Projekt A4

Entwicklung einer ereignisorientierten Regelung auf Basis der inversen Modellierung zur robusten Prozessführung komplexer MSG-Impulsschweißprozesse

U. Reisgen, G. Buchholz, K. Willms, M. Beckers
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH-Aachen
J. Kruscha, F. Wagner
Institut für inverse Modellierung, Hochschule Lausitz

1. Einführung

Seitens der Schweißstromquellenhersteller erfolgten für die MSG-Impulslichtbogenschweißtechnik umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung geeigneter Schweißstromquellenregelungen, deren Signalverläufe eine relativ stationäre Prozessführung garantieren. Schweißtechnisches Fachwissen vorausgesetzt, kann mit Hilfe der existierenden Impuls-Schweißstromquellentechnologie ein Großteil der potentiellen Anwendungen realisiert werden. Aufgrund des großen Anwendungsbereiches und Parameterraums des MSG-Impulsschweißprozesses ist das Generieren eines den applikationsspezifischen Anforderungen entsprechenden optimalen Prozesses jedoch häufig schwierig und verlangt sowohl umfangreiches schweißtechnisches Expertenwissen als auch zeitaufwendige empirische Versuche. Zwar stellen die anwendungsspezifisch abgestimmten Parameter für die Prozessrandbedingungen, unter denen sie generiert wurden, einen stabilen Arbeitspunkt zur Verfügung, jedoch ist unter Produktionsbedingungen, aufgrund von Änderungen der Prozessrandbedingungen, mit mehr oder minder starken Störungen zu rechnen. Dies ist beispielsweise bei Schwankungen in der Schichtdicke von Oberflächenbeschichtungen, wie bei Zinkschichten, der Fall, die die ermittelten Prozessparameter als nicht optimal erscheinen lassen. Insbesondere die im Automobilbereich häufig verwendeten feuerverzinkten Bleche weisen oftmals chargenabhängige Schwankungen der Zinkschichtdicken auf. Das beim Verschweißen abrupt verdampfende Zink führt zu Spritzerbildung und Störungen des Schweißprozesses. Die bei den o. g. Zinkschichten beschriebenen Probleme stehen stellvertretend für Schwierigkeiten, die auch bei anderen Beschichtungen, wie Primern oder Oxidhäuten auftreten. Problematisch ist ferner das zur Verfügung stehende kleine Arbeitsfenster, das schon bei geringsten Abweichungen von den Prozessrandbedingungen, wie sie besonders bei Schweißpositionen in Zwangslagen aufgrund von Gravitationseinflüssen auftreten, zu Instabilitäten des Schweißprozesses führt.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel des Forschungsvorhabens A4 die Weiterentwicklung des zeitgesteuerten Impulsprozesses zu einem ereignisgesteuerten MSG-Prozess, bei dem jede einzelne Prozessphase optimiert wird und so über ein zeitliches Mittel ein stabiler Arbeitspunkt des Prozesses bereitgestellt wird. Dies soll durch die Detektion und Evaluierung von schweißtechnisch-physikalischen Lichtbogeneffekten, Prozessereignissen und Prozessphasenzuständen erfolgen, welche die beiden Prozesshauptsegmente „Grundphase“ und „Pulsphase“ definieren und klassifizieren. Auf der Basis dieser Detektion soll eine entsprechende Regelung entwickelt werden, welche nicht einem starren Strom/Spannungs-Zeitverhalten folgt, sondern ereignisgesteuert, dynamisch und modellgestützt arbeitet und dadurch einen kurzschlussfreien, in seinen Qualitäten definierbaren Prozess ermöglicht.

2. Arbeitsbericht

Im Rahmen des ersten Antragszeitraumes soll mit Hilfe der konventionellen Impulslichtbogentechnik unter Nutzung einer umfassenden internen und externen Messsensorik eine umfangreiche Datenbasis in Form von synchronisierten Zeitreihen erstellt werden, die die Basis für die explorative Datenanalyse und inverse Modellierung bilden. Da die spätere Schweißstromquellenregelung unter LabVIEW realisiert werden soll, wurde das Messwerterfassungssystem am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik auch unter LabVIEW unter Nutzung entsprechenden Messkarten realisiert.

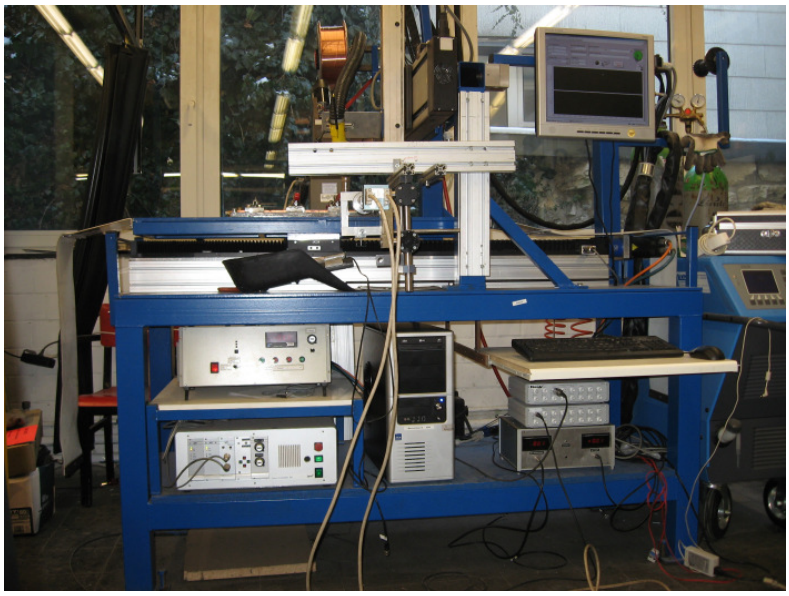

Abb. 1: Versuchsstand mit Messwerterfassungssystem

In Abb. 1 ist der Schweißversuchsstand mit dem integrierten Messwerterfassungssystem abgebildet. Neben der Aufzeichnung von den das Systemverhalten charakterisierenden primären Prozessgrößen Schweißstrom und -spannung, welche an verschiedenen Knoten des Wirkkreises Quelle-Lichtbogen bestimmt wurden, erfolgte die Erfassung und Dokumentation des Massentransportes, d. h. der Tropfenbildung und Tropfenablösung, in Form von synchronisierten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Der Messaufbau erlaubt die Erfassung der Strom- und Spannungssignale mit einer Messfrequenz von 1 MHz. Die Aufzeichnung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die viele prozessphasenbestimmende Ereignisse sowie Zustände visuell beinhalten, erfolgte je nach Bildauflösung mit einer Aufnahmerate von ca. 3000 Bildern pro Sekunde.

Weiterhin wurden am Institut für inverse Modellierung Module zur Signalvorverarbeitung (Glättungsalgorithmen, Berechnung der Ableitungen etc.) realisiert. Diese bilden die Basis für eine differenzierte, modelltechnische Analyse. Ferner wurden Methoden zur automatisierten Bildbearbeitung von Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen entwickelt. Somit wurde die Voraussetzungen für eine integrierte Bild- und Zeitreiheninformationsverarbeitung durch eine Zusammenführung mit den elektrischen und optischen Informationen geschaffen.

3. Aktuelle Ergebnisse

In Abb. 2 ist das angestrebte grundlegende Konzept zur Entwicklung und Realisierung einer ereignisorientierten Regelung von MSG-Impulsschweißprozessen dargestellt.

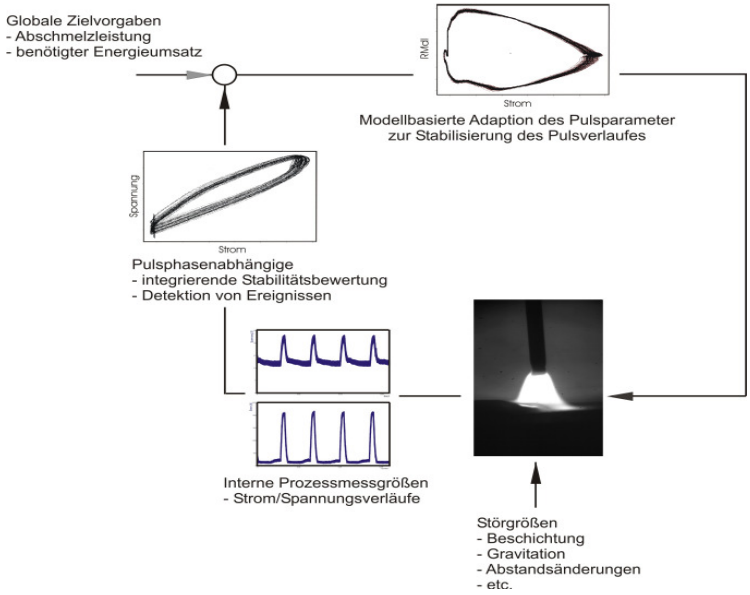

Abb. 2: Lösungskonzept für die Entwicklung einer ereignisorientierten Regelung

Als globale Zielvorgaben für die Regelung sind applikationsspezifische Größen wie Abschmelzleistung und benötigter Energieumsatz vorgesehen. Als Störgrößen, die die Prozessstabilität beeinträchtigen sind im Wesentlichen die beschriebenen Einflüsse, wie Beschichtung, Gravitation und Abstandsänderungen aufgeführt. Zwingende Voraussetzung für die Realisierung eines derartigen Lösungsansatzes ist jedoch die Detektion von relevanten Prozessereignissen und Systemzuständen mittels interner Sensorik, d.h. Erfassung und Auswertung des Strom- und Spannungsverlaufs, zur Beurteilung der aktuellen Prozesssituation. Neben der Bereitstellung von Information über relevante Prozessereignisse soll ferner auf der Basis der internen Sensorik eine Stabilitätsanalyse und -bewertung für die jeweilige Pulsphase durchgeführt werden. Bei eventuell aufgrund der Störgrößen auftretenden Instabilitäten soll der Impulsschweißprozess dann mittels einer modellbasierten Adaption der Pulsparameter wieder in einen stabilen Zustand geführt werden. Die Entwicklung und Realisierung einer derartigen neuen Prozessregelung zielt auf einen verbesserten Impulsschweißprozess, der, trotz Störeinflüsse, in jeder Prozessphase ein optimiertes Verhalten aufweist, sodass für den Endanwender nach erfolgreichem Abschluss des Forschungsprojektes ein technologisch-wirtschaftlich attraktives MSG-Verfahren zur Verfügung steht.

Auf der Basis programmiertechnischer Eigenentwicklungen konnte den besonderen Anforderungen der explorativen Datenanalyse zur Extraktion und Identifikation schweißprozessrelevanter Signalmuster entsprochen werden. In einem ersten Schritt wurden, wie in Abb. 3 dargestellt, Korrelationsanalysen der Strom/Spannungssignale mit den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt.

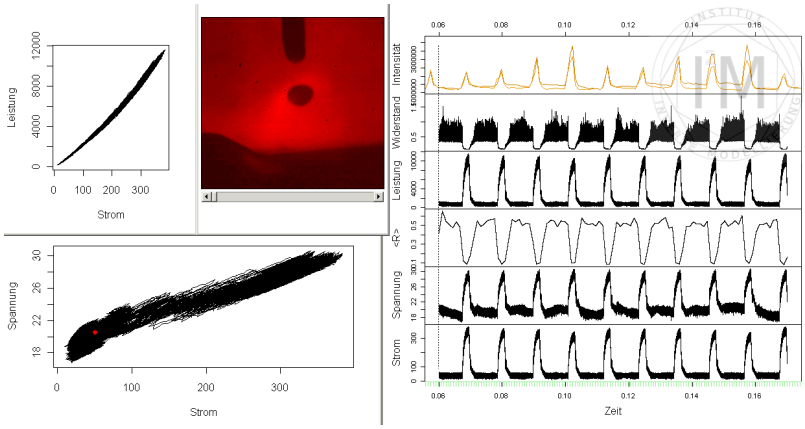

Abb. 3: Korrelation (Zeitreihen- u. Bildinformation)

Die ersten Untersuchungen zielten auf die Detektion des Ereignisses „Zeitpunktes des Tropfenüberganges“, welches maßgeblich Informationen über die Gleichmäßigkeit aber auch in Kombination mit der aktuellen elektrischen Leistung über die Qualität des Massentransportes, wie z.B. Spritzer, zur Verfügung stellt. Durch die Korrelation der Daten und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte bei der U/I-Modulation der Zeitpunkt der Tropfenablösung im Spannungssignal als kurzzeitige Spannungserhöhung eindeutig detektiert werden. Die Signaländerung konnte sowohl bei optimalen Schweißprozesseinstellungen, bei denen der Tropfenübergang möglichst leistungsarm am Ende der fallenden Pulsflanke erfolgt, sondern bei auch davon abweichenden Prozessen detektiert werden. Verantwortlich für die Signaländerung bei der Tropfenablösung ist eine Widerstandserhöhung aufgrund der Änderung des Plasmas als auch der geometrischen Veränderungen am Schweißdrahtende. In Abb. 4 sind Spannungssignale für einen Puls, die bei unterschiedlichen Prozesseinstellungen gemessen wurden, abgebildet. Die Signaländerungen aufgrund der Tropfenablösung sind durch die Kreise markiert. Die Signaländerung in der Pulsphase ist relativ markant ausgebildet, sodass hier die Detektion ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden kann. Erfolgt der Tropfenübergang in der fallenden Flanke des Pulsverlaufes gestaltet sich die Detektion schon schwieriger, da sich hierbei die Signaländerung maximal über den Bereich von zwei Invertertaktungen erstreckt und nur aufgrund der ho- hen Messfrequenz sicher erfasst werