen kann. Gerade für Klein- und Mittelständler mit variierendem Produktprofil rechnen sich Lasergeräte oft nicht, sie sind teuer in Anschaffung und Betrieb. Mit dem Projektergebnis kann eine kostengünstige Alternative zum Laserschweißen entstehen.

Bis dahin sind allerdings noch viele Fragen zu beantworten, so nach einer optimalen Integration in den Brennerkopf; Wissen über Materialpaarungen und Prozessparameter ist erheblich zu erweitern. Ein Verständnis für die neuartige Parameterwelt temperaturgeregelter Plasmen ist zu erlangen.

Es wurden sieben Projekttreffen durchgeführt, davon vier unter Beteiligung des projektbegleitenden Ausschusses. Die Mitglieder trugen zu einer industrietauglichen Ausrichtung der Forschungen bei. Entwicklungsleiter der Schweißfirmen Cloos und Rehm stellten Ausrüstungen zur Verfügung. Das Engagement von Fa. Cloos ging soweit, eine spezielle RS422-Schnittstelle (DSP plus Software) für deren Schweißmaschine Quinto 403 zu entwickeln, mit der der Spektralcontroller zusammenarbeitet.

Das Forschungsvorhaben (AiF- Vorhaben 14607 BG) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) gefördert.

2 Auf einen Blick

2.1 Forschungsziel

- Prozessstabilisierung insbesondere bei dünnen Blechen (<0,5 mm)
- Vermeidung von Tropfenexplosion
- Idee: Plasmatemperatur kontrollieren
- Beobachtung in ChopArc:
 - Metalllinien steigen mit Temperaturerhöhung
 - Argonlinien fallen mit Temperaturerhöhung
- Spektral geregelten Prozess entwickeln
- Energieeintrag gesteuert vermindern
- Vermutung: Plasma- Temperatur/Energieeintrag ist spektral mess- und steuerbar
- Ansatz:
 - Linienspektrometer (Abbruch, undurchführbar)
 - Breitband- Spektrometer (erfolgreich)

2.2 Projektpartner und Arbeitsteilung

- Institut für Plasmaphysik Greifswald
 - Theorie der Plasmen, Untersuchungen an Linienspektren von Schweißprozessen
 - G. Goett, H. Schoepp
- TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
 - Schweißversuche, Prozessoptimierung, prototypische Erprobungen
 - F. Hofmann, L. Dorn
- Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik Berlin
 - Hard- und Softwareentwicklung
 - G. Heinz, F. Hoffmann, D. Holm

2.3 Projektdurchführung in Stichpunkten

- Untersuchung von Linienspektren auf Relevanz (INP)
- Schweißversuche mit Ziel einer Prozessfixierung (TU)
- Untersuchung zu Hochgeschwindigkeits- Linienspektrometern (GFal)
 - Wenige Photonen pro Linie, Pixel und Zeitintervall
 - hohes Eigenrauschen
 - Hohe Datentransferzeiten (Auslesen 40µs, ADC 50µs)
 - Gesamte Signalverarbeitung zu langsam > 3ms
- Aufwands- und Kostenexplosion aufgrund parallelisierter Prozesse (FPGA)
- Entdeckung einer parallelen Temperaturmodulation von Gruppen von Metalllinien
- Erkenntnis zur 1.PbA-Sitzung (10.5.2006): Fokus auf
- Breitband- Spektrometer mit spektralsensitiven Photodioden
 - keine Probleme mit Datenvolumina
 - Entscheidungszeit unter 100 µs; schnell, preiswert
 - Beherrschbare Schaltungstechnik (analog/digital gemischt)
- Festlegung der spektralen Integrationsgrenzen (Spektralbereiche) und der Bandaufteilung
- Recherche zu spektralselektiven Photodioden
- Untersuchung spektraler Gruppeneigenschaften (INP)
- Versuch von Temperaturschätzungen (INP, GFal)
- Variation von Kennlinienpaarungen per Software (GFal)
- Spektrale Untersuchung verschiedener Materialien (TU/INP)
- Entwicklung 6-Kanal (Photodioden-) Spektrometer für Tests (GFal)
- Festlegung der Ziele und Parameter für Spektralregler
- Entwicklung eines 2-Kanal-Spektralreglers (GFal)
- Stichpunktartige Ersterprobung des Spektralreglers (TU)

3 Urheberrechtlicher Hinweis

Von der Kopie oder Weitergabe von Auszügen, Bildern oder Abschnitten des Abschlußberichts bitten wir aus urheberrechtlichen Gründen (Patent und Erstveröffentlichungen) bis zum 1. Juli 2008 abzusehen.

Danach sind Bilder gemeinfrei, wenn der Name des Autors und die Quelle klar erkennbar angegeben wird. Verwendung ohne Quellenangabe ist in keiner Form gestattet.

ANLAGE 1:
Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschuss

ANLAGE 2:

Teilnehmerlisten Sitzungen des PbA

ANLAGE 3:

**Vorhabensbezogene Leistungen der Wirtschaft,
Bereitstellung von Versuchsanlagen und Geräten (BV)**

ANLAGE 4:

**Vorhabensbezogene Leistungen der Wirtschaft,
vorhabensbezogene Dienstleistungen (DL)**

Name der Forschungsstelle(n)

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : _____

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Ort, Datum

Dr. G. Heinz

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Inhalt

Ergebnisse der Forschungsstelle GFal		14
1	Entwurf Linienspektrometer	14
2	Entwurf Breitband- Spektrometer	16
2.1	Sondierung von Photodioden	18
2.2	Sechskanaliges Breitband- Spektrometer für Photodioden	20
2.3	Entwicklungs- und Testumgebung	22
2.4	Auswertungssoftware WAV2GIF	24
2.5	Aufnahmen im Zeitbereich	25
2.6	Subband-Selektion, optimale Bandaufteilung	26
2.7	Software-Simulation des Abschaltvorgangs	28
3	Zweikanal-Spektralregler	28
3.1	Zur Funktion des Spektralreglers	29
3.2	Versuchsaufbau	30
3.3	Interaktion mit dem Schweißgerät	32
3.4	Interpretation der Ergebnisse	33
4	Zusammenfassung	37
5	Nutzen für die Wirtschaft, insbesondere für kmU	39
5.1	Markteinführung des entwickelten Spektralverfahrens	39
5.2	Perspektivische Bedeutung für den Leichtbau	40
6	Danksagung	40
7	Veröffentlichungen/Arbeitsberichte	41
8	Referenzen	42
Anlage: Blockschaltung Spektralregler		43

Ergebnisse der Forschungsstelle GFal

Im Projekt entstand ein Spektralregler, der sich über die Zielstellung hinausgehend durch geringes Volumen und Gewicht, durch niedrige Selbstkosten sowie durch universelle Anwendbarkeit bei verschiedenen Löt- und Schweißprozessen auszeichnet.

Ein Funktionsmuster des Spektralreglers wurde aufgebaut und der Schweißindustrie vorgestellt. Die Zielstellungen des Projekts wurden erfüllt.

1 Entwurf Linienspektrometers

Der Antrag ging von der Beobachtung aus, dass sich die Plasmatemperatur bzw. der Energieeintrag in das Plasma über Linienspektren beteiligter Metalle abschätzen lässt. Kernidee war es, (zunächst) ein Linienspektrometer zu schaffen, welches in Echtzeit (> 100.000 Samples pro Sekunde) das Licht des Plasmas analysiert und bei Überhitzung den Lichtbogen abschaltet.

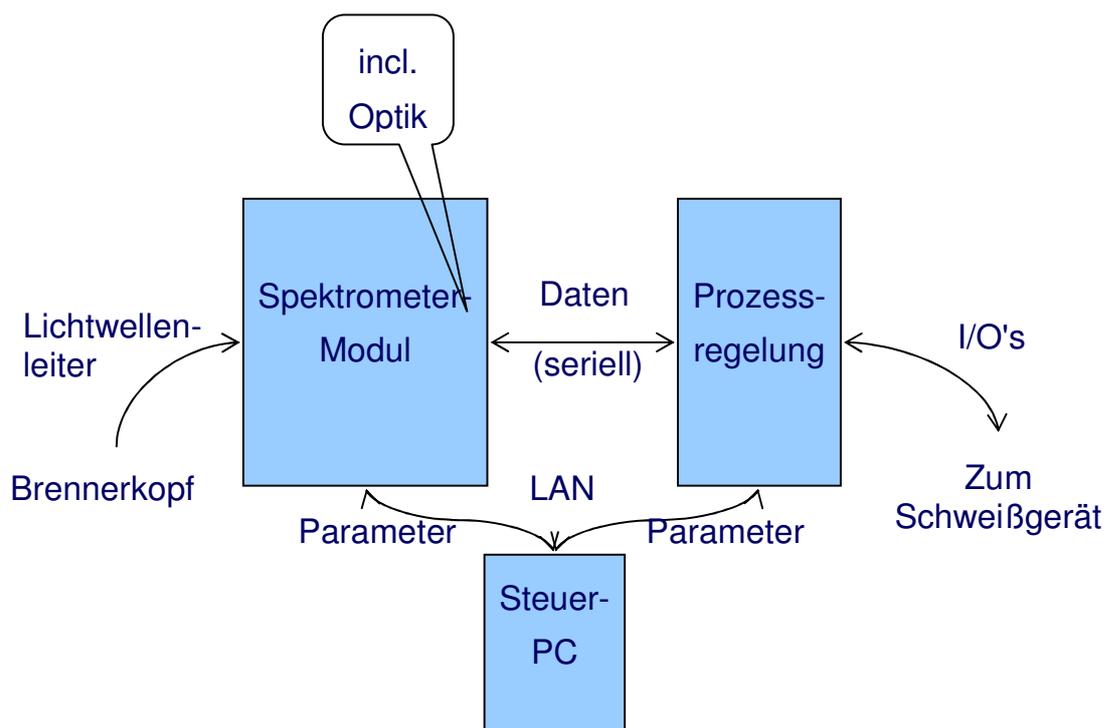


Abb.2: Vision eines Reglers basierend auf einem Linienspektrometer [13].

Entsprechende Schaltungsentwürfe mit einer Abschätzung der zu erreichenden Antwortgeschwindigkeiten schufen allerdings Ernüchterung. Weder mit einem Prozessorentwurf auf Basis Blackfin (siehe Zwischenbericht), noch mit dem parallelisierten Entwurf auf Basis einer FPGA vom Typ Altera Cyclone C6 ist derzeit eine

Echtzeitregelung in unter drei Millisekunden zu schaffen. Gefordert aber sind 100 Mikrosekunden, soll ein ein- bis drei Millisekunden langer Schweißimpuls noch rechtzeitig abgeschaltet werden können.

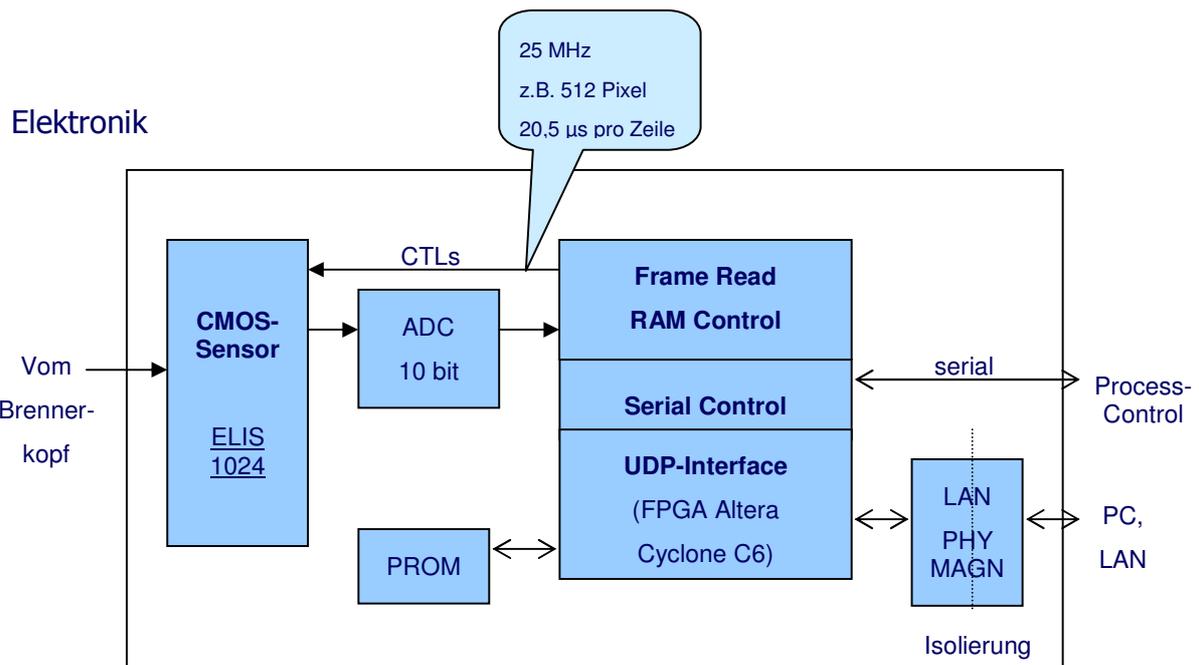
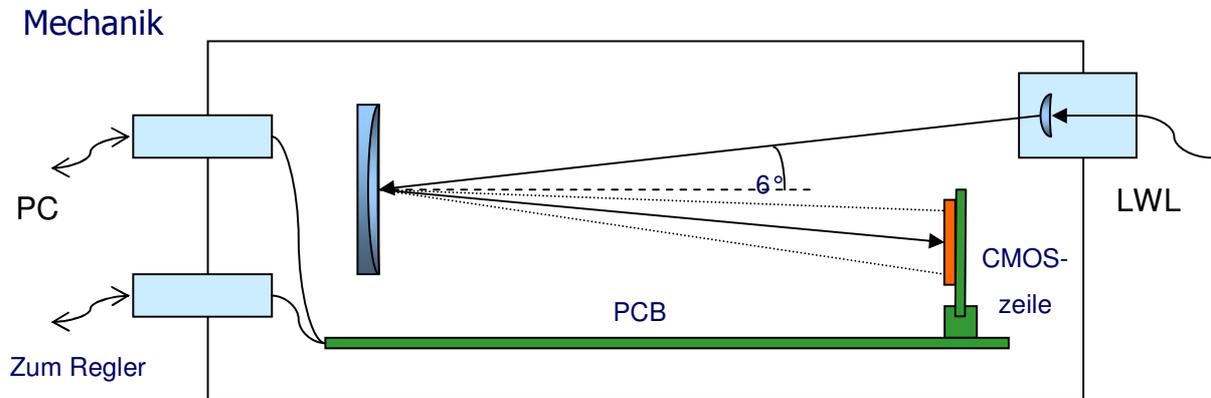


Abb.3a: Anfangsidee: Spektrometermodul (Mechanik und Elektronik) [13].

Als Kernproblem stellten sich enorm hohe Verarbeitungsleistungen für die Integration, Normierung, Zentrierung, Offset- und Rauschbefreiung der geplanten 1024 Spektrallinien heraus. Wir standen vor dem Dilemma einer Kosten- und Zeitexplosion. Eine Weiterarbeit an diesem Konzept hätte Millionen und Jahre verschlungen und wäre vielleicht dennoch gescheitert. Auch hätte die Steuerung für jede Materialpaarung neu konfiguriert werden müssen, die Optik wäre teuer, das Gerät wäre über alle Maßen unhandlich. Diskussionen zum ersten Projekttreffen kamen zum Tragen [15].

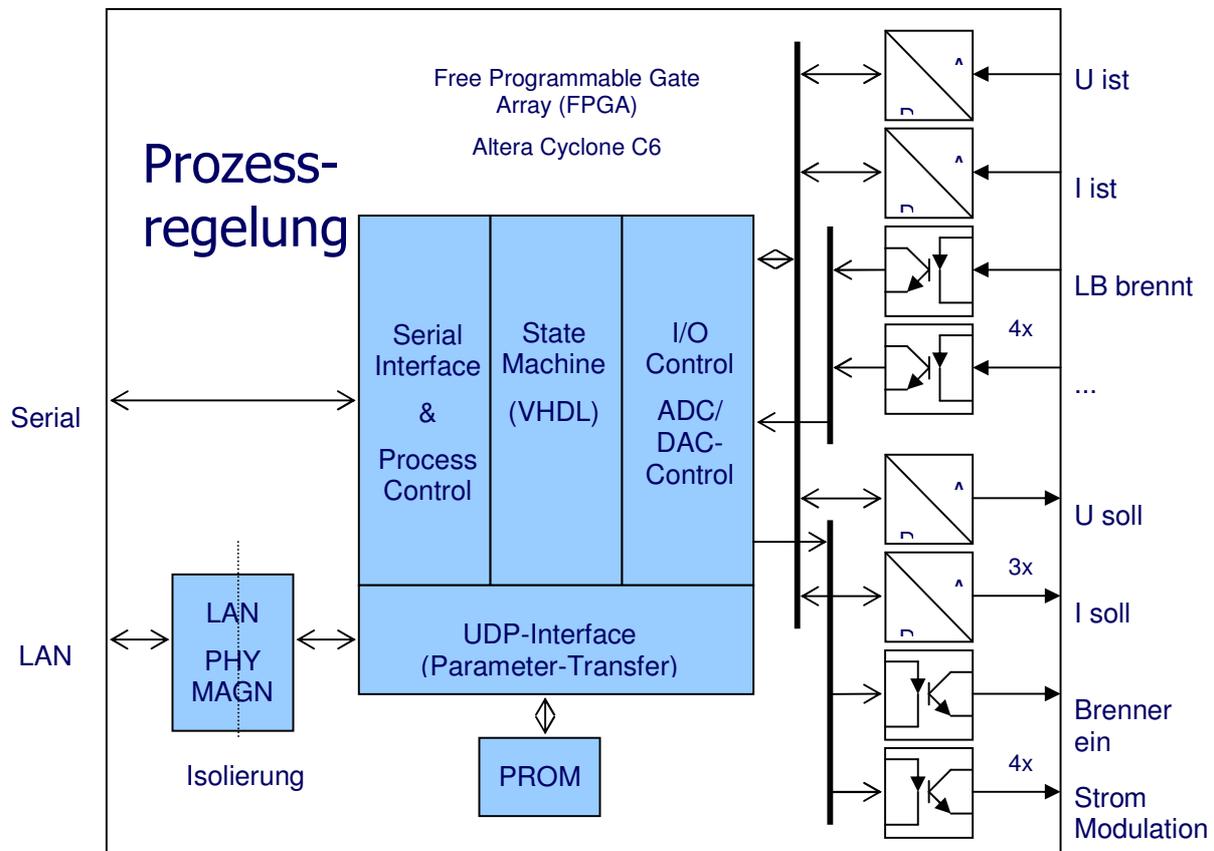


Abb.3b: Entwurfsskizze eines Prozessreglers mit ULSI-FPGA [10, 11].

2 Entwurf Breitband- Spektrometer

Untersuchungen mit Interferenzfiltern hatten bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gezeigt¹, dass die Intensität einer einzelnen Metalllinie während des Pulses wächst, während die einer Argonlinie langsam nachlässt.

Rückfrage bei den Kollegen des INP und der TU ergab, Abb.4, dass offenbar ganze Spektralbereiche von diesem Phänomen betroffen sind. Das Spektrum leuchtet in Gesamtheit zu Pulsbeginn rötlich, zum Pulsende aber weiß bis blau-grünlich. Die rötliche Färbung kann dem Schutzgas Argon zugeordnet werden, die blau-grünliche Färbung den Metallionen.

Bestimmte Linien in schmalen Bereichen (umrandete Gebiete) scheinen sich bei Parameteränderung etwa proportional miteinander auf und ab zu bewegen, wobei Metallionen und Argon-Ionen bei Erwärmung gegenläufig steigen bzw. fallen.

¹ Siehe [10], Berichtsteil INP, Eckhard Metzke, Seite B41

Diese ‚parallele Gruppenmodulation‘ der Linien würde den Verzicht auf Auswertung von Einzellinien erlauben. Damit täte sich eine Tür zu einer ungemein preiswerten und einfachen Lösung auf, vorausgesetzt, der Effekt lässt sich nachweisen.

Es entstand die Frage, ob spektral sensitive, aber relativ breitbandige Photodioden (evtl. mit Zusatzfilter) geeignet sein könnten, die Plasmatemperatur dieser Gebiete abzuschätzen und als Sensoren für spektrale Regler zu dienen.

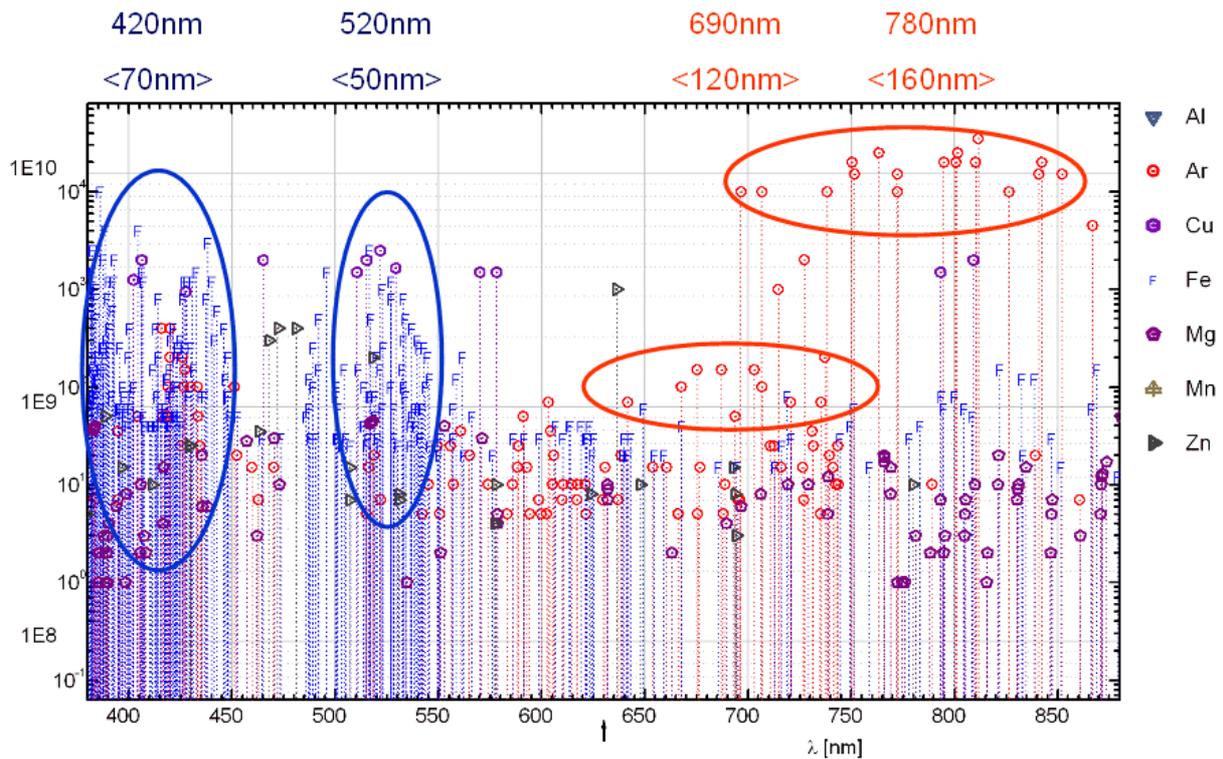


Abb.4: Linienpektren eines Schweißvorgangs zeigen Häufungsorte von Argon-Linien (rot) und von Metalllinien (blau). Darüber: Bandmitte und \langle Bandbreite \rangle des umrandeten Bereiches. © Bild: G.Heinz, GFal; Spektrum G. Gött, INP

Vorteilhaft bei Verwendung von Photodioden wäre eine Unabhängigkeit vom Material, verschiedene Metalllinien häufen sich an bestimmten Orten. Auf der ersten Sitzung des PbA wurde darüber lebhaft diskutiert. Der Übergang auf eine breitbandige Lösung besäße insbesondere aber den Vorzug, dass die Integration über Bereiche von Linien bereits innerhalb von Photodioden erfolgt. Aufwändige Rechenalgorithmen können entfallen. Geforderte Echtzeitfähigkeit des Systems mit Antwortzeiten im Mikrosekundenbereich hingegen könnte problemlos erreicht werden.

Mit Photodioden der angegebenen Maxima und Bandbreiten (Abb.4) sollte es gelingen, Metaldampf und Argon trennen zu können, um dann über eine Art Plancksche Strahlungsformel zu einer Temperaturschätzung zu kommen. Alternativ zum Linienpektrometer wurden deshalb spektralsensitive Photodioden beschafft. Parallel wurden im INP und an der TU Bemühungen forciert, geeignete Aussagen über integrale Spektraleigenschaften des Plasmas (Häufungsorte) zu festigen (siehe deren Berichte).

2.1 Sondierung von Photodioden

Verschiedene Hersteller bieten Photodioden in verschiedenen Spektralbereichen an. Der Bereich von 200µm bis 1100µm wurde recherchiert. Als problematisch erwiesen sich die unterschiedlichen Empfindlichkeitsskalen der Hersteller. So sind je nach Hersteller relative und absolute Angaben für Kurzschlussstrom (µA, mA) oder Kennempfindlichkeit (A/W) in linearer und logarithmischer Darstellung anzutreffen. Zum Entwurf eines Vorverstärkers, der für alle Arten von Dioden brauchbar sein sollte, waren zunächst also die Extremwerte zu finden schnell und übersichtlich darzustellen.

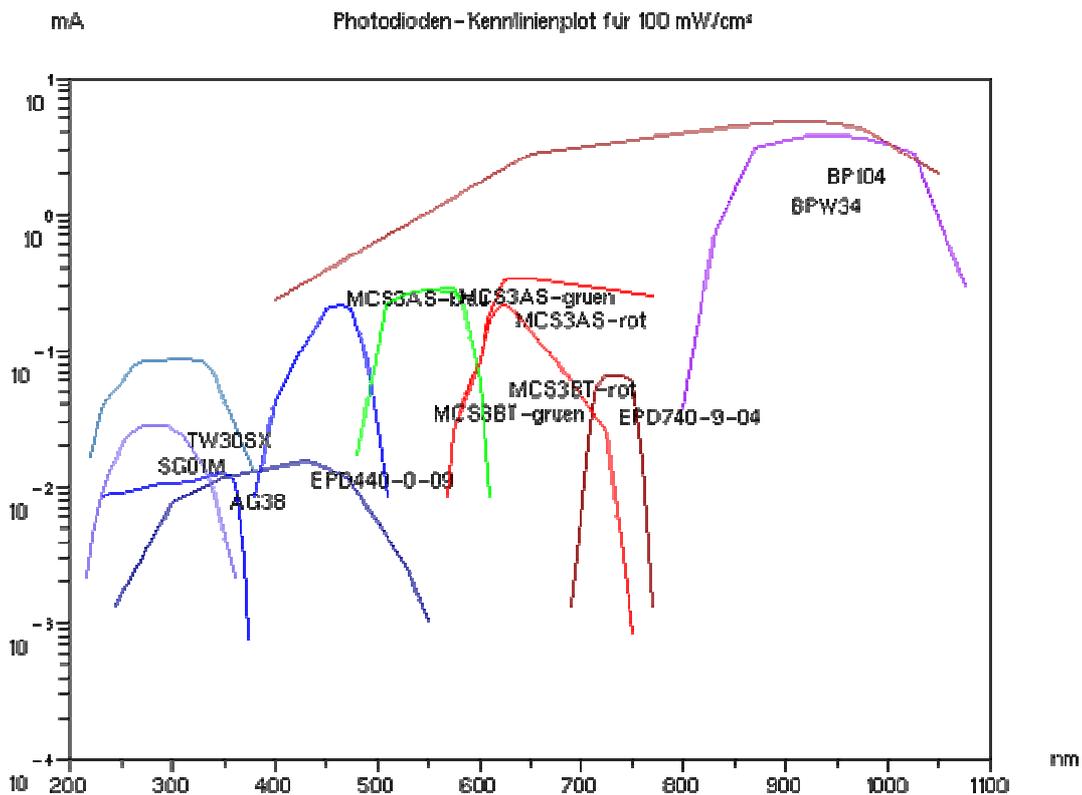


Abb. 5: Photodioden in Darstellung „log. Kurzschlussstrom“, GIF-Ausgabe aus dem Programm KENNLINIENPLOT.SCE © G.Heinz, GFal, [4]

Um zu einer Vergleichbarkeit zu kommen, wurde ein Programm KENNLINIENPLOT.SCE unter Scilab entwickelt. Kennlinien von Photodioden werden digitalisiert als sog. *.KEN-Files abgelegt. Gesteuert durch ein Parameterfile können mit dem Programm interaktiv verschiedene Files aufgerufen und im selben Maßstab zusammen dargestellt werden. Ausgaben sind in den Zielformaten möglich (d.h. µA, relativ und A/W in linearer und logarithmischer Darstellung).

Kennlinien unterschiedlichster Photodioden (Si, GaAs, GaAlAs, SiC) können nun in verschiedener Weise dargestellt werden:

- Kennempfindlichkeit, Kurzschlussstrom oder relative Empfindlichkeit
- Linear oder logarithmisch

Dabei zeigt sich ein genereller Abfall der Kennempfindlichkeit (Abb.6) von Infrarot (IR) nach Ultraviolett (UV) hin, zwischen dem Maximum der BPW34 (63%) und dem Minimum der TW30SX (2%) liegt ein Faktor von etwa 30. Bis zu 140-fach höhere Chipflächen der IR-Dioden (0.056 bis 7,5 mm²) gegenüber UV sorgen für proportional zusätzliche Stromergiebigkeit der IR-Dioden, siehe Abb.5 und 6.

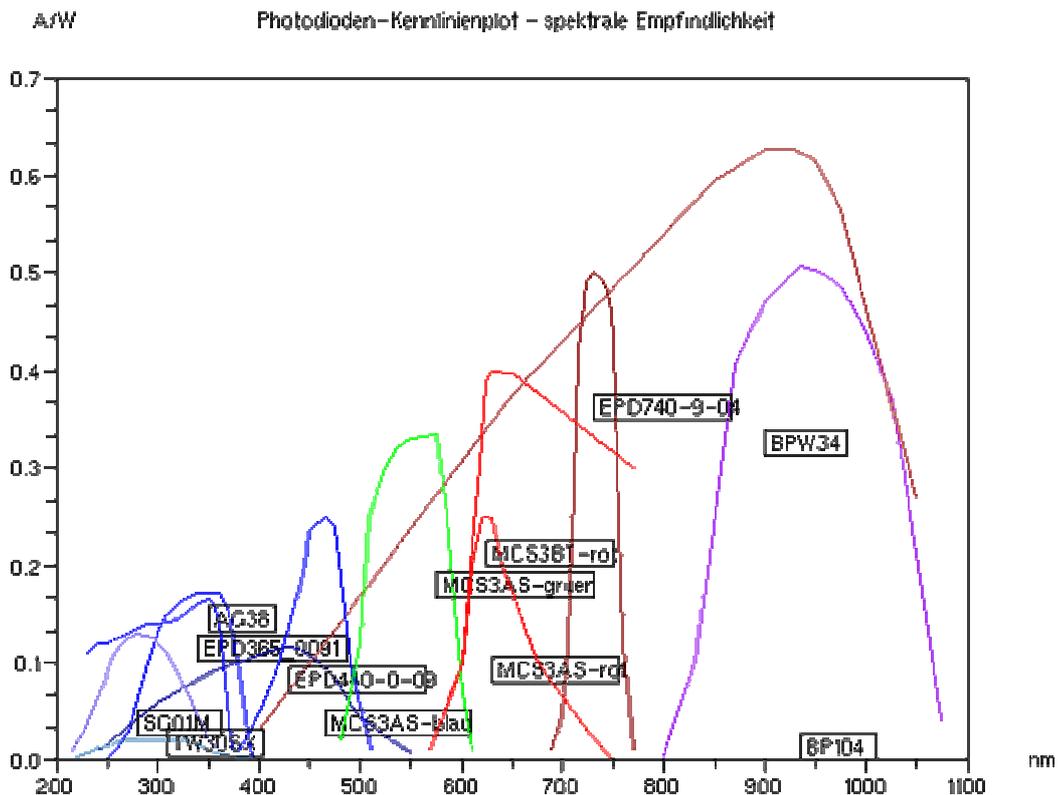


Abb.6: Photodioden in Darstellung „Empfindlichkeit A/W, linear“, GIF-Ausgabe aus dem Programm KENNLINIENPLOT.SCE © G.Heinz, GFal, [4]

In Summe ist bei gemeinsamer Applikation von IR- und UV-Dioden stets mit großer Verschiedenheit der Kurzschlussströme bis etwa zum Faktor $30 \cdot 140 = 4200$ zu rechnen (bei Sonnenschein, 100 mW/cm²). Für zu realisierende Vorverstärker erschien eine einstellbare Verstärkung im Bereich von 1 bis etwa 1000 als sinnvoll.

Folgende, im Experiment an der TU gemachte Erfahrungen belegten dies: während IR-Dioden mit Dämpfungsfolien zu überkleben waren, ist bei den UV-Dioden maximale Verstärkung einzustellen, um ein für den Datenrecorder brauchbares Eingangssignal von +/- 1Volt zu erhalten.

2.2 Sechskanaliges Breitband- Spektrometer für Photodioden

In der angestrebten Industrieapplikation sind verschiedene Materialien zu schweißen. Es ist nicht möglich, auf das Vorhandensein bestimmter Werkstoffe oder deren Linien zu vertrauen. Um Möglichkeiten einer breitbandigen Trennung am realen Plasma im Pulsprozess zu untersuchen, wurde im nächsten Schritt ein 6-Kanal Spektrometer für Photodioden entwickelt.

Mit dem Spektrometer- Vorverstärker soll der reale Zeitverlauf des leuchtenden Plasmas bei verschiedenen, breitbandigen und schmalbandigen, optischen Spektren im Bereich von 200 bis 1100 nm mit einer Abtastrate von 192 kS/s auf sechs unabhängigen, optischen Kanälen von Infrarot (IR) bis Ultraviolett (UV) beobachtbar werden.

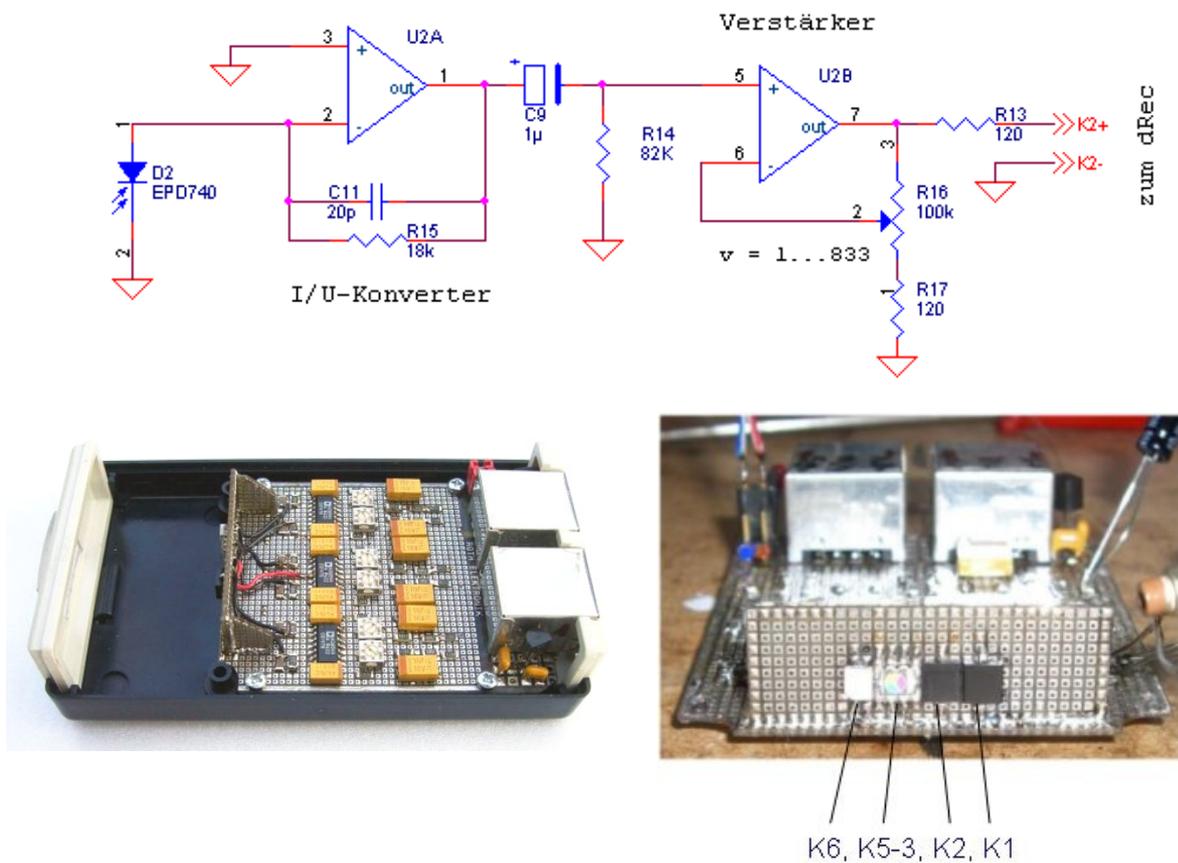


Abb.7: 6-Kanal Spektrometer-Verstärker. Oben: Auszug Schaltbild eines Kanals, Links: Gehäuseeinbau. Das Licht tritt von links auf die Photodioden. Rechts: Sicht auf Photodioden. © G.Heinz, GFal

Sollten sich breitbandige Spektren als nicht zielführend erweisen, sollten mit der Technik auch gefilterte, schmalbandige Spektren im Zeitverlauf untersucht werden. Schmalbandfilter sind umso lichtschwächer, je schmaler deren Bandbreite ist. Die Auslegung des Spektrometers ist anpassbar, so dass prinzipiell breitbandige, als auch schmalbandige Messungen mit Zusatzfilter möglich sind.

Um zu relevanten Aussagen über die für den Regler zu erwartenden Zeitfunktionen zu erhalten, wurde ein spezifischer Vorverstärker für einen vorhandenen Datenrecorder entwickelt. Zielvorgaben waren: Grenzfrequenz 100 kHz, 6 Kanäle, beliebige Photodioden (UV bis IR) am Eingang anschließbar.

Aufgezeichnet wird mit einem modifizierter Datenrecorder des Typs dRec192 (192 kS/s pro Kanal, 16 Kanäle, GFal) mit optisch isolierten Eingängen. Die Betriebsspannung der Spektrometer- Vorverstärker wird vom Datenrecorder geliefert (5 Volt, 20 mA).

Mit dem Sensorverstärker wird ein Empfindlichkeitsbereich realisiert, dem gewonnene Vorgaben zwischen minimaler und maximaler Stromergiebigkeit entsprechen. Er wurde zweistufig ausgeführt, die erste Stufe bildet einen Strom-Spannungswandler (I/U-Wandler), die zweite Stufe einen einstellbaren Verstärker (1...1000).



Abb.8: Links: Adapter für den Datenrecorder dRec192. Mitte: 6-Kanal Spektrometer im Gehäuse, Rechts: Datenrecorder dRec192 (GFal).

Zur Offsetbefreiung der Signale erschien eine Wechsellspannungskopplung (AC) zunächst am unproblematischsten. Nullpunktdrift kann nachträglich per Software mit einem Programm WAV2GIF.SCE eliminiert werden.

Besondere Aufmerksamkeit wurde einer extremen Störfestigkeit gewidmet, weil der Sensorverstärker nahe am Brennerkopf montiert ist. Signalkabel führen stückweise parallel zum Schweißstromkabel. Bei Transienten von bis zu 1000 A/ μ s bzw. 1000 V/ μ s ist sowohl eine elektrische Signalkomponente als auch die induktive Komponente abzuschirmen bzw. zu kompensieren. Ein gescheiterter Vorversuch im BMBF- Projekt ChopArc/Adamus [17] zeigte schon 2004, dass die Qualität der elektrischen Kompensationen ausschlaggebend für den Erfolg sein würde.

Der Entwurf berücksichtigt dies durch verschiedene Maßnahmen. Mit einem äußerst konservativen Design (Abb.7) war zunächst der Nachweis zu erbringen, daß es überhaupt möglich ist, eine so empfindliche Schaltung am Brennerkopf zu montieren. Zum einen wurden Impedanzen minimiert, um kapazitive Einkopplungen zu minimieren. Zum andern wurden Metallgehäuse gemieden (selbiger Grund). Es wurde ein Plastgehäuse mit innenliegender Abschirmung gewählt. Sämtliche Signale werden differentiell bzw. impedanzkompensiert – pseudosymmetrisch geführt, um induktiv zu kompensieren. Das PCB-Layout ist in den Vorstufen maximal symmetrisch geführt. Die Zuführung zum Datenrecorder erfolgt über pseudosymmetrische Paare in einem

vierpaarigen RJ45-Kabel. Zwei Adern führen die Betriebsspannung zu, drei Aderpaare tragen je einen Kanal. Erdschleifen waren strikt zu meiden.

Zeitkonstanten in verwendeter Wechselfrequenzkopplung wurden als kritisch erkannt: zu hohe C9-Werte (Abb.7) bringen dynamische Probleme bei Lichtschwankungen im Prozess, zu geringe C9-Werte führen zu Dachabfall, beide Phänomene stören.

Nachteil des konservativen Designs ist auch eine durch C9 (Abb.7) erkaufte Abhängigkeit des Offset vom Typ der Zeitfunktion. Weiterführende Arbeiten erfolgten deshalb für einen gleichspannungs- (DC-) gekoppelten Vorverstärker mit U/I-Wandler. Die Untersuchungen erwiesen sich für den später zu entwickelnden Spektralcontroller als äußerst nützlich.

Mit einer maximalen Samplerate des Datenrecorders von 192 kS/s steht eine Grenzfrequenz der Aufzeichnung von 90 kHz zur Verfügung. Um mit Auflösungen im Bereich von 0,1 ms arbeiten zu können, wurde der Spektrometer- Verstärker für eine Grenzfrequenz von etwa 100 kHz ausgelegt, siehe Abb.10b.

2.3 Entwicklungs- und Testumgebung

Zur Inbetriebnahme des Vorverstärkers war eine Testumgebung für die Laborphase zu entwickeln und aufzubauen. Verschiedene Lichtquellen wurden auf ihre Tauglichkeit untersucht, pulsmoduliertes Licht im entsprechenden Spektralbereich abzugeben.

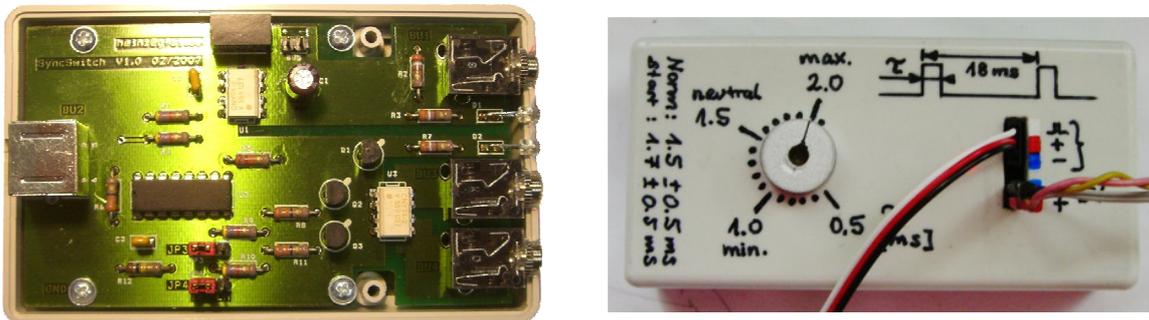


Abb.9: Entwickelte Testumgebung: Links: Isolierter Schalter (IsoSwitch) für Synchronisation von Datenrecorder, Schweißmaschine und Hochgeschwindigkeitskamera, Rechts: Pulsgeber für die Plasma-Simulation mittels LED. © G.Heinz, GFal

Es zeigte sich, dass eine IR-LED und eine blaue LED in Kombination über ein RC- Filter Abb.10a am besten geeignet sind, die Zeit- und Spektralcharakteristik des Plasmas hinreichend zu imitieren. Beide Dioden werden über ein transistorverstärktes Signal aus einem Pulsgeber betrieben. Dieses wird von einem Pulsgeber geliefert, Abb.9.

Um alle Geräte (Hochgeschwindigkeitskamera, Datenrecorder, Schweißgerät) zeitlich exakt synchron starten zu können, wurde eine Synchronisation mit Optokopplern entwickelt (SyncSwitch/IsoSwitch). Die galvanische Verbindung von Schutzgeräten über Signaladern verbietet sich bei Aufzeichnungen von Schweißvorgängen aufgrund der Einkopplung entstehender Erdschleifen.

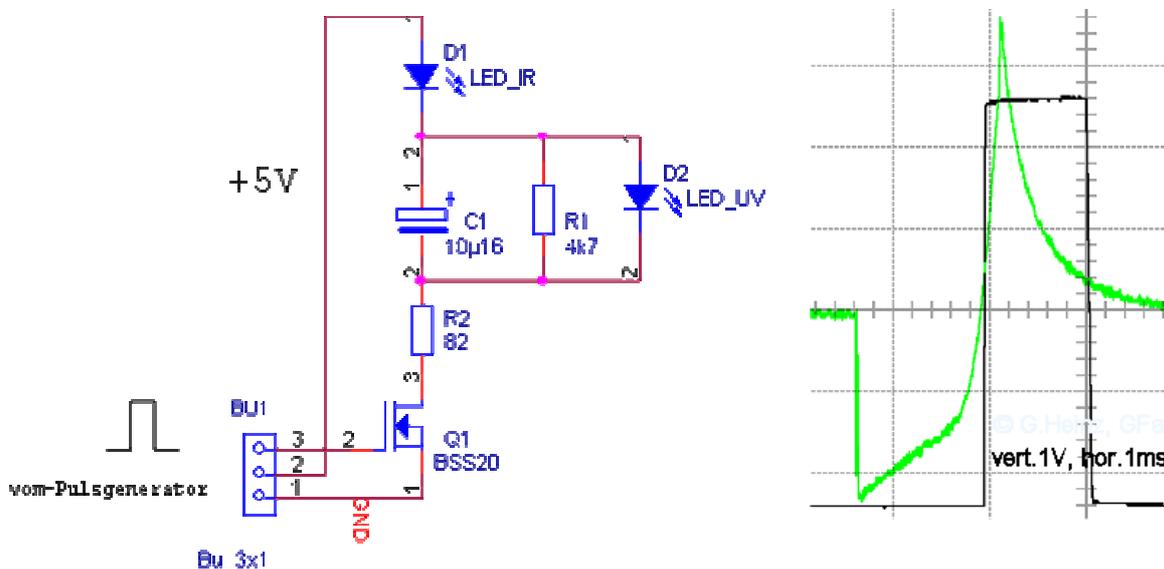


Abb.10a: RC-Glied für die LED-Plasma-Imitation (links) und gemessener Zeitverlauf des simulierten Differenzsignals (UV minus IR, grün) am Spektralregler rechts.

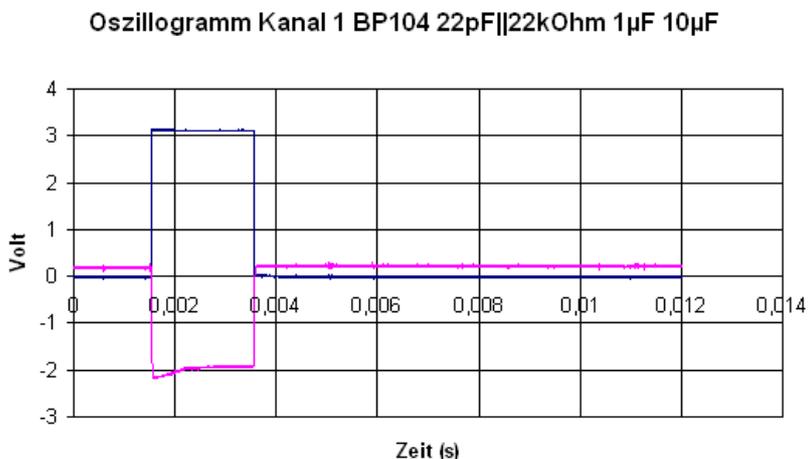


Abb.10b: Dynamisches Verhalten des Spektrometer-Verstärkers (SV). Strom durch die Lichtquelle (weiße LED) blau, obere Kurve, 1mV/div.; Ausgangssignal des SV violett (unten); 1V/div. 2ms/div.

Untersuchungen zur Dynamik des Verstärkers erfolgten mit einer weißen LED, der ein Rechteckimpuls aufgeprägt wird, Abb.10b. Die Schaltung produziert hinreichend steile Transienten im Großsignalverhalten. AC-Kopplung sorgt unvermeidlich für einen Dachabfall.

2.4 Auswertungssoftware WAV2GIF

Der Datenrecorder liefert unkalibrierte Rohdaten mit dynamischem und statischem Offset, teils haben Kanäle falsche Polarität etc.. Zur exakten Darstellung in Form nach Abb.11a und 11b wurde ein Programm WAV2GIF.SCE unter Scilab entwickelt, mit dem anschließend auch eine Simulation des Schaltens des zu entwickelnden Controllers simuliert werden kann. Das Programm gestattet

- Lesen der Zeitfunktionen im *.WAV-Format
- Offsetbefreiung der Kanäle und Inversion der Zeitfunktionen
- Mathematische Verknüpfungen ausgehend vom Initialisierungsfile
- Komparierung einer Zeitfunktion mit vorgebbaren Schwellen sowie
- Ausgabe eines Plotbildes als *.GIF-File.

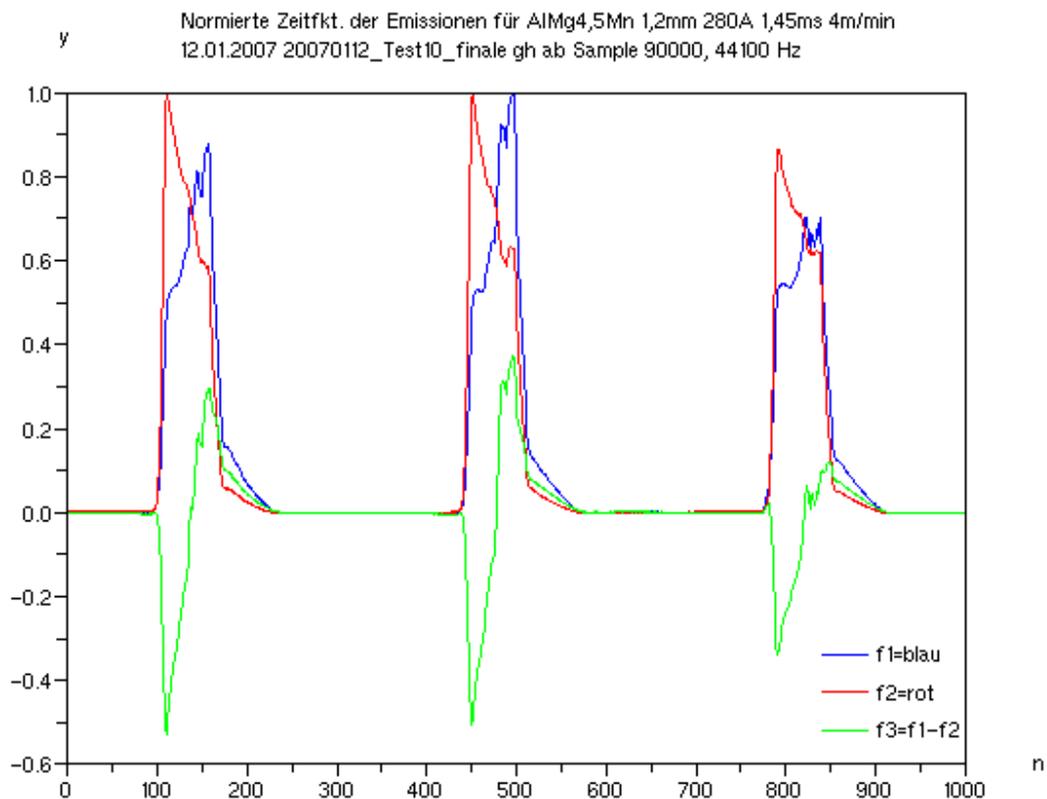


Abb.11a: Am Schweißplasma gemessene Zeitfunktionen einer blau-empfindlichen Diode (f1) und einer rot-empfindlichen Diode (f2). Die Differenz f3 beider kann im Nulldurchgang einer definierten Plasmatemperatur zugeordnet werden, bei der abgeschaltet wird. © G.Heinz, GFal, Jan. 2007

2.5 Aufnahmen im Zeitbereich

Waren zu Projektbeginn Aufnahmen von Einzellinien im Zeitverlauf nur stroboskopisch gewinnbar, so eröffnete der 6-Kanal-Vorverstärker die Möglichkeit, Subspektralen von Photodioden im Zeitverlauf genau und mit zusätzlicher Aufzeichnung durch eine an der TU vorhandene Hochgeschwindigkeitskamera zu untersuchen.

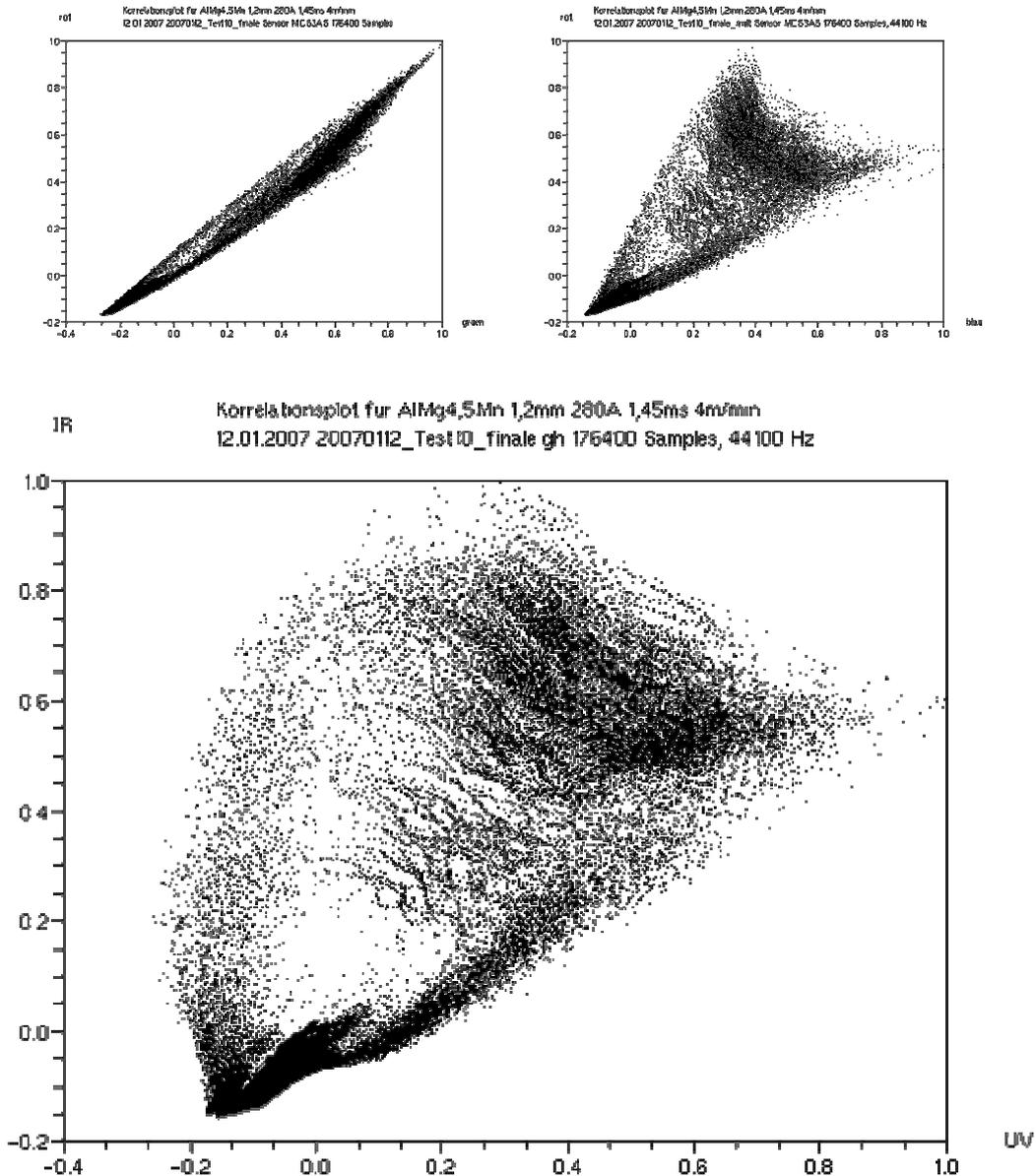


Abb.11b: Korrelationsplots der Zeitfunktionen verschiedener Photodioden-Paare: Links oben: Rot-Grün, rechts oben: Rot-Blau (Dreifarbsensor MC3AS), unten: IR (BP104) gegen UV (AG38). Das Bild unten zeigt stärkste Unabhängigkeit beider Kanäle. © G.Heinz, GFal, Feb. 2007

Zeitfunktionen wurden mit folgenden Photodioden aufgezeichnet: blau/UV: EPD280 (280 nm), SG01M (280 nm), TW30 (300 nm), EPD440 (440 nm); sichtbar: MCS3AS (RGB 470/570/650 nm); rot/IR: EPD740 (740 nm), BPW34 (880 nm), BP104(950 nm).

Mit Inbetriebnahme des 6-Kanal Spektrometers konnten die erwartete Entdeckung (Hofmann/Heinz) am 12.1.2007 dann tatsächlich gemacht werden: Die Blau-Emission eines Schweiß-Plasmas (Metалldampf, $f1$) steigt auch bei Breitband-Untersuchung in der Pulsphase an, während die Infrarot-Emission ($f2$) stetig sinkt (Argon), Abb.11a. Die Differenz $f3$ kann als Maß für die Temperatur gelten – sie soll später den Abschaltvorgang steuern.

Breitbandige Spektren gestatten also eine Signaldifferenzierung, die Rückschlüsse auf Temperatur und Energieeintrag erlaubt. Mit diesem Ergebnis wurden die Arbeiten am linienspektrometrischen Ansatz überflüssig.

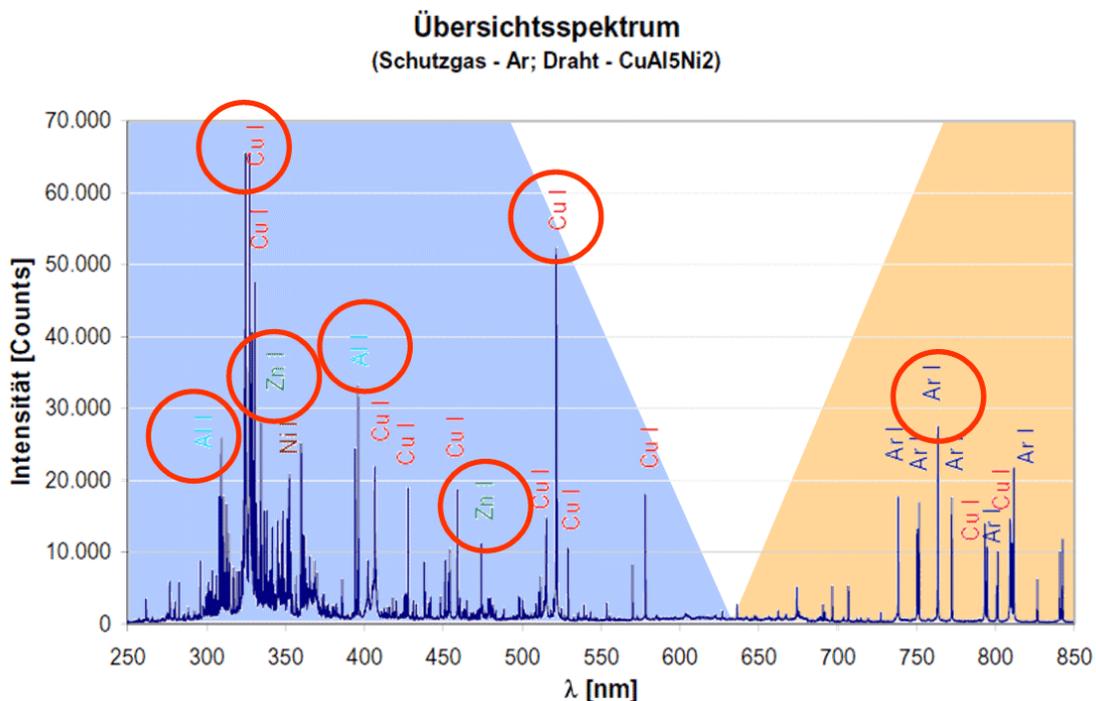


Abb.12: Wird ein Schnittpunkt um 630 nm gewählt, wird eine Differenzierung zwischen Metaldämpfen und Argon möglich. Bild: INP Metzke/GFal Hz

2.6 Subband-Selektion, optimale Bandaufteilung

Zunächst stand noch offen, welche Spektralbereiche für die Detektion von Metaldampf und Argon taugen. Theoretische Betrachtungen (INP Greifswald und TU Berlin, siehe Berichte) erbrachten keine abschließende Klarheit über sinnvolle Bandaufteilung des Spektrums in Subbänder für Metaldampf und Argon.

Um optimale Unterscheidbarkeit zu finden, wurde ein statistischer Ansatz auf Basis linearer Separabilität gewählt. Die Zeitfunktionen für Metall und Argon sollen sich „möglichst stark“ im Zeitverlauf unterscheiden.

Die Momentan-Amplituden von n Zeitfunktionen eines Samples werden dazu jeweils auf den n Achsen eines n -dimensionalen Raumes als Punkt aufgetragen, siehe Abb.11b für $n = 2$. Je ausladender die Punktwolke, umso mehr Potential steht für die Trennung zur Verfügung. In die Software WAV2GIF.SCE wurde eine Funktion ‚Korrelationsplot‘ integriert. Es ergibt sich eine recht anschauliche Darstellung, die eine Art Divergenz-Potential der Punktwolken zeigt.

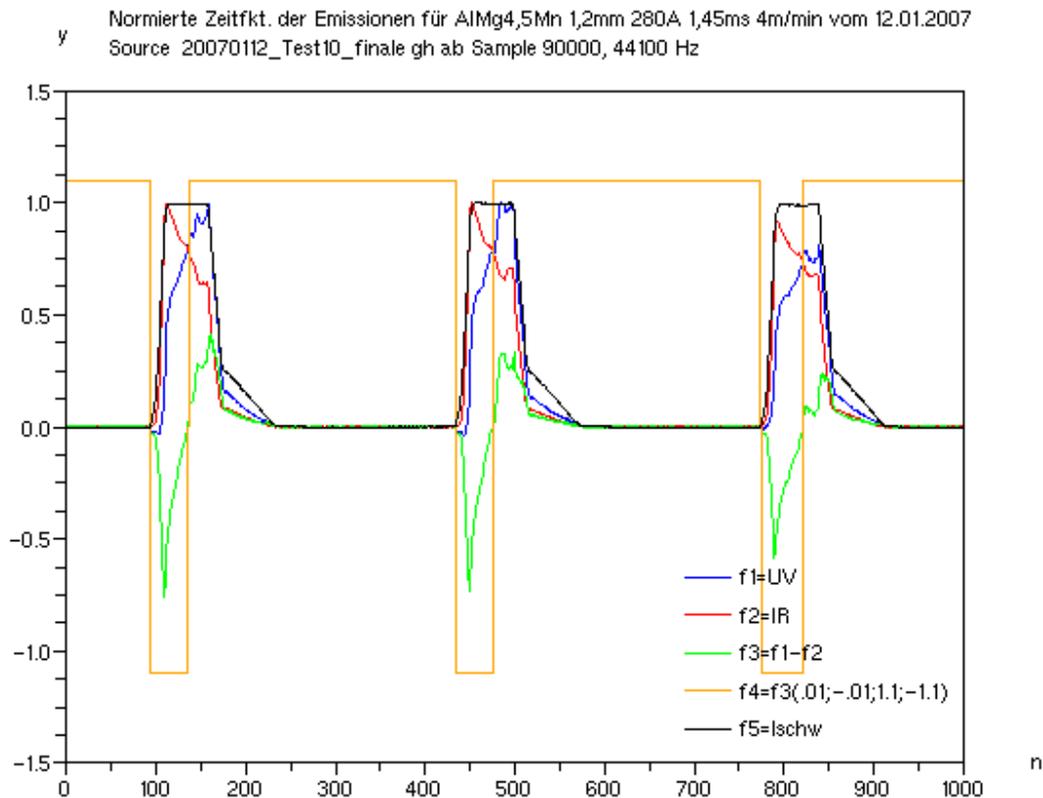


Abb.13: Simulierter Abschaltvorgang. Eine parametrisierbare Schwellwertfunktion $f4$ simuliert die Schaltflanke. $f1$ und $f2$ sind Messdaten. © G.Heinz, GFal, Jan. 2007, [4, 7]

Folgende Experimente mit verschiedenen Metallen und Dioden (Herr Hofmann, TU) zeigten recht pauschale eine Eignung von Dioden-Kombinationen mit einem Frequenzschnittpunkt zwischen 550 und 700 nm. Dabei ist relativ unkritisch, wie groß die Bandlücke zwischen beiden ist. Lediglich der Schnittpunkt sollte nicht übertreten werden. Im Projekt konnten nur erste, ganz grob gerasterte Untersuchungen dazu gemacht werden, weitere Untersuchungen müssen folgen. Die Aussagen decken sich weitgehend mit den theoretischen Erwartungen ausgehend von Linienspektren, Abb.12 (Linienspektrum: Quelle INP).

2.7 Software-Simulation des Abschaltvorgangs

Um ein Verständnis dafür zu erlangen, in welcher Art und Weise ein in Hardware realisierter Controller reagieren würde, erfolgte zunächst eine Erweiterung des Programms WAV2GIF.SCE um eine Schwellwertfunktion, Abb.13.

Die Funktion $f(\max, \min, \text{limit}+, \text{limit}-)$, in Abb.13 als f_4 dargestellt, simuliert den zu erwartenden Abschaltvorgang (hier die steigende Flanke). Es wird angenommen, dass sich die gewünschte Schwelle über die Verstärkungseinstellung vorgeben lässt. Variation der Schwellwertparameter sollte darüber Aufschluss geben, ob eine Prozessregelung stabil arbeiten würde. Ausgehend von realen Schweißdaten zeigt die Simulation der Abschaltflanke (hier HL), dass sich eine Parametrisierung der Komparatorfunktion tatsächlich finden lässt, die einen kompletten Schweißzyklus lückenlos detektieren kann.

Vorausgesetzt muss allerdings werden, daß statische wie dynamische Offsetdrift (driftende Nulllinie) verschwindet oder differenziell kompensiert werden kann. (Die Offsetbefreiung wird in Abb.13 durch eine statistische Funktion NULLO in WAV2GIF.SCE realisiert).

Für den Spektralcontroller entsteht die Forderung, mit Gleichspannungskopplung (DC) statt mit kapazitiver Kopplung (AC) arbeiten zu müssen. Dies erhöht die schaltungstechnischen Anforderungen und erklärt einen höheren Aufwand bei der Realisierung des Reglers. Zum Vergleich: Beim 6-Kanal-Spektrometer kommen zwei OPV pro Kanal, beim Spektralregler 6 OPV pro Kanal zum Einsatz.

3 Zweikanal-Spektralregler

Im letzten Teil des Projekts wurde ein zweikanaliger Spektralregler als Versuchsaufbau realisiert. Dieser schweiß seit dem 21.11.2007 beim Projektpartner an der TU Berlin, siehe Abb.1, Abb.14, Abb.17 und 18.

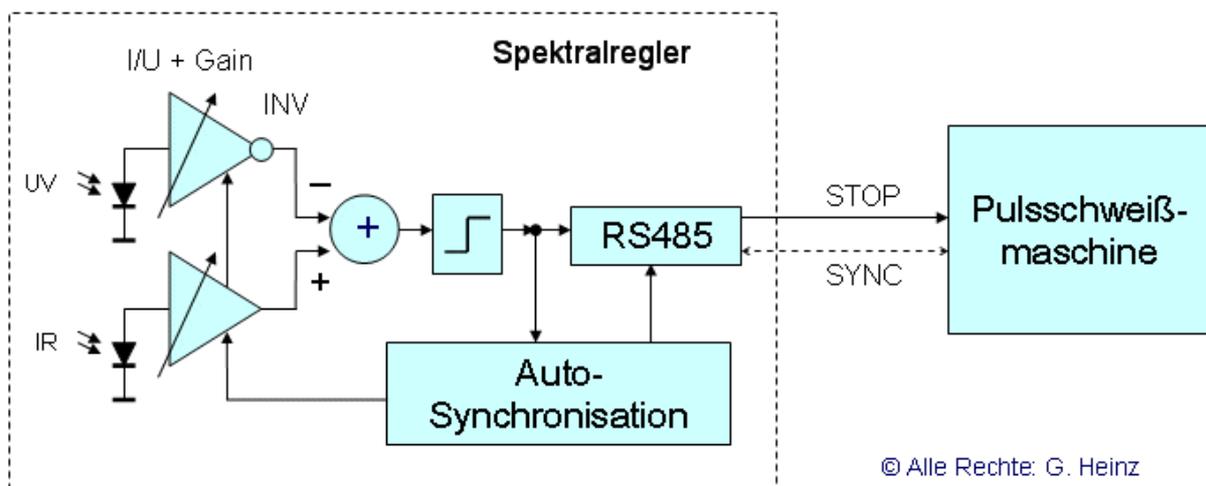


Abb.14: Blockschaubild des Zweikanal- Spektralreglers.

zwei Moden betrieben werden: Mit speziellen Brücken (Jumper) kann zwischen *quasi-kontinuierlichem Betrieb* und *Pulsbetrieb* gewählt werden.

Für **quasikontinuierlichen Betrieb** hat die Schweißmaschine nur den ersten Puls zu geben (Anfahrpuls). Danach erhält sie das Pulssignal (ein/aus) komplett aus dem Spektralcontroller, Abb.15, rechts. An der Schweißmaschine sind nur die Parameter Grundstrom, Pulsstrom sowie Drahtvorschubgeschwindigkeit einzustellen. Eine bisher übliche Einstellung der Pulsdauer entfällt. Im Gegensatz dazu liefert der Spektralregler im **Pulsmode** jeweils nur die Abschaltflanke, Abb.15, links.

Technisch unterscheiden sich beide Moden durch ein zusätzliches Verzögerungsglied für den Pulsbetrieb. Eine Pulsverlängerung wird nötig, um wiederholtes Einschalten innerhalb eines Pulses zu verhindern. Beide Moden arbeiten am besten mit Autosynchronisation. Grundstrom und Pulsstrom wurden von 300 auf 500 A gesteigert ohne nennenswerte Auswirkung auf die Schweißqualität.

3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau Abb.16) ist mit neun IC bestückt, darunter befinden sich drei vierfach- OPV (Operationsverstärker). Insgesamt sind also zwölf OPV in Verwendung, um die Funktionen I/U-Konversion, Verstärkung, Differenzbildung, Komparierung und Autosynchronisation zu realisieren. Die Schaltung ist zu umfangreich, um hier im Detail vorgestellt werden zu können, siehe dazu auch Anlage1.

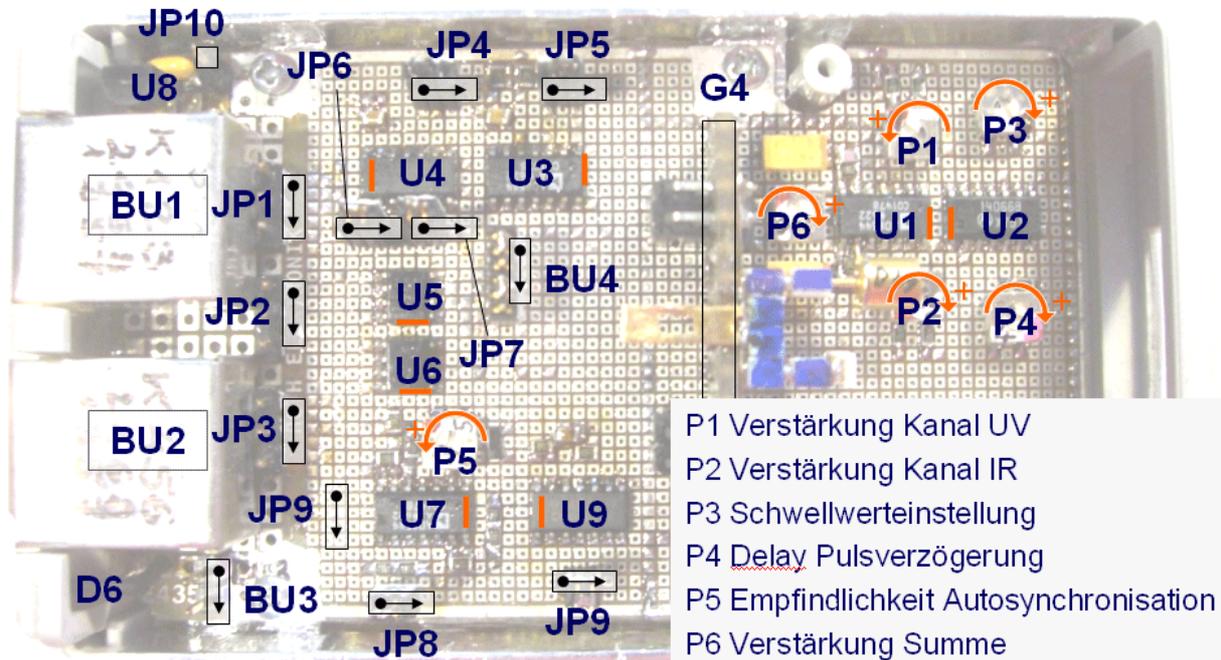


Abb.16: Bedienelemente des Spektralregler (Versuchsaufbau). © G.Heinz, GFal

Ein zentral zu lösendes Problem ist das der Offsetkompensation der Vorverstärker. Wie beim Spektrometerverstärker beschrieben, führt Wechselspannungskopplung bei unsymmetrischen Signalen zum neuen Problem einer dynamischen Offsetdrift. Diese ist – genau wie statische Offsetdrift und statisches Offset – zu minimieren.

Als Lösungsansatz steht die Möglichkeit offen, Koppelkondensatoren wegzulassen und direkt zu koppeln (DC). Dies ist bei Verstärkungen von insgesamt bis etwa 10000 und undefinierten Dunkelströmen der Photodioden nicht ganz unproblematisch. Die Eingangsstufe (I/U-Wandlung und Verstärkung) wurde deshalb mit geschalteter Gegenkopplung konzipiert. Nur dann, wenn ein Nullsignal anliegt, wird vorsichtig gegengekoppelt und das Offset wird eliminiert. Stabilität in der Gegenkopplungsschleife kann erreicht werden, zeigt die realisierte Lösung.

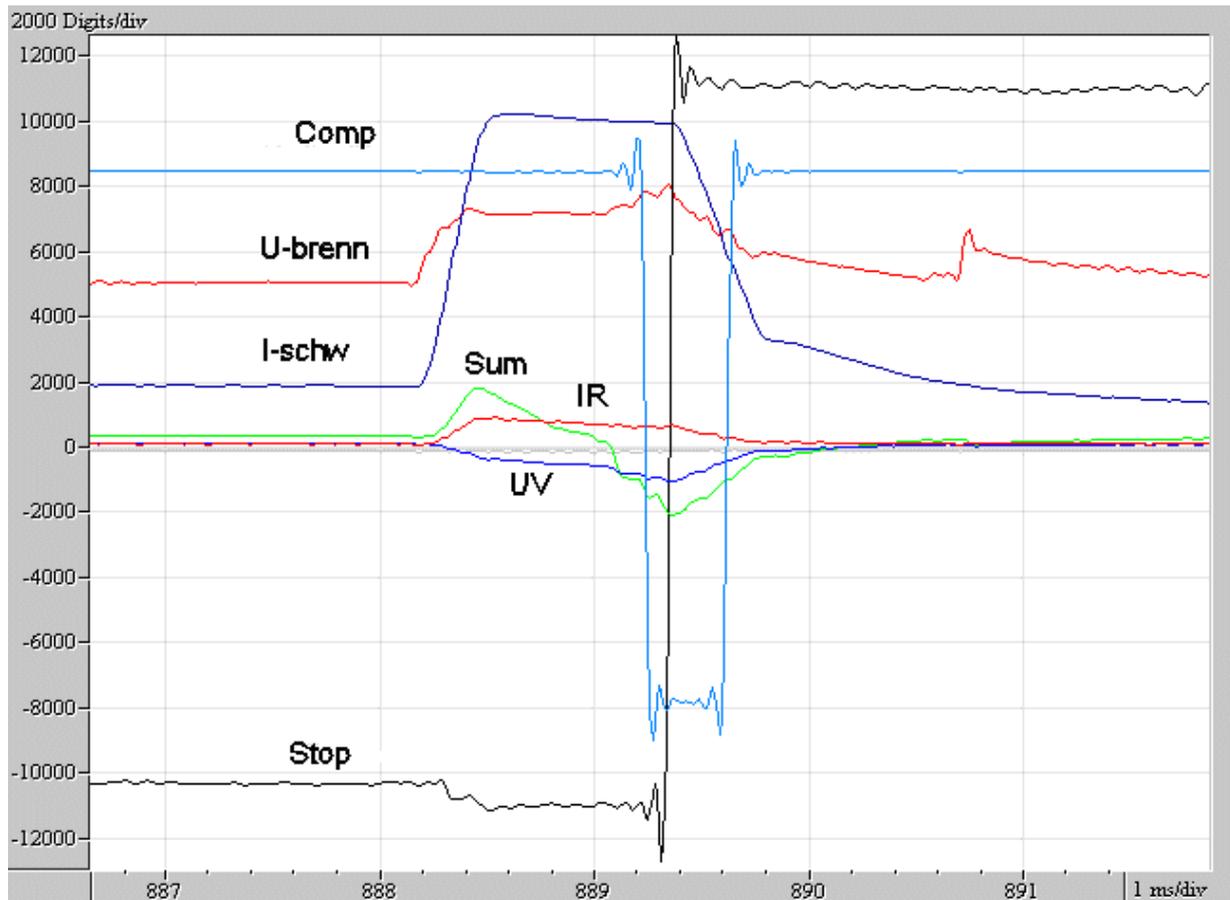


Abb.17: Erste, aufgezeichnete Zeitfunktionen einer spektral geregelten Pulsschweißung. Abkürzungen: I-schw Schweißstrom, U-brenn: Brennspeisung, UV: Signal der UV-Diode, IR: Signal der IR-Diode, Sum: Differenzsignal (negiert), Comp: Ausgang des Komparators, Stop: generiertes Steuersignal für die Schweißstromquelle. Datensatz 20071121_AIMg45_AIMg45_ArgR_CI_V01.chl, TP 15kHz, -36 dB. Recording: F. Hofmann & G. Heinz. Bild: © G.Heinz, GFal, 21.11.2007

Da wir es mit (fast) rechteckigen Signalen zu tun haben, genügt eine starke Verstärkung, um die Zeitbereiche ausklammern zu können, die ungeeignet für eine Gegenkopplung sind. Dafür wurde eine Baugruppe ‚Autosynchronisation‘ entwickelt. Es war anzunehmen, daß ein von der Schweißmaschine kommendes Pausensignal verrauscht und zeitlich nicht präzise genug sein würde. Das negierte Differenzsignal

schaltet die Gegenkopplung in Bereichen hoher Aussteuerung ab. Damit wird das Differenzsignal wiederum nahezu ideal auf die Nulllinie gezogen.

Eine *Ruhe-Zeitkonstante* der Offsetkompensation wurde auf etwa 100 Sekunden dimensioniert. Die Schaltung ist danach betriebsbereit.

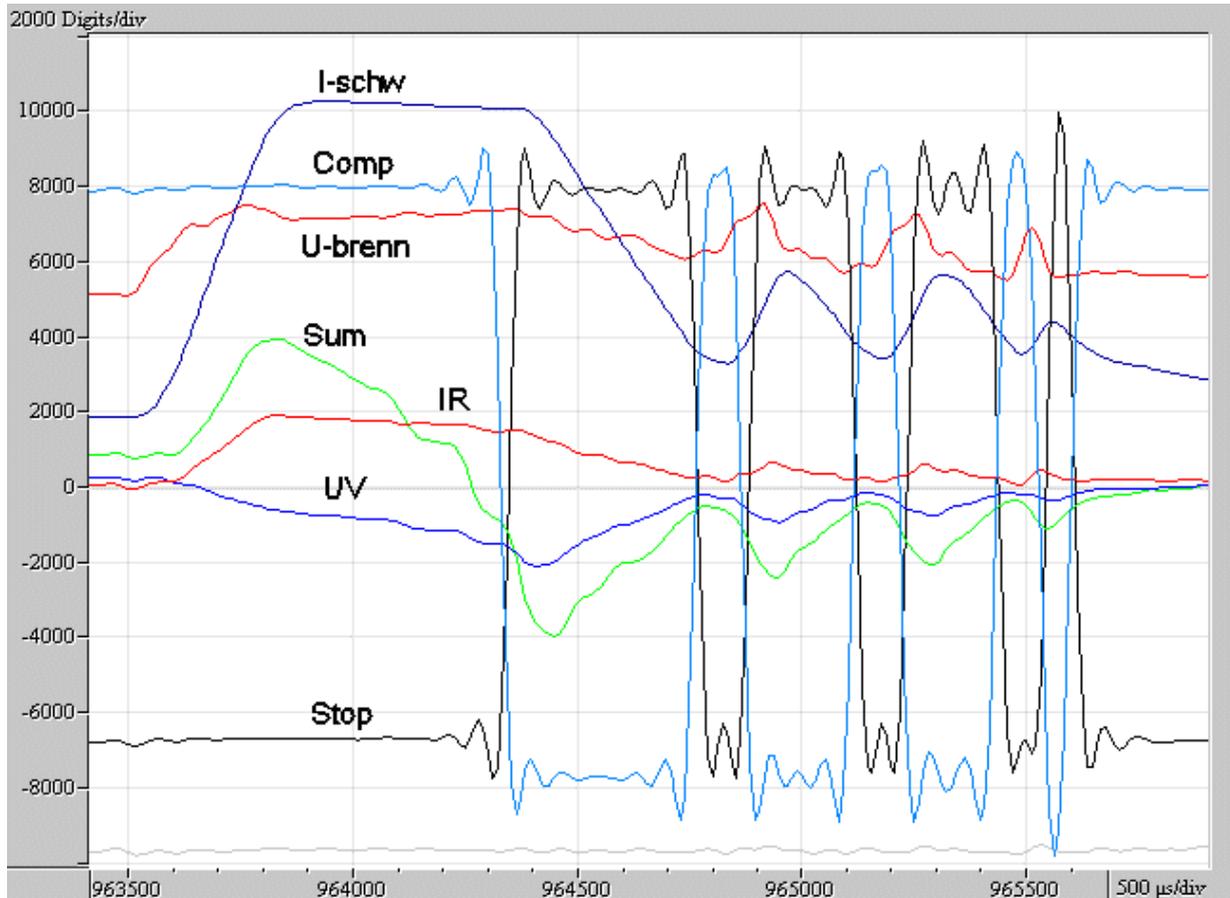


Abb.18: Erste, quasi-kontinuierliche Spektralschweißung. Der Regler lässt nicht zu, daß das Plasma zu heiß oder zu kalt wird, er schaltet Signal ‚Stop‘ ab und wieder an. Datensatz 20071119_AIMg45_AIMg45_ArgR_CI_V01.chl, TP 15kHz -36 dB; Record: F. Hofmann & G. Heinz. Bild: © G.Heinz, GFal

Um Offsetänderungen z.B. durch variierende Grundstrom-Helligkeit infolge von Drahtabstandsschwankungen schnell genug kompensieren zu können, besitzt der Regler eine zweite Zeitkonstante. Diese sog. *Refresh-Zeitkonstante* wirkt während der Pulspause des Schweißens. Sie ist wesentlich härter als die Ruhe-Zeitkonstante und wurde zunächst auf 2 Sekunden fixiert. Leider fehlte bislang die Möglichkeit, deren optimale Größe im Praxisversuch zu validieren.

3.3 Interaktion mit dem Schweißgerät

Zwei differentielle Digitalsignale (RS485) steuern die Kommunikation mit der Schweißmaschine:

- Schweißmaschine und Regler werden über ‚Sync‘ synchronisiert (optional).
- ‚Stop‘ steuert die Ab- und Anschaltung der Schweißmaschine (immer vorhanden).

Zum Betrieb genügt ein RJ45-Kabel zur Schweißmaschine. Die Spannungsversorgung kommt über dasselbe Kabel (5V, 30 mA). Folgende Synchronisationsmoden stehen zur Verfügung:

1. SYNC-EXT: das Synchronsignal kommt von der Schweißmaschine
2. SYNC-INT: eine interne Schaltung erzeugt das Synchronsignal.
3. dRec: Für den Service können sechs interne Signale (u.a. auch das intern erzeugte Synchronsignal) an einen Datenrecorder ausgegeben werden
4. GEN: Für Testbetrieb kann ein Synchronsignal über einen Zusatzstecker eingespeist werden.

Die Synchronisationsmoden können über einen 6-poligen Adapter eingestellt werden (BU4, siehe Anlage1).

Ursprünglich sollte das Schweißgerät über eine RS-485 Schnittstelle bidirektional gesteuert werden: Die Schweißmaschine liefert den Puls, der Regler schaltet diesen wieder ab. Die Übertragungstrecke zwischen Schweißmaschine und Regler verursacht aber ein gewisses Rauschen. Im Projektverlauf zeigte sich nun, dass der Spektralregler präziser mit einer Autosynchronisation arbeitet, die ihn selbst in die Lage versetzt, optisch den Puls zu erkennen und das Timing zu optimieren.

Schlussendlich kann zwischen Fremdsynchronisation von der Schweißmaschine und (interner) Autosynchronisation umgeschaltet werden, Anlage1, BU4/JP9. Der Regler liefert im Mode ‚Autosynchronisation‘ nur ein Aus- bzw. Einschaltsignal. Damit ergibt sich zusätzlich die Chance eines intermittierenden, quasikontinuierlichen Betriebs der Schweißmaschine.

Projektpartner Cloos- Schweißtechnik lieferte entsprechend angepasste Module für den DSP der Quinto 403 sowie eine Schnittstellenkarte (sog. Master-Slave) mit EIA-422 Schnittstelle (siehe Bericht der TU). In der Finalversion (siehe Anlage1) bedient der Regler zwei differentielle Steuerleitungen mit serieller Schnittstelle (EIA-485/422). Auf einer Leitung kann er ein Synchronsignal (*Sync*) empfangen oder aussenden, auf der anderen sendet er das eigentliche Steuersignal (*Stop*).

Sowohl UV, als auch IR-Signal weisen einen hochfrequenten Rauschanteil auf. In einer *Signalkonditioniereinheit* (Abb.14, bzw. Anlage1, G8) ist mit einem digital realisierten Tiefpassfilter eine minimale Dauer des Überhitzungssignals einstellbar, bevor ein Stop-Signal an die Schweißmaschine geht. Damit wird die minimale Pulsdauer praktisch auf etwa 100 µs begrenzt.

3.4 Interpretation der Ergebnisse

Verschiedene Methoden sind bekannt, um aus bekannten Einzellinien den Temperaturverlauf zu lokalisieren, siehe z.B. [19...26]. Perspektivisch sind derartige Methoden zu erschließen, um die Plasmatemperatur kalibrieren zu können. Leider kann der Zusammenhang zwischen Linienemission und Messsignal der Photodioden bislang noch nicht zweifelsfrei hergestellt werden.

War der Antrag davon ausgegangen, dass Einzellinien der Metallionen im Spektrum zur Temperaturbestimmung genutzt werden, so ist wenig Wissen verfügbar über die hier genutzte Dynamik der Liniengruppen. Um zu Aussagen über breitere Bänder zu kommen, gibt die Plancksche Strahlungsformel einen Anhaltspunkt.

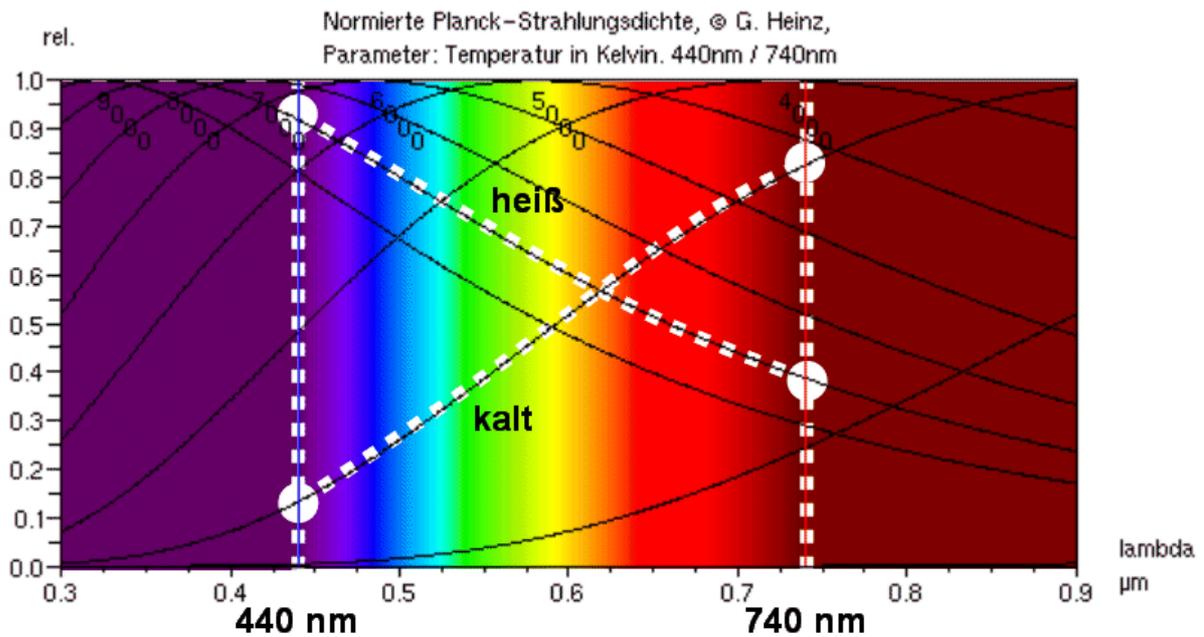


Abb.19: Idee des Reglers. Schätzung der Plasmatemperatur des Spektralreglers über eine normierte, Plancksche Strahlungsdichte $D = f(T, \lambda)$ ausgehend von zwei Emissionswerten. © G.Heinz, GFal

Element	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe
Schmelzpunkt in K	693	923	1517	1358	1808
Siedepunkt in K	1180	1380	2235	2840	3023

Tab.1 Schmelz- und Siedepunkte zu fügender Metalle

Die Idee geht davon aus, dass eine Verlagerung des Emissionsschwerpunktes von IR nach UV auf eine Temperaturzunahme des Plasmas hindeutet.

Das Plancksche Strahlungsgesetz² (hier in einer auf gleiche Höhe normierten Darstellung) gilt zwar eigentlich nur für Schwarzkörperstrahler. Nimmt man an, dass die interessierenden Metalllinien in etwa unter der einhüllenden Planckkurve liegen, eröffnet es die Möglichkeit, die Wirkungsabläufe grob inhaltlich zu deuten.

² Siehe auch http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz

Die Plancksche Strahlungsgleichung stellt einen Zusammenhang zwischen Temperatur T , Wellenlänge λ und Strahlungsleistung pro Flächenelement D her,

$$(1) \quad D = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$$

mit c Lichtgeschwindigkeit, k Boltzmannkonstante und h Plancksches Wirkungsquantum.

Eine auf gleiche Amplituden normierte Darstellung der Planckschen Strahlungsgleichung zeigt Abb.19. Eingezeichnet sind die Maxima der Detektion der zur Zeit im Regler verwendeten Photodioden bei 440 und 740 nm.

Es ist zu erkennen, dass die Kennlinie „kalt“ eines 3000 Grad heißen Plasmas von rot zu blau hin im markierten Bereich sinkt (Emissionen $440 \text{ nm} < 740 \text{ nm}$).

Hingegen steigt die Kennlinie „heiß“ eines 7000 Grad warmen Plasmas aber im selben Bereich (Emissionen blau $>$ rot) an. Folglich sind die von den Photodioden zu erwartenden Werte für beide Fälle verschieden.

Herleitung einer Näherung zur Temperaturbestimmung

Eine Berechnung der Planckschen Strahlungsdichte $D = f(T, \lambda)$ für zwei Werte der Wellenlänge ($\lambda_{UV}, \lambda_{IR}$) liefert die Funktionen

$$(2) \quad D_{UV} = f(T, \lambda_{UV}) \text{ sowie}$$

$$(3) \quad D_{IR} = f(T, \lambda_{IR}).$$

Deren analytische oder numerische Inversion gibt die Temperatur in Abhängigkeit von der Strahlungsdichte der betrachteten Linie an,

$$(4) \quad T = f(D_{UV}, \lambda_{UV}) \text{ bzw.}$$

$$(5) \quad T = f(D_{IR}, \lambda_{IR}).$$

Bildet man das Verhältnis der Strahlungsdichten

$$(6) \quad Q = D_{UV}/D_{IR},$$

so kann man eine monoton wachsende Funktion T zwischen der Temperatur und dem Quotienten Q bilden. Die entstehende Funktion ist in Abb. 20 dargestellt.

Wird der Quotient Q Wert für Wert aus den Abtastwerten der Photodioden ermittelt, so können wir daraus numerisch die Temperaturkurve des Schweißvorgangs schätzen.

Mit entsprechenden Normierungskonstanten lassen sich die Empfindlichkeiten der Photodioden anpassen. Schlussendlich sehen wir mit Abb.21 und 22 eine Schätzung der aktuellen Plasmatemperatur und können dem Regler bei der Arbeit zusehen.

Die so gewonnene Temperaturfunktion gilt allerdings nur für genau diese zwei Maxima definierter Wellenlänge. Werden andere Photodioden mit anderen Empfindlichkeitsmaxima benutzt, so ist dafür zunächst wieder die Temperaturfunktion zu bestimmen. Unter Scilab wurden dazu spezielle Softwaremodule entwickelt (temperaturkurve.sce und wav4gif_v3.sce).

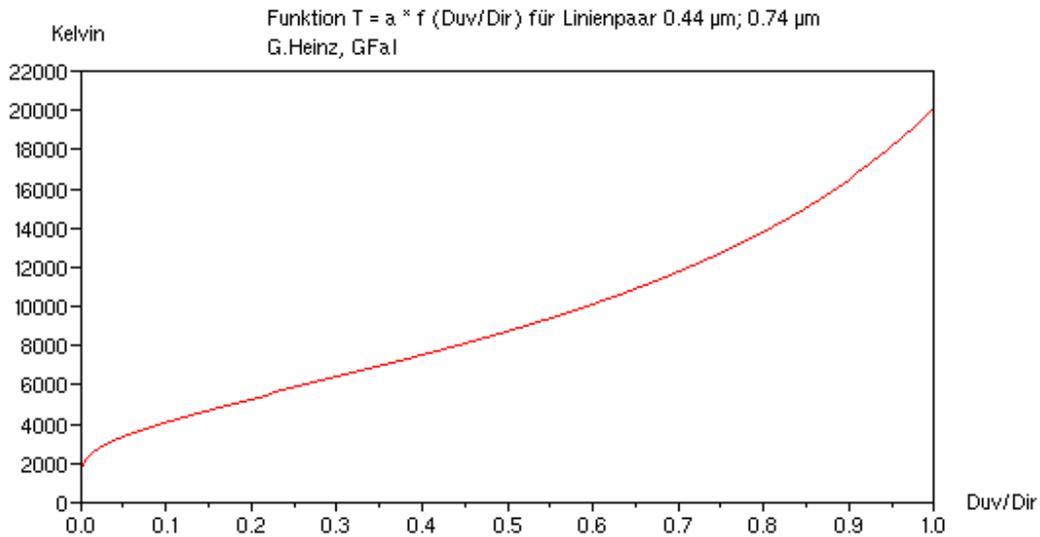


Abb.20: Temperaturfunktion für das Linienpaar 440/740nm. © G.Heinz, GFaI

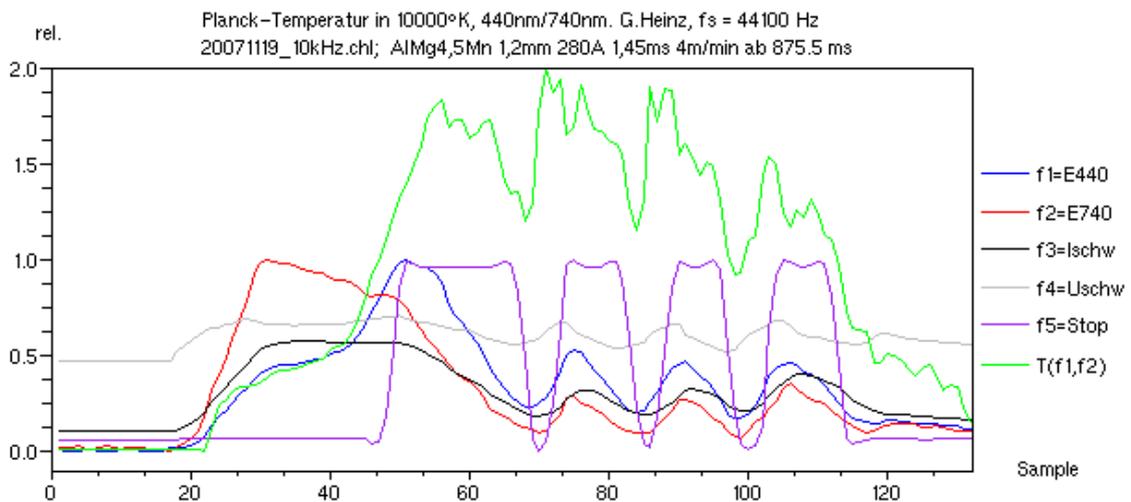


Abb.21: Temperaturgeregeltes Plasma im intermittierend-quasikontinuierlichen Mode mit Schätzung der Plasma-Temperatur. f_1 und f_2 sind die Signale der Photodioden; f_3 und f_4 sind Schweißstrom und -spannung. Die Temperatur $T(f_1, f_2)$ wird aus der Zeitfunktionen der Photodioden geschätzt. f_5 ist das an die Stromquelle gelieferte Stop-Signal (ein = low). Bei Überschreitung einer Schwelltemperatur wird der Puls mit f_5 abgeschaltet, bei Unterschreitung wird wieder zugeschaltet. © G.Heinz

Abb.21 verdeutlicht, dass die Plasmatemperatur tatsächlich auf einem gewissen Niveau gehalten wird. Indes entstehen neue Fragen.

So ist noch unklar, in welcher Weise die Tropfenablösung beeinflusst wird. Grundlegende Arbeiten sind erforderlich, um die Verhältnisse plasmaphysikalisch besser verstehen zu können. Parameter von Materialpaarungen sind zu untersuchen. Einfache „Kalibrierlampen“ müssen gefunden werden, die auf definierter Wellenlänge definierte Helligkeiten abstrahlen.

Der Spektralregler ist auf Plasmatemperaturen oberhalb von 5000 Kelvin eingestellt. Vergleichen wir die Temperaturen mit den Siedepunkten zu schweißender oder zu lötender Metalle, Tab.1, so wird bewusst, dass wir uns trotz Regler noch weit oberhalb des Bereiches möglicher Tropfenexplosionen bewegen.

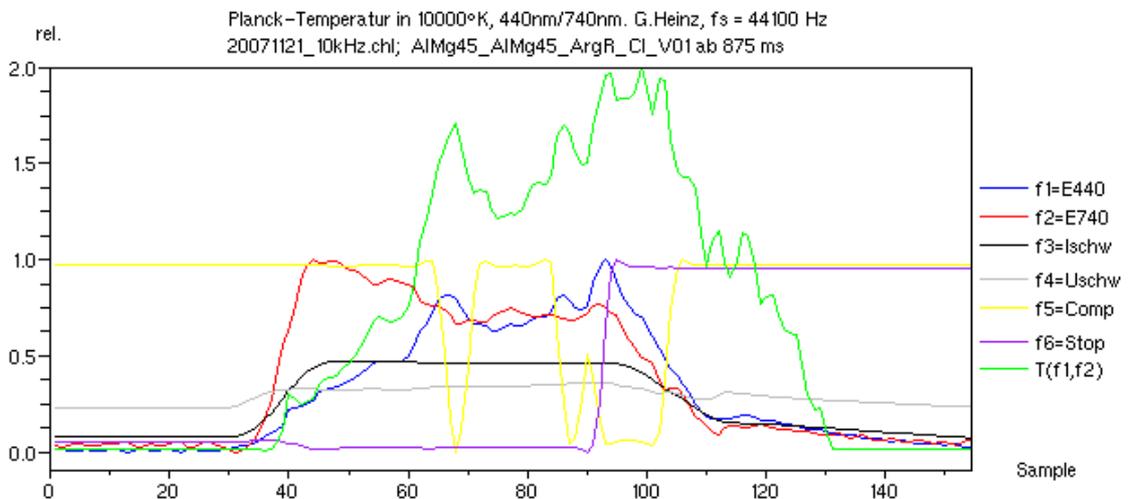


Abb.22: Temperaturregelung im reinen Puls-Betrieb. f_1 bis f_4 wie Abb.21, f_5 ist das interne Summensignal nach dem Komparator (Schaltbild siehe Anlage). Besteht f_5 für eine eingestellte Dauer, wird das Abschaltsignal f_6 ausgelöst. $T(f_1, f_2)$ ist die geschätzte Temperatur. © G.Heinz, GFal

Theoretisch sind bei ungünstiger Prozessführung trotz Regler Tropfenexplosionen möglich. Offenbar gilt es zu erkennen, dass mit dem Spektralregler nur die schlimmsten Übel völlig überhitzter Plasmen (des unregulierten Prozesses) gebannt sind.

Wenn man bedenkt, dass sich der Übergang von IR-Dominanz zu UV-Dominanz recht genau innerhalb von einer Millisekunde vollzieht, so bedeutet das, dass sich die Plasmatemperatur in dieser Zeit um einige Tausend Grad erhöht hat.

Der Tropfenübergang sollte deshalb auch mit Spektralregler nach Abschaltung des Pulses in der Grundstromphase erfolgen, um Tropfenexplosion zu vermeiden, Abb.21.

Erste Analysen mit der so geschätzten Plasmatemperatur zeigen eine Besonderheit auf: wir finden mit wachsender Pulsdauer teilweise sogar einen beschleunigten Temperaturanstieg. Für die Konstruktion von Pulsschweißmaschinen bedeutet dies, dass die Längentoleranz des Pulses erheblich die Endtemperatur des Plasmas beeinflusst.

4 Zusammenfassung

Im Projekt wurden einige Grundlagen für die Entwicklung eines Spektralreglers für Impulslichtbogen-Schweißmaschinen (MIG-ILS) untersucht.

Linienspektrometrische Ansätze führten nicht zum Erfolg. Zu hohe Rechenzeiten gestatten derzeit keine Echtzeit-Lösung im Bereich unterhalb von 100 μ s.

Experimentelle Ergebnisse von Breitbandverfahren mit Photodioden lassen eine Temperaturschätzung des Plasmas zu.

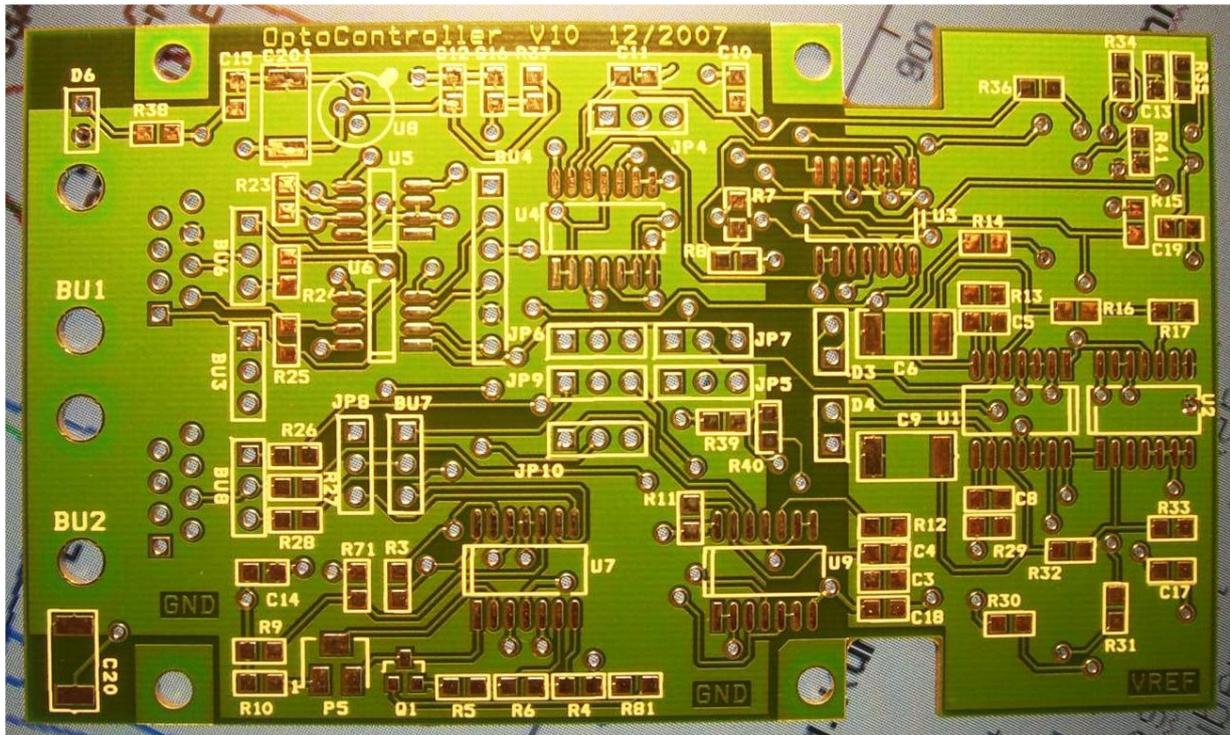


Abb.23: Nach Projektende gelang es noch, eine Leiterplatte des Controllers zu entwerfen (4-lagig, SMD). Mit Abmessungen von 57x98 mm verdeutlicht sie bereits Industrierelevanz. © G.Heinz, GFal

Mittels zweier, spektralsensitiver Photodioden wird das Licht des Plasmas spektral zerlegt. Die Zeitfunktion der Metallionen wird über eine blau/ultraviolett Photodiode (UV) bestimmt, die Zeitfunktion des Schutzgases Argon wird mit einer rot/infrarot Photodiode (IR) aufgenommen. Differenzbildung beider Kanäle liefert ein Abschaltsignal bei Erreichen einer voreingestellten Plasmatemperatur.

Ein Spektralregler wurde als Versuchsaufbau entwickelt. Er kann den Schweißstrom im Pulsbetrieb abschalten bzw. das Pulsen der Schweißmaschine im quasi-kontinuierlichen Mode vollständig steuern.

Mit dem Regler wird eine unerwartet stabile Prozessführung erreicht. Stromstärken von Pulsstrom und Grundstrom können bis zu 50% überhöht werden ohne Prozessabbruch oder Nahtschädigung.

Das Verfahren konnte bereits stichprobenartig erprobt werden. Es arbeitet mit relativ ähnlichen Parametern für verschiedene Materialkombinationen (Schweißen und Löten).

Der Spektralregler wird über ein Standardschnittstelle (RS485) an die Schweißmaschine angeschlossen und liefert i.a. nur ein einziges Signal (*Stop*). Er arbeitet in zwei Moden. Im *Pulsbetrieb* wird der Puls nur abgeschaltet. Eine Vorgabe der Pulsdauer kann entfallen. Im *Quasi-stationären Betrieb* gibt der Regler das Einschalten und Ausschalten der Schweißstromquelle komplett selbst vor. Damit zeigt das Verfahren ein hohes Potential für universelle Applikation bei Pulsschweißgeräten.

Das entwickelte Verfahren zeichnet sich durch größte Robustheit und Einfachheit aus. Variationen von Pulsstrom und Grundstrom sind relativ unkritisch.

Eine Realisierung des Spektralreglers ist mit relativ Materialkosten von etwa 100 € möglich. Integration der Elektronik in den Brennerkopf wird Ziel weiterer Arbeiten sein.

Weiterführende Untersuchungen zur Theorie, zum Verhalten bei verschiedenen Materialpaarungen und zur mechanischen Integration sind erforderlich.

5 Nutzen für die Wirtschaft, insbesondere für kmU

5.1 Markteinführung des entwickelten Spektralverfahrens

Insbesondere für Nichteisen-Metalle, wie z.B. AlMg und CuAl ist durch die Optimierung des Energieeintrages in der Aufschmelzphase eine Verbesserung der Prozessqualität zu erwarten.

Im Gegensatz zu Laserverfahren und Hybridprozessen bietet das im Projekt entwickelte spektral geregelte Impuls-Lichtbogenverfahren (S-ILB) für kmU. eine investitions- und betriebskostengünstige Alternative. Es ist fehlertoleranter gegenüber Bauteiltoleranzen und Materialparametern als vergleichbare Verfahren. Durch die Nachregelung des Aufschmelz- Energieeintrags wird dieser Vorteil erweitert.

Mit dem Projektergebnis wird die Wettbewerbsfähigkeit des Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) gegenüber anderen Fügeprozessen zunehmen.

Die Kosten der gefundenen und umgesetzten Lösung liegen mit 100 € weitaus niedriger, als im Projektantrag vorgegeben. In Massenfertigung dürften sie auf 20 € pro Regler zu vermindern sein.

Rechnet man Entwicklungskostenabschreibungen insbesondere für notwendige Modifikationen am Brennerkopf hinzu, entstünde bei 10.000 verkauften Einheiten etwa ein Selbstkostenaufwand von 100 €. Damit könnte ein Verkaufspreis im Bereich zwischen 200 und 500 € pro Spektralregler möglich sein.

Es ist zu erkennen, dass die Prozessstabilität von Schweißprozessen mit dem Regler erhöht werden kann. Mit einer zügigen Markteinführung ist deshalb zu rechnen.

Bei 800 Mio. Jahresumsatz der europäischen Schweißgerätehersteller (2002) wird mit etwa 2 Mio. Jahresumsatz bei Spektralreglern gerechnet (ca. 4000 Geräte).

Denkbar ist, dass der Exportanteil der deutschen Schweißgeräteindustrie damit ansteigt. Optimistische Erwartungen gehen von einer möglichen Verdreifachung des deutschen Marktanteils aus.

Eine besondere Bedeutung wird das Verfahren für anwendende kmU haben. Hier ist mit Qualitätsverbesserungen vorrangig im Dünnschleif- und Lötbereich zu rechnen.

Einsparungen in der Vielzahl einzusetzender Fügetechniken sind denkbar, daraus wird Kostenersparnis und bessere Prozessbeherrschung resultieren.

Besondere Bedeutung kann das quasikontinuierliche Verfahren dort erlangen, wo hohe Schweißgeschwindigkeiten bei sinkenden Blechdicken gefordert sind (z.B. im Karosserie- und Auspuffbau).

5.2 Perspektivische Bedeutung für den Leichtbau

Seit vielen Jahren versucht man, stabile Verfahren für das Schweißen dünner Bleche zu entwickeln. Solche Verfahren sind als Fügetechnologien für den Leichtbau hochinteressant.

So kam man zum Beispiel 1999 im Projekt DFG/Do202/26-3 beim Schweißen von Blechen mit 0,2 mm Dicke zur Erkenntnis:

„Da in der für dieses Vorhaben aufgebauten Laborenergiequelle die Parameter aller Phasen lediglich starr definierbar waren, war die Verwendung selbst im Laborbetrieb nur unter großem Justageaufwand möglich. Insbesondere wurde während eines Machbarkeitsnachweises deutlich, dass äußere Störungen wie Spalt- und Abstandsänderungen, häufig zum Unterbrechen des Prozesses führen. Als Ursache wurde hierbei der unterschiedliche notwendige Energieeintrag identifiziert. Ein starr geführter Prozess kann auf diese Störungen nicht optimal reagieren.“

Diese starre Prozeßführung wird mit dem Spektralregler erstmals überwunden. Puls für Puls wird nun die Energie portioniert. Für eine Weiterentwicklung von Dünnschleif-Verfahren hat das hier erreichte Projektergebnis somit Schlüsselcharakter: Vielleicht können damit auch die Weichen gestellt werden für zukünftige, neue Technologien, um Bleche im Bereich unter 0,5 mm mit konstanter Qualität schweißen zu können.

6 Danksagung

Vielen Dank an die Firmen Rehm und Cloos, die in erheblichem Umfang Schweißausrüstungen für Experimente (TU und INP) zur Verfügung stellten. Industriepartner Carl Cloos entwickelte eine Steuerschnittstelle für die Experimente an einer Quinto GLC403. Vielen Dank dafür insbesondere an deren Entwicklungsleiter, Herrn Warmbier, der weder Kosten noch Mühe scheute, uns maximal zu unterstützen

Besonderer Dank geht an die Projektmitarbeiter der TU (Frank Hofmann und Prof. Lutz Dorn) sowie des INP (Dr. Heinz Schöpp und Gregor Gött) für die äußerst disziplinierte Zusammenarbeit.

Nicht zuletzt trugen die Mitarbeiter der GFal, Dr. Dirk Holm und Frank Hoffmann wesentlich zur Ideenfindung und Projektausrichtung in der sehr komplizierten Startphase bei. Auch Ihnen gilt mein größter Dank.

7 Veröffentlichungen/Arbeitsberichte der GFal

Veröffentlichungen in der Fachpresse werden in Kürze folgen. Geplant ist ein Patent sowie folgend ein Beitrag für Schweißen und Schneiden in der deutschen und in der englischen Ausgabe. Ein Beitrag für IEEE Journal of Applied Physics ist in Vorbereitung.

Vertraulichkeit: Da sich Erstveröffentlichungen und ein Patent zum Spektralregler in Arbeit befinden, bitten wir von einer Weitergabe des GFal- Teils des Abschlußberichts oder von Teilen daraus bis zum 1. Juli 2008 abzusehen. Danach sind Bilder und Texte des GFal-Teils gemeinfrei, sofern deren Urheber vermerkt ist.

- [1] Heinz, G.: 'Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralselektiver Sensorik. Vortrag zum vierten Treffen des PbA, Abschlußveranstaltung. GFal-Bericht v. 2007-11-30. PPT, 50 S.
- [2] Heinz, G.: *Technische Beschreibung 2-Kanal Spektralregler*. GFal-Bericht 2007-11-30, PPT, 14 S. Vortrag zum vierten Treffen des PbA, Abschlussveranstaltung. GFal-Bericht v. 2007-11-30. PPT, 50 S.
- [3] Heinz, G.: *Technische Beschreibung 6-Kanal Spektrometer*. GFal-Bericht 2007-11-02, PPT, 7 S. Vortrag zum vierten Treffen des PbA, Abschlussveranstaltung. GFal-Bericht 2007-11-30. PPT, 50 S.
- [4] Heinz, G.: Projekt-Zwischenbericht 'Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralselektiver Sensorik (Gepulste Lichtbogenfügeprozesse) (2/2006 - 12/2007) AiF 14607 BG, Teil GFal, 6 S., siehe http://www.gfai.de/~heinz/publications/projects/2006_Optispek_Part_GFal.pdf
- [5] Heinz, G.: Auszug aus dem GFal- Jahresbericht 2006, Bereich Interferenzsysteme. S.18-19 http://www.gfai.de/~heinz/publications/annual/06_Intsys.pdf
- [6] Heinz, G.: Optimierung des Energieeintrages gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralselektiver Sensorik – Stand der Arbeiten. Vortrag vor dem Fachausschuß Fügetechnik der GFal, 19.10.2007, PPT, 23 S.
- [7] Heinz, G.: Dynamische Untersuchung von Pulslichtbogen mit 6-Kanal Spektrometer. GFal-Bericht 2007-01-17, PPT, 55 S., Vortrag zur dritten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 9.3.2007
- [8] Heinz, G.: Zur Selektivität breitbandiger Photodioden, Vortrag zur dritten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 9.3.2007. GFal- Bericht 2007-02-09, PPT, 20 S.,
- [9] Heinz, G.: Protokoll der dritten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (Protokoll_PbA_2007_03_09_.pdf) vom 9.3.2007, 3 S.
- [10] Heinz, G.: Gepulste Lichtbogenfügeprozesse. Stand der Arbeiten. Vortrag zur zweiten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 6.11.2006, PPT, 34 S. (OptiSpecs5.ppt)
- [11] Holm, Dirk (GFal): Gepulste Lichtbogenfügeprozesse. Stand der Echtzeit-Prozessregelung. Vortrag zur zweiten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 6.11.2006, PPT, 10 S.
- [12] Heinz, G.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralselektiver Sensorik. Arbeitsstand der GFal. Bericht der Forschungsstellen. Vortrag vor dem Fachausschuß Fügetechnik der GFal am 20.10.2006, PPT, 13 S. (VortragHeinz20061020.ppt)
- [13] Heinz, G.: Zwischenstand Spektrometermodul. GFal-Bericht 2006-08-28, PPT, 7 S., vorgetragen zum dritten Projekttreffen am 28.8.2006

- [14] Hoffmann, Frank (GFal): Ergebnisse aus dem Projekt Adamus-Choparc. Vortrag zum ersten Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses am 10.5.2006, 17 S., PPT (GFal_Hoffmann.pdf)
- [15] Protokoll der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses am 10.5.2006 (Protokoll_ersteSitzung_PbA.pdf)
- [16] Heinz, G., Schöpp, H.: Protokoll zum ersten Projekttreffen am 4.12.2006 (Protokoll_2006_04_12.pdf)

Veröffentlichungen sind abrufbar bei Dr. Gerd Heinz, GFal, Rudower Chaussee 30, 12489 Berlin; Tel. +49-030-6392-1652; www.gfai.de/~heinz.

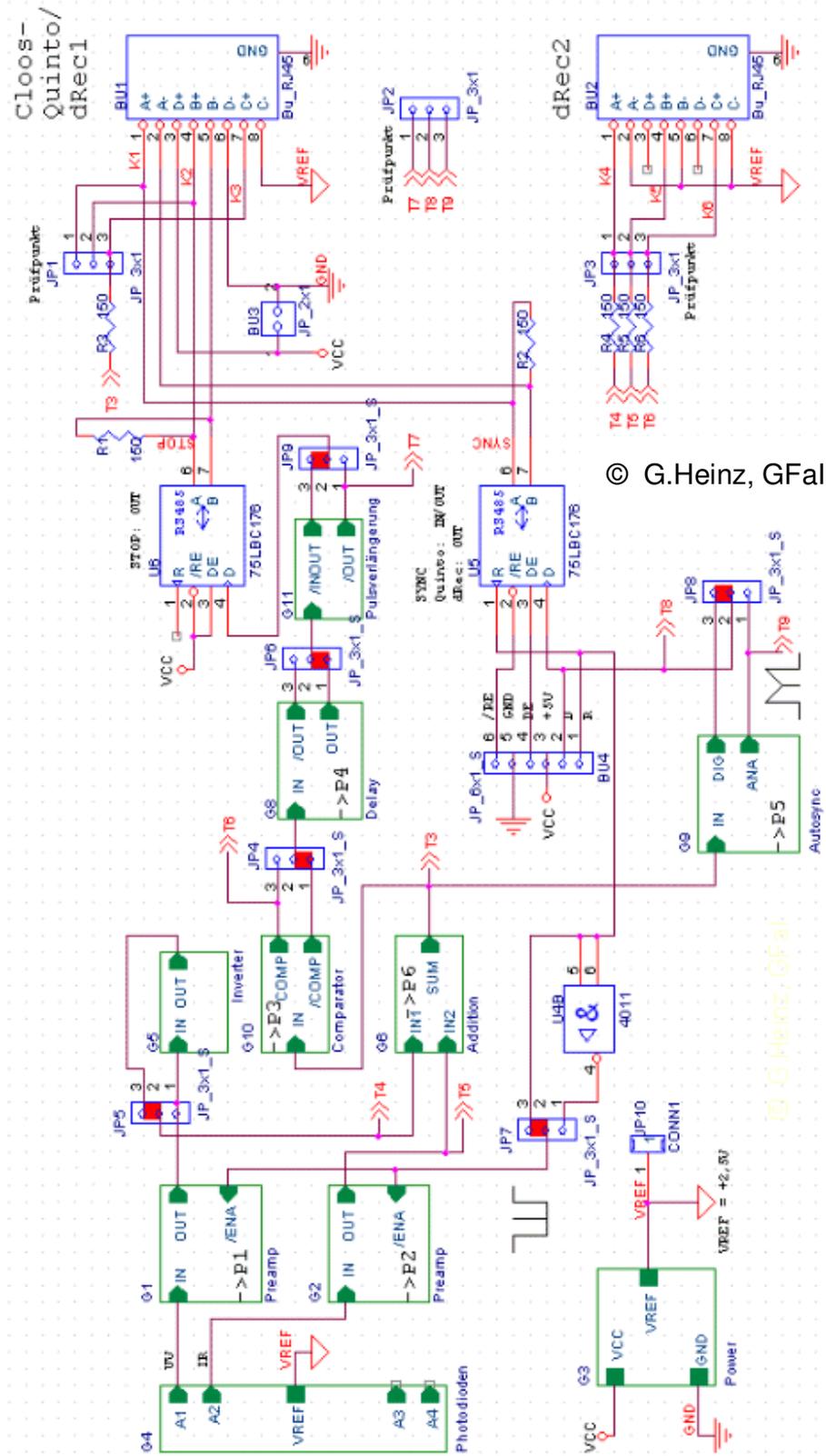
8 Spezielle Referenzen

- [17] 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
- [18] 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
- [19] Murphy, A. B.: Modified Fowler-Milne Method for the Spectroscopic Measurement of Temperature and Composition of Multielement Thermal Plasmas. Rev. Sci. Instrum., 65(11), Nov.1994, pp. 3423-3427
- [20] Bott, J. F.: Spectroscopic Measurement of Temperatures in an Argon Plasma Arc. Phys. of Fluids, 9(8), 1966, pp. 1540-1547.
- [21] Haddad, G. N. and Farmer, A. J. D.: Temperature Determinations in a Free-burning Arc: I. Experimental Techniques and Results in Argon. J. Phys. D: Appl. Phys., 17, 1984, pp.1189-1196.
- [22] Haddad, G. N. and Farmer, A. J. D.: Temperature Measurements in Gas Tungsten Arcs. Weld. J., Dec. 1985, pp. 339s-342s.
- [23] 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
- [24] Thornton, M. F.: Spectroscopic Determination of Temperature Distributions for a TIG Arc. Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK, 1993, 118 p.
- [25] Vilarinho, L. O., Scotti, A., Dantas, N. O.: Enhancement of an Optics Emission Spectroscopic Technique to Measure Welding Arc Temperature. Science & Engineering Journal, UFU, 11(1), Jan./Jun. 2002, pp. 67-74
- [26] Vilarinho, L.O., Scotti, A.: Proposal for a Modified Fowler-Milne Method to Determine the Temperature Profile in TIG Welding at Low Currents. Journ. of Brazilian Soc. of Mech. Sci. & Eng., January-March 2004, Vol.26, No. 1, pp.34-39

Dr. Gerd Heinz, heinz@gfai.de

Berlin, im Januar 2008.

Anlage: Blockschaltung Spektralregler



© G.Heinz, GFal

© G.Heinz, GFal

INP Greifswald (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

Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2006 bis 31.12.2007

Berichtszeitraum: 01.02.2006 bis 31.12.2007

Zuwendungsempfänger: GFal e.V.

Forschungsstelle 2 von 3:
1 GFal Berlin, 2 INP Greifswald, 3 TU-Berlin IWF

Anschrift der Forschungsstelle

INP-Greifswald
Felix-Hausdorff-Str. 2
17489 Greifswald

Greifswald, den 21.12.2007

Ort, Datum

Unterschrift Projektleiter

Inhalt

1. Stand des Vorhabens im Vergleich zur Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung (bezogen auf die Forschungsstelle)	46
2. Arbeitspakete des INP Greifswald, folgende Ergebnisse wurden erreicht:	46
AP1 Aufnahmen von Übersichtsspektren.....	46
AP2 Auswahl geeigneter Wellenlängen zur Ermittlung des Strahlungsverhaltens.	48
AP3 Strahlungsverhalten in der Hochstromphase	49
AP4 Bereitstellung der Ergebnisse	51
AP5 Berechnung der Strahldichte, des Emissionskoeffizienten und Temperaturbestimmung	51
AP6 Spektroskopie am spektralselektiv geregelten Schweißprozess	53
3. Zusammenfassung	54

1. Stand des Vorhabens im Vergleich zur Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung (bezogen auf die Forschungsstelle)

Das Projekt wurde gemäß dem Bewilligungszeitraum vom 01.02.2006 bis 31.12.2007 durchgeführt. Für die Projektbearbeitung wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt. In dieser Zeit wurden die geplanten Arbeitspakete AP1 bis AP6 bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen.

Ein Messaufbau wurde neu konzipiert und so vorgenommen, dass sich simultan sowohl Hochgeschwindigkeitskamera (HGK) -Aufnahmen sowie durch optische Abbildung auf einen Spektrografenspalt radiale Schnitte durch die Bogenachse zur Aufnahme von Spektren als auch elektrische Strom- und Spannungsverläufe aufzeichnen lassen. Ein Foto demonstriert die Gesamtansicht (Abb. 1). Die spektroskopischen Aufgaben zur Linienidentifizierung und Eingrenzung von Spektralbereichen führten im Verbund zur Auswahl geeigneter Prozesse sowie geeigneter spektralselektiver und Ansteuerungs-Lösungen, um erfolgreich in den Regelkreis der Schweißmaschine eingreifen zu können.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

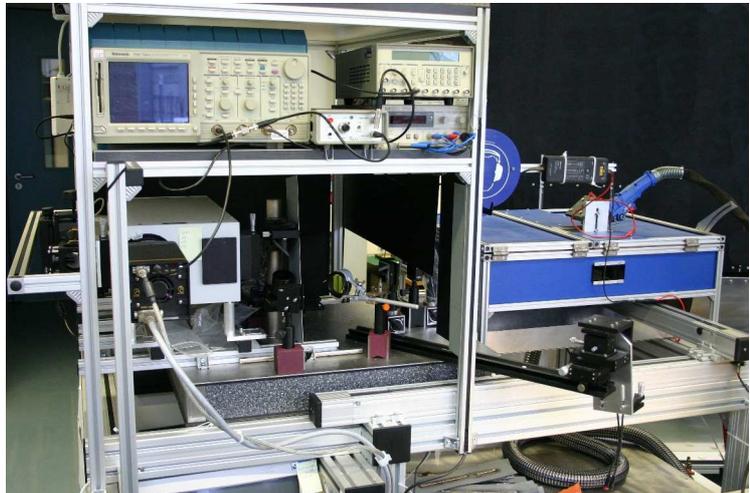


Abb. 1: Versuchsaufbau

2. Arbeitspakete des INP Greifswald, folgende Ergebnisse wurden erreicht:

AP1 Aufnahmen von Übersichtsspektren

In einem ersten Schritt wurden Übersichtsspektren für die Materialkombinationen CuAlBz (Löten) und AlMg4,5Mn0,7 (Schweißen) in einem gepulsten Prozess aufgenommen. Zur Messung wurde ein optischer Messplatz (Abbildung 1), der aus einem Spektrometer, auf dessen Spalt der Lichtbogen über einen sphärischen Spiegel 1:1 abgebildet wird, mit angeschlossener ICCD (Intensified Charge-coupled Device), verwendet. Durch diese 1:1-Abbildung wird das Licht aus einer horizontalen Schnittebene aus dem Lichtbogen aufgenommen. Dadurch ist es möglich, radiale Schnitte durch den Lichtbogen zu legen, in denen die spektrale Verteilung bestimmt werden kann. Diese Schnittebenen ließen sich parallel zum Werkstück in der Höhe variieren, so dass auch spektrale Veränderungen zwischen Elektrode und Werkstück messbar wurden.

Die Werkstoffkombinationen wurden in Abstimmung mit der TU und GFal für den Impulslichtbogen gewählt, da nur bei definierten Stromimpulsverläufen die Zuordnung zu den Spektren und HGK-Aufnahmen zu verwertbaren Ergebnissen führen.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen Übersichtsspektren für zwei Materialkombinationen. Sowohl für die Kombination AlCuBz auf verzinktem Stahl (Lötprozess) zum Zeitpunkt 1,3 ms nach dem Stromanstieg ($U=18,7$ V, $I_p=260$ A, $t_p=1,75$ ms) als auch für die Kombination AlMg4,5Mn0,7 auf Aluminiumblech (Schweißprozess) zum Zeitpunkt 0,6 ms nach Auslösen des Triggers ($U=15,3$ V, $I_p=280$ A, $t_p=1,45$ ms) ist eine gewisse Teilung der Metall- und Ar-Linien in den Spektralbereichen erkennbar.

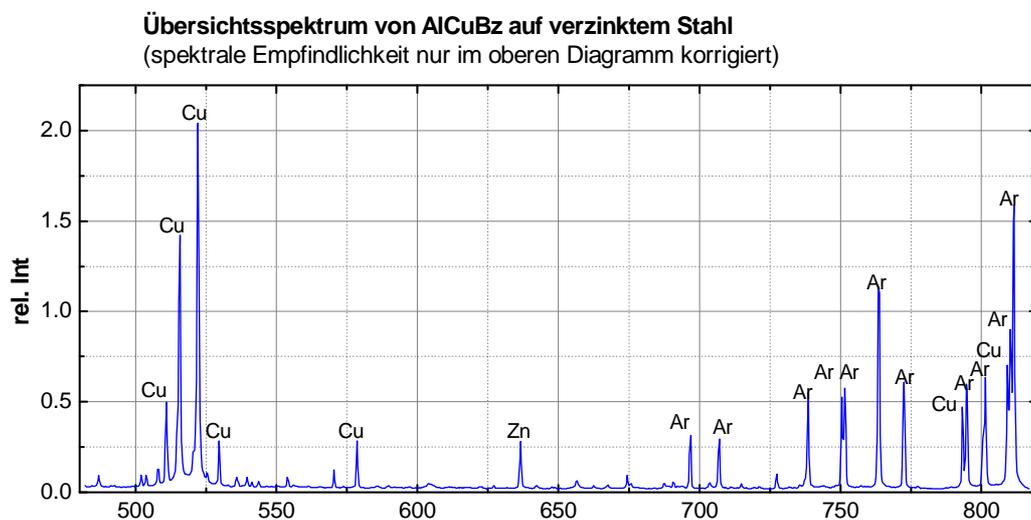


Abb. 2: Übersichtsspektrum AlCuBz 1.3ms nach Stromanstieg (Löten)

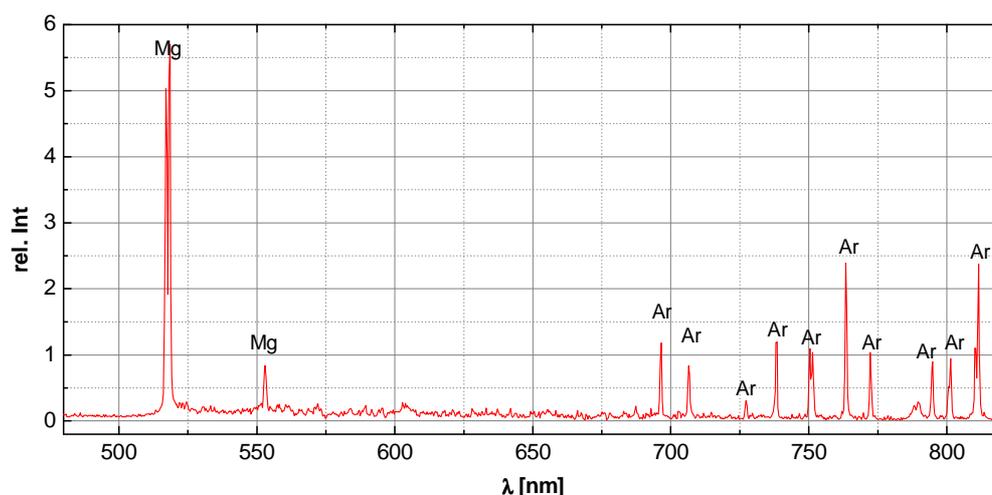


Abb. 3: Übersichtsspektrum AlMgMn 0.6ms nach Stromanstieg (Schweißen)

AP2 Auswahl geeigneter Wellenlängen zur Ermittlung des Strahlungsverhaltens

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Auswahl geeigneter Einzellinien oder Spektralbereiche (Wellenlängenintervalle) aus den Übersichtsspektren für eine nachfolgende höher auflösende Spektroskopie zur Ermittlung des Strahlungsverhaltens während der Hochstromphase.

Bei der Auswertung hat sich herausgestellt, dass die spektralen Bereiche von 500 - 600nm für Metalle und 675 – 825nm für Argon einer Zuordnung sinnvoll und geeignet sind, da diese mit dem verwendeten 150er Gitter (150 Striche/mm) in einer Aufnahme messbar sind. Hierbei zeigte sich, dass zumindest für den AlMg_{4,5}Mn_{0,7}-Schweißprozess weitere Metalllinien im Spektralbereich vom blauen bis zum UV-Bereich (blau ~400 – 480 nm, UV unterhalb von ~400 nm siehe Abb. 4) zu finden waren, die eine bessere Signalstärke für eine Diodenlösung versprechen. Eine Diodenlösung hat gegenüber einer Spektrometerlösung zur Signalauswertung den Vorteil, dass Dioden wesentlich schneller ausgelesen werden können und somit zeitlich schneller in den Prozess eingegriffen werden kann. Nachteilig wirkt sich bei einer Diodenlösung aus, dass ein größerer Spektralbereich zur Signalbildung führt, weshalb eine genauere Prüfung der Spektren notwendig ist, um eine Überlagerung und damit verbundenen Signalverfälschung von Metall- und Schutzgas-Linien sicher zu trennen. Beim Schweißen von verzinktem Stahl spielen die vielen Metalllinien keine größere Rolle, da dort kein negativer Einfluss festgestellt werden konnte. Insbesondere vor dem Hintergrund einer elektronisch realisierbaren Regelung ist einerseits ein möglichst großer Spektralbereich auszuwählen, andererseits darf in diesem Spektralbereich keine störende Überlappung der Plasmainformationen der Ar- bzw. Metall-Atome zu Fehleinschätzungen führen. Hier sind große Anstrengungen in Zusammenarbeit mit der GFal unternommen worden, um passende Dioden auszuwählen, so dass ein sinnvoller Lösungsansatz entstand.

Übersichtsspektrum von AlMgMn auf Aluminiumblech (spektrale Empfindlichkeit korrigiert)

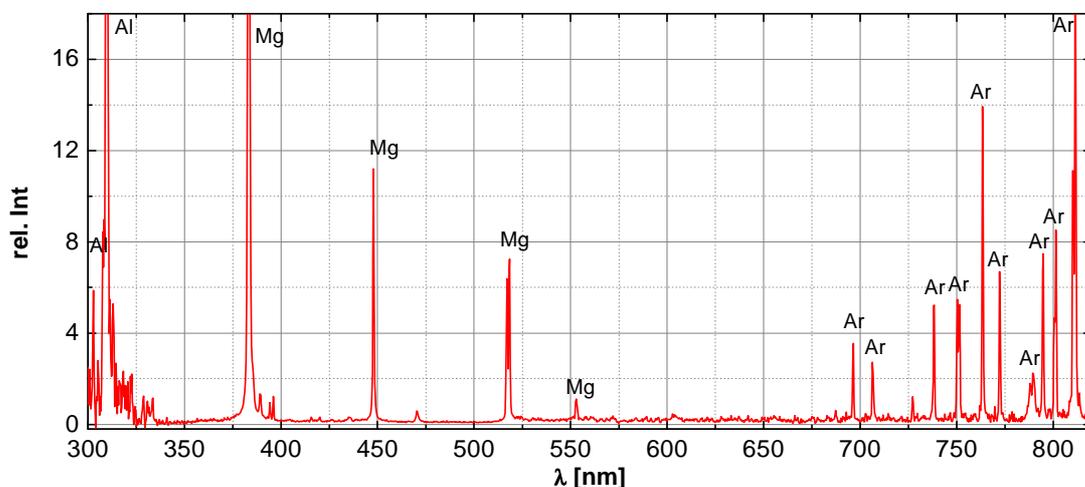


Abb. 4: Übersichtsspektrum inkl. blauem - und UV-Bereich (Schweißen)

AP3 Strahlungsverhalten in der Hochstromphase

Übersichtsspektren zu bestimmten Zeitpunkten in der Hochstromphase sind in Abbildung 2 und 3 für die beiden Prozesse gezeigt. Die spektrale Auflösung beträgt 0,34 nm/Pixel für ein 150/mm Gitter. Die spektrale Empfindlichkeit des Systems wurde mit einer Wolfram-Bandlampe (WBL) korrigiert, die über einen schwenkbaren Spiegel in gleicher Entfernung wie der Lichtbogen 1:1 auf den Spektrometerspalt abgebildet wurde.

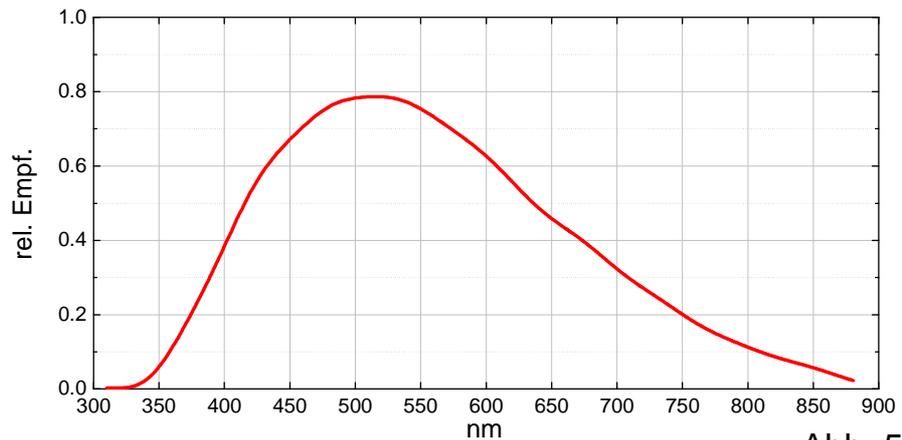


Abb. 5

Zur Bestimmung der tatsächlich emittierten Strahlung aus dem Lichtbogen, muss die Messempfindlichkeit des gesamten Systems bestimmt werden. Die Empfindlichkeitskurve dazu ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die Wellenlängenüberprüfung wurde mit einem Ar- bzw. Hg-Penray vorgenommen. Auf diese Art können die gemessenen Spektren den im Lichtbogen vorhandenen Elementen zugeordnet werden. Daraus ergibt sich, dass für die betrachteten Elemente im Spektralbereich unterhalb von 550 nm vorwiegend Metalllinien sichtbar sind, während im Spektralbereich oberhalb 690 nm vorwiegend Argonlinien beobachtet werden.

Zur Auswertung wurden Strahlstärkewerte herangezogen, die durch Integration zunächst über nur zwei Spektrallinien bestimmt wurden. Damit wurde eine Störung durch andere Elemente ausgeschlossen. Die gewählten beiden Linien liegen relativ nah beieinander, wodurch sie in einer hochauflösenden spektralen Aufnahme gut miteinander verglichen werden können. Dabei handelt es sich beim CuAlBz-Lötprozess um die Cu-Linie bei 793,3 nm und die Ar-Linie bei 794,8 nm.

Durch eine zeitliche Zuordnung zu diesen Integralwerten kann man erkennen, dass die Intensität der Argonlinien im Impulsstromverlauf abnimmt, während die Metalllinien an Intensität zunehmen.

Für die beiden Prozesse AlMg_{4,5}Mn_{0,7} auf Aluminium und AlCuBz auf verzinktem Stahl liegen auch die zeitlichen Abhängigkeiten der spektral- und ortsintegrierten Intensitäten (Strahlstärken der Linienintegrale) vor. Diese sind als Kurvenverläufe in Abbildung 6a und 6b im Vergleich mit dem Stromimpuls dargestellt. Integriert wurde hier jeweils über die Kupfer- bzw. Magnesium-Linien von 500 – 600nm und für die Argon-Linien 675 – 825nm.

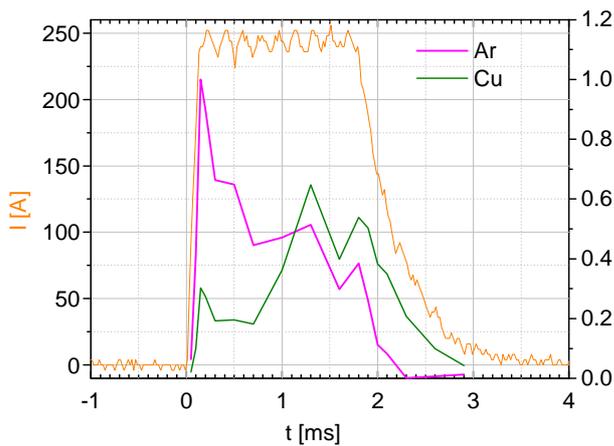


Abb. 6a: Strahlstärken der Cu- und Ar-Linienintegrale in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Impulsstromes

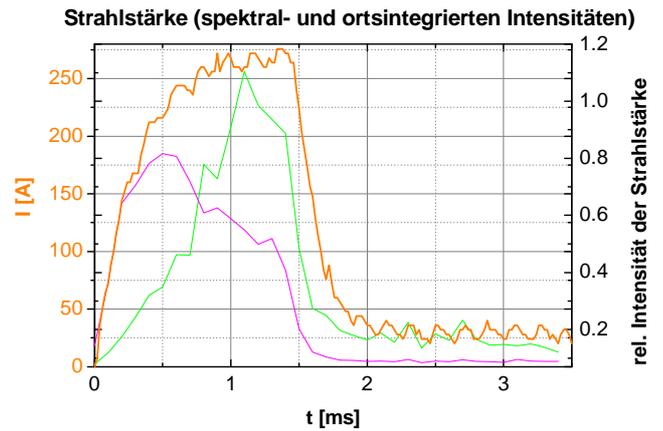


Abb. 6b: Strahlstärken der Mg- und Ar-Linienintegrale in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Impulsstromes

In Abbildung 6a zeigt der Strahlstärkeverlauf der Kupferlinie bei 1,6 ms einen Einbruch, der möglicherweise auf Abschattungen im Bogenkern durch den abschmelzenden Draht hervorgerufen wird. Der Einfluss ist dort größer als im umgebenden Schutzgas. Dies gibt einen Hinweis für mögliche Fehlerquellen bei einer abbildenden Messung. Die Entwicklung der Intensitäten wurde durch den Vergleich mit HGK-Aufnahmen zur Tropfenablösung in Beziehung gesetzt.

Eine Kombination von wellenlängenmäßig hochauflösender Spektroskopie und HGK-Aufnahmen zur Ermittlung des Strahlungsverhaltens ausgesuchter Spektrallinien und des Zusammenhangs mit den Vorgängen im Schweißlichtbogenplasma war Ziel dieses Arbeitspaketes.

Beobachtet man den Lichtbogen mittels HGK unter Benutzung von Metallinterferenzfiltern (das sind schmalbandige Paßfilter), kann man sowohl die räumliche Zuordnung zur spektralen Verteilung visualisieren (Abb. 7 und 8), als auch die zeitliche Entwicklung durch die Bildfolge sichtbar machen. Für die Kupferlinien wurde ein Interferenzfilter mit einer Durchlässigkeit bei 575 nm (unterstes Bild in Abb 8 - grün) gewählt und für die Argonlinien eines bei 750 nm (oberes Bild in Abb 8 - rot). In Abbildung 7 ist der Lichtbogen ohne Filter aufgenommen dargestellt.

In den drei synchronen Bildern der Abbildungen 7 und 8 erkennt man die Herausbildung von einem Metaldampfkern (unteres Bild in Abb 8 - grün) und einer umhüllenden Argonglocke (oberes Bild in Abb 8 - rot). Die Abdunkelung im Zentrum dieser Argonglocke im oberen Bild von Abbildung 8 ist auf die geringere Temperatur bzw. Absorption durch den Metaldampf zurückzuführen und nur aufgrund des 750 nm-



Abb. 7

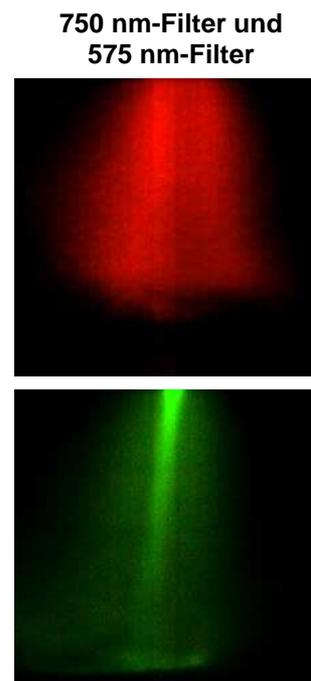


Abb. 8

Filters zu erkennen. Mit der Information aus den beiden spektralselektiven Aufnahmen kann man in Abbildung 7 schlussfolgern, wie sich der hellere Metalldampfkern herausbildet. Ohne die vorherige Betrachtung wäre dies nicht ohne weiteres möglich. Analog wurde mit dem AlMgMn-Schweißprozess vorgegangen, der eine sehr ähnliche Charakteristik für die Ar- und die Mg-Linien zeigte.

Die Steigerung der Metalldampfkonzentration, durch die eine erhöhte Emission im Wellenlängenintervall von 480 – 550 nm beobachtbar ist, rührt von der Erhitzung des abschmelzenden Schweißdrahtes durch das umgebende heißere Ar-Schutzgas her.

AP4 Bereitstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit unter den Partnern, sowohl operativ telephonisch, als auch auf Projekttreffen ausgetauscht, so dass eine Auslegung der Sensorik und deren Testung im Schweißbetrieb möglich war. Dazu fanden sechs Projekttreffen statt, davon drei unter Beteiligung des projektbegleitenden Ausschusses (am 10.05.2006, 06.11.2006 und 30.11.2007).

AP5 Berechnung der Strahldichte, des Emissionskoeffizienten und Temperaturbestimmung

Die Temperatur einer Spezies im Lichtbogen kann unter bestimmten Voraussetzungen über die Kuppenstrahldichte ihrer Linien bestimmt werden. Dazu hat Bartels ein Verfahren [1-5] unter folgenden Voraussetzungen entwickelt :

- optisch dicke Linie (keine Resonanzlinie)
- Rotationssymmetrie
- Lokales thermodynamisches Gleichgewicht

Man muss hierfür das Maximum der Umkehrkuppe der selbstumgekehrten Linie bestimmen. Über die Gleichung :

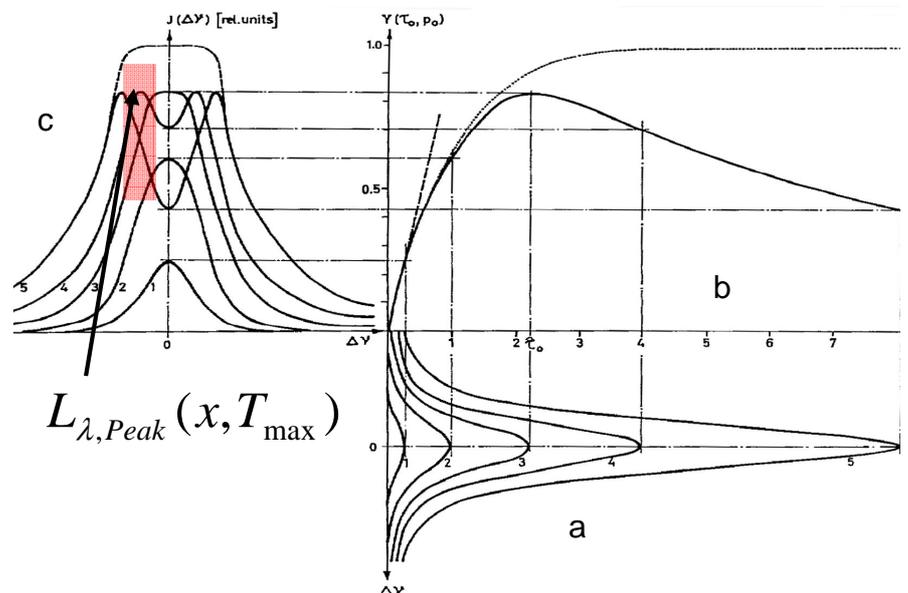


Abb. 9: a) optisch dünne Linie, b) beschreibt den Strahlungstransport, c) optisch dicke Linie [6]

$$T_{\max} \approx \frac{hc}{\lambda k_B T} \frac{1}{\ln \left[1 + \frac{2hc^2}{\lambda^5} \sqrt{\frac{E_i}{E_k}} (0,736 + 0,264 p^{*2}) \frac{1}{L_{\lambda,P}} \right]}$$

kann dann die maximale Temperatur auf dem Sehstrahl durch den Lichtbogen bestimmt werden. In diese Gleichung gehen Naturkonstanten (c = Lichtgeschwindigkeit, h = Plancksches Wirkungsquantum, k_B = Boltzmann-Konstante) und atomare Größen (E_i bzw. E_k = Anregungsenergie des oberen bzw. unteren Niveaus, λ = Wellenlänge) sowie Profil-Funktionen (ρ^* und $L_{\lambda,P}$ siehe Abb. 9b) ein. Letztere beschreiben den Zusammenhang zum Strahlungstransport, der die Energieverteilung im Lichtbogen beeinflusst.

In Abbildung 9a ist schematisch dargestellt, wie man sich die an einem bestimmten Ort im Lichtbogen emittierte Linie als Nettoemission vorstellen kann. In 9b wird der Strahlungstransport über den Parameter der optischen Tiefe beschrieben. Dieser beschreibt, wie die Strahlung vom jeweiligen Entstehungsort nach außen transportiert wird. Das Linienprofil, das im Spektrographen gemessen wird, ist in Abbildung 9c verdeutlicht. Aus diesem Bild ist die Herausbildung der Umkehrkuppen schematisch erkennbar.

Für die exakte Messung der Kuppenstrahldichte, was die Voraussetzung für korrekte Temperaturangaben ist, benötigt man allerdings einen Spektrographen mit sehr hoher spektraler Auflösung. Wird die Kuppenstrahldichte nicht korrekt bestimmt führt das zu starken Abweichungen in der Temperaturberechnung.

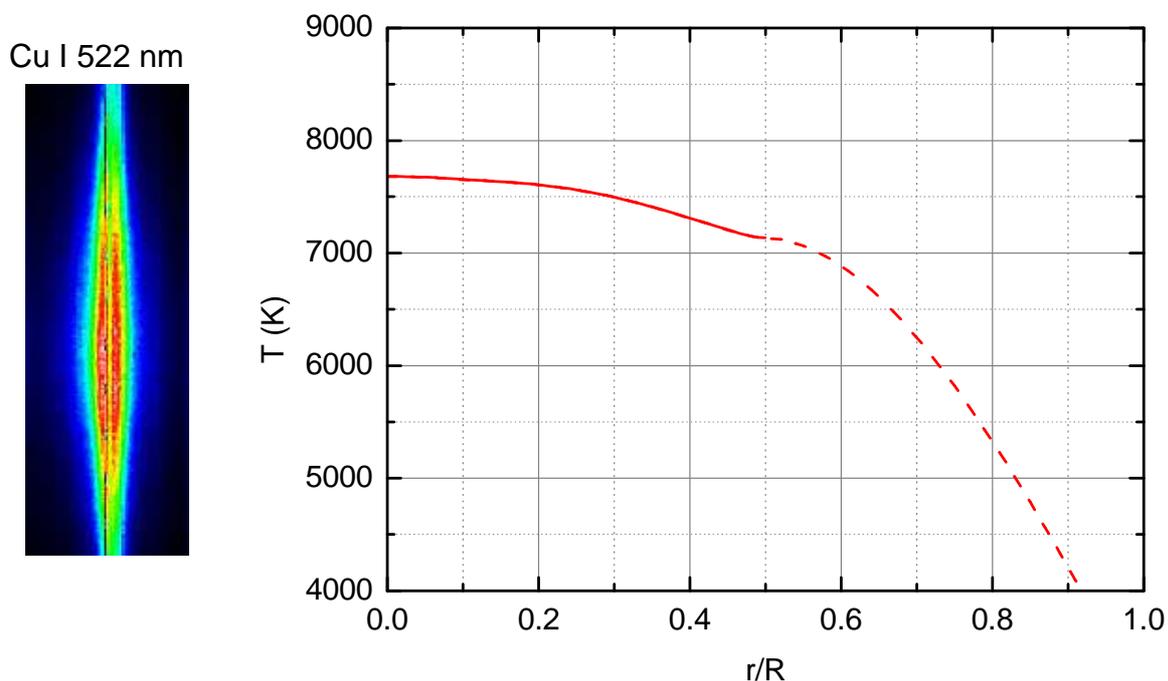


Abb. 10: Spektralaufnahme (Image) während eines Stromimpulses (links) und daraus ein berechnetes Temperaturprofil für den Lötprozess (rechts)

Neben den soeben grob beschriebenen physikalischen Schwierigkeiten ist der Schweiß- aber auch der Löt-Prozess ein häufig unregelmäßiger Prozess. Dadurch ergeben sich für aufeinander folgende Stromimpulse im Lichtbogen unterschiedliche radiale Intensitätsverteilungen. Diese radialen Intensitätsverteilungen haben wiederum Einfluss auf die optische Tiefe der Strahlung und somit auf die Ausbildung

der Umkehrkuppen. Deshalb war der Prozess zu dem hier die Berechnungen durchgeführt wurden noch nicht ausreichend stabil. Ein einfaches Übernehmen der Schweißparameter lieferte trotz gleicher Maschinen nicht das gleiche Ergebnis. Hier ist weitere Arbeit sowohl zur Prozessstabilität als auch spektroskopisch notwendig, um zuverlässigere Temperaturangaben zu bekommen. Einen ersten Eindruck vermitteln die Abb. 10 und 11 über Temperaturverläufe beim Löten und Schweißen.

Dort wurde über die radiale Kuppenstrahlstärkeverteilung ein Temperaturprofil erstellt. In den Diagrammen der beiden Abbildungen 10 und 11 ist die Temperatur in Kelvin über den Radius r im Verhältnis zum Gesamtradius R . Der Gesamtradius betrug etwa 3 mm, so dass sich das Diagramm auf diesen Wert bezieht.

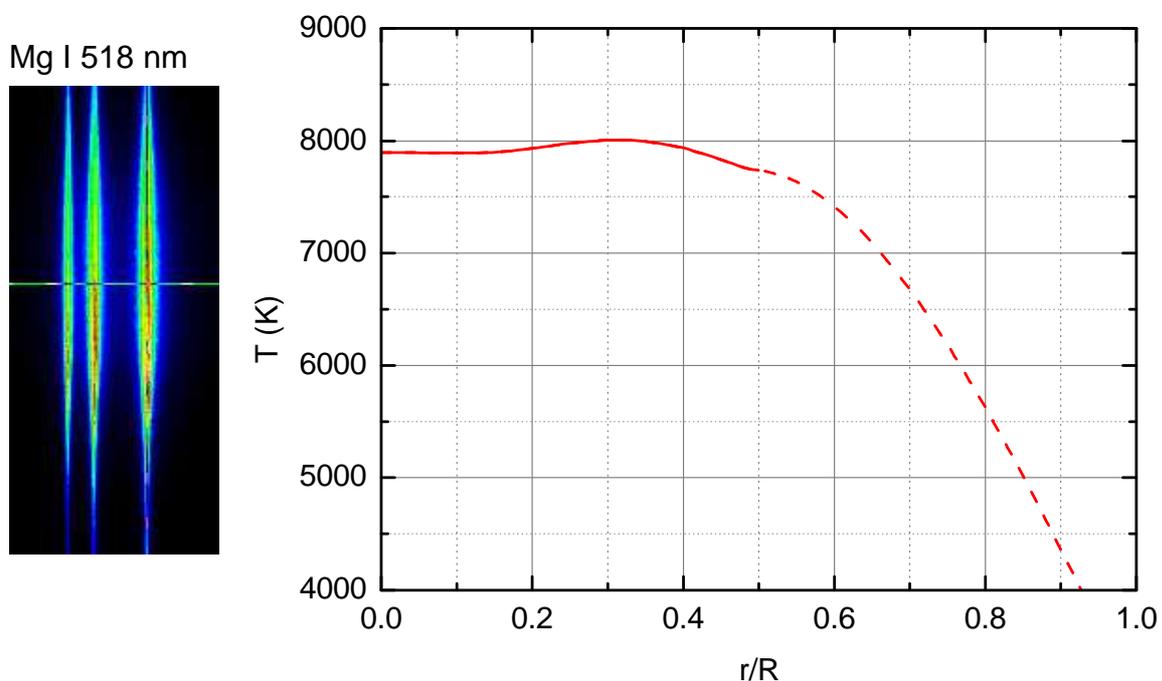


Abb. 11: Spektralaufnahme (Image) während eines Stromimpulses (links) und daraus ein berechnetes Temperaturprofil für den Schweißprozess (rechts)

Die Unregelmäßigkeit des Temperaturprofils in Abbildung 11 (maximale Temperatur nicht bei $r/R = 0$) ist auf die nicht vorhandene Zylindersymmetrie zurückzuführen. Das führt zu einem verfälschten Profil, was ebenfalls auf einen unregelmäßigen Prozess hinweist.

AP6 Spektroskopie am spektralselektiv geregelten Schweißprozess

Die Verbindung der spektralen Regelung mit der Schweißmaschinensteuerung, erwies sich an der TU-Berlin als problematisch und sehr aufwendig. Erst nach mehrmaligen Rücksprachen mit dem Hersteller der Schweißmaschine konnte in den Regelkreis eingegriffen und erste Schweißungen realisiert werden. Die Realisierung eines ähnlichen Aufbaus am INP verzögerte sich dadurch und es konnten bisher keine vergleichenden Messungen am spektralselektiv geregelten Prozess

durchgeführt werden, jedoch zeigten die Schweißungen an der TU-Berlin bereits den prinzipiellen Erfolg der Projektarbeit.

3. Zusammenfassung

Die Arbeiten verliefen weitgehend planmäßig und führten zu einer erfolgreichen Bearbeitung der Ziele des Vorhabens.

Ergebnisse des Projekts wurden auf der „Große Schweißtechnische Tagung 2007, Basel“ im Konferenzband [7] sowie als Vortrag präsentiert.

Eine Nutzung der Ergebnisse ist für KMU hochinteressant, eine konkrete Umsetzung momentan nicht abzusehen.

Die Publikation der Ergebnisse des Gesamt-Projektes ist in den Zeitschriften „Schweißen und Schneiden“ sowie „Welding and Cutting“ vorgesehen, ein eingereichtes Vortragsangebot zur „Große Schweißtechnische Tagung 2008, Dresden“ wurde abgelehnt.

Greifswald, 21. Dezember 2007

- [1] Bartels, H.: Über Linienemission aus inhomogener Schicht, Teil 1. *Zeitschrift für Physik* 125 (1947), 597-614
- [2] Bartels, H.: Über Linienemission aus inhomogener Schicht Teil 2. *Zeitschrift für Physik* 126 (1949), 108-140
- [3] Bartels, H.: Eine neue Methode zur Temperaturmessung an hochtemperierten Bogensäulen Teil 1. *Zeitschrift für Physik* 127 (1950), 243-273
- [4] Bartels, H.: Eine neue Methode zur Temperaturmessung an hochtemperierten Bogensäulen Teil 2. *Zeitschrift für Physik* 128 (1950), 546-574
- [5] Bartels, H.: Der Einfluß erzwungener Übergänge und starker kontinuierlicher Emission auf die Linienkontur bei inhomogener Schicht. *Zeitschrift für Physik* 136 (1953), 411-440
- [6] Lochte-Holtgreven, W.: *Plasma Diagnostics*. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1968
- [7] Gött, G., Schöpp, H.: Plasmaphysikalische Untersuchung am Schweißlichtbogen. *DVS-Berichte Band 244* (DIE VERBINDUNGS SPEZIALISTEN 2007_Große Schweißtechnische Tagung, Basel, 2007), S. 259-262

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 (API). Der Auswahl einer geeigneten Stromquelle kam dabei besondere Bedeutung zu. Die Möglichkeit extern in die Steuerungsroutinen 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].
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 Metalldampf. Spritzer- und Porenbildung durch Turbulenzen im Schutzgasschleier sind die Folge [2].

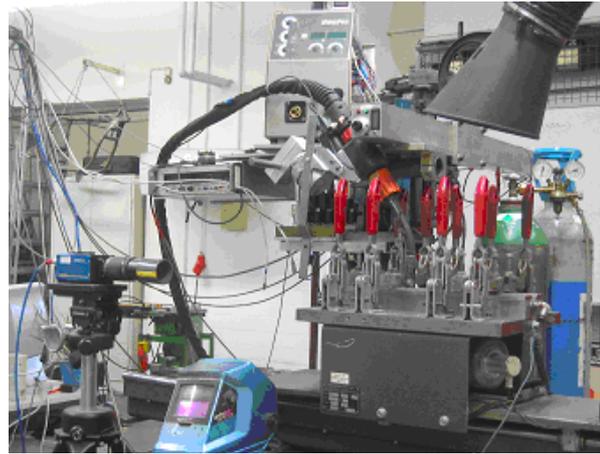


Abb.1: Schweißversuchsstand

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 Versuchstandes 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 -Schweiß = 0,35 m/min; v -Draht = 3,75 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

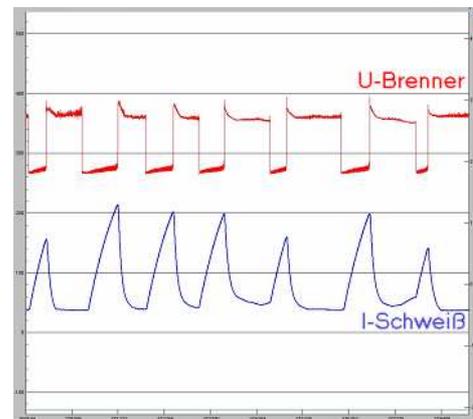


Abb. 3: Gemessener Strom- und Spannungsverlauf am Kurzlichtbogen

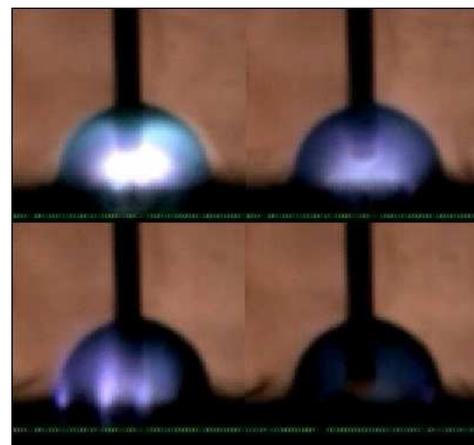


Abb. 4: Unkontrollierbare Schwankungen der Lichtintensität für den kurzschlussbehafteten Tropfenübergang bedeuteten das Aus für Kurzlichtbogen

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.

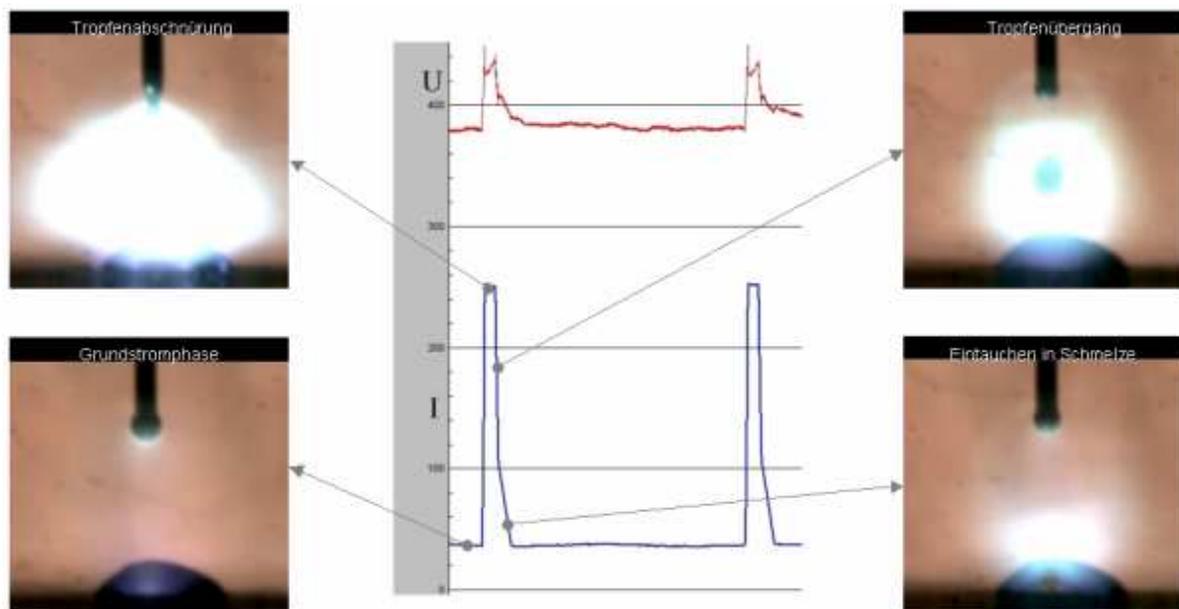


Abb. 5: Strom- /Spannungsverlauf für Impulslichtbogen [5]

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 = 33Hz; I -basis = 28 A; t_p = 1,5 ms und I_p = 250A.

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 Hz; I -basis = 15 A; t_p = 1,3 ms und I_p = 280 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.

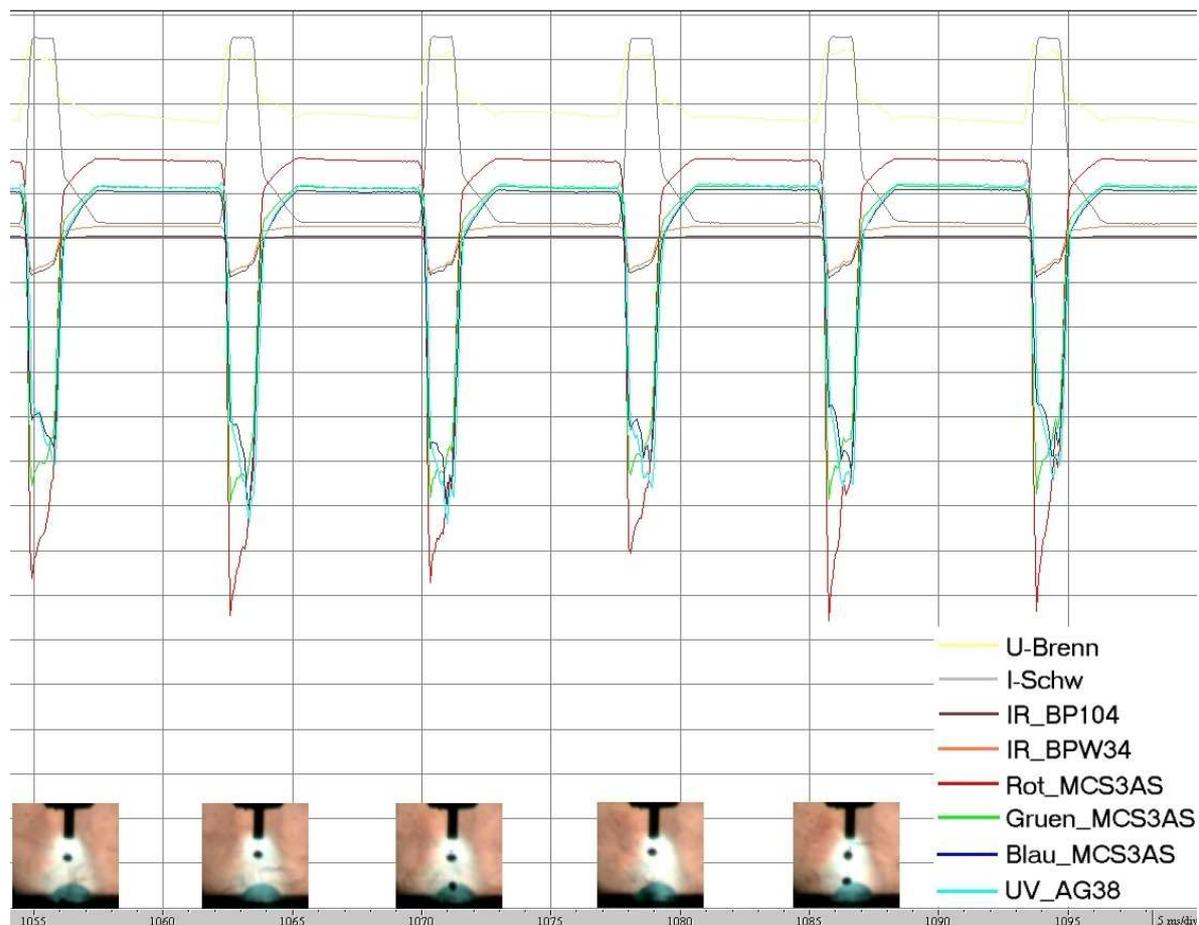


Abb.7: AlMg_{4,5}Mn-Schweißprozess mit Tropfenübergang ohne Regler

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.

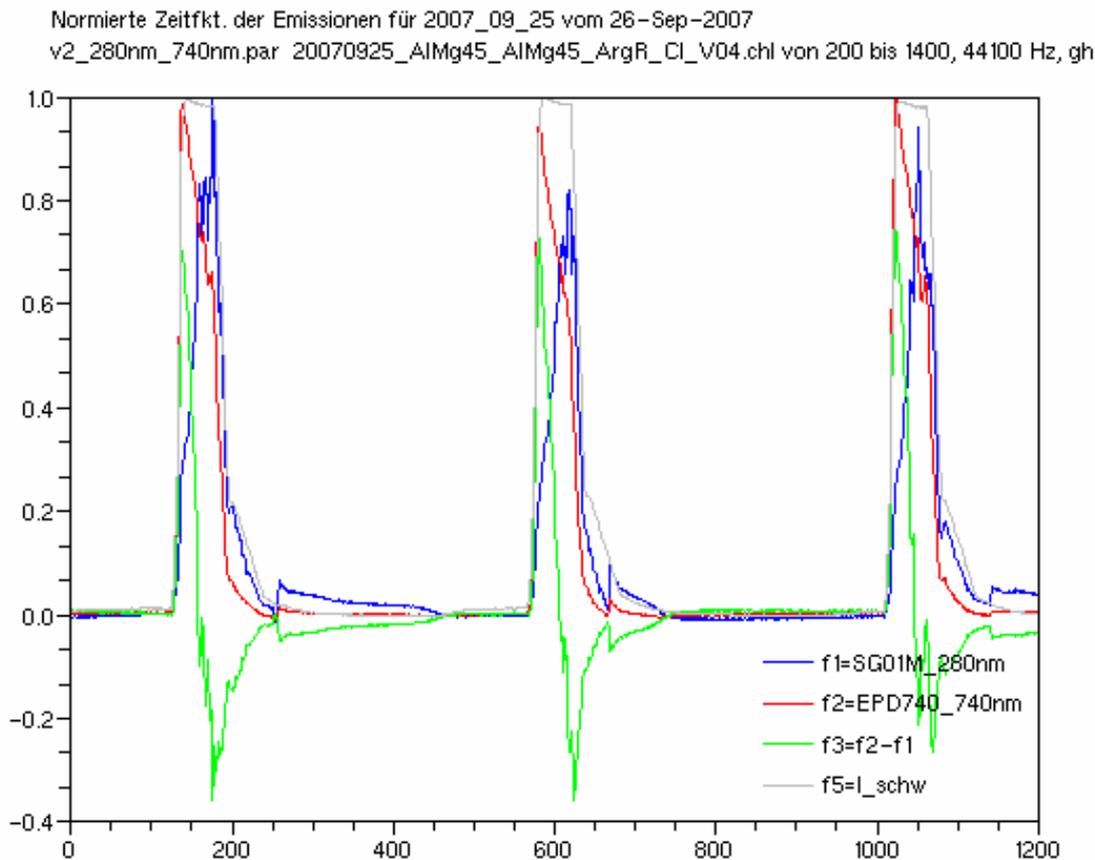


Abb.9: Zeitfunktion der Signale IR (rot); UV (blau) und Differenzsignal (grün)

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 Pulssynchronsignals 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.

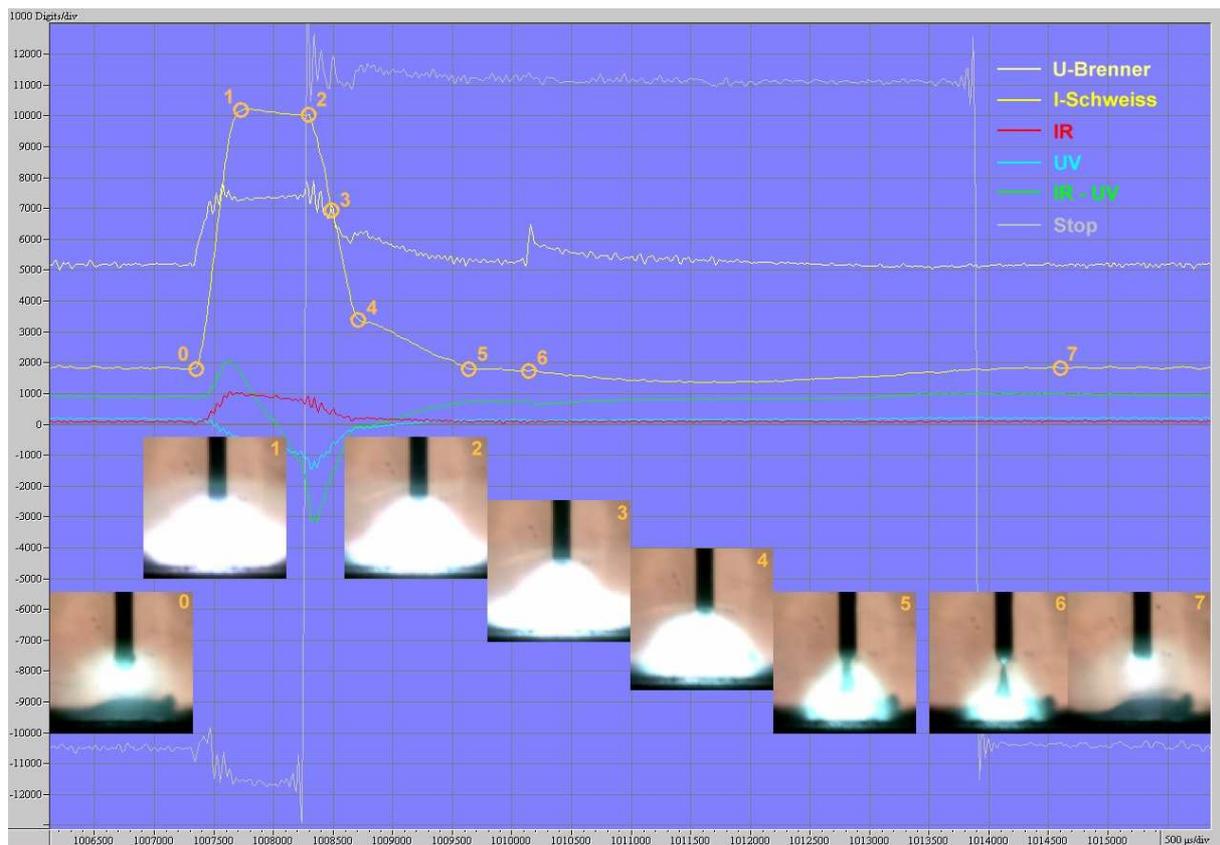


Abb.12: Strom-/Spannungsverlauf in Korrespondenz zu Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera. Man beachte die Fotonummerierung. Der Spannungsanstieg bei 6 zeigt den Tropfenübergang (AlMg4,5Mn).

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 Dünoblechbereich 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 I _b [A]	30
Pulsdauer t _p [ms]	1,2
Pulsstrom I _p [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.

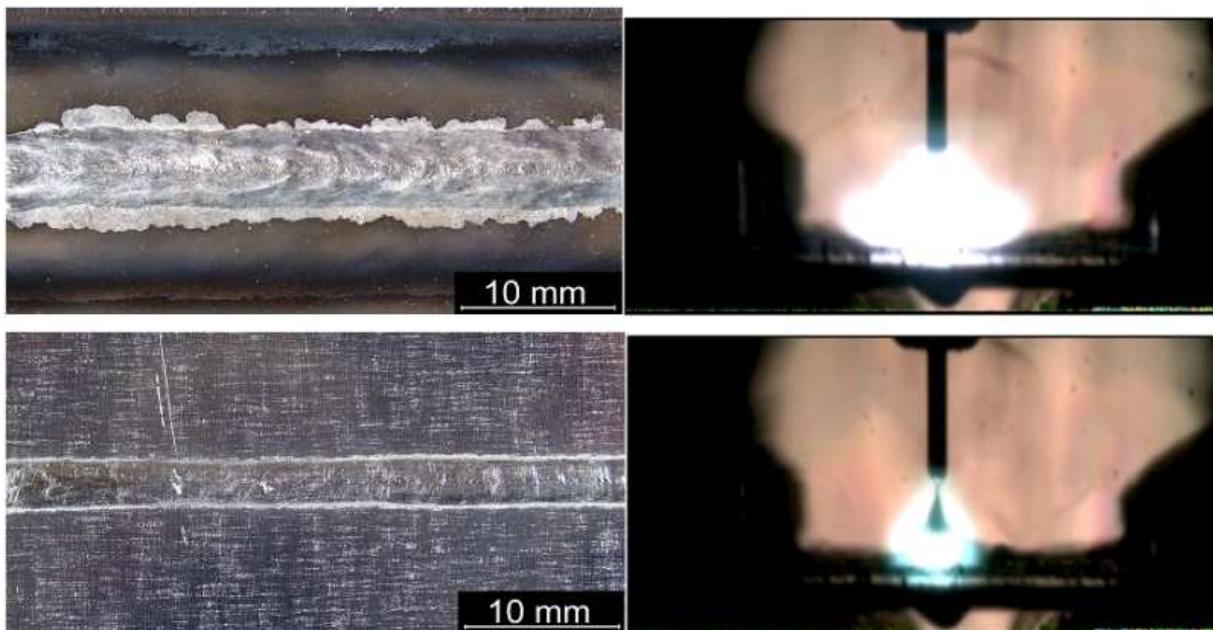


Abb.13: Schweißungen mit Spektralregler. Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter), Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie bei Tropfenübergang (darunter)

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.

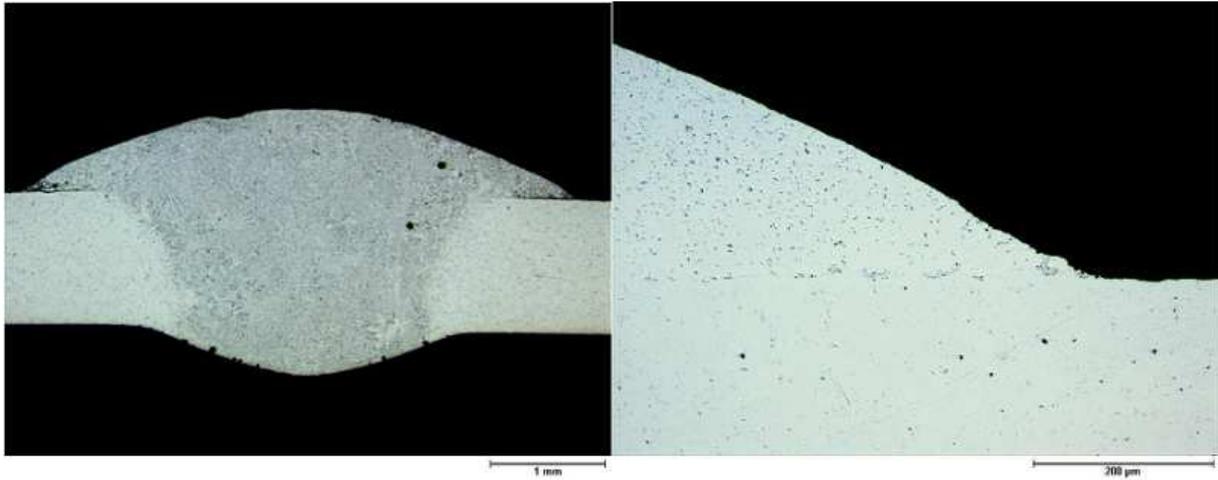


Abb.14: Eine mit Spektralregler geschweißte Probe zeigt eine saubere Schliifffläche (3:40min in 33% HNO₃ geätzt)

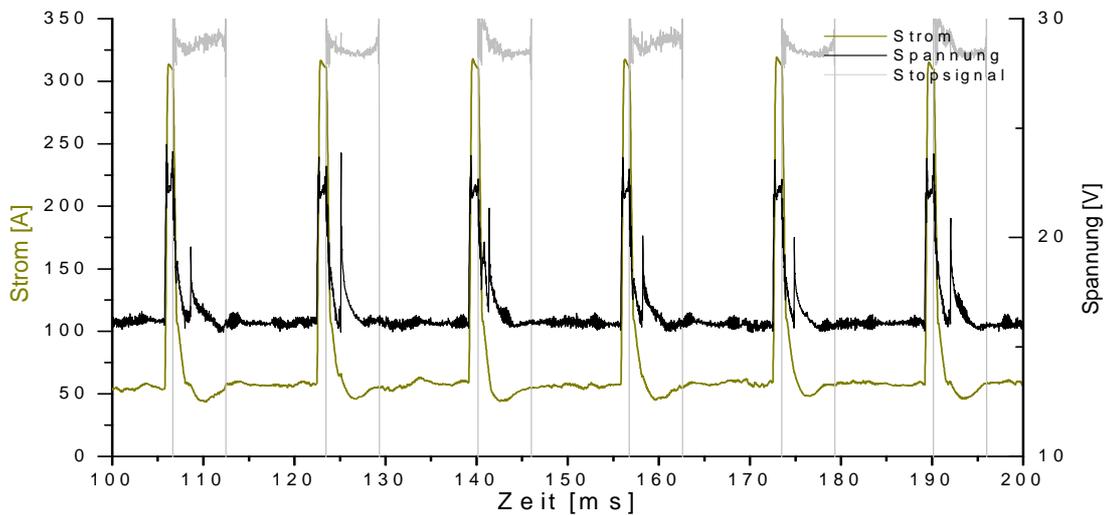


Abb. 15: Signalverlauf von Strom, Spannung und Stoppsignal

	manuell optimiert	mit Prozessregler		
		$I_p = 400 \text{ A}$	$I_b = 40 \text{ A}$	
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.

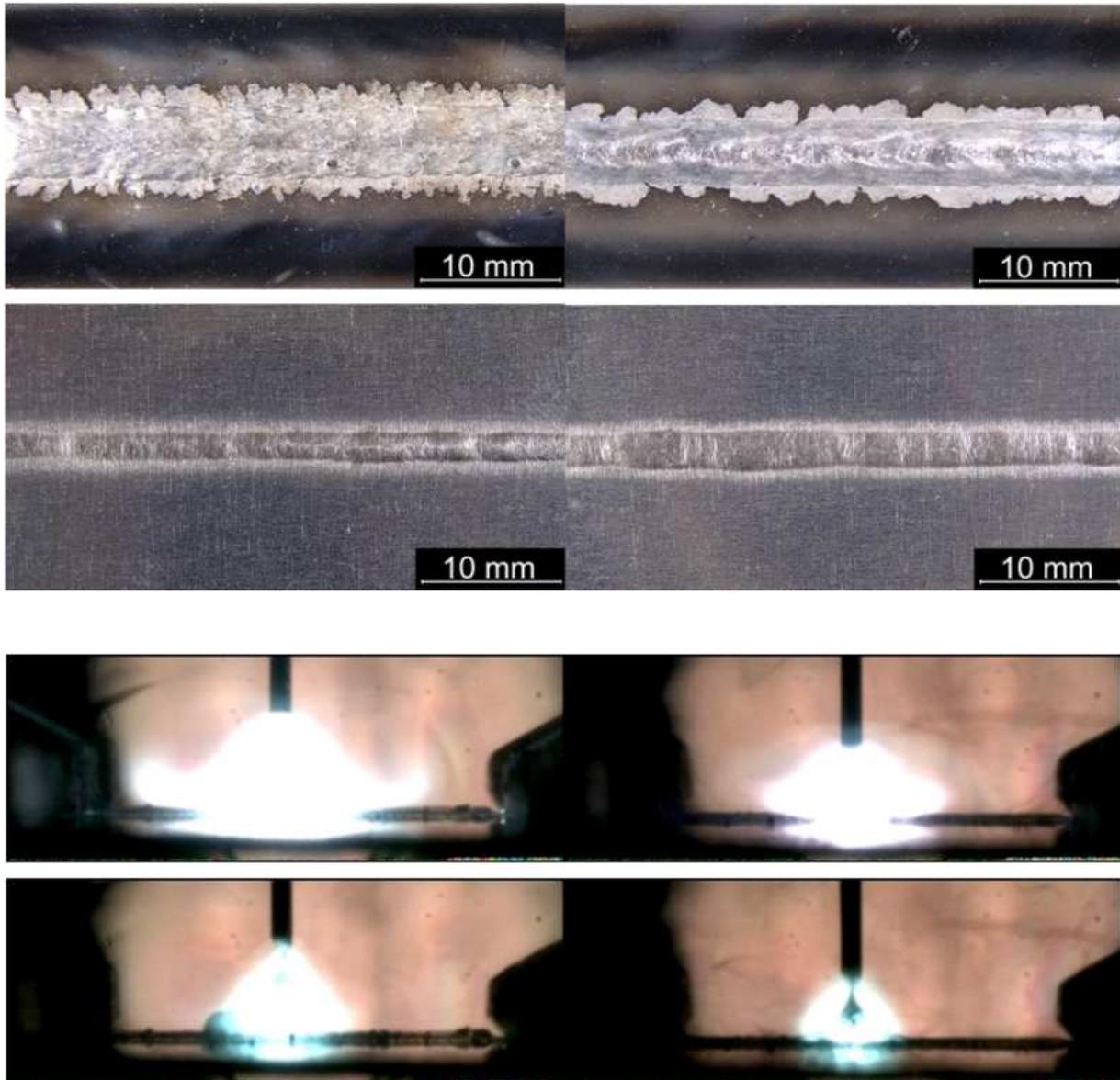


Abb.16: a) Schweißungen mit Spektralregler. Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter), b) Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie bei Tropfenübergang (darunter), linke Seite mit überhöhtem Pulsstrom 400A; rechte Seite bei überhöhtem Basisstrom 40A

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 ausgeglichen.

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.

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

Tab. 3: Lötparameter

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 Metalldämpfe 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.

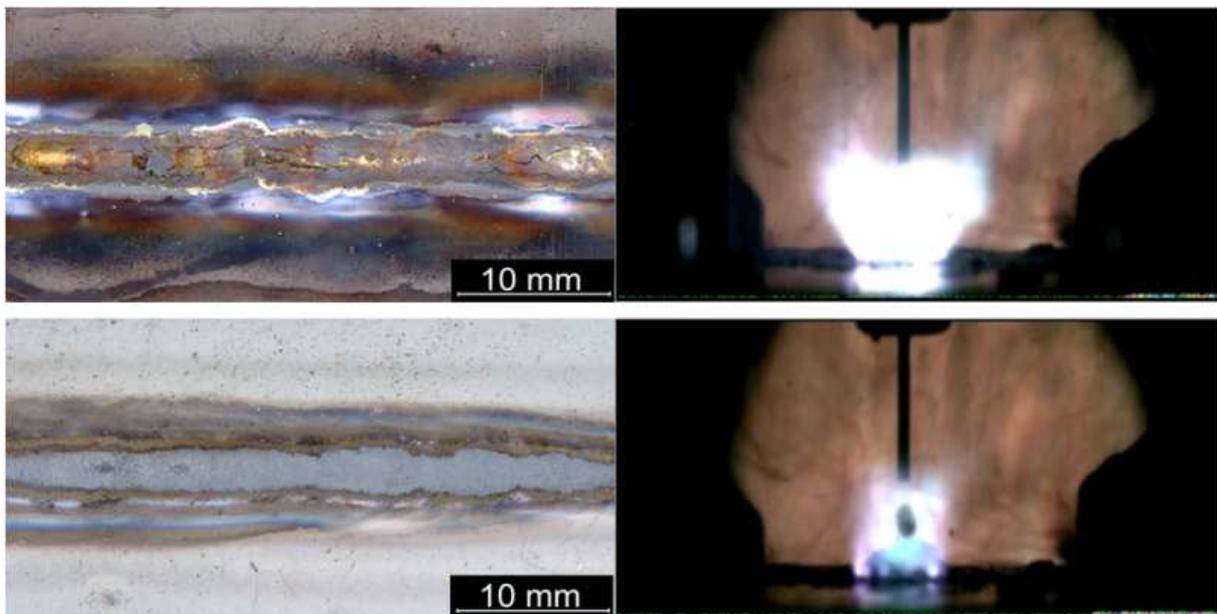


Abb.17: Nahtoberseite (oben) und Nahtunterseite (darunter). Lichtbogenprofil in der Pulsphase (oben) sowie Tropfenübergang mit aktivem Prozessregler (darunter)

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 löten. 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.

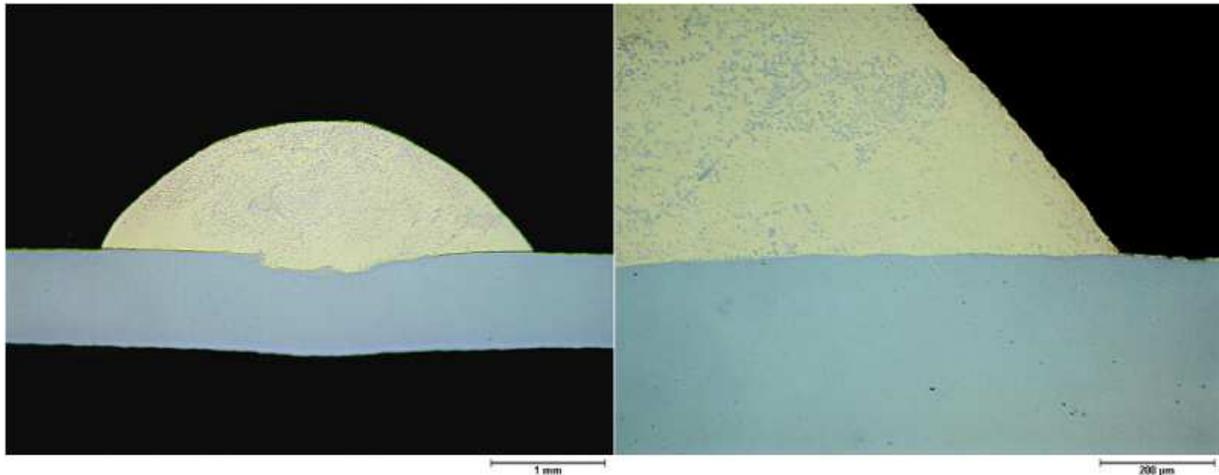


Abb. 18: Schliffbild einer mit Spektralregler gelöteten Probe. Es zeigt eine wenig durchmischte, recht abrupte Übergangszone

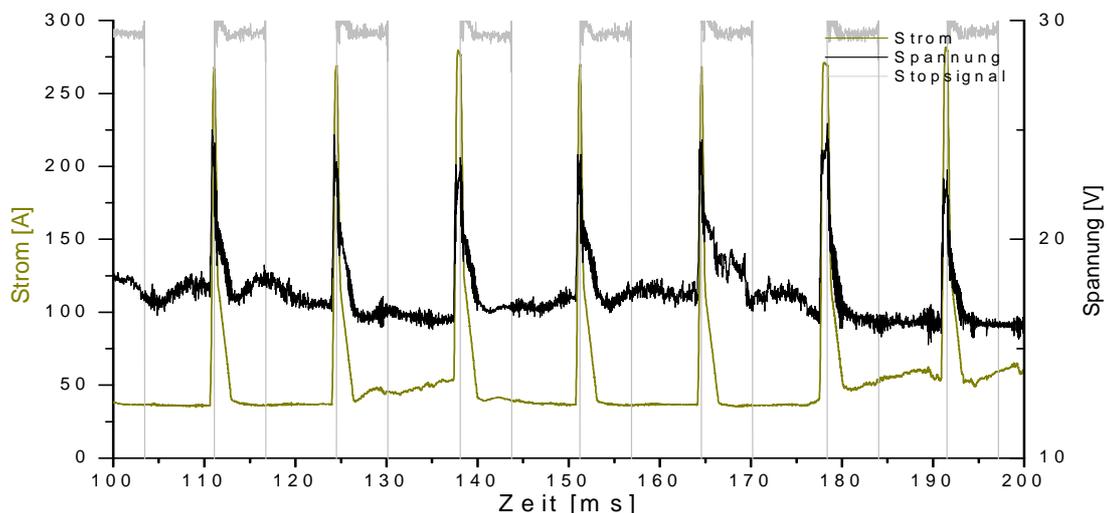


Abb. 19: Signalverlauf von Strom, Spannung und Stoppsignal für den geregelten Lötprozess (Strom und Spannungsverlauf schwarz, Stop-Signal grau)

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 Lichtausstrittswinkel 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