

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.

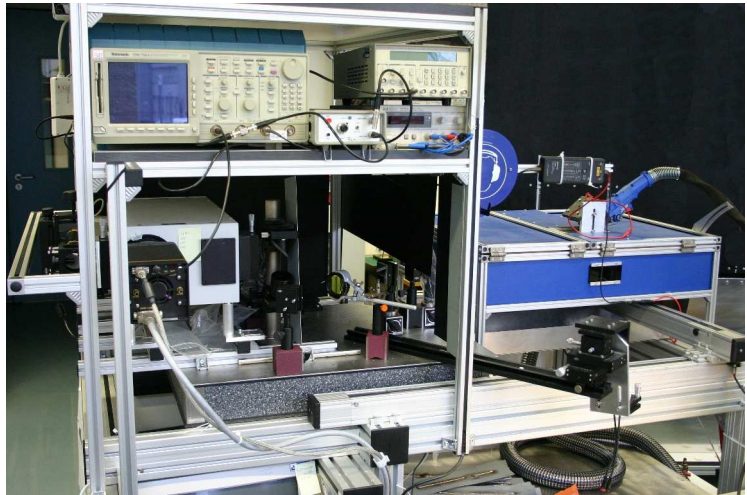


Abb. 1: Versuchsaufbau

## 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.

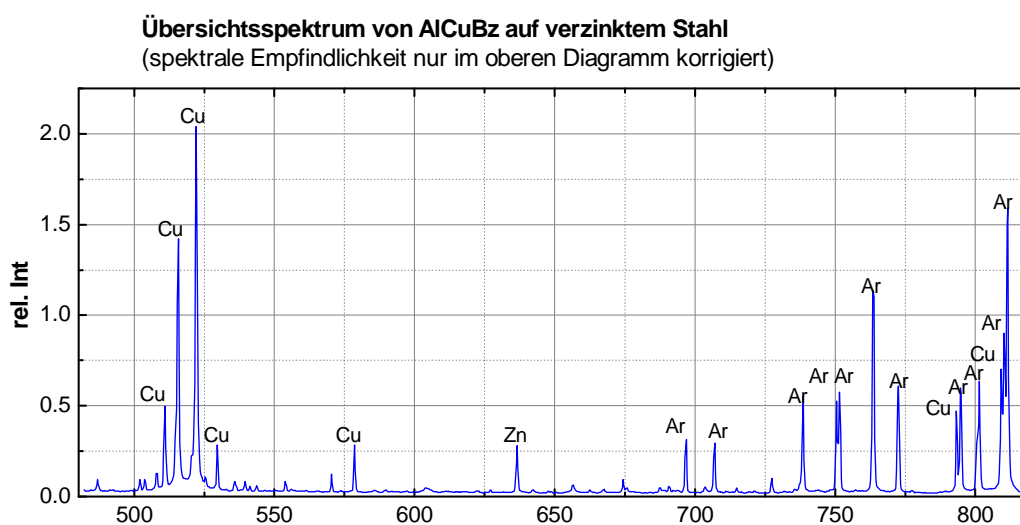


Abb. 2: Übersichtsspektrum AlCuBz 1.3ms nach Stromanstieg (Löten)

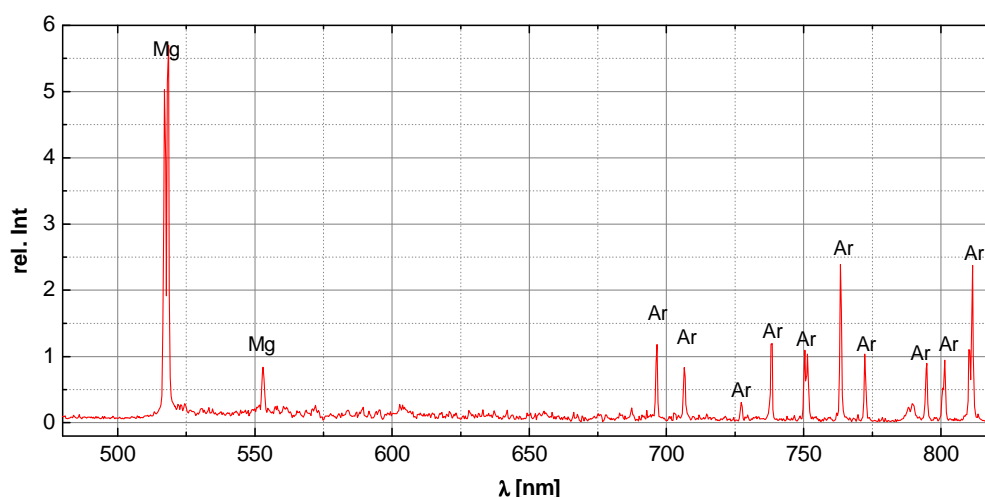


Abb. 3: Übersichtsspektrum AlMgMn 0.6ms nach Stromanstieg (Schweißen)

