

# Aktive Gestaltung des Tropfenübergangs beim gepulsten Metallschutzgasschweißen

R. Kozakov, M. Bredack, J. Schein

Institut für Plasmaphysik und Mathematik, EIT1, Universität der Bundeswehr München,  
85577 Neubiberg, Germany

E-Mail: [ruslan.kozakov@unibw.de](mailto:ruslan.kozakov@unibw.de)

## 1 Einführung

### 1.1 Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin, durch die aktive Regelung des Tropfenablösezeitpunktes den Schwingungszustand der Restschmelze an der Drahtelektrode auszunutzen. Damit wäre es möglich, einerseits gezielt die Tropfeneigenschaften wie z. B. deren Größe und Temperatur zu beeinflussen und andererseits auf Störfälle wie z. B. ein Nichtablösen des Tropfens nach einem Strompuls während des Schweißprozesses schnell zu reagieren. Dieses Ziel müsste mit einem dynamischen Anpassen des Strom-Zeit-Funktion erreicht werden können. Weiterhin sollte das Prozessverständnis der Tropfenablösung in einem gepulsten MSG-Prozess durch umfassende diagnostische Untersuchungen wesentlich verbessert werden.

### 1.2 Stand der Technik

Beim MSG-Prozess können verschiedene Werkstoffübergangsformen eingestellt werden. In der Praxis sind Kurz-, Impuls- sowie Sprühlichtbogen am häufigsten vertreten. Der Fokus dieses Vorhabens liegt auf einer weiteren Verbesserung des Impulslichtbogenschweißens, da dieses immer häufiger industriell genutzt wird [1]. Diese Impulslichtbogenart wird durch einen nahezu kurzschlussfreien, tropfenförmigen Materialübergang charakterisiert, der im Gegensatz zum klassischen Sprühlichtbogen auch bei niedrigen Abschmelzleistungen realisiert werden kann. Aufgrund von Prozessunregelmäßigkeiten bzw. -instabilitäten, die während des Schweißprozesses vorkommen können (z. B. unzureichende Nahtvorbereitung oder Verunreinigungen des Drahtes oder Werkstücks), lassen sich bei gleichbleibenden Prozessparametern nicht alle Tropfen in der Pulsphase gleichartig ablösen. Ebenso ist die Tropfenablösung abhängig von weiteren Einflussfaktoren, wie bspw. dem Drahtdurchmesser, der Frequenz und Form der Strompulse sowie der Bewegung der schmelzflüssigen Phase am Drahtende vor und nach der Ablösung eines Tropfens. Da auf die genannten Einflussgrößen bisher entweder keine oder nur wenig Rücksicht während der Regelung

eines MSG-Prozesses genommen wird, sind Tropfenablösezeitpunkt, Größe des Tropfens, Menge der Restschmelze und deren Bewegungszustand oft undefiniert.

In konventionell erhältlichen Schweißstromquellen für das MSG-Schweißen werden zumeist Strom-Zeit-Verläufe, bestehend aus zeitlich aufeinanderfolgender Grund-, Impuls- und Zwischenstromphase, angewendet. Diese werden von Stromquellenherstellern so gewählt, dass der hiermit verbundene Energieeintrag so hoch ist, dass ein Ablösen eines Tropfens pro Puls mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit am Ende der Pulsphase stattfindet [2], [3]. Es ist aber aufgrund von Prozessunregelmäßigkeiten möglich, dass eine Tropfenablösung innerhalb einer oder mehrerer Pulsphase(n) nicht stattfindet, so dass sich ein großer Tropfen bilden kann. Dieser kann sich bspw. sofort zu Beginn einer weiteren Pulsphase ablösen, so dass in der verbleibenden Zeit der Pulsphase weiteres Material aufgeschmolzen wird, welches im Laufe dieser Phase nicht mehr als Tropfen abgelöst werden kann. Dies kann im nachfolgenden Puls wieder zu einem größeren Tropfen führen, so dass sich das Risiko einer Kurzschlussbildung erhöht, wodurch der Prozess für eine gewisse Zeit instabil werden kann. Nachteilig ist außerdem, dass keine Vorausberechnung der Tropfengröße und des Tropfenablösezeitpunktes erfolgt. So können im Fall von Unregelmäßigkeiten die bereits bekannten Probleme auftreten, wie z. B. Kurzschlussbildung oder Einbringung von zu viel Energie. Eine aktive Kontrolle der Strom-Zeit-Funktion basierend auf dem erfassten Zustand der Restschmelze am Drahtende würde eine Möglichkeit geben, die Unregelmäßigkeiten aktiv zu detektieren und die Maßnahmen zur deren Unterdrückung vorzunehmen. Für die Vorhersage der Tropfeneigenschaften ist ein Modell der Restschmelze-Bildung und – Bewegung notwendig. Es existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, in denen Lichtbogen- und Regelmodelle für den MSG-Prozess aufgestellt wurden [4], [5], [6], [7]. So hat z. B. Thomsen in [4] Regelstrategien für die dynamische Regelung der Tropfengröße abhängig von Prozesszustand anhand von Simulationen entwickelt, jedoch keine Kopplung mit realen Schweißversuchen durchgeführt.

Ziel in diesem Forschungsvorhaben war eine aktive Gestaltung des Werkstoffübergangs in Abhängigkeit vom Prozesszustand. Dazu wurden die benötigten charakteristischen Größen und deren Zusammenhänge messtechnisch erfasst und analysiert. Ein Modell der Restschmelzeschwingung wurde aufgestellt und mit Hilfe einer Echtzeit-Mess- und Steuer-System implementiert. Es wurde versucht, die Tropfenablösung durch die Veränderung der Strom-Zeit-Funktion gemäß dem aktuellen Zustand der Schwingung der Restschmelze zu beeinflussen.

## 2. Messaufbau und Versuche

Es wurden experimentelle Untersuchungen an Schweißprozessen mit verschiedenen Schweißparametern durchgeführt. Diese Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Als

Grundwerkstoff wurde Baustahl vom Typ S355 mit einer Blechdicke von 8 mm und ein Schweißdraht G3Si1 mit dem Durchmesser 1,2 mm verwendet. Der Kontaktrohrabstand zum Werkstück (i.e. Stickout) betrug 14 mm. Als Schweißmaschinen wurden eine EWM Phoenix 521, eine EWM Phoenix alphaQ, eine EWM Titan XQ sowie eine OTC Daihen DW300+ verwendet. Weiterhin wurde Argon mit 18% CO<sub>2</sub> als Standardgas für dieses Projekt verwendet. Exemplarisch wurden auch Versuche mit anderen Gasen durchgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Parameter

Gas	Vorschub, m/min				
	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
Ar + 2.5 % CO <sub>2</sub>	x		x	x	
Ar + 10 % CO <sub>2</sub>	x	x	x	x	
Ar + 18 % CO <sub>2</sub>	x	x	x	x	x

## 2.1 Messung zur Erfassung der charakteristischen Größen

Zur Ermittlung der notwendigen Zusammenhänge zwischen charakteristischen Größen der Restschmelzeschwingung wurde ein Aufbau zur Beobachtung der Schattenbilder in einem MSG-Prozess aufgebaut. Abbildung 1 zeigt den Aufbau. Die Schattenbilder wurden mit Hilfe einer LED-Beleuchtung realisiert. Der Materialübergang wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Das Verwenden von schmalbandigen Interferenzfiltern ermöglichte eine gute Ablendung der Lichtbogenstrahlung. Somit konnten Schattenbilder während einer gesamten Schweißstromperiode gewonnen werden.

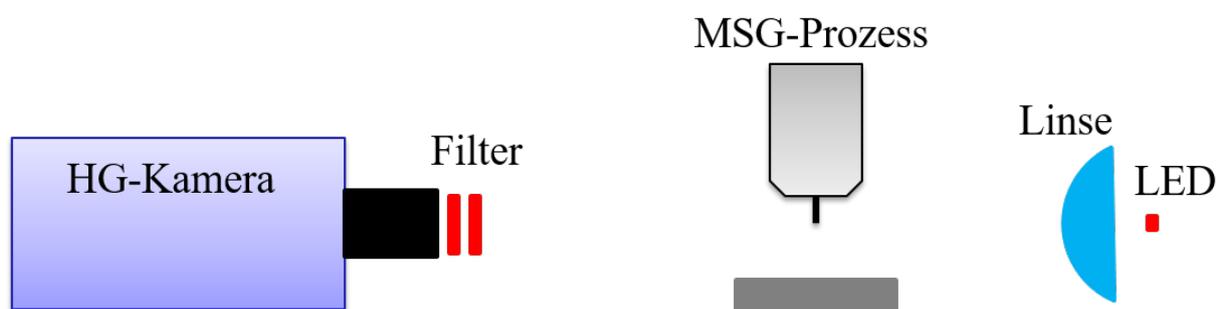


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau: Die Strahlung einer Hochleistungs-LED (5 W, 630 nm) wird mit Hilfe einer Sammellinse auf den Lichtbogen projiziert. Die Hochgeschwindigkeitskamera nimmt Bilder durch zwei Interferenzfilter auf (630 nm mit 10 nm Bandbreite und 633 nm mit 3 nm Bandbreite).

Ein Beispiel für Schattenbildaufnahmen in Grund- und Hochstromphase ist in Abbildung 2 zu sehen. Die räumliche Auflösung hierbei beträgt 75 pix/mm. Die zeitliche Auflösung wurde mit 0,2 ms ausgewählt. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass die spektralselektive Beobachtung der Schattenbilder eine sehr gute Unterdrückung der Lichtbogenstrahlung erlaubt. Damit ist eine präzise Auswertung der Restschmelze position und deren zeitlicher Verlauf möglich.

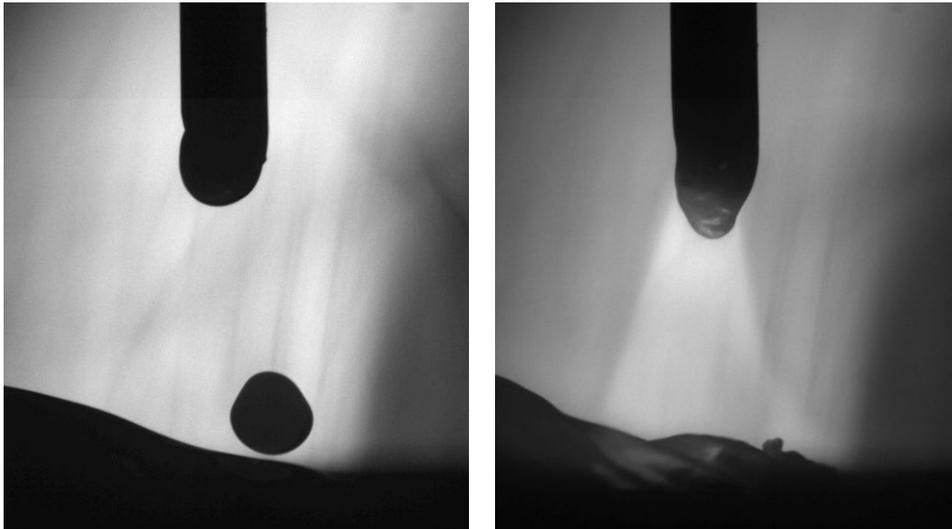


Abbildung 2: Beispielaufnahmen von Schattenbildern. Das linke Bild zeigt den MSG-Prozess in der Grundstromphase (ca. 35 A) und das rechte Bild in der Hochstromphase (ca. 450 A).

## 2.2 Messung zur Validierung der Modellvorhersagen

Für die Validierung der Modellvorhersagen und Implementierung einer aktiven Gestaltung des Tropfenübergangs wurde ein Echtzeit-Mess- und Steuer-System aufgebaut, das aus einem FPGA basierendem System cRIO von National Instruments und einer modifizierten Stromquelle, die eine externe Steuerung ermöglichte, zusammengestellt wurde. Schematisch ist der Aufbau in der Abbildung 3 dargestellt

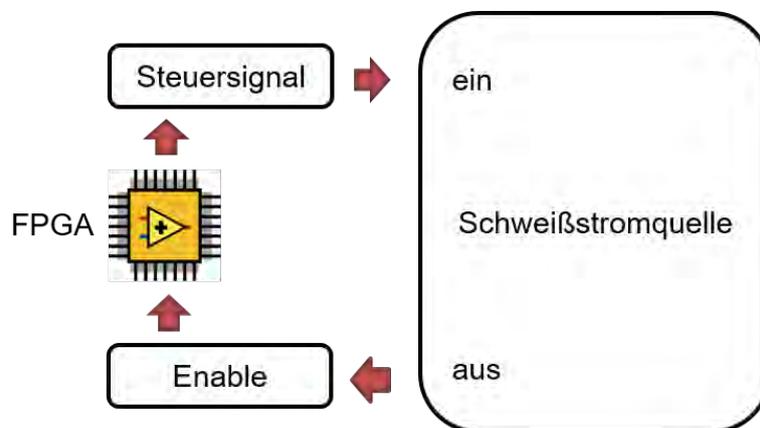


Abbildung 3: Zusammenarbeit der FPGA-Steuerung mit der Schweißstromquelle

Das entwickelte Modell der Schwingung der Restschmelze wurde in der FPGA implementiert, so dass der Schwingungszustand der Restschmelze in Echtzeit berechnet wurde. Die berechneten Signale für die Änderung der Strom-Zeit-Funktion wurden dann an eine modifizierte Schweißstromquelle gesendet. Die Modifikation erlaubt es, einen Schweißprozess in einem Wechselbetrieb zwischen Standardkennlinie und extern gesteuertem Modus durchzuführen. In bestimmten Zeitfenstern ist es damit möglich, das Einleiten des Strompulses extern zu triggern. Auf diese Weise ist es möglich, die Zeitposition jedes Strompulses individuell zu verzögern.

### 3. Modell des Materialtransfers

Das Modell besteht aus einem Lichtbogenmodell, welches durch die Gleichung

$$U_{LB} = U_0 + R_{SO}I + E_{LB}l_{LB}$$

$U_{LB}$  – messbare Lichtbogenspannung;  $U_0$  – Kathoden- u. Anodenfall;

$R_{SO}$  – Widerstand des Stickouts;  $I$  – Schweißstrom;

$E_{LB}$  – Konstante, Verhältnis zwischen LB-Länge u. Spannung;

$l_{LB}$  - Lichtbogenlänge

beschrieben wird und einer Gleichung für das Abschmelzmodell:

$$v_m = K_0 + K_1I + K_2I^2$$

$v_m$  – Abschmelzgeschwindigkeit;  $I$  – Schweißstrom;

$K_0, K_1, K_2$  – Konstanten, aus realen Schweißungen ermittelt

Bei diesem wird die freie Drahtlänge der Elektrode in  $n$  gleich große Teilvolumina eingeteilt (siehe Abbildung 4). Die Drahtelektrode wird infolge der ohmschen und der anodischen Erwärmung abgeschmolzen. Dadurch erfahren die einzelnen Segmente eine unterschiedliche Erwärmung. Die Temperaturverteilung nimmt dabei ausgehend von der Kontaktdüse über die gesamte freie Drahtlänge  $l_s$ , d. h. bis zum Ende der Elektrode zu. Sobald ein Segment  $n$  eine definierte Enthalpie bzw. Schmelztemperatur überschritten hat, wird dieses abgelöst und nicht mehr in der Berechnung berücksichtigt. Da das Modell diskret arbeitet, wird bei Überschreitung einer definierten Enthalpie bzw. Schmelztemperatur eines Segments eine gewisse Restwärme an das vorherige Segment übertragen (siehe Abbildung 4).

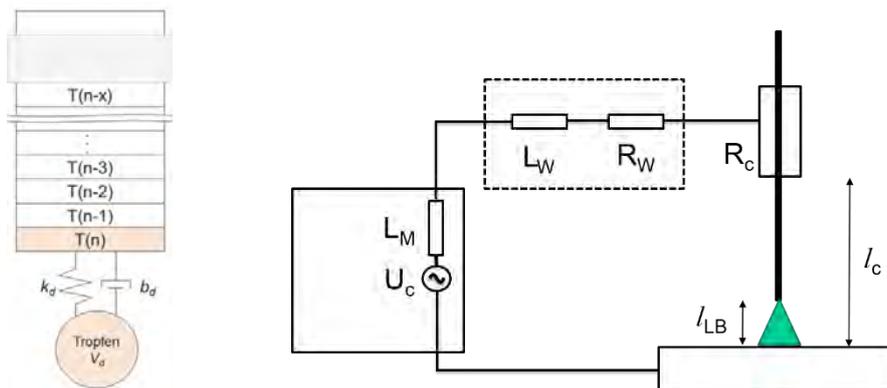


Abbildung 4: Das Modell der Stick-Out Abschmelzung ist mit einem Schwingungsmodell der Restschmelze am Drahtende erweitert (links). Die Schaltung für die Simulation des Lichtbogens (rechts).

Die zeitlichen Einflüsse, wie z. B. das Tropfenvolumen oder den Schwingungszustand der Schmelze werden durch das folgende Gleichungssystem beschrieben:

$$\frac{dl_{LB}}{dt} = v_m - v_w$$

$$\frac{dx}{dt} = v_d$$

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{1}{m_d} (-k_d x - b_d v_d + F_1 + M_R \rho_{Fe} v_w)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = M_R \rho_{Fe}$$

wo  $l_{LB}$  – Lichtbogenlänge,  $v_m$  – Abschmelzgeschwindigkeit,  $v_w$  – Drahtvorschubgeschwindigkeit,  $x$  und  $v_d$  – Position und Geschwindigkeit des Tropfens, gemessen relativ zum Drahtende,  $k_d$  – Federkonstante,  $b_d$  – Dämpferkonstante,  $m_d$  – Masse des Tropfens,  $F_1$  – Summe der einwirkende Kräfte,  $\rho_{Fe}$  – Dichte von Eisen und  $M_R$  – momentane Abschmelzrate.

Die Bilanz der auf den Tropfen wirkende Kräfte beinhaltet die Gravitationskraft, die Plasmaziehkraft und die elektromagnetische Kraft. Sie werden durch den Ausdruck  $F_1 = F_{elmag} + F_{grav} + F_{drag}$  zusammengefasst. Zusätzlich werden Kräfte, die den Einfluss der Oberflächenspannung und Viskosität beschreiben, eingeführt. Sie werden durch eine Federkonstante  $k_d$  ( $F_{spring} = k_d x$ ) und eine Dämpfungskonstante  $b_d$  ( $F_{damp} = b_d v_d$ ) definiert. Außerdem wird noch die Schubkraft durch den Drahtvorschub berücksichtigt ( $F_{schub} = M_R \rho_{Fe} v_w$ ).

Das aufgestellte Gleichungssystem kann sehr effektiv durch Runge-Kutta Verfahren gelöst werden. Dieses wurde in einem FPGA-System implementiert und erlaubte den Schwingzustand der Restschmelze realitätstreu zu modellieren.

## 4. Ergebnisse

Das Auswerten der Schattenbilder wurde mittels eines automatisierten Verfahrens durchgeführt. Hierfür wurde ein Programm entwickelt, welches automatisch räumliche Parameter wie die Position des unteren Endes der Schmelze am Draht, die Position der Grenze fest-flüssig und die Länge der flüssigen Geißel nach der Tropfenablösung bestimmt. Außerdem wurden zeitliche Parameter wie das Ablösen des Tropfens, die Dauer des Zurückziehens der Geißel und die Periode des Schweißstromes ermittelt.

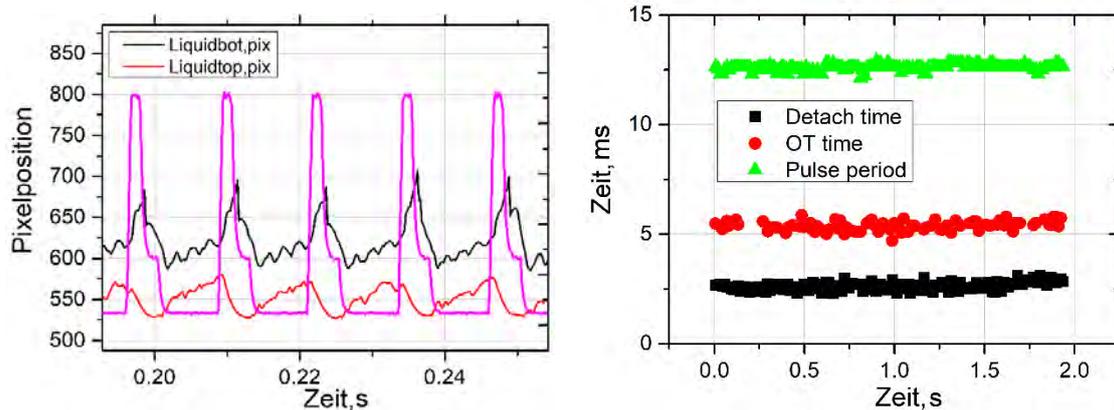


Abbildung 5: Beispiel einer bildweisen Auswertung eines Schweißversuchs bei 3 m/min 18% CO<sub>2</sub>. Links ist der Verlauf der Schwingung während der einzelnen Strompulsperioden dargestellt. Rechts ist die Auswertung der Parameter über mehrere Strompulse.

Ein Beispiel einer bildweisen Auswertung ist in der Abbildung 5 (links) dargestellt. Die gezeigten Parameter sind: Liquid bot – untere Grenze der Restschmelze – und Liquid top – Grenze fest - flüssig am Drahtende. Diese Parameter geben den Verlauf der Abschmelzprozesse während der MSG-Schweißung wieder. Mit dem Start des Strompulses steigt die fest-flüssig-Grenze nach oben (rote Kurve fällt nach unten). Gleichzeitig wird die flüssige Schmelze am Drahtende teilweise durch das steigende Volumen der Schmelze, teilweise durch elektromagnetische Kräfte nach unten gezogen (schwarze Kurve steigt nach oben). Nach einer Tropfenablösung (steiler Sprung der schwarzen Kurve kurz nach dem Strompulsende) folgt die Rückziehung der Geißel und Oszillationen der Schmelze bis zum nächsten Strompuls. Zwischen den Strompulsen folgen beide Kurven dem Drahtvorschub (rote und schwarze Kurven steigen mit dem gleichen Anstieg). Außerdem wurden die statistischen Gegebenheiten der Schweißungen ausgewertet. Die Abbildung 5 (rechts) zeigt z.B. den Verlauf der zeitlichen Parameter wie der Pulsperiode (Pulse period), Tropfenablösezeitpunkt (Detach time) und Zeit des Erreichens des ersten oberen Totpunktes durch die Restschmelze nach dem Tropfenablösung (OT time).

Ein Vergleich der Schwingung der Restschmelze bei unterschiedlichen Drahtvorschubgeschwindigkeiten ist in der Abbildung 6 dargestellt. Die Verkürzung der Periode, die mit steigenden Drahtvorschubgeschwindigkeiten einhergeht, führt zur Verkürzung

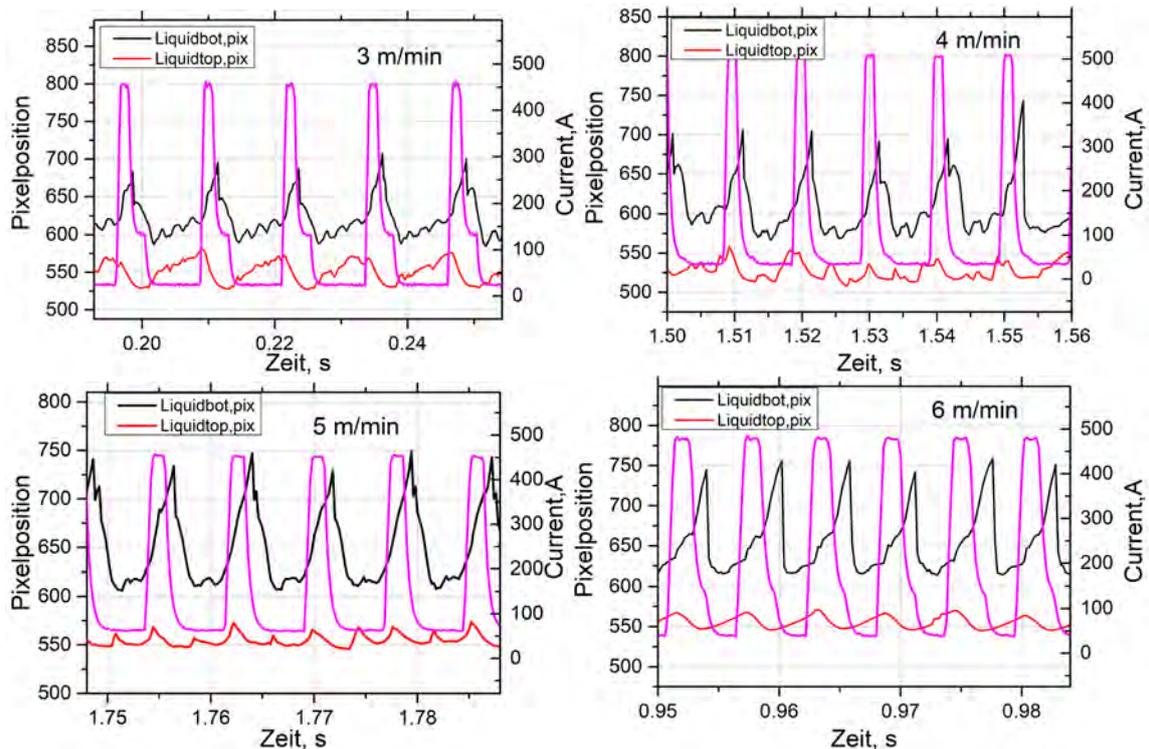


Abbildung 6: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Restschmelzeschwingung bei unterschiedlichen Drahtvorschüben im Schutzgas mit 18% CO<sub>2</sub> Anteil.

des zeitlichen Bereichs, wo Schwingungen der Restschmelze stattfinden. Die Zeit zwischen der Tropfenablösung und dem nächsten Strompuls ändert sich von etwa 10 ms bei 3 m/min bis etwa 2 ms bei 6 m/min, was anhand

Abbildung 6 verdeutlicht wird. Bei einem Drahtvorschub von 3 m/min bleibt noch ausreichend Zeit für drei volle Schwingungsperioden der Restschmelze bis zum nächsten Strompuls. Bei 4 m/min können nur noch zwei volle Schwingungen realisiert werden, bei 5 m/min 1 bis 1,5 Schwingungen und bei 6 m/min kommt der nächste Strompuls fast unmittelbar nach dem Zurückziehen der flüssigen Geißel.

Die durchgeführten Versuche erlaubten die notwendigen Parameter für das Schwingmodell zu ermitteln. Damit könnte eine qualitative und quantitative Übereinstimmung mit dem Experiment erreicht werden. Der Vergleich ist in den Abbildung 7 und Abbildung 8 für Schweißungen mit den Drahtvorschüben 3 und 6 m/min gezeigt. Für die Modellierung wurden die experimentell gemessenen Strom-Zeit-Funktionen verwendet. Die wichtigsten Parameter der Restschmelzebewegung wie die Frequenz und die Amplitude der Schwingung werden richtig wiedergegeben. Die exakten Gegebenheiten des Experimentes können aber nicht nachgebildet werden, weil das Modell eine vereinfachte Darstellung der Schmelzebewegung verwendet. So wird z.B. im Modell die Restschmelze in Form eines kugelförmigen Objektes betrachtet und die Bewegung nur eindimensional berechnet. Deswegen können manche Ereignisse, wie die Änderung der Form der Restschmelze oder deren Oszillationen in horizontalen Richtung nicht durch das Modell erfasst werden. Nichtsdestotrotz ist die Beschreibung des Experimentes durch das Modell gelungen.

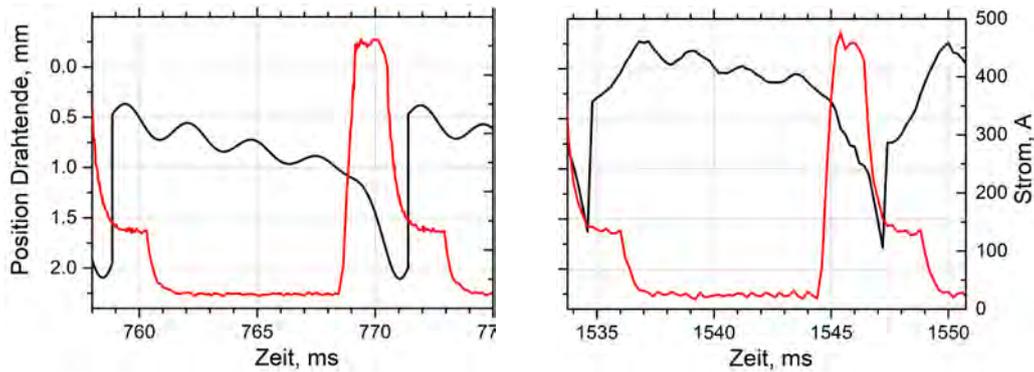


Abbildung 7: Vergleich der Restschmelzebewegung aus Modell (links) und Experiment (rechts). Die schwarze Linie zeigt die Position des unteren Endes der Restschmelze. Die rote Linie zeigt die gemessene Strom-Zeit-Funktion (Schutzgas Ar+18 % CO<sub>2</sub>, Drahtvorschub 3 m/min).

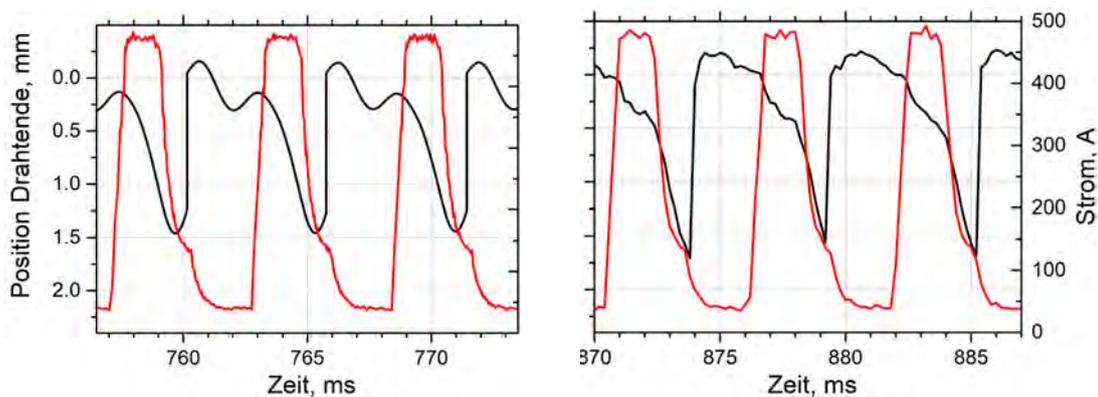


Abbildung 8: Vergleich der Restschmelzebewegung aus Modell (links) und Experiment (rechts). Die schwarze Linie zeigt die Position des unteren Endes der Restschmelze. Die rote Linie zeigt die gemessene Strom-Zeit-Funktion (Schutzgas Ar+18 % CO<sub>2</sub>, Drahtvorschub 6 m/min).

Für die Kopplung des Prozessmodells mit einer Schweißstromquelle für die aktive Gestaltung des Materialtransfers ist die Kenntnis über den aktuellen Zustand der Restschmelzeschwingung notwendig. Diese Informationen wurden aus den elektrisch gemessenen Daten des Strom- und Spannungsverlaufs am Kontaktröhre herangezogen. Als zeitlicher Referenzpunkt für das Prozessmodell bietet sich der Moment der Tropfenablösung an. Er liefert einen fest definierten Zustand des Schweißprozesses, ab dem das Modell zurückgesetzt werden kann. Die Vorhersagen des Modells können danach mit Hilfe eines Echtzeitsteuersystems umgesetzt werden. Ein ähnlicher Ansatz der Ablösungsdetektion wurde in dem IGF-Vorhaben [8] verfolgt. Dort wurde eine analoggesteuerte Stromquelle eingesetzt, welche ein störungsfreies Spannungssignal liefert. Dieses Signal wurde verwendet, um die Tropfenablösung zu detektieren. Das Spannungssignal der hier verwendeten kommerziellen invertergesteuerten Schweißstromquelle ist mit Harmonischen der Schaltfrequenz des Inverters überlagert. Resultierend ist das Spannungssignal mit dem s.g. Rippel verunreinigt. Das erschwert die Detektion der geringfügigen Spannungsänderung, die mit der Tropfenablösung verbunden ist (siehe Abbildung 9).

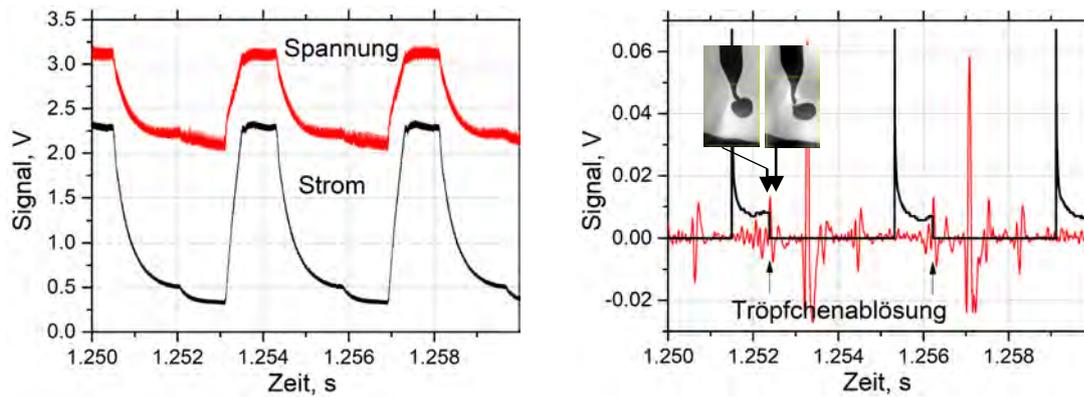


Abbildung 9: Gemessene Signale von Strom und Spannung (links) und Signal zur Detektion der Tröpfchenablösung (rechts, rote Kurve) sowie adaptiver Schwellwert (rechts, schwarze Kurve). Die Detektion der Ablösung wird mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen illustriert. Die zwei Bilder zeigen um 0.2 ms getrennte Schattenaufnahmen des Lichtbogens. In ersten hängt das Tropfen noch am Geißel und im zweiten ist es abgelöst.

Bei diesem Algorithmus wird das gefilterte Stromsignal mit einem charakteristischen Widerstand multipliziert und vom Spannungssignal abgezogen. Dabei wird eine Hilfsspannung berechnet. Um schnelle Ereignisse wie z. B. eine Tropfenablösung von der langsamen Änderung der Hilfsspannung trennen zu können, wurde ein Algorithmus aus dem weiter oben erwähnten IGF-Vorhaben [8] angewendet: die Bildung einer Differenz zwischen dem Signal selbst und seiner gefilterten Form. Auf diese Weise werden langsame Änderungen aufgehoben und nur schnelle Ereignisse bleiben erhalten. Diese Ereignisse (Spannungsschwankungen) bestehen sowohl aus nützlichen Informationen (Tropfenablösung) als auch aus Rauschsignalen. Es stellte sich heraus, dass die Tropfenablösung als ein schmaler Peak mit etwas höherer Amplitude als das Rauschsignal detektiert werden kann (rote Kurve in der Abbildung 9). Die Suche nach dem Ablöseereignis wird mit Hilfe eines adaptiven Schwellwertes durchgeführt (schwarze Kurve in der Abbildung 9 rechts). Das Vorgehen wird im rechten Teil der Abbildung 9 illustriert. Die rote Linie zeigt das berechnete Signal und die schwarze Linie zeigt den adaptiven Schwellwert.

Das Detektionsalgorithmus für die Tropfenablösung zusammen mit dem Modell der Schwingung wurden in dem Echtzeit-Mess- und Steuer-System implementiert. Das erlaubte eine Echtzeitbestimmung der Schwingzustandes der Restschmelze am Drahtende. Zusammen mit einer Schweißstromquelle, die eine externe Steuerung des Strompulses erlaubte, konnten Versuche zum gezielter Ablösung des Tropfens durchgeführt werden.

## 5. Diskussion

Zur Analyse der Ergebnisse wurden statistische Auswertungen des Ablösezeitpunktes in Abhängigkeit der Schwingphase durchgeführt. So wird die Zeit zwischen der Einleitung eines Strompulses und der Tropfenablösung in Relation mit der Phase der vorhergehenden Schwingung gesetzt. Ein Beispiel für den Drahtvorschub von 5 m/min wird in der Abbildung

10 gezeigt. Hier wurde ein Referenzprozess untersucht, bei dem keine externe Steuerung angewendet wurde. Die Markierungen OT und UT bezeichnen den oberen und unteren Totpunkt einer Schwingung der Restschmelze. Aus den in Abbildung 10 dargestellten Daten ist ersichtlich, dass die Restschmelze fast zwei volle Schwingungen nach dem Ablösen des Tropfens durchläuft, vom ersten oberen Totpunkt (OT) bis zum zweiten unteren Totpunkt (UT2), bevor ein neuer Strompuls eingeleitet wird. Nachdem ein neuer Strompuls eingeleitet wurde, löst sich bei einer Standardkennlinie der Tropfen im Durchschnitt nach  $2,7 \pm 0,5$  ms ab.

Die Zeit des Einleitens des Strompulses wird auf der x-Achse als Schwingphase in Grad angegeben. Der daraus resultierende Ablösezeitpunkt des nächsten Tropfens wird auf der y-Achse angegeben.

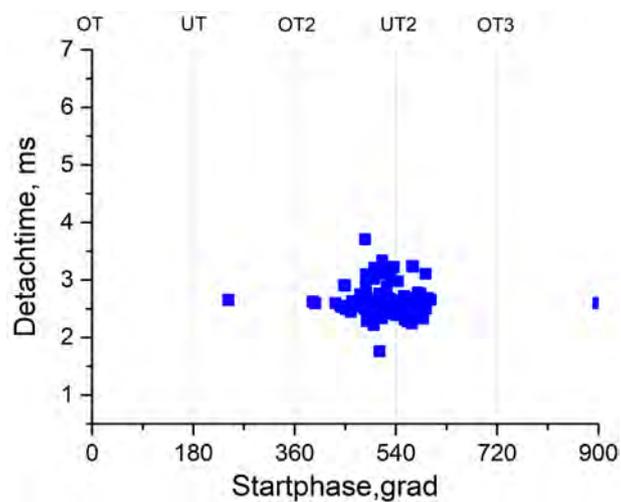
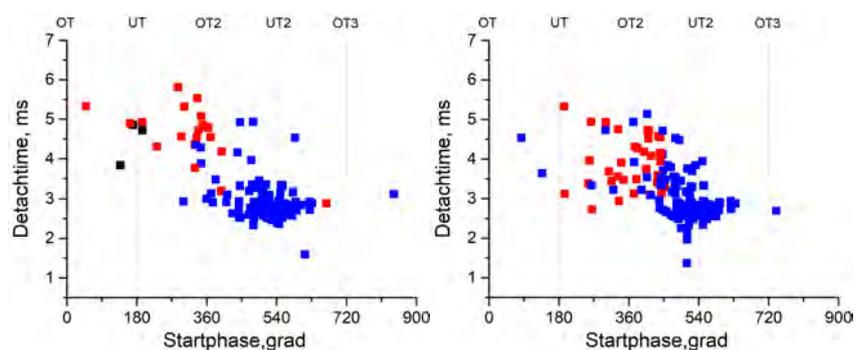


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Ablösephase des Tropfens und dem Zeitpunkt der nächsten Tropfenablösung bei einem stabil laufendem Prozess ( $DV=5$  m/min, Ar+18%  $CO_2$ ).

Abbildung 11 zeigt die Änderung der Ablösezeitpunkte, wenn der Strompuls zu unterschiedlichen Phasen der Schmelzeschwingung eingeleitet wird. Die blauen Punkte beschreiben das Geschehen während der Standardsteuerung und die roten Punkte während der externen Steuerung der Schweißmaschine. Bei diesem Experiment wurde versucht, die Strompulsposition in unterschiedliche Phasen der Schmelzeschwingung zu setzen, zwischen UT – dem ersten unteren Totpunkt und OT3 – dem dritten oberen Totpunkt.



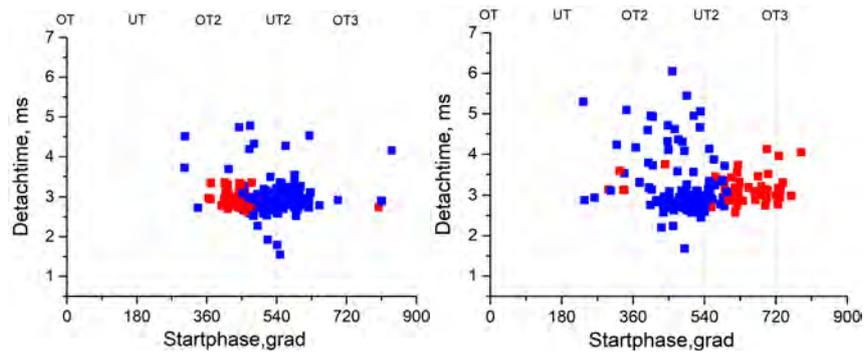


Abbildung 11: Ergebnisse der Einleitung des Strompulses zu unterschiedlichen Schwingphasen der Restschmelze für einen Drahtvorschub von 5 m/min.

Entgegen der Erwartung konnte die Tropfenablösezeit durch das Einleiten des Strompulses zu den unterschiedlichen Phasen der Restschmelzeschwingung nicht signifikant beeinflusst werden. Die Daten in Abbildung 11 zeigen, dass die Ablösezeit des nächsten Tropfens konstant bleibt. Bei einem frühen Einleiten des Strompulses, um den Bereich des ersten unteren Totpunktes (UT), kann eine Vergrößerung der Ablösezeit beobachtet werden. Das widerspricht der Erwartung, dass das Ausnutzen der Schmelzebewegung auf dem Weg nach unten zur leichteren Ablösung des Tropfens (früheren Ablösezeit) führen müsste.

Abbildung 12 zeigt das erwartete Verhalten der Tropfenablösezeit. Es war zu erwarten, dass, wenn der Strompuls während der Phase eingeleitet wird, in der sich die Schmelze auf dem Weg nach unten befindet (die Phasen um die UT-Punkte), es zu einer erleichterten (früheren) Ablösung des Tropfens führen würde. Die Phasen, in denen sich die Schmelze nach oben bewegt, müssten hingegen eine erschwerte (verspätete) Ablösung hervorrufen. Das tatsächlich gemessene Verhalten, dargestellt durch durchgezogene Linie in Abbildung 12, zeigt keinen Einfluss der Phase auf die Ablösezeit und damit auf das Ablöseverhalten.

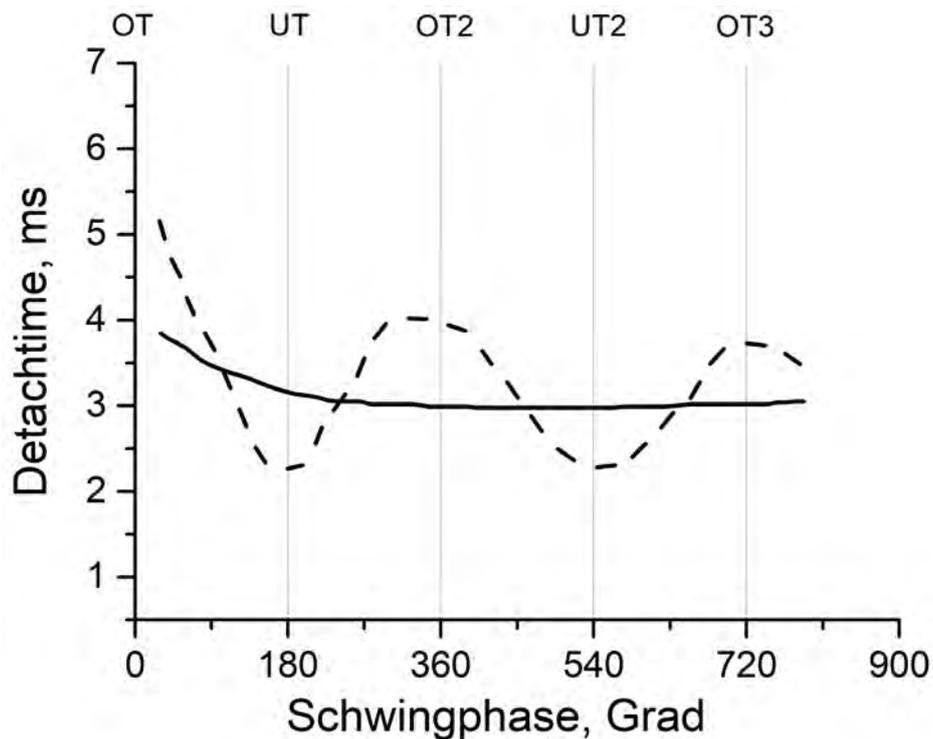


Abbildung 12: Vergleich der erwarteten (gestrichelte Linie) und festgestellten (durchgezogene Linie) Abhängigkeit des Ablöseverhaltens des Tropfens von der Schwingungsphase der Restschmelze.

Die durchgeführten Arbeiten haben es ermöglicht, die Arbeitshypothese des Projektes zu prüfen. Es ist gelungen, das Tropfenablöseereignis aus den elektrischen Signalen einer kommerziellen Schweißstromquelle zu bestimmen. Basierend auf dem aufgestellten Modell war es möglich, den Schwingzustand der Restschmelze ab der Tropfenablösung realitätsgetreu zu modellieren. Das aufgebaute Echtzeit-Mess- und Steuerungs-System zusammen mit einer modifizierten Schweißstromquelle ermöglichte es, die Strompulse gezielt synchron mit der Restschmelzebewegung zu platzieren. Wie es herausstellte hat der Schwingzustand der Restschmelze keinen entscheidenden Einfluss auf die Tropfenablösung.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.515 N/DVS-Nummer 03.130 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:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Literaturverzeichnis

- [1] B. Jaeschke, „Speed Pulse - eine produktivitäts- und effizienzsteigernde Weiterentwicklung des MIG-MAG-Impulsschweißens,“ *Schweißtechnik*, 03 2010.
- [2] N. N., SFI Aktuell, Düsseldorf: GSI SLV Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, DVS Media GmbH, 2014.
- [3] L. Baum und H. Fichter, Der Schutzgasschweißer, Teil 2: MIG-/MAG-Schweißen. Band 12, 1990.
- [4] J. Thomsen, Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding, Ph.D. Thesis, Department of Control Engineering, Aalborg University, 2004.
- [5] D. S. Naidu, S. Ozcelik und K. L. Moore, Modeling, sensing and control of gas metal arc welding, Elsevier, 2003.
- [6] P. Modenesi und R. Reis, „A model for melting rate phenomena in GMA welding,“ *Journal of material processing technology*, pp. 199-205, 2007.
- [7] Y. Wang, L. Wang und X. Lu, „Simulation of dynamic behaviour and prediction of optimal welding current for short-circuit transfer mode in GMAW,“ *ASME*, 2016.
- [8] U. Reisgen und J. Kruscha, „IGF-Vorhaben 15.872 B „Entwicklung einer ereignisorientierten Regelung auf der Basis der inversen Modellierung zur robusten Prozessführung komplexer MSG-Impulsschweißprozesse“,“ DVS, 2012.