

Einsatz optischer Sensorik für die Charakterisierung von Emissionen und Prozessstabilität beim MSG-Schweißen

G. Gött¹

¹Leibniz Institute for Plasma Science and Technology, Felix-Hausdorf-Straße 2, 17489 Greifswald, Germany
E-mail: g.goett@inp-greifswald.de

S. Mann²

²Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen Pontstrasse 49 D-52062 Aachen

R. Sharma²

U. Reisgen²

D. Uhriandt¹

Spektralselektive Diodendaten können von verschiedenen Lichtbogenschweißprozessen genutzt werden, um eine Aussage über die Qualität selbigen Prozesses zu treffen. Es werden zwei Methoden vorgestellt dies zu erreichen. Zum einen können neuronale Netze angelernt und genutzt werden, um Störungen im Prozess zu identifizieren. Zum anderen kann dies auch über eine Echtzeitphasenraumauswertung erfolgen. Diese Arten der Diagnostik sind Herstellerunabhängig und können zur Qualitätssicherung und Überwachung der Arbeitssicherheit genutzt werden.

1 Einführung

1.1 Forschungsziel

Ziel des Vorhabens war es, ein einfach zu handhabendes Werkzeug für die Kontrolle und Reduzierung von Emissionen sowie zur Überwachung der Prozessstabilität beim MSG-Schweißen zu schaffen. Mit Hilfe kostengünstiger Sensoreinheiten auf der Basis von Fotodioden unterschiedlicher spektraler Sensitivität wurde ohne eine Verbindung zur Schweißmaschine die Emission von UV-Strahlung und die Generierung von Schweißrauch im Lichtbogenprozess gemessen. Bei grober Angabe der Prozessart und des Grund- und Zusatzmaterials durch den Anwender vergleicht die Auswerteeinheit die Messergebnisse mit Schwellwerten und gibt Zeitpunkte bzw. Nahtpositionen besonderer Abweichungen in den Emissionen und in der Prozessstabilität an.

1.2 Stand der Technik

Grundsätzlich berührt das hier vorgestellte Forschungsthema zwei wesentliche Forschungsfelder in der Schweißtechnik. Bei diesen handelt es sich um den Arbeits- und Gesundheitsschutz und die Überwachung der Prozessstabilität beim Metallschutzgasschweißen. Bisherige Untersuchungen auf dem Gebiet des Arbeitsschutzes beim Schweißen umfassten primär den Bereich der Risikobewertung, also eine Einschätzung des Gefährdungspotentials, und den Bereich der Risikominimierung [1,2,3,4]. Der größte Teil der im Bereich der Risikobewertung durchgeführten Untersuchungen beschäftigte sich mit der Bestimmung der Menge und Qualität von Schweißrauch an un-, niedrig- und hochlegierten

Stählen, u. a. auch an MSG-Prozessen unter Variation verschiedener Randbedingungen [5, 6, 7]. Darüber hinaus wurde bei Dilthey et al [5] sowie Hovde et al [6] eine deutliche Abhängigkeit der Menge und auch der Qualität der Emissionen von der MSG-Verfahrensvariante ermittelt. In [7, 8, 9] wurde zudem eine Beeinflussung durch die Art des Tropfenübergangs und vor allem von den eingestellten Schweißparametern beobachtet. Andere Untersuchungen stellten auch eine Abhängigkeit von den verwendeten Schutzgasen [10] und Werkstoffen sowie Zusatzwerkstoffen [11] fest. Ziel der im AiF-Projekt 14.459B durchgeführten Untersuchungen war es, einen Überblick über das Emissionsverhalten neuer und moderner Schweißverfahren zu erhalten [8, 12]. Dabei konzentrierten sich die Arbeiten auf die Erfassung der Schweißrauchmengen. Als zusammenfassendes Ergebnis wurde hier festgehalten, dass Abhängigkeiten der Schweißrauchemissionen von der Drahtvorschubgeschwindigkeit, der Lichtbogenlänge, den Schutzgasen, den Schweißzusätzen sowie von der gewählten Verfahrensvariante existieren.

Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OstrV vom 19.07.2010. In Untersuchungen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [14] werden Messungen der UV-Exposition bei Schweißarbeiten als sehr zeit- und kostenintensiv eingeschätzt. Deshalb erfolgten Messungen (Spektrograph und Radiometer) in einem Laboraufbau exemplarisch für ausgewählte Schweißprozesse. Hier zeigten MAG-Prozesse eine besonders hohe Bestrahlungsstärke im UV-Bereich, und für alle untersuchten Prozesse steigt die Belastung mit der Stromstärke an. Unabhängig von den in jedem Fall notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen (Verwendung von Schutzkleidung und Schutzschild) wären einfache und kostengünstige Möglichkeiten von Kontrollmessungen wünschenswert. Zur Überwachung der Prozessstabilität werden beim MSG-Schweißen überwiegend die elektrischen Prozessgrößen Schweißstrom und Schweißspannung herangezogen [15, 16, 17]. Hierbei werden während des Schweißvorgangs die Mittel- und Effektivwerte der elektrischen Größen bestimmt und in einer nachfolgenden Analyse alle dynamischen Kennwerte des Prozessablaufes ermittelt und zu einer Qualitätsbeurteilung herangezogen. Die Prozessüberwachung basiert im Wesentlichen auf einem Vergleich der Messwerte mit einer vorher definierten Hüllkurve. Zur Definition der Hüllkurve müssen vorab Referenzmessungen bei optimalen Prozessbedingungen durchgeführt werden. Diese Überwachungsmethoden sind für den Kurz- und Impulslichtbogenschweißprozess nur bedingt geeignet, da das periodische Verhalten der Prozesse, beim Impulsprozess prinzipbedingt durch den Wechselstromanteil, nur grob durch die o. g. statistischen Größen abgebildet werden können. Für den Impulslichtbogenschweißprozess werden in [18] fünf Kenngrößen zur Überwachung definiert. Diese dienen dazu Kurzschlüsse und Lichtbogenunterbrechungen zu detektieren und zu bewerten. Zwei dieser Kenngrößen sind für die Detektion und Bewertung von Kurzschlüssen und kurzschlussartiger Tendenzen bestimmt. Zwei weitere Kenngrößen sind für die Erkennung und Bewertung von Lichtbogenunterbrechungen formuliert. Die letzte Kenngröße erlaubt eine Beurteilung der Spritzerintensität durch das Verhältnis der Impulsleistung mit der in der Grundphase umgesetzten Leistung. Nach [19] sind diese Schwellenwerte unabhängig von Schutzgas, Drahtdurchmesser und Stromquellencharakteristik. Zwar erlauben die Kennzahlen eine Quantifizierung der Prozessstörungen, jedoch bezogen auf relativ extreme Ereignisse. Voraussetzung für die Erfassung der elektrischen Prozessgrößen ist jedoch eine Kopplung der Messleitungen mit den stromführenden Leitungen des Schweißprozesses. Messungen direkt am Schweißprozess sind in der laufenden Produktion nur sehr eingeschränkt möglich. Beim Laserschweißen kommen zur Überwachung der Sekundärstrahlung vielfach Fotodioden, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen eine Sensitivität aufweisen, zum Einsatz. Diese Strahlung setzt sich aus der Emission des Plasmas, des Metaldampfes und der Wärmestrahlung des Schmelzbades zusammen [20]. Ursprung dieser Strahlung ist die Wechselwirkungszone der Laserstrahlung und des Werkstückes sowie der unmittelbar angrenzende Bereich. Hierbei erfassen die Fotodioden, entsprechend ihrer spektralen Sensitivität, einen fest definierten Wellenlängenbereich aus dem

Gesamtspektrum von ultraviolett bis infrarot [21, 22]. Die zeitliche Zuordnung sowie Kombination der verschiedenen Emissionen liefert beim Laserschweißen Informationen über die Prozessstabilität und Qualität der Verbindung, wie z. B. Einschweißtiefe. Die Vorteile dieser fotodiodenbasierten integral messenden Systeme liegen in der rückwirkungsfreien und berührungslosen Erfassung mit hoher Dynamik Spec03 [23].

Beim Lichtbogenschweißen wurde erstmalig für das MSG-Impulsschweißverfahren in zwei AIF-Projekten (IGF Nr. 14607 BG – OptiSpec, IGF Nr. 15649 BG – OptiPuls) auf der Basis von Fotodioden in Verbindung mit einer Schweißstromquelle eine Schweißprozessregelung für das Schweißen an verschiedenen Werkstoffen entwickelt [24]. Bei diesen Forschungsprojekten wurde eine Sensorik, die Informationen über spektralselektive, breitbandige Fotosensoren aus dem Lichtspektrum des Schweißprozesses gewinnt, entwickelt. Mit diesen Informationen wurde dann über eine Schnittstelle zur Schweißstromquelle eine Abschaltung der Pulsphase bei Erreichen der geforderten Energie eingeleitet. Weiterhin wurde automatisch, über eine Regelung der Pause zum nächsten Impuls, eine Synchronisation der Tropfenablösung mit der Pulsfrequenz sichergestellt [24]. Grundlagenuntersuchungen in [25] an MSG-Schweißprozessen mit spektralselektiven Dioden zur Erfassung der Metaldampf- und Argonemissionen sowie Untersuchungen des INP-Greifswald mit der Optischen Emissionsspektroskopie (OES) an Schweißlichtbögen [26], die zeitlich und räumlich hochauflösende spektrale Messungen gestatten, zeigen das Potenzial dieser Dioden zur Lösung der angestrebten Ziele in diesem Forschungsvorhaben auf.

2 Messaufbau und Versuche

In Abbildung 1 ist der Messaufbau dargestellt, der für die Versuche genutzt wurde. Er besteht aus dem Spektroskopiesystem im Hintergrund und dem Diodensensor. Beide optische Diagnostiken zeichnen die Emissionen vom Lichtbogen des Schweißprozesses auf. Des Weiteren werden die elektrischen Daten wie Strom und Spannung am Brenner ebenfalls aufgezeichnet.

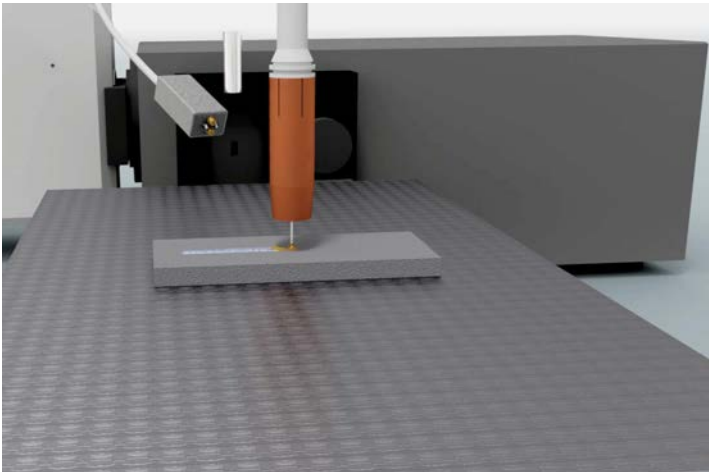


Abbildung 1. Messaufbau mit Diodensensor und Hochgeschwindigkeits-Spektroskopiesystem

Das vielseitige Diodenmesssystem (Sensor mit vier Dioden und Anschlusskabel) kann mit verschiedenen Auswerteprogramme und Überwachungsalgorithmen programmiert werden und gibt parallel die Sensordaten analog aus (Abbildung 2). Es ist für maximal vier verschiedene Spektralbereiche ausgelegt. Außerdem lassen sich interaktiv die minimalen und maximalen Grenzwerte für die beiden Dimensionen im Phasenraum einstellen und über einen Farbcode ausgeben (z. B. grün – Prozess innerhalb der Prozessgrenzen, rot – außerhalb oder auch blau – im unteren Bereich der Grenzen, gelb – im oberen Bereich). Mehr dazu in Kapitel 4.

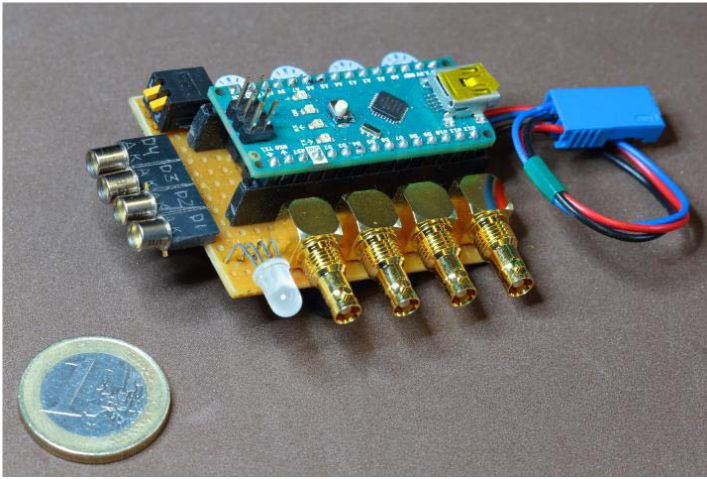


Abbildung 2. Spektralselektiver Vierkanal-Diodensensor mit Mikrokontroller-Einheit

2.1 Messung zur Prozessqualität und und Stördetektion

Für eine tiefere, robuste Identifikation der Prozessstörungen in Hinblick auf die hier untersuchte Produktqualität wurde ein Prozess gefahren (siehe Tabelle 1), der mit verschiedenen Störungen aus dem stabilen Bereich getrieben wurde. Zu den getesteten Störungen zählen eine gestörte Drahtförderung, gestörter Gasfluss, verunreinigte Blechoberfläche und Brennerfehlstellung. Diese wurden dann anhand von einer Datenanalyse mittels Neuronaler Netze und auch Mikrokontroller-Programme mittels Echtzeit-Phasenraumauswertung ausgewertet.

	Parameter/Randbedingung
Material	S235
Blechmaße	3 mm x 50 mm x 250 mm
Schweißgerät	EWM AlphaQ 551
Drahtvorschub	6 m/min
Schweißgeschwindigkeit	0,6 m/min
Schutzgas	92% Ar, 8% CO ₂
Dioden	H 440 nm, H 740 nm, E 740 nm Filter
Abtastrate	200 kHz
Prozessabstand Dioden	100 mm

Tabelle 1. Versuchsparameter und Randbedingungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Optische Signalaufzeichnung

Die Daten, die durch den spektralselektiven Diodensensor erzeugt wurden, mussten in geeigneter Form bearbeitet werden, um sie für die weitere Datenverarbeitung nutzen zu können. Hierbei konnten einfache Zeitreihen für die neuronale Auswertung genutzt werden. Für die Phasenraumanalyse musste diese jedoch noch angepasst werden (siehe Abbildung 3). Mehr dazu wird in Kapitel 4 erklärt.

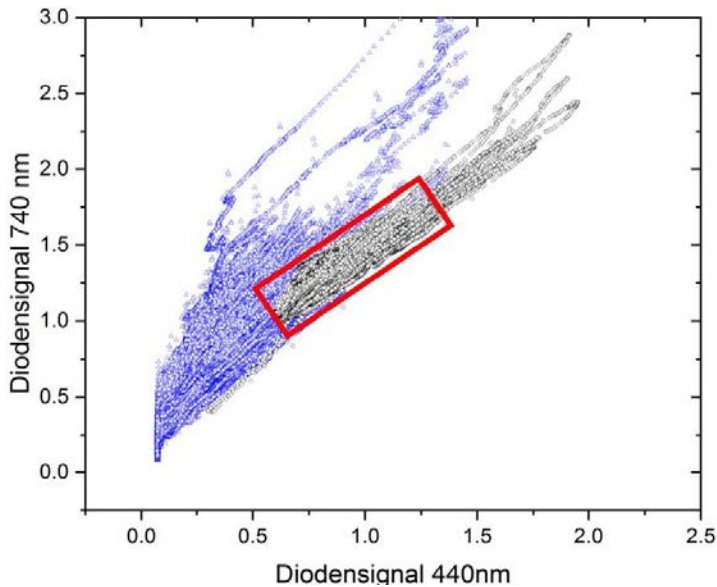


Abbildung 3. Diodensignal im Phasenraum mit stabilem Bereich im Rechteck (Störung der Drahtförderung)

Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine solche Darstellung für einen der Störfälle. Das Rechteck kennzeichnet den stabilen Bereich des Prozesses im Phasenraum. Signale außerhalb des Rechtecks gehören zum ungewünschten Prozessbereich. Die Aufzeichnungsfrequenz betrug 2 MHz was unterhalb der möglichen Abtastrate des Diodensensors lag. Auf diese Weise können selbst schnelle Variationen im Lichtbogen detektiert werden. Andere Vorgänge, wie die der Elektroden und des flüssigen Metalls finden auf deutlich längeren Zeitskalen statt.

Im folgenden Kapitel geht es um die Auswertung der gemessenen Daten.

4 Diskussion

4.1 Diodendaten

4.1.1. Auswertung mittels neuronaler Netz

In den folgenden Abschnitten wird zur Auswertung der gemessenen Zeitfunktionen ein Ansatz über künstliche neuronale Netze gewählt. Dabei werden zunächst die Diodendaten in Form von signifikanten Merkmalen aggregiert und dann der Zielgröße, in diesem Fall den Störungsklassen gegenübergestellt. In diesem Kontext soll nicht nur untersucht werden ob eine Störung vorliegt, sondern auch um welche Art der Prozessstörung es sich handelt. Zudem wurden Diodendaten und konventionelle Daten aus Schweißstrom und Schweißspannung betrachtet und verglichen. Die Versuchsreihen beziehen sich auf Verbindungsschweißungen im Überlappstoß mit den Parametern und Randbedingungen aus Tabelle 1.

Dabei wurde beispielhaft die Auswirkung verschiedener Prozessstörungen untersucht, die sich in einer unzureichenden Nahtqualität widerspiegeln. Dazu zählt das Unterbrechen der Schutzgaszufuhr, Verunreinigung auf dem Blech in Form von Fett sowie einer Brennerfehlpositionierung auf das Ober- und Unterblech. Als Eingang erhält das neuronale Netz die in Abbildung 4 beschriebenen Merkmale je Kurzschlussperiode eines oder mehrerer Messkanäle und als Ausgang die generierten Klassenlabels.

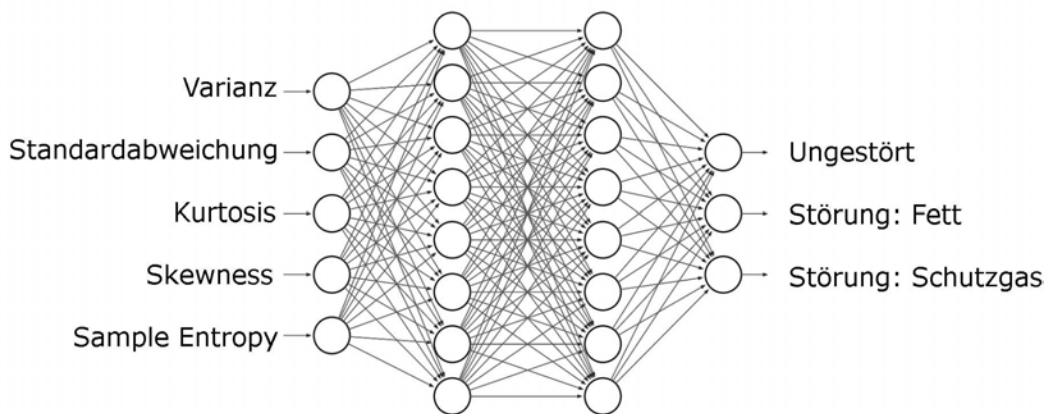


Abbildung 4. Vereinfachte Darstellung des künstlichen neuronalen Netzes

Die Auswertung des Modells mit 50 Neuronen auf einer verdeckten Schicht ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Aus der Konfusionsmatrix lässt sich schlussfolgern, dass die Schutzgas Störung in den Diodendaten deutlich von den anderen beiden Klassen abgegrenzt werden kann. Bei den Klassen „Ungestört“ und „Störung Fett“ treten häufiger Verwechslungen auf. Die Ergebnisse sind plausibel, da es sich bei der Unterbrechung der Schutzgaszufuhr um die schwerwiegendere Prozessstörung handelt.

Aus der Konfusionsmatrix in Tabelle 2 geht hervor, dass sich verschiedenen Arten der Prozessstörungen gut voneinander unterscheiden lassen. Zwischen den vier Prozessstörungen kommt es kaum zu Verwechslung. Von insgesamt 1062 richtig erkannten Störungen, wurden insgesamt 1055 der richtigen Art zugeordnet, was einer Genauigkeit von 99,3% entspricht. Falls eine Störung erkannt wird, kann also mit hoher Sicherheit auch die Art der Störung bestimmt werden.

Tatsächliche Klassen	Modell Ausgabe				
	Referenz	Fett	Schutzgas	Unterblech	Oberblech
Referenz	569				
Fett	18				
Schutzgas	0				
Unterblech	45				
Oberblech	10				

Tabelle 2. Generalisationstest – Gemeinsame Betrachtung

Wie bereits in der getrennten Betrachtung der Prozessstörungen in den vorangegangenen Kapiteln, finden die meisten Verwechslungen zwischen Anomalien und ungestörten Lichtbögen statt. Darüber hinaus lässt sich aus Generalisierungstests folgen, dass sich die unterschiedlichen Arten der Anomalien nicht gleich gut detektieren lassen. Die Schutzgasstörung lässt sich dabei in den Testdaten

am besten erkennen (fehlerfrei in Tabelle 2). Das Unterblech wurde im Vergleich zum Oberblech deutlich schlechter erkannt, was auf eine weniger starke Veränderung des Schweißprozesses auf dem Oberblech zurückzuführen ist. Die Erkennung der Störung durch mangelndes Schutzgas und Verunreinigungen ist zudem in Abbildung 5 und Abbildung 6 visualisiert. Dabei wird sichtbar, dass die Erkennung der Schutzgasstörung sicherer als die Verunreinigung des Bleches identifiziert wird. Die Falschaussagen für die Erkennung der Verunreinigungen sind jedoch vornehmlich vereinzelte Identifikationen von Verunreinigungen bei tatsächlich ungestörtem Prozess. Das Modell schlägt somit eher zu häufig an als zu wenig, was bei einer konservativen Fehlererkennung vorteilhaft ist. Insgesamt treten die Fehlinterpretationen nur vereinzelt auf und lassen sich mit einem Schwellwert über eine Mindestanzahl erkannter Störungen leicht herausfiltern.

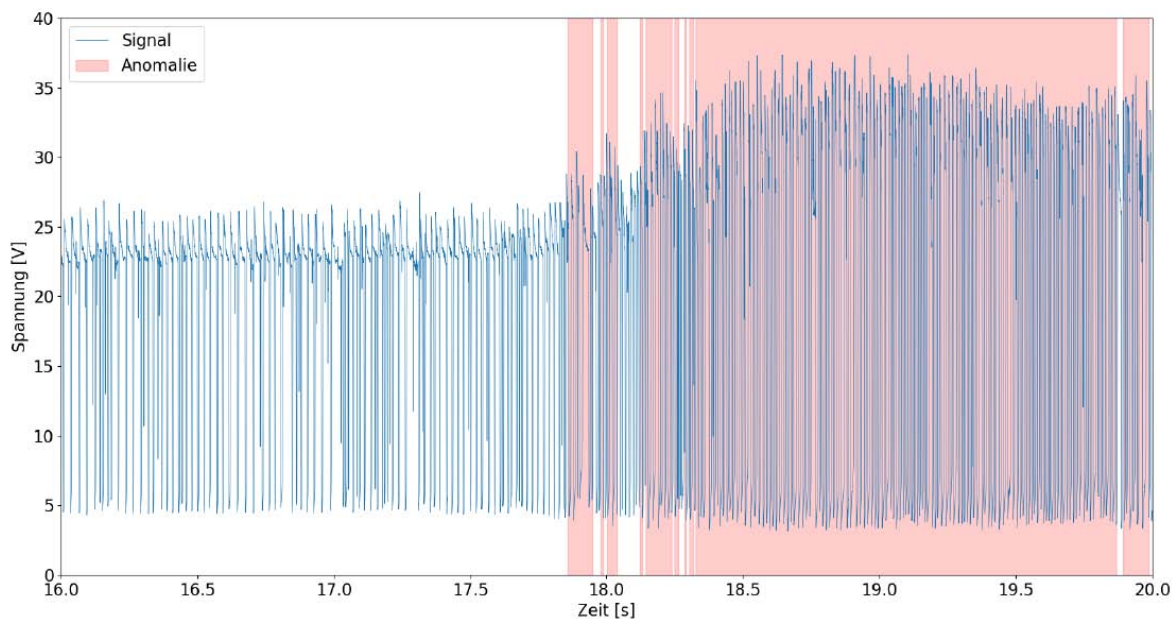


Abbildung 5. Generalisationstest Schutzgas (Erkannte Störungen sind rot markiert)

Abgesehen von den grundlegenden Unterschieden zwischen optischer Messung und der konventionellen Erfassung elektrischer Größen des Schweißprozesses soll im Folgenden die Eignung beider Datenquellen zur Identifikation von Störungen verglichen werden. Dazu wurden in Tabelle 3 Modellgütekriterien (F1-Score) aufgelistet, die mit Verschiedenen Datenquellen und Kombinationen erzielt werden konnten.

Die Nutzung aller Diodendaten erzielt im Vergleich zu der Nutzung von Schweißstrom und Schweißspannung eine höhere Modellgüte. Die einzelnen Dioden für sich erzielen jedoch eine geringere Modellgüte. Die besten Ergebnisse erzielt jedoch die gemeinsame Verwendung aller Daten mit einem F1-Score von 0,989. Abschließend kann festgestellt werden, dass sich die hier betrachteten Prozessstörungen mit neuronalen Netzen mit einer Wahrscheinlichkeit über 90% erkennen lassen. Dabei konnte nicht nur bestimmt werden ob eine Störung vorliegt, sondern auch welche. Die Diodendaten erzielten im direkten Vergleich mit konventionellen Strom- und Spannungsdaten bessere Ergebnisse. Dazu muss jedoch erwähnt werden, dass die Schweißspannung direkt zwischen Schweißbrenner und Werkstück abgegriffen wurde und nicht wie sonst üblich, an den Klemmen des Schlauchpakets bzw. Massekabel am Schweißgerät. Die Ergebnisse sollten somit unter industrienahen Bedingungen noch deutlicher zugunsten der Diodendaten ausfallen. Abgesehen davon, konnten die Diodendaten in der Klassifizierung von Prozessstörungen zusätzlich zu Prozessdaten aus Schweißstrom und Schweißspannung genutzt werden um die Identifikation von Prozessstörungen zu verbessern.

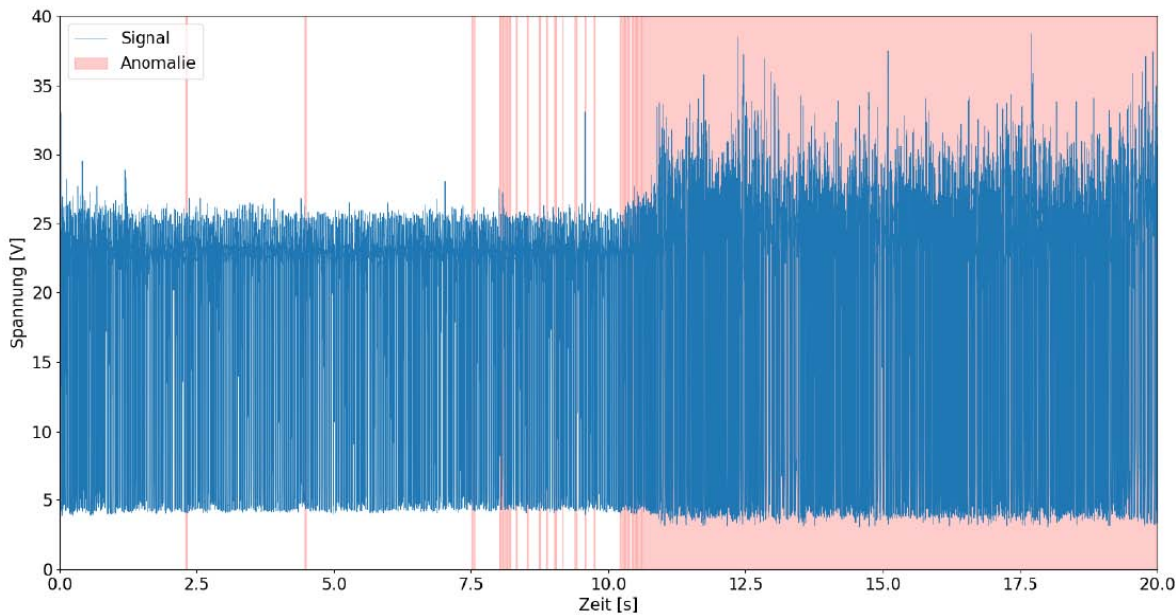


Abbildung 6. Generalisationstest Fett (Erkannte Störungen sind rot markiert)

	U & I	440nm	740 nm	740 nm mit Filter	Alle Dioden
U & I	0,941	0,963	0,971	0,945	0,989
440 nm		0,887	0,913	0,923	
740 nm			0,856	0,927	
740 nm mit Filter				0,807	
Alle Dioden					0,963

Tabelle 3. Modellgüte (F1-Score) zu den Prozessdatenkombinationen

4.1.2 Phasenraumanalyse

Bei der Phasenraumdarstellung werden die Signale nicht wie bei der Zeitreihe in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, sondern im Verhältnis zueinander. Das bedeutet, dass für jeden Zeitpunkt das Signal der 740-Diode auf der y-Achse zusammen mit dem 440-Diodensignal auf der x-Achse dargestellt wird.

Ein ergänzender Weg die Diodensignale zu analysieren und auszuwerten ist die Phasenraumanalyse. Bei dieser Methode werden geeignete Signale in Beziehung zueinander dargestellt, statt ihres zeitlichen Verlaufes. Dadurch werden die Abweichungen in der Phase zueinander deutlich. Stellt man zwei identische Signale im Phasenraum dar, so erhält man eine Diagonale ähnlich wie bei der Funktion $y(x) = x$. Es wird deutlich, dass solche Signale keine Phaseninformationen enthalten. Unterscheiden sich die Signale aber in ihrem Phasenanteil, können diese in einer solchen Darstellung deutlich herausgestellt werden. Es entsteht eine Darstellung, wie sie z. B. in Abbildung 3 zu sehen ist. Hier ist ein Beispielprozess dargestellt, der anfangs ungestört lief (schwarzer Graph) und in dem im Verlauf eine Störung (blauer Graph) provoziert wurde. Diese Störung führt zu einer Änderung des Phasenverhältnisses, durch eine Änderung sowohl in der Phase als auch in der Amplitude der Signale. Das rote Rechteck begrenzt in diesem Fall den gewünschten, stabilen Prozessverlauf ein. Allerdings

muss dieses Rechteck gedreht dargestellt werden. Der Phasenraum kann aber transformiert werden, in dem man einen Signalanteil mit Bezug zur Amplitude des anderen Signals darstellt. Dies kann durch eine einfache lineare Formel erfolgen: $f(s_2) = s_1 - s_2 * k$, wobei s_1 und s_2 die beiden darzustellenden Signale sind und k ein Korrekturfaktor, der bei amplitudengleichen Signalen $k = 1$ betragen kann. Das führt dazu, dass sich der Phasenraum der Signale derart verschiebt, so dass z. B. aus der Diagonale $y(x) = x$ eine horizontale Linie wird und die Phasenraumdarstellung aus unserem Beispiel sich zu Abbildung 7 verändert.

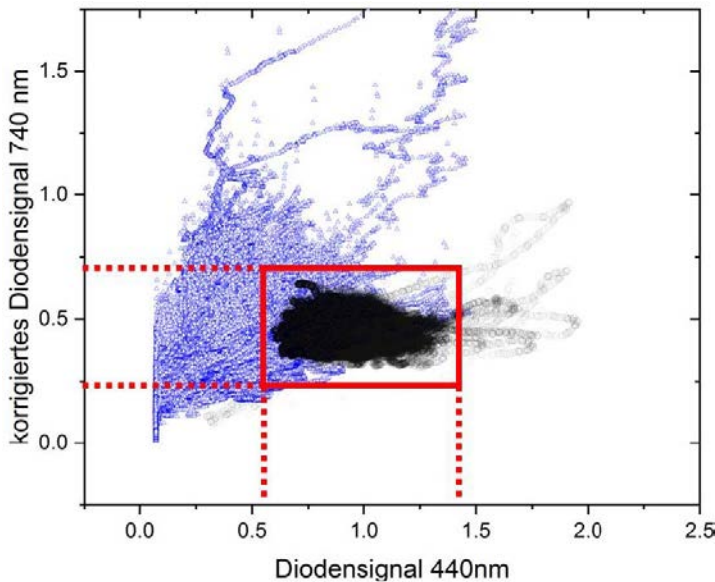


Abbildung 7. Korrigiertes Diodensignal im Phasenraum mit stabilem Bereich im gedrehten Rechteck (Störung der Drahtförderung)

Der Vorteil einer solchen Transformation ist, dass sie zum einen durch einen Mikrokontroller sehr schnell durchgeführt werden kann und zum anderen sich das schräge Rechteck aus Abbildung 3 zu dem achsenparallelen Rechteck in Abbildung 7 verändert. Diese Grenzen des Rechteckes und damit die stabilen Prozessgrenzen lassen sich danach in einem weiteren Schritt mittels eines Mikrokontrollers in Echtzeit analysieren lassen. Der Vorteil generell, ein solches System zu verwenden ist, dass es sich an jedem bestehenden Aufbau oder Herstellungsprozess verwenden lässt, unabhängig von den verwendeten Geräten oder Stromquellen. Der Sensor ist so klein, dass er sich sogar in einen Schweißhelm integrieren ließe. Außerdem lassen sich Störungen darstellen, die nicht immer mittels der Auswertung von elektrischen Signalen zu detektieren sind. Abbildungen 10 und fg:Vergl-Opt zeigen die Wirkung einer kurzen Störung im Drahtvorschub auf die elektrischen Daten und den Diodensensor mit Phasenraumanalyse im Vergleich.

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Prozessanalyse-Werkzeug

Mit dem zuvor vorgestellten Diodensystem lassen sich Diodensignale direkt am Smartphone über den Mikrofonanschluss am Klinkenstecker erfassen (siehe Abbildung 8). Akustische Signale werden für den hörbaren Bereich bis 20 kHz ausreichend hoch abgetastet, um eine Vielzahl der beschriebenen Prozessmerkmale erfassen zu können. Mit dem mobilen Prozessanalyse Werkzeug lassen sich somit Informationen zur Prozessstabilität oder Schweißrauchemission direkt auf dem Handy darstellen. Mit einer Analyse-App ließen sich zunächst Diodendaten erfassen und dann mit Metadaten, wie dem

verwendeten Schutzgas ergänzen. Aus diesen Informationen können Kenngrößen und Modelle berechnet werden, die eine Aussage über Schweißrauchemission machen. So kann der Anwender den Prozess ohne aufwändige Messtechnik interpretieren und optimieren.

5.2 Prozess-Monitor

Aufgrund Ihrer geringen Bauform lassen sich die verwendeten Diodensysteme zudem unkompliziert in Schweißhelme integrieren (Abbildung 8). Der Schweißer wird naturgemäß immer optischen Kontakt zum Schweißlichtbogen haben, sodass auch die Erfassung des Lichtbogens über Dioden im Schweißhelm sichergestellt werden kann. So kann bei der Verwendung der in Kapitel 2.1 vorgestellten Modelle dem Schweißer direkt eine Angabe zur Schweißrauchemission im Schweißhelm sichtbar gemacht werden. Zudem lassen sich bereits aus einfachen Informationen wie der Schweißzeit oder der Prozessstabilität mit einfacher Rechenhardware bestimmen und in einem „smarten Schweißhelm“ vorhalten. Diese Informationen können dann, wie die Pulsdaten bei einer Smartwatch, kabellos über Bluetooth mit dem Smartphone synchronisiert, weiterverarbeitet und dargestellt werden.



Abbildung 8. Anwendungsbeispiele Mobile Prozessüberwachung und Analyse

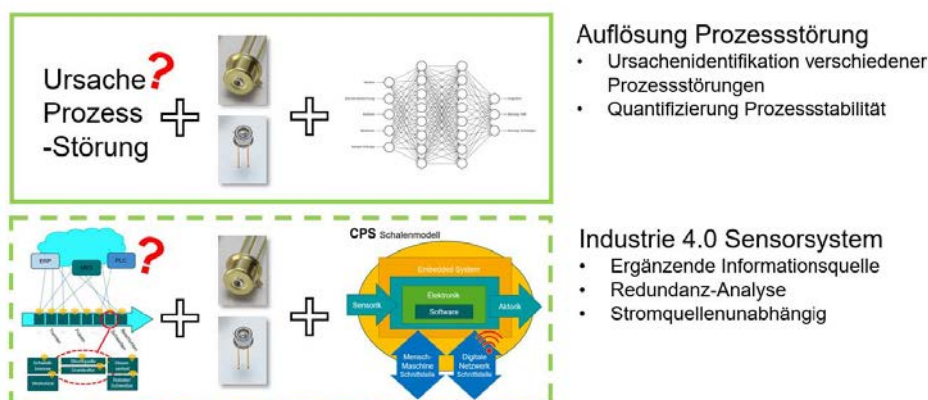


Abbildung 9. Anwendungsbeispiele Stationäre Prozessüberwachung und Analyse

6 Stationäre Prozessüberwachung und Analyse

6.1 Auflösung Prozessstörung

Für Anwendungen in der Qualitätsüberwachung sind besonders beim automatisierten Schweißen geeignete Sensorsysteme unerlässlich. Nach den zuvor vorgestellten Ergebnissen lassen sich mit Diodendaten nicht nur feststellen, ob eine Störung vorliegt, sondern auch welche. Zudem sind bereits einfache Informationen wie das Vorhandensein einer Schweißnaht wesentliche Informationen, die in einer automatisierten Fertigung nicht immer vorliegen. Mit Diodensensoren lassen sich diese

Informationen in Kombination mit den hier vorgestellten datenverarbeitenden und modellbildenden Methoden sicher ableiten.

6.2 Industrie 4.0

6.2.1 Sensorsystem

Prozessstörungen konnten in diesem Forschungsvorhaben nicht nur über Diodendaten und neuronale Netze abgebildet werden. Die Modellgüte stieg zudem, wenn konventionelle elektrische Prozessgrößen hinzugezogen wurden.

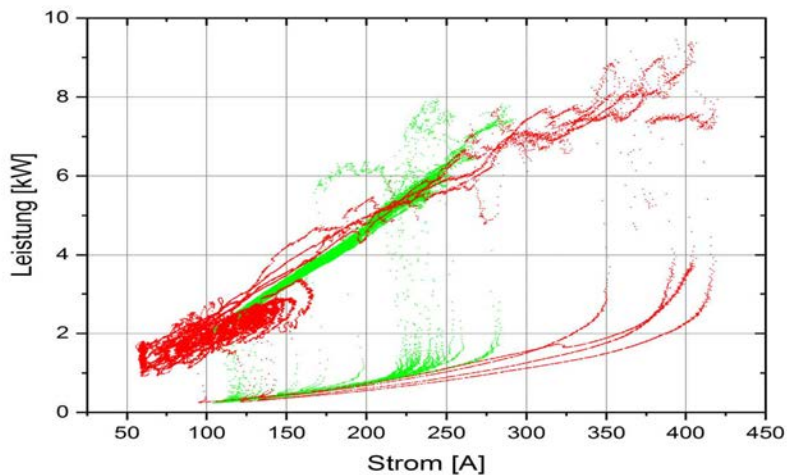


Abbildung 10. Phasenraum der elektrischen Signale mit stabilem (grün) und instabilen (rot) Prozessbereichen

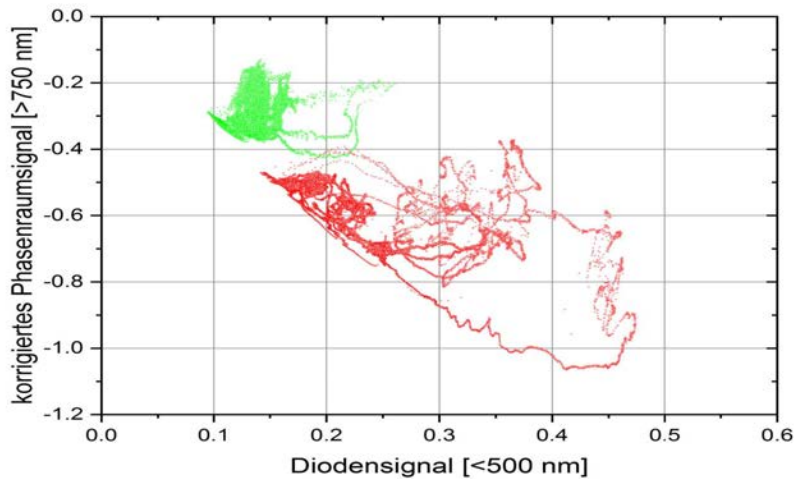


Abbildung 11. Phasenraum der optischen Signale mit stabilem (grün) und instabilen (rot) Prozessbereichen

Diodendaten konnten somit erfolgreich in einem Verbund aus Prozessdatenquellen eingesetzt werden. Ein entsprechend vernetztes System ist folglich besser in der Lage Prozesszustände zu beschreiben und zudem in der Lage sich selbst zu überprüfen. Aufgrund der Verwandtheit der Diodensignale zum Spannungsabgriff, lassen sich fehlerhafte Sensoren identifizieren, um die Sicherheit der Prozessüberwachung weiter zu steigern.

7 Schlussbemerkungen

In diesem Artikel wurde gezeigt, dass spektralselektive Diodendaten von verschiedenen Lichtbogenschweißprozessen genutzt werden können, um eine Aussage über die Qualität selbigen

Prozesses zu treffen. Es wurden zwei Methoden vorgestellt dies zu erreichen. Zum einen können neuronale Netze angelernet und genutzt werden, um Störungen im Prozess zu identifizieren. Zum anderen kann dies auch über eine Echtzeitphasenraumauswertung erfolgen. Diese Arten der Diagnostik sind Herstellerunabhängig und können zur Qualitätssicherung und Überwachung der Arbeitssicherheit genutzt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.037 N/DVS-Nummer 03.125 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Spiegel-Ciobanu, V. 2012 Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren. Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Mainz
- [2] N. N.: 2013 Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung GefStofV). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
- [3] N. N.: 2009 A.f.G. Technische Regeln für Gefahrstoffe – TRGS 528 Schweißtechnische Arbeiten., AGS-Geschäftsführung BauA
- [4] N. N.: 2010 Din EN ISO 15011-1: Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen Teil1: Bestimmung der Rauchemissionsrate beim Lichtbogenschweißen und sammeln von Rauch zur Analyse (ISO 150)., Normenausschuss Schweißtechnik (NAS) im DIN
- [5] Dilthey, U. Reisgen, U. Holzinger, K. Kress, S. Stein, L. 2008 Schweißrauchemission aus neuen Hochleistungsschweiß- und MSG-Lötprozessen. Schweißen und Schneiden, Heft 11, S.632-638
- [6] Hovde, C.A. Raynor, P.C. 2007 Effects of Voltage and Wire Feed Speed on Weld Fume Characteristics., Nr. 4 pp. 903-912
- [7] N. N.: 2008 Abschlussbericht AIF 14.459B Untersuchungen zu Schweißrauchemissionen aus neuen Hochleistungs-Schweiß- und MSG-Lötprozessen., Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH-Aachen University
- [8] Kusch, M. Hönig, T. 2008 Schweißrauchemissionsmessungen an modernen Schutzgasschweißverfahren., Schweißen und Schneiden, Bd. 60, Nr. 9
- [9] Rose, S. 2011 Entstehung und Reduzierung der Schweißrauchemissionen beim MSG-Schweißen. Ergebnisse des 1. EWM-Awards, DVS-Berichte, Bd. 275
- [10] Pires, I. Rosado, T. Costa, A. Quintino, L. 2007 Influence of GMAW shielding gas in productivity and gaseous emissions. ASTK 2007, Schweißtechnik und Fügetechnik Schlüsseltechnologien der Zukunft, Shaker Verlag J Aachen, Bd.10
- [11] Chan, W. Gunter, K. Sutherland, J. 2002 An experimental study of the fume particulate produced by the shielded metal arc welding process., Technical Paper Society of Manufacturing Engineers, Nr. MS02-201
- [12] N. N.: 2007 Abschlussbericht AIF 14.459B -Bewertung von Schweißrauchemissionen bei Anwendung moderner Schutzgasschweißverfahren., Technische Universität Chemnitz, Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik
- [13] Brand, P. Lenz, K. Reisgen, U. Kraus, T. 2013 Number of size distribution of fine and ultrafine fume particles from various welding processes., Annals of Occupational Hygiene
- [14] Schwaß, D. Wittlich, M. Schmitz, M. Siekmann, H. 2011 Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin (www.dguv.de/jifa)
- [15] Burmeister, J. 2009 Konzept der Schweißdatenüberwachung / Qualitätssicherungsgeräte Teil 1 /Schwerpunkt Mustererkennung. „Messen/Steuern/Regeln beim Lichtbogenschweißen“, Seminar der SLV-Duisburg
- [16] Kiese, M. 2009 Konzept der Schweißdatenüberwachung / Qualitätssicherungsgeräte Teil 2 /Schwerpunkt Mustererkennung. „Messen/Steuern/Regeln beim Lichtbogenschweißen“, Seminar der SLV-Duisburg
- [17] Teßmar, V., Schauder, V. 2009 Automatisierte Qualitätssicherung für das Schutzgasschweißen., Dresdener Fügetechnisches Kolloquium
- [18] Ogunbiyi, B. Nixon, J. Richardson, I. Blackman, S. 1999 Monitoring indices for assessing pulsed gas metal arc welding process., Science and Technology of Welding and Joining, 4, 209 213

- [19] Wildmann, D. Stöhr, H. 2004 Schweißnahtkontrolle Drei parallele Verfahren., Qualität und Zuverlässigkeit 49 H.4S.62 63
- [20] Müller Borhanian, J. 2005 Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserschweißen., München Herbert Utz Verlag
- [21] Eriksson, I. 2011 Optical monitoring and analysis of laser welding. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology
- [22] N. N.: 2014 plasmoprozessüberwachung advanced., Produktbeschreibung der Firma Plasmoprozessüberwachung GmbH
- [23] Specker, W., Verstraeten, R. 2003 Prozessüberwachung Einzelpulsschweißen mit Laserstrahlung an Elektronenstrahlquellen., QZ Qualität und Zuverlässigkeit 48, Nr. 1, S.46-48
- [24] Heinz, G. Hofmann, F. Schöpp, H. Gött, G. 2009, Echtzeit-Spektralregler für Impulsschweißmaschinen, Fachbeiträge, 144-150
- [25] Füssel, U.; Rose, S.; Schnick, M. 2010 Beschreibung komplexer Vorgänge im Lichtbogen durch die Kopplung von inverser und direkter Modellierung. Zwischenbericht "Lichtbogenschweißen Physik und Werkzeug"
- [26] Schöpp, H.; Uhlandt, D.; Gött, G.: Plasmaphysikalische Untersuchungen am Schweißlichtbogen. DVS, Jahrbuch Schweißtechnik, Düsseldorf: DVS Media GmbH, S. 213-225