## 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<sub>4,5</sub>Mn<sub>0,7</sub>-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)

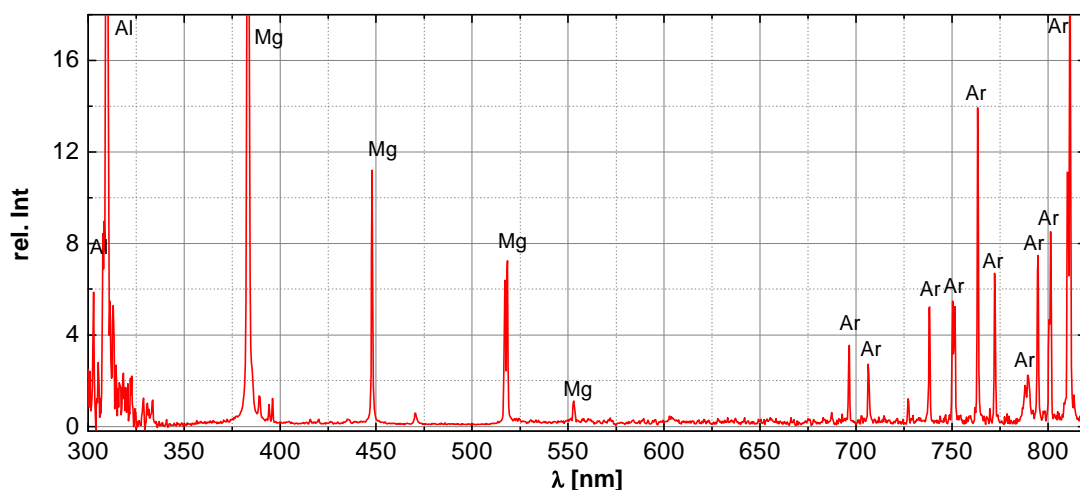


Abb. 4: Übersichtsspektrum inkl. blauem - und UV-Bereich (Schweißen)

### 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.

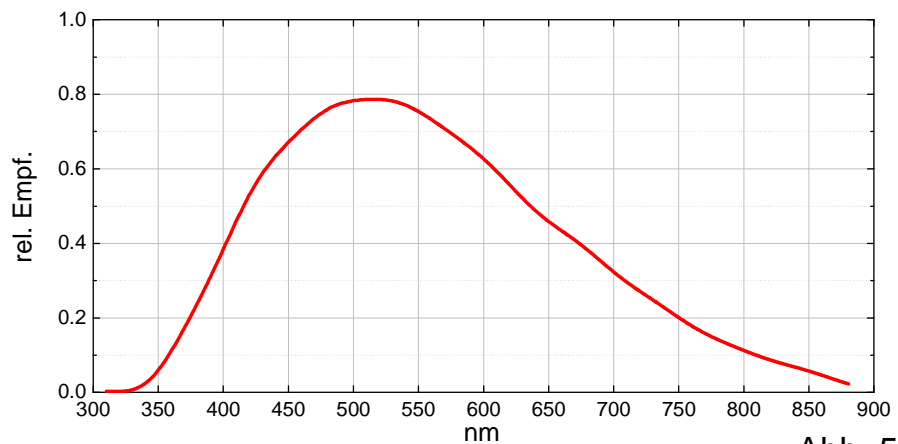


Abb. 5

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<sub>4,5</sub>Mn<sub>0,7</sub> 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.

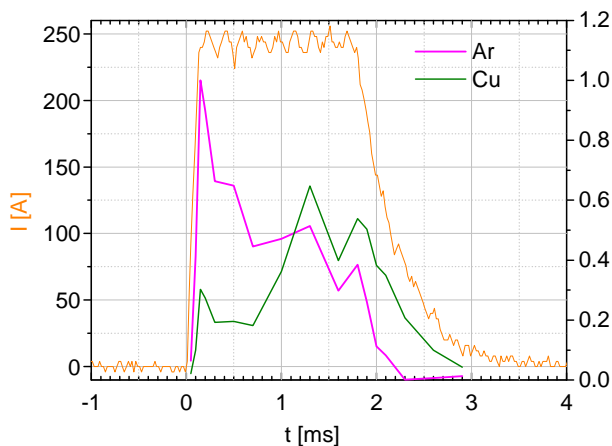


Abb. 6a: Strahlstärken der Cu- und Ar-Linienintegrale in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Impulsstromes

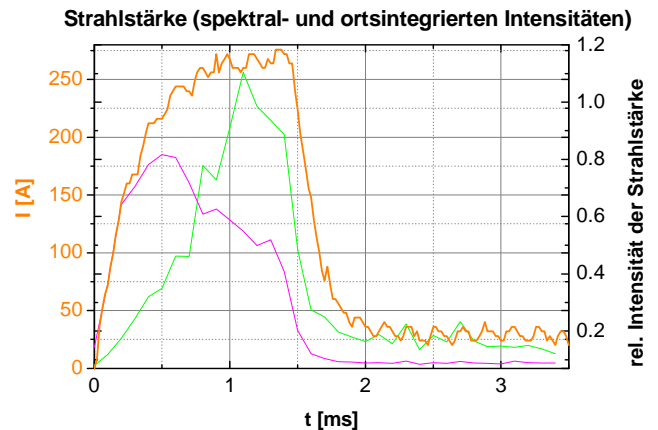


Abb. 6b: Strahlstärken der Mg- und Ar-Linienintegrale in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Impulsstromes

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-

ohne Filter



Abb. 7

750 nm-Filter und 575 nm-Filter

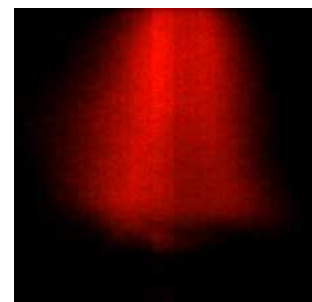


Abb. 8



Filters zu erkennen. Mit der Information aus den beiden spektralselektiven Aufnahmen kann man in Abbildung 7 schlussfolgern, wie sich der hellere Metaldampfkern 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 Metaldampfkonzentration, 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 :

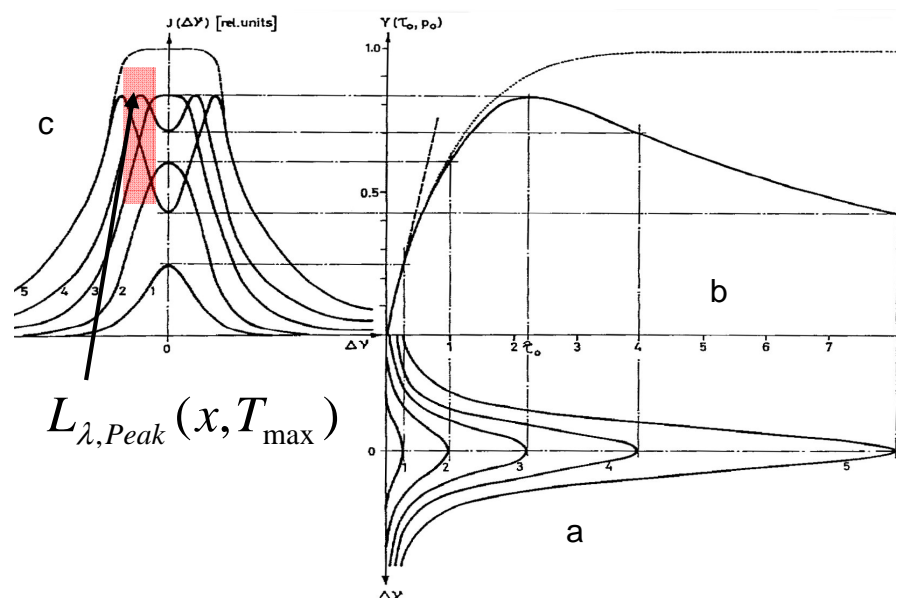


Abb. 9: a) optisch dünne Linie, b) beschreibt den Strahlungstransport, c) optisch dicke Linie [6]

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



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,  $\lambda$  = Wellenlänge) sowie Profil-Funktionen ( $p^*$  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.

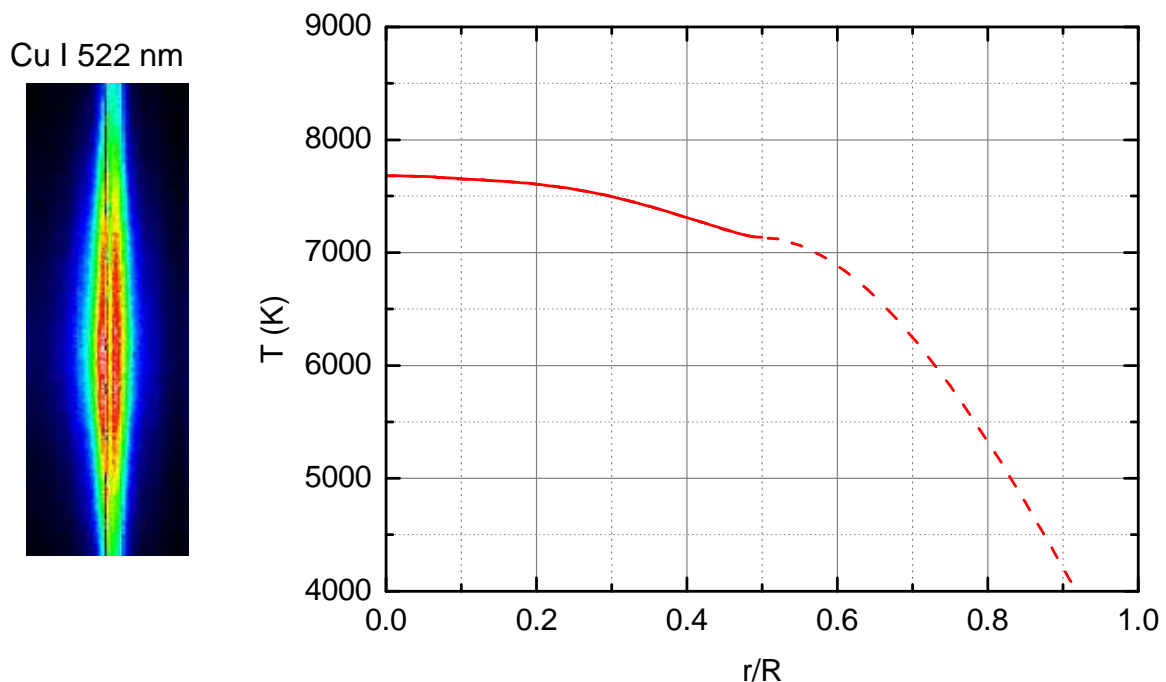


Abb. 10: Spektralaufnahme (Image) während eines Stromimpulses (links) und daraus ein berechnetes Temperaturprofil für den Lötprozess (rechts)

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.

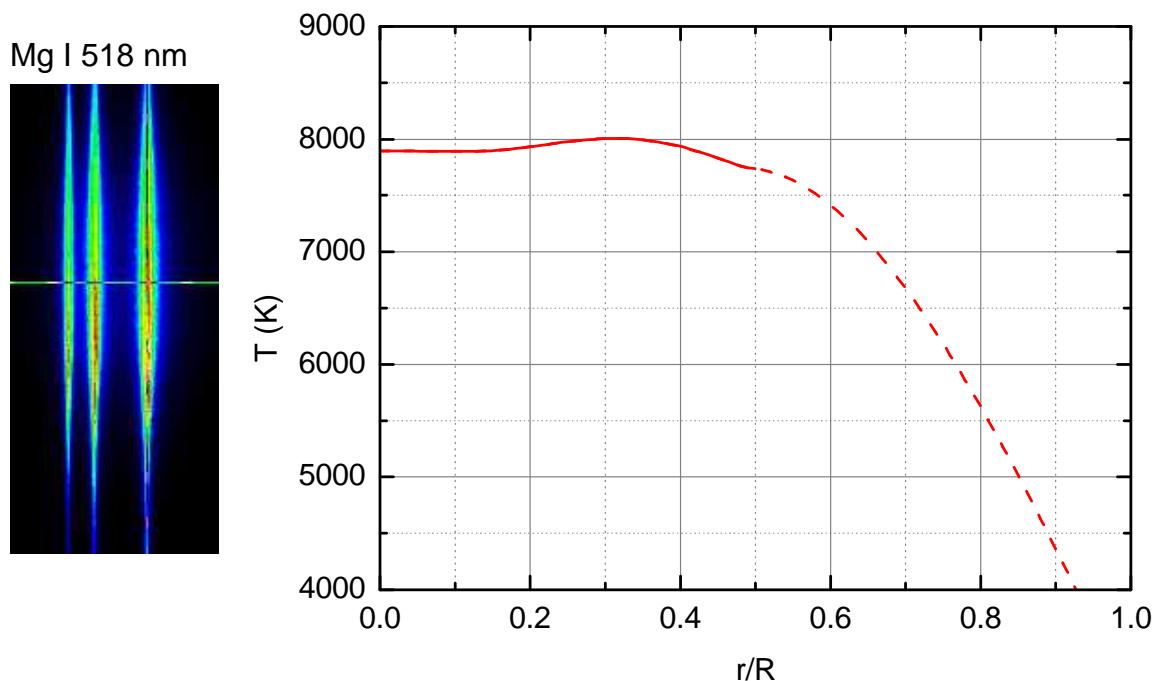


Abb. 11: Spektralaufnahme (Image) während eines Stromimpulses (links) und daraus ein berechnetes Temperaturprofil für den Schweißprozess (rechts)

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