

---

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 beigelegt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

---

Ort, Datum

Dr. G. Heinz  

---

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Name der Forschungsstelle

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

## Bewilligungszeitraum

Unterschrift Projektleiter

# Inhalt

|   |  |
|---|--|
| <b>Ergebnisse der Forschungsstelle GFal .....</b> | <b>14</b>  |
| <br>  |  |
| 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   |
| <br>  |  |
| Anlage: Blockschaltung Spektralregler .....       | 43   |

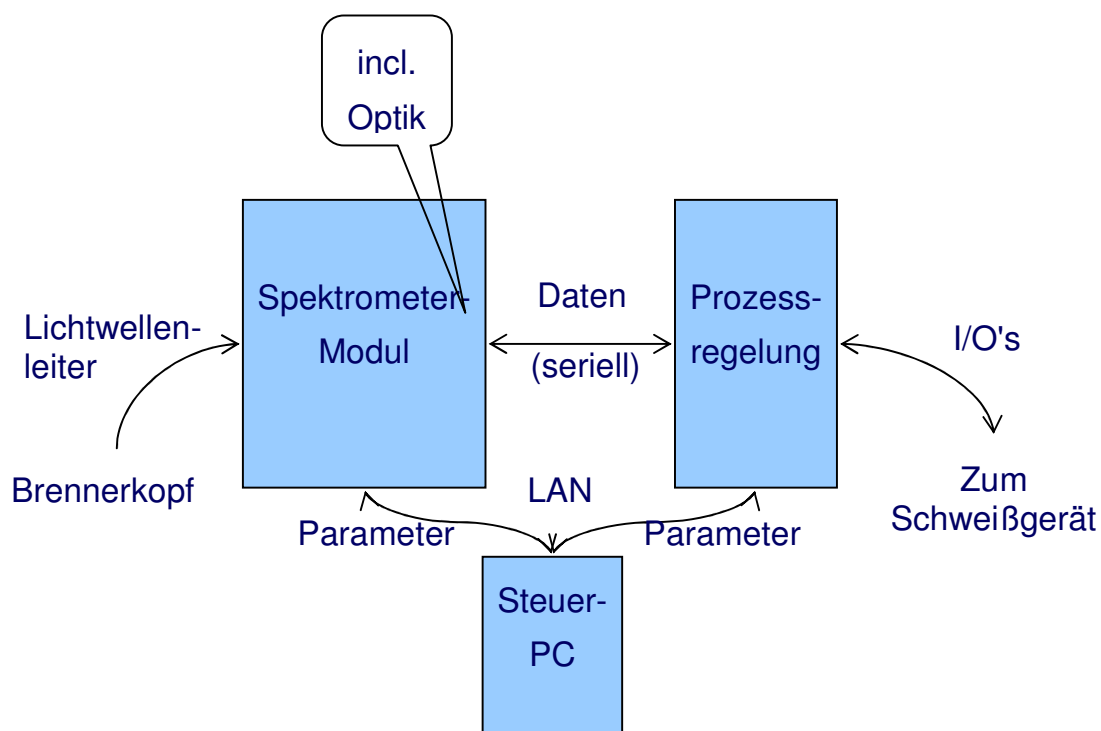
## Ergebnisse der Forschungsstelle GFal

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 Linienspektrometer

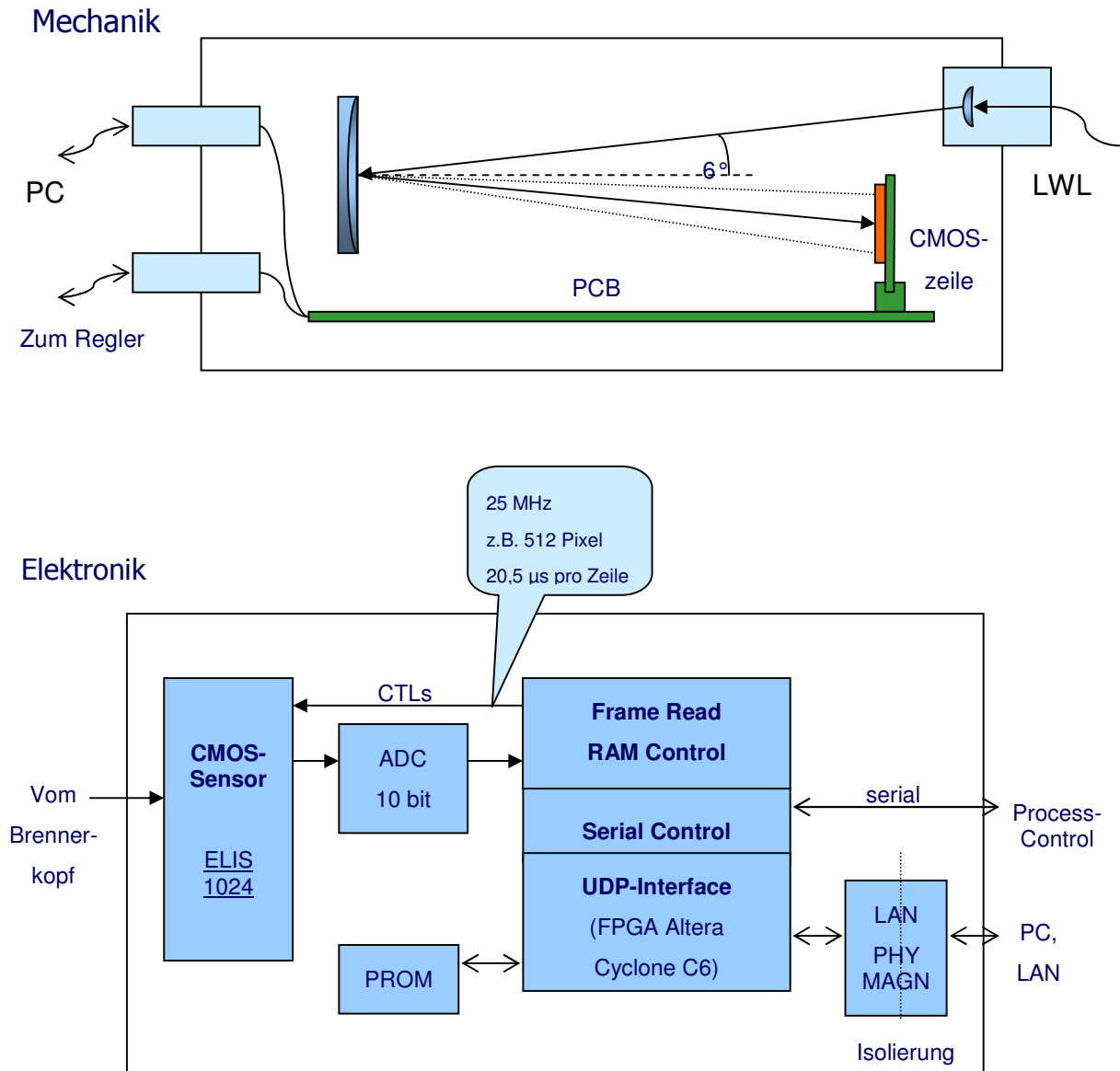
Der Antrag ging von der Beobachtung aus, dass sich die Plasmatemperatur bzw. der Energieeintrag in das Plasma über Linienspektren beteiligter Metalle abschätzen lässt. Kernidee war es, (zunächst) ein Linienspektrometer zu schaffen, welches in Echtzeit (> 100.000 Samples pro Sekunde) das Licht des Plasmas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



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

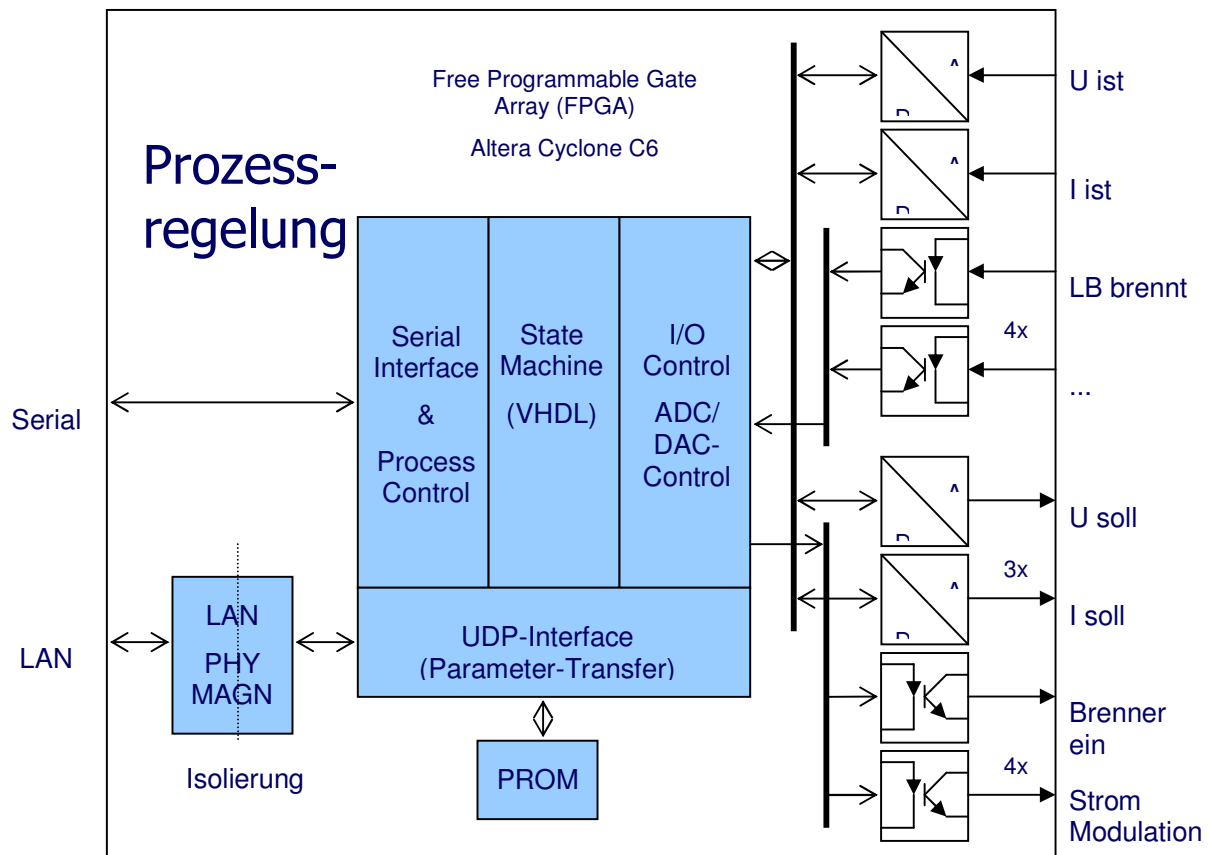
Entsprechende Schaltungsentwürfe mit einer Abschätzung der zu erreichenden Antwortgeschwindigkeiten schufen allerdings Ernüchterung. Weder mit einem Prozessorentwurf auf Basis Blackfin (siehe Zwischenbericht), noch mit dem parallelisierten Entwurf auf Basis einer FPGA vom Typ Altera Cyclone C6 ist derzeit 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 gezeigt<sup>1</sup>, dass die Intensität einer einzelnen Metalllinie während des Pulses wächst, während die einer Argonlinie langsam nachlässt.

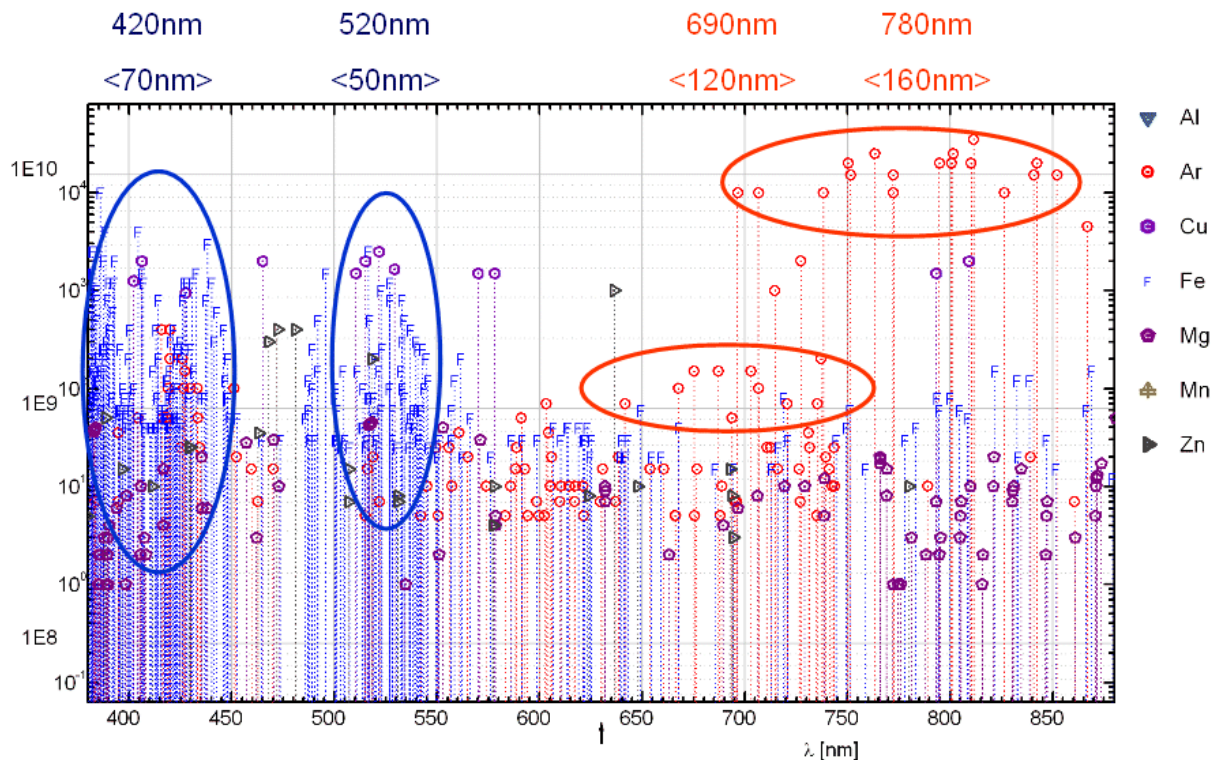
Rückfrage bei den Kollegen des INP und der TU ergab, Abb.4, dass offenbar ganze Spektralbereiche von diesem Phänomen betroffen sind. Das Spektrum leuchtet in Gesamtheit zu Pulsbeginn rötlich, zum Pulsende aber weiß bis blau-grünlich. Die rötliche Färbung kann dem Schutzgas Argon zugeordnet werden, die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

<sup>1</sup> 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.



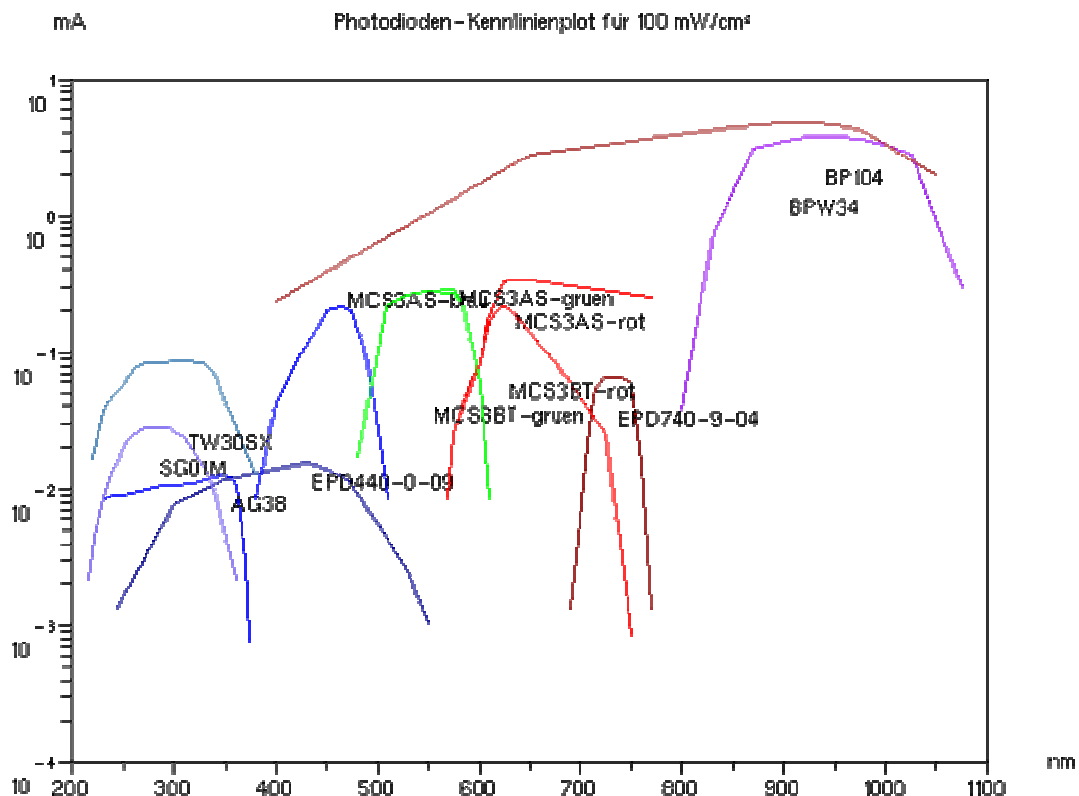
**Abb.4: Linienspektren eines Schweißvorgangs zeigen Häufungsorte von Argon-Linien (rot) und von Metalllinien (blau). Darüber: Bandmitte und <Bandbreite> des umrandeten Bereiches. © Bild: G.Heinz, GFal; Spektrum G. Gött, INP**

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 Linienspektrometer 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 200nm bis 1100nm wurde recherchiert. Als problematisch erwiesen sich die unterschiedlichen Empfindlichkeitsskalen der Hersteller. So sind je nach Hersteller relative und absolute Angaben für Kurzschlussstrom ( $\mu\text{A}$ , 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]**

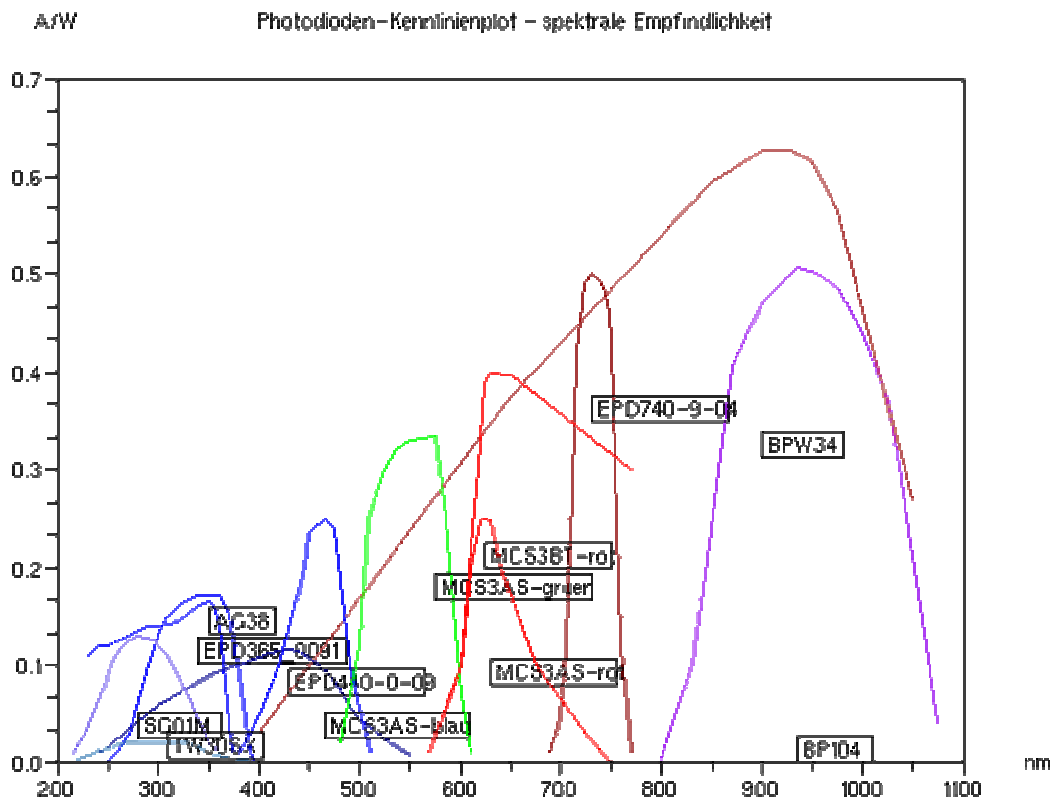
Um zu einer Vergleichbarkeit zu kommen, wurde ein Programm KENNLINIENPLOT.SCE unter Scilab entwickelt. Kennlinien von Photodioden werden digitalisiert als sog. \*.KEN-Files abgelegt. Gesteuert durch ein Parameterfile können mit dem Programm interaktiv verschiedene Files aufgerufen und im selben Maßstab zusammen dargestellt werden. Ausgaben sind in den Zielformaten möglich (d.h.  $\mu\text{A}$ , 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 mm<sup>2</sup>) 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]**

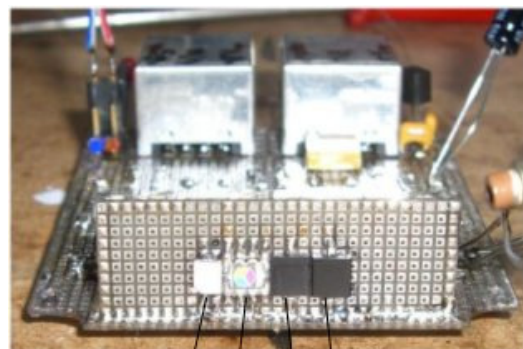
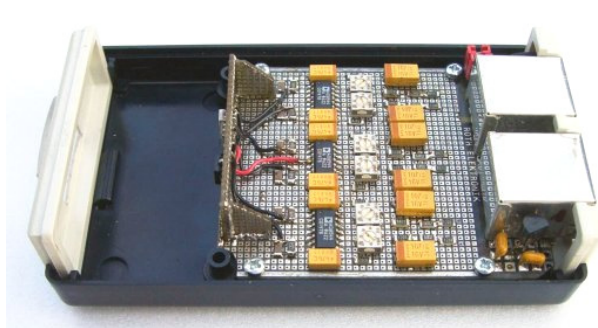
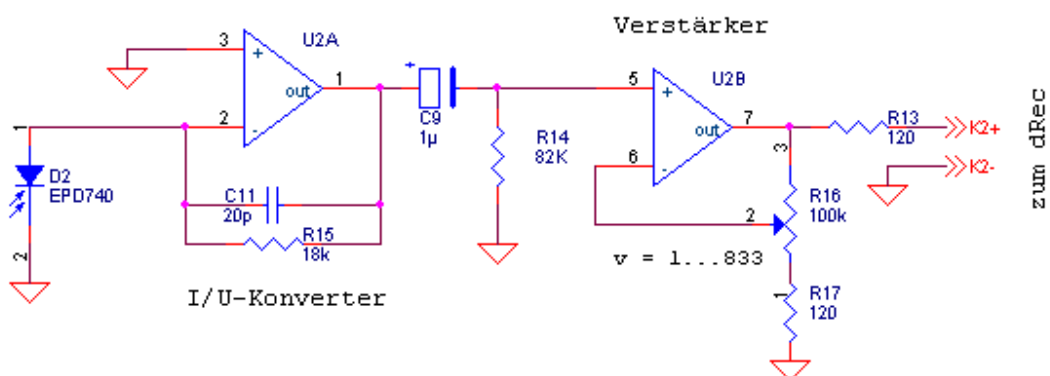
In Summe ist bei gemeinsamer Applikation von IR- und UV-Dioden stets mit großer Verschiedenheit der Kurzschlussströme bis etwa zum Faktor  $30 \cdot 140 = 4200$  zu rechnen (bei Sonnenschein, 100 mW/cm<sup>2</sup>). Für zu realisierende Vorverstärker erschien eine einstellbare Verstärkung im Bereich 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.



K6, K5-3, K2, K1

**Abb.7: 6-Kanal Spektrometer-Vorverstärker. 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 Wechselspannungskopplung (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/ $\mu$ s bzw. 1000 V/ $\mu$ 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.

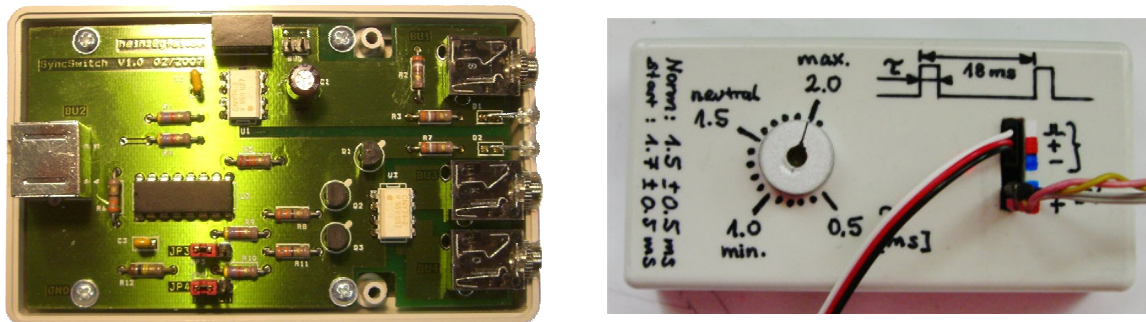
Zeitkonstanten in verwendeter Wechsellspannungskopplung wurden als kritisch erkannt: zu hohe C9-Werte (Abb.7) bringen dynamische Probleme bei Lichtschwankungen im Prozess, zu geringe C9-Werte führen zu Dachabfall, beide Phenomena stören.

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

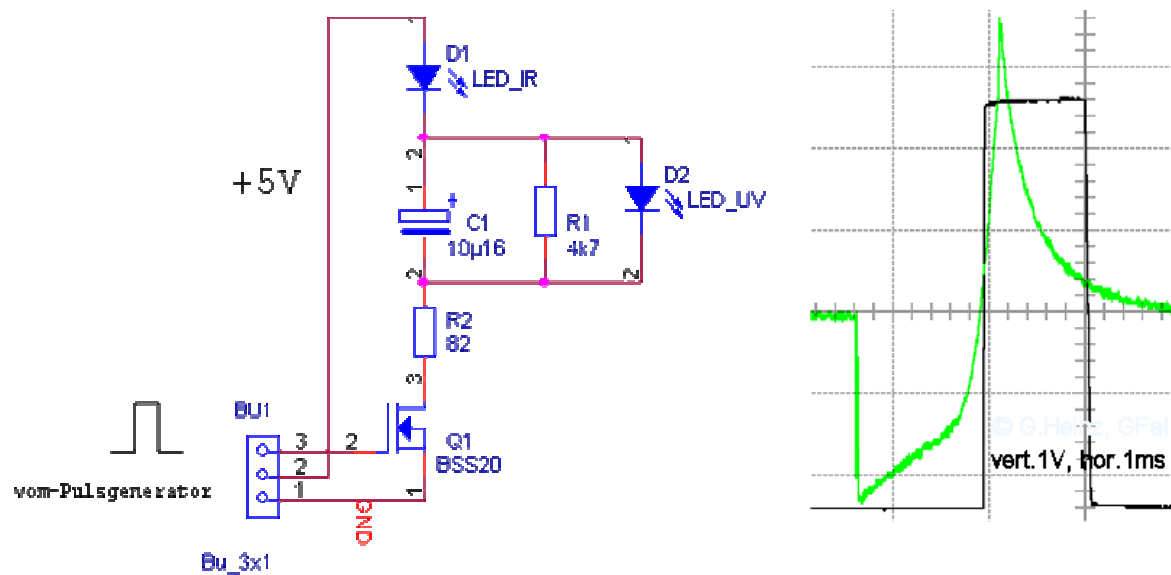
Zur Inbetriebnahme des Vorverstärkers war eine Testumgebung für die Laborphase zu entwickeln und aufzubauen. Verschiedene Lichtquellen wurden auf ihre Tauglichkeit untersucht, pulsmoduliertes Licht im entsprechenden Spektralbereich abzugeben.



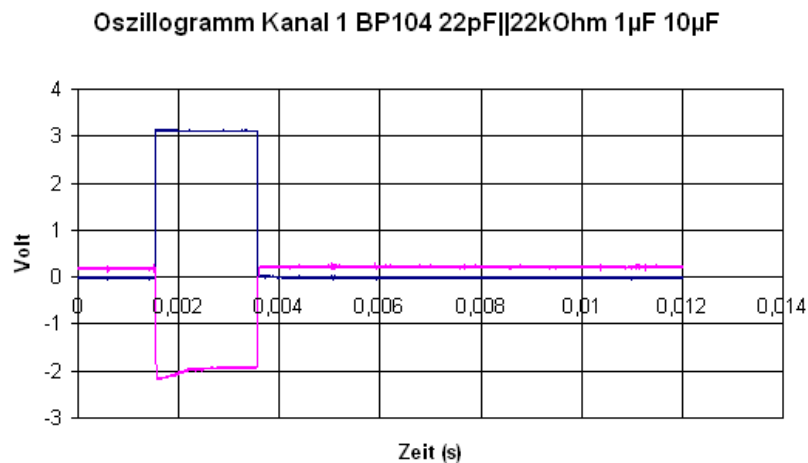
**Abb.9: Entwickelte Testumgebung: Links: Isolierter Schalter (IsoSwitch) für Synchronisation von Datenrecorder, Schweißmaschine und Hochgeschwindigkeitskamera, Rechts: Pulsgeber für die Plasma-Simulation mittels LED. © G.Heinz, GFal**

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 Schutz-erde-Geräten 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.**



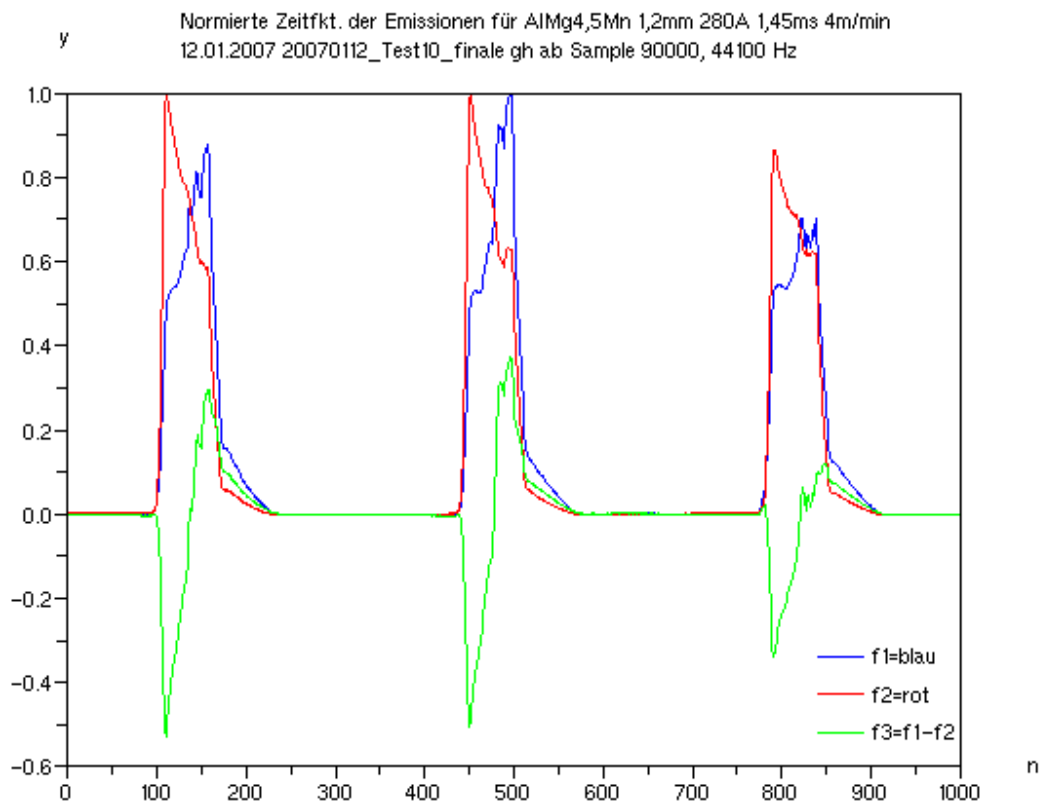
**Abb.10b: Dynamisches Verhalten des Spektrometer-Verstärkers (SV). Strom durch die Lichtquelle (weiße LED) blau, obere Kurve, 1mV/div.; Ausgangssignal des SV violett (unten); 1V/div. 2ms/div.**

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

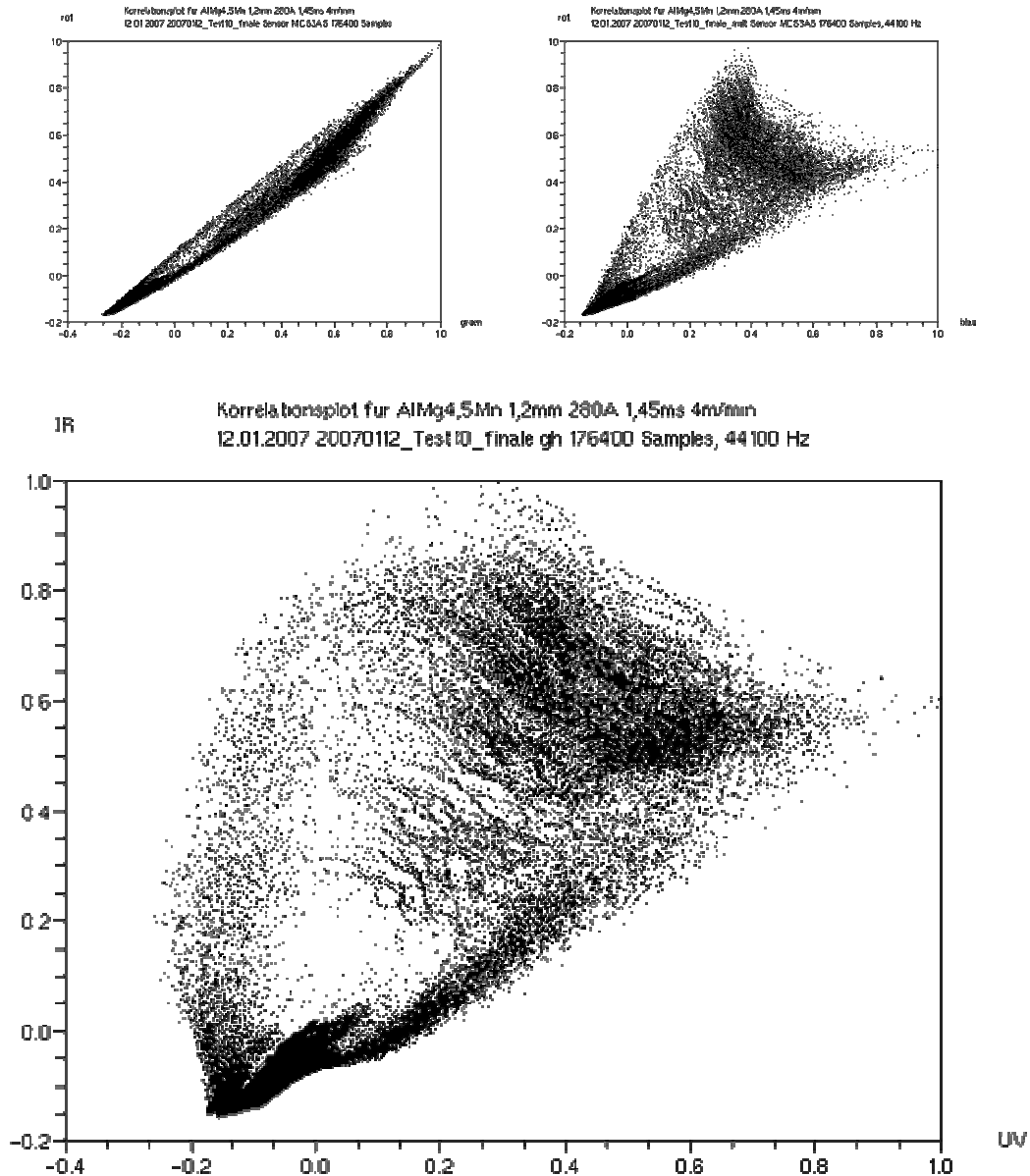
- Lesen der Zeitfunktionen im \*.WAV-Format
- Offsetbefreiung der Kanäle und Inversion der Zeitfunktionen
- Mathematische Verknüpfungen ausgehend vom Initialisierungsfile
- Komparierung einer Zeitfunktion mit vorgebbaren Schwellen sowie
- Ausgabe eines Plotbildes als \*.GIF-File.



**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, Subspektren von Photodioden im Zeitverlauf genau und mit zusätzlicher Aufzeichnung durch eine an der TU vorhandene Hochgeschwindigkeitskamera zu untersuchen.



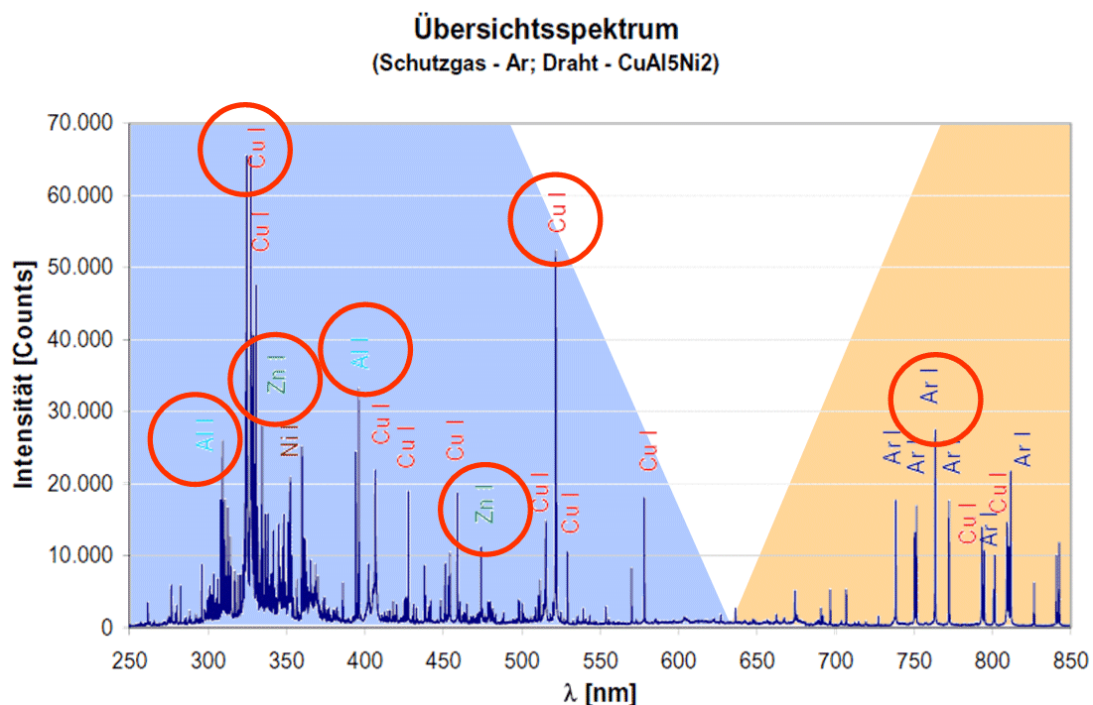
**Abb.11b:** Korrelationsplots der Zeitfunktionen verschiedener Photodioden-Paare: Links oben: Rot-Grün, rechts oben: Rot-Blau (Dreifarbsensor MC3AS), unten: IR (BP104) gegen UV (AG38). Das Bild unten zeigt stärkste Unabhängigkeit beider Kanäle. © G.Heinz, GFal, Feb. 2007



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 (Metaldampf,  $f_1$ ) steigt auch bei Breitband-Untersuchung in der Pulsphase an, während die Infrarot-Emission ( $f_2$ ) stetig sinkt (Argon), Abb.11a. Die Differenz  $f_3$  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

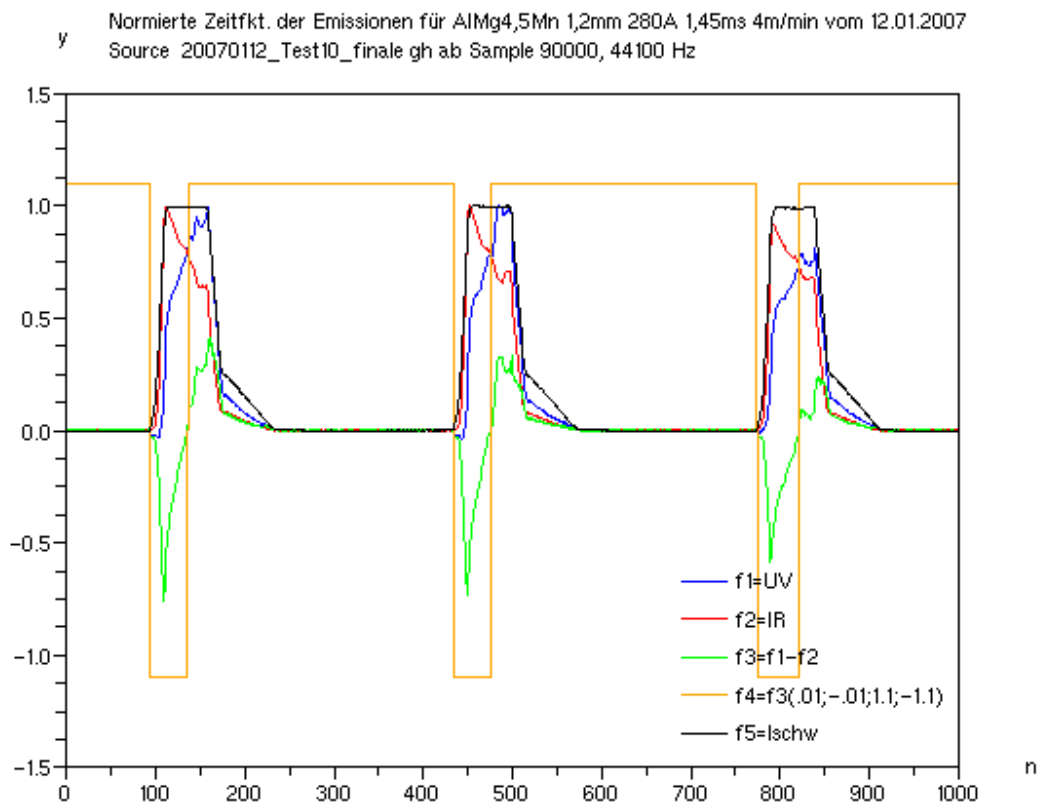
## 2.6 Subband-Selektion, optimale Bandaufteilung

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 Linienpektren, Abb.12 (Linienpektrum: 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.

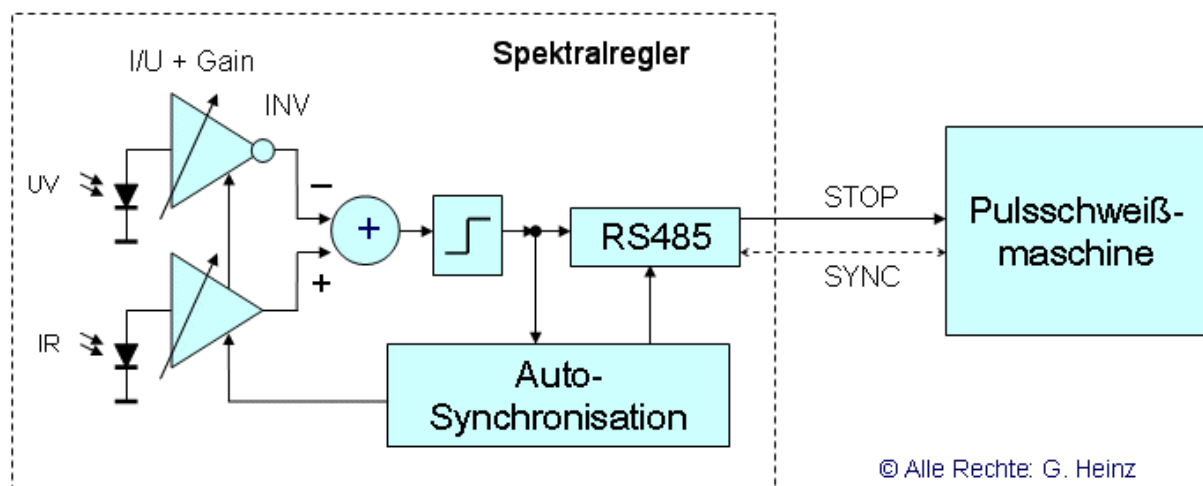
Die Funktion  $f(\max, \min, \text{limit}+, \text{limit}-)$ , in Abb.13 als  $f_4$  dargestellt, simuliert den zu erwartenden Abschaltvorgang (hier die steigende Flanke). Es wird angenommen, dass sich die gewünschte Schwelle über die Verstärkungseinstellung vorgeben lässt. Variation der Schwellwertparameter 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 schweißt seit dem 21.11.2007 beim Projektpartner an der TU Berlin, siehe Abb.1, Abb.14, Abb.17 und 18.



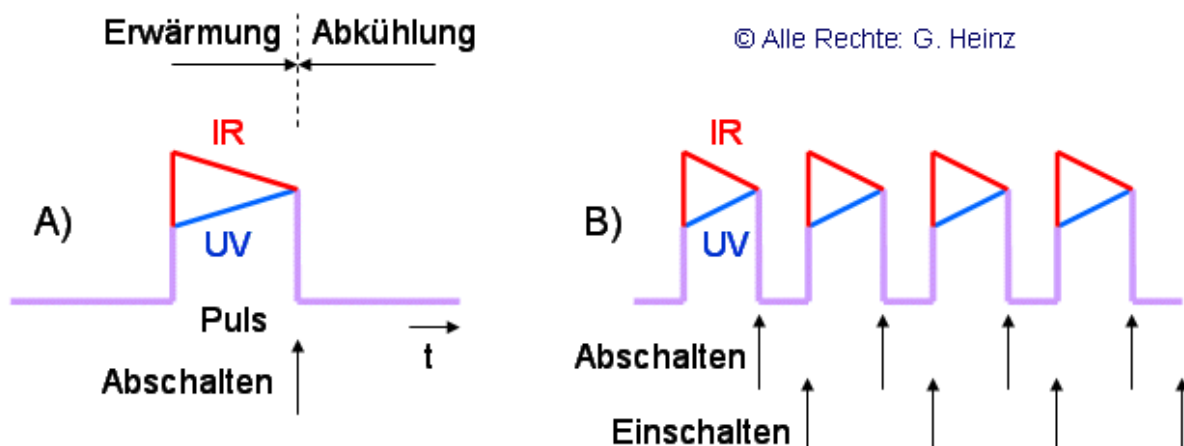
**Abb.14: Blockschaftbild des Zweikanal- Spektralreglers.**

Der Spektralregler wurde für die Steuerung einer MIG-Pulslichtbogen-Schweißmaschine Cloos-Quinto GLC403 erprobt. Die erste, erfolgreiche spektralgesteuerte Pulsschweißung erfolgte an der TU Berlin, Schweißversuchsanlage des IWF, Dövestr.6, Ecke Helmholtzstr. am 21.11.2007, Abb.17. Zwei Tage zuvor war eher zufällig die erste spektral geregelte, pseudo-kontinuierliche Schweißung gelungen. Ein Missverständnis in der Implementierung der Schnittstelle zur Schweißmaschine zwischen Cloos und GFal hatte zufällig dieses Ergebnis gezeigt, Abb.18.

### 3.1 Zur Funktion des Spektralreglers

Mit Variationen von Photodioden, Korrelationsplots und Spektren entstand die Erkenntnis, daß mit zwei Photodioden eine Trennung zwischen Metallemissionen und Argonemissionen gewährleistet werden kann.

Die Zeitfunktionen der Photodioden für Infrarot (IR) und Ultraviolett (UV) des Lichtbogens werden einzeln verstärkt und voneinander subtrahiert, Abb.14. Das Verhältnis beider entscheidet über den Abschaltpunkt. Die Höhe des Abschaltpunktes wird über das Verhältnis der Verstärkungen eingestellt.



**Abb.15: Zeitfunktionen der Betriebsmoden: Im Pulsbetrieb A wird jeder Puls abgeschaltet, im quasikontinuierlichen Betrieb B steuert der Spektralcontroller die Schweißmaschine komplett selbst.**

Während des Pulses sinkt die IR-Emission zeitlich ab, dafür steigt die UV-Emission zeitlich an, Abb.15. Es entsteht eine im Bereich des Pulses mit der Temperatur monoton steigende Differenzkurve, Abb.17, Signal *Comp* bzw. Abb.13, *f3*. Überschreitet die Differenz von  $f1-f2$  (UV-IR) einen Schwellwert, so ist die Temperatur zu hoch. Ein Abschaltsignal (*Stop*) wird an die Schweißmaschine ausgegeben. Dieses schaltet von Pulsstrom (um 300 A) auf Grundstrom (um 40 A) zurück.

Das Plasma wird danach vom Grundstrom erhalten, während der Pulspause entsteht eine IR-dominante Emission. Entsprechend nimmt der Spektralregler den Stop- Impuls nach Abkühlung des Plasmas automatisch wieder zurück.

Ausgehend von dieser Idee kann der Spektralregler den Puls bei Überhitzung *abschalten*, als auch den Puls bei Unterkühlung wieder *einschalten*. Er kann deshalb in

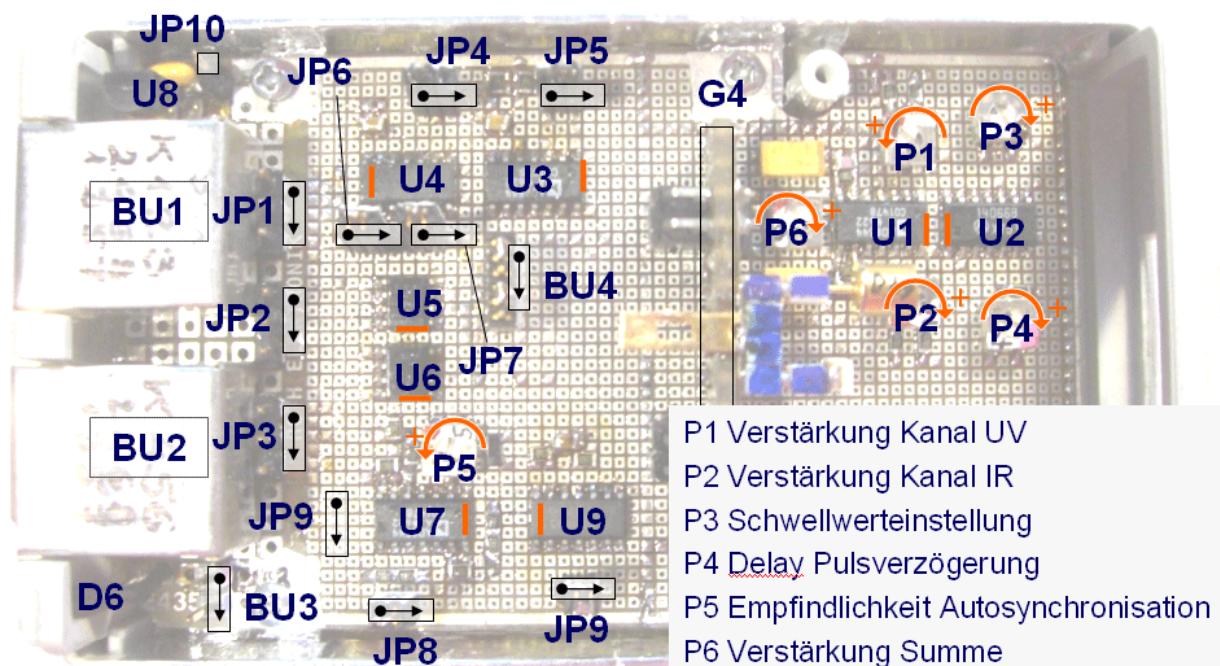
zwei Moden betrieben werden: Mit speziellen Brücken (Jumper) kann zwischen *quasi-kontinuierlichem Betrieb* und *Pulsbetrieb* gewählt werden.

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

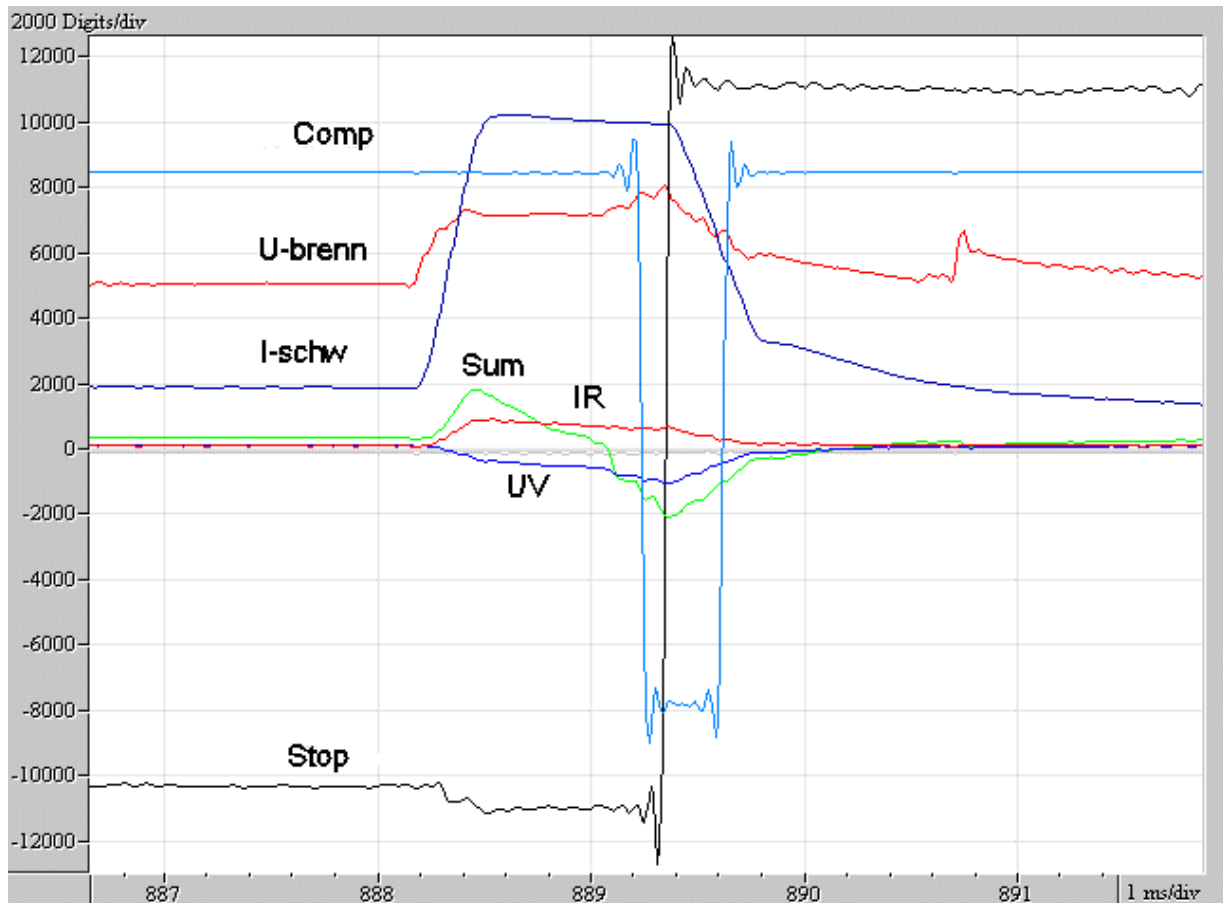
Der Versuchsaufbau Abb.16) ist mit neun IC bestückt, darunter befinden sich drei vierfach- OPV (Operationsverstärker). Insgesamt sind also zwölf OPV in Verwendung, um die Funktionen I/U-Konversion, Verstärkung, Differenzbildung, Komparierung und Autosynchronisation zu realisieren. Die Schaltung ist zu 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 Wechsellspannungskopplung 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.

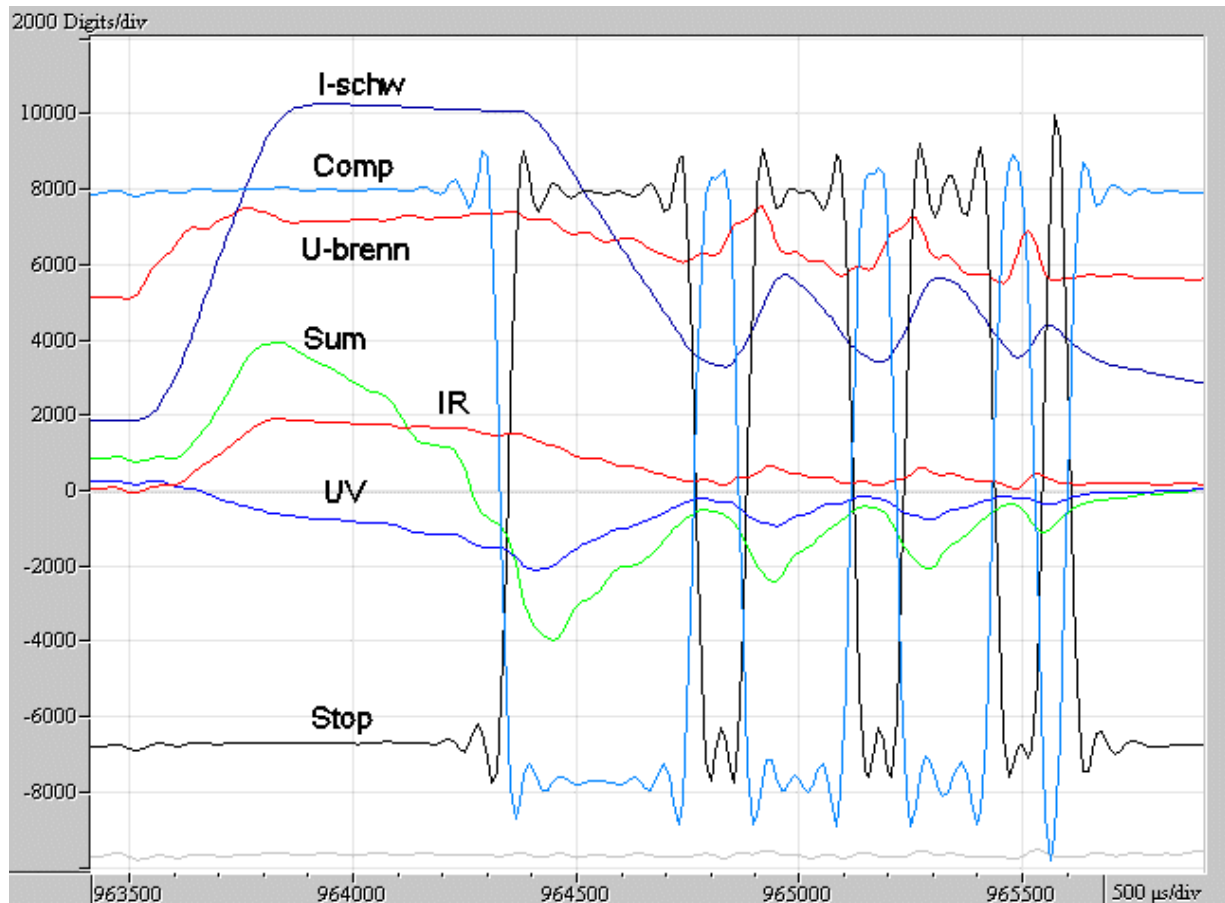


**Abb.17:** Erste, aufgezeichnete Zeitfunktionen einer spektral geregelten Pulsschweißung. Abkürzungen: I-schw Schweißstrom, U-brenn: Brennspannung, UV: Signal der UV-Diode, IR: Signal der IR-Diode, Sum: Differenzsignal (negiert), Comp: Ausgang des Komparators, Stop: generiertes Steuersignal für die 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 Übertragungsstrecke 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.

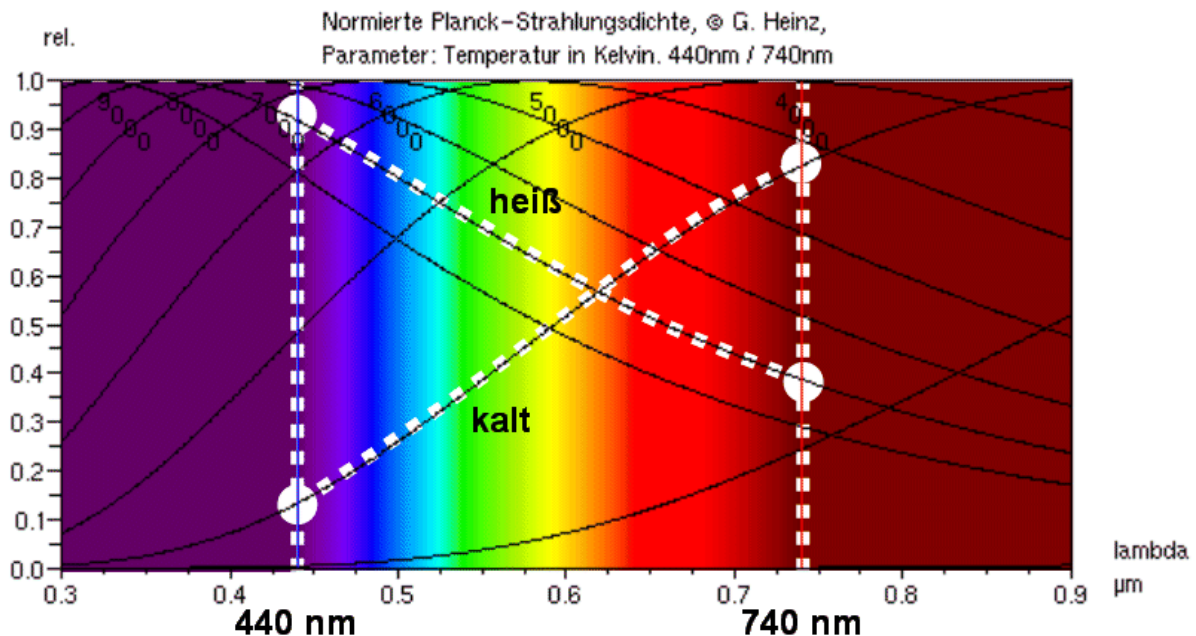
Projektpartner Cloos- Schweißtechnik lieferte entsprechend angepasste Module für den DSP der Quinto 403 sowie eine Schnittstellenkarte (sog. Master-Slave) mit EIA-422 Schnittstelle (siehe Bericht der TU). In der Finalversion (siehe Anlage1) bedient der Regler zwei differentielle Steuerleitungen mit serieller 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 Strahlungsgesetz<sup>2</sup> (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.

<sup>2</sup> Siehe auch [http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches\\_Strahlungsgesetz](http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz)



Die Plancksche Strahlungsgleichung stellt einen Zusammenhang zwischen Temperatur  $T$ , Wellenlänge  $\lambda$  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

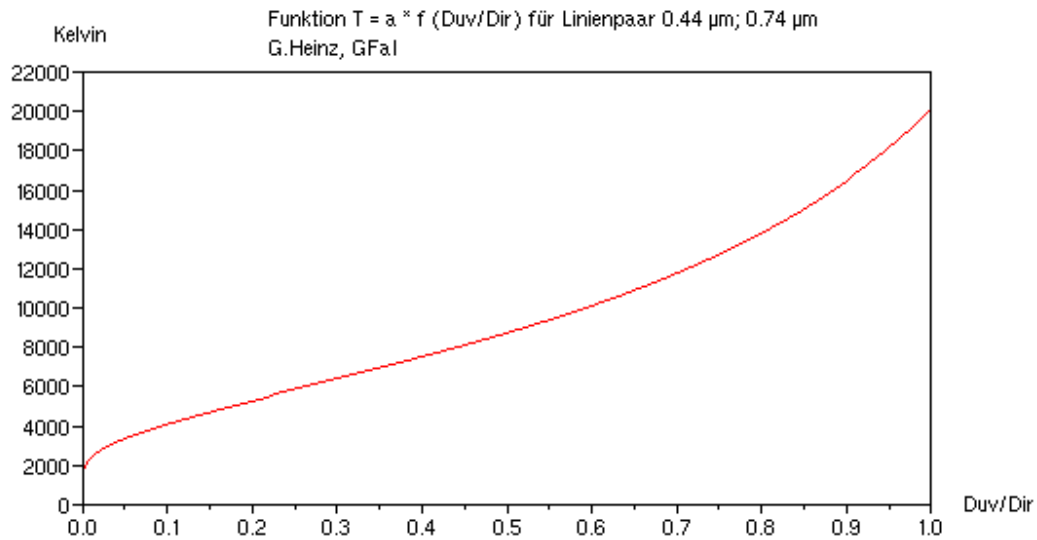
$$(6) \quad Q = D_{UV}/D_{IR},$$

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

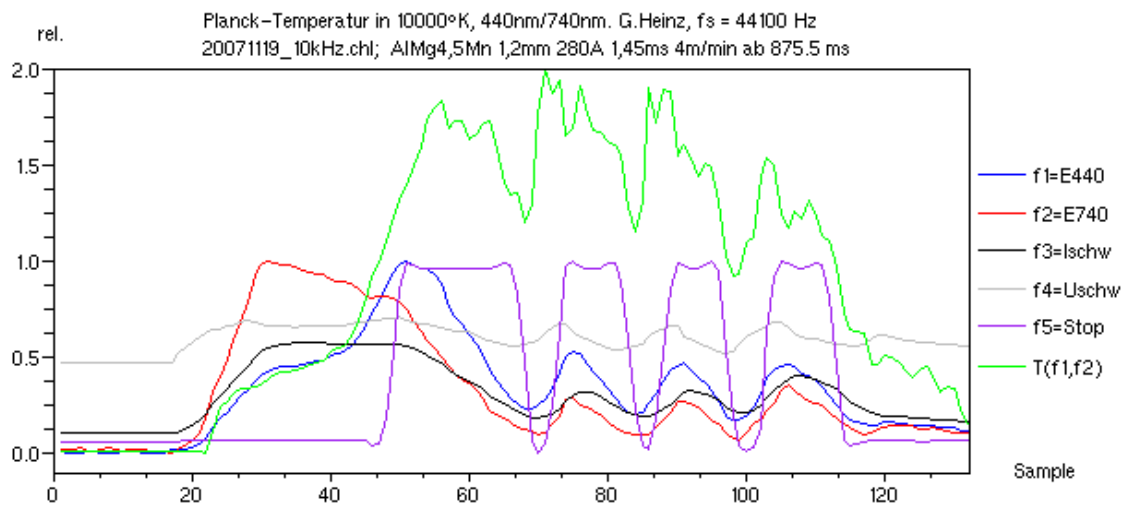
Wird der Quotient  $Q$  Wert für Wert aus den Abtastwerten der Photodioden ermittelt, so können wir daraus numerisch die Temperaturkurve des Schweißvorgangs schätzen.

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**

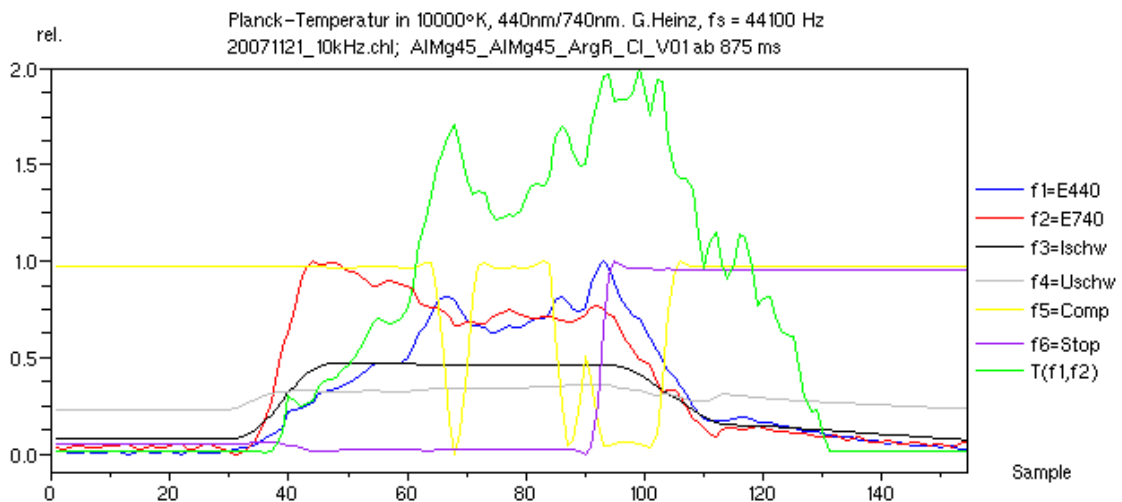


**Abb.21: Temperaturregeltes Plasma im intermittierend-quasikontinuierlichen Mode mit Schätzung der Plasma- Temperatur.  $f1$  und  $f2$  sind die Signale der Photodioden;  $f3$  und  $f4$  sind Schweißstrom und -spannung. Die Temperatur  $T(f1,f2)$  wird aus der Zeitfunktionen der Photodioden geschätzt.  $f5$  ist das an die Stromquelle gelieferte Stop-Signal (ein = low). Bei Überschreitung einer Schwelltemperatur wird der Puls mit  $f5$  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.  $f1$  bis  $f4$  wie Abb.21,  $f5$  ist das interne Summensignal nach dem Komparator (Schaltbild siehe Anlage). Besteht  $f5$  für eine eingestellte Dauer, wird das Abschaltsignal  $f6$  ausgelöst.  $T(f1,f2)$  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.

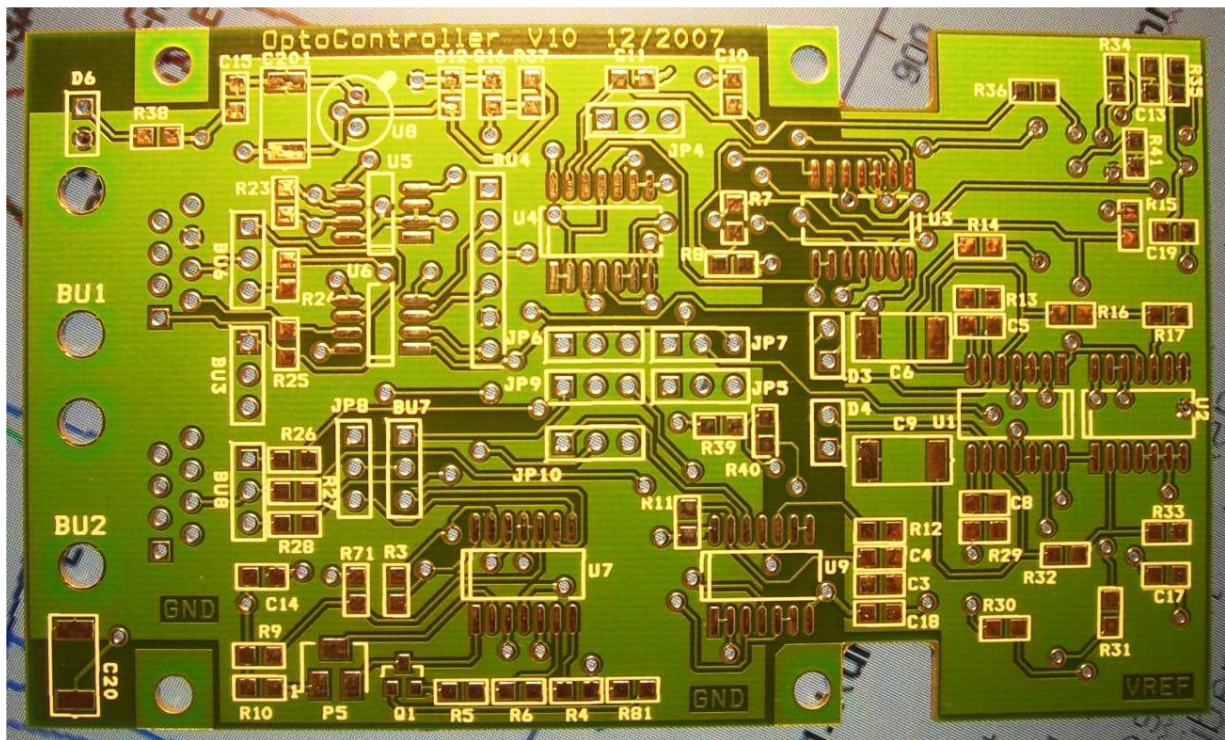
Erste Analysen mit der so geschätzten Plasmatemperatur zeigen eine Besonderheit auf: wir finden mit wachsender Pulsdauer teilweise sogar einen beschleunigten Temperaturanstieg. Für die Konstruktion von Pulsschweißmaschinen bedeutet dies, dass die Längentoleranz des Pulses erheblich die Endtemperatur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

## 4 Zusammenfassung

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

Linienpektrometrische Ansätze führten nicht zum Erfolg. Zu hohe Rechenzeiten gestatten derzeit keine Echtzeit-Lösung im Bereich unterhalb von 100  $\mu$ 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](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](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](http://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](http://www.irb.fraunhofer.de), S.B41, siehe auch [http://www.choparc.de/ergebnis\\_inp.pdf](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](mailto:heinz@gfai.de)

Berlin, im Januar 2008.



# Anlage: Blockschaltung Spektralregler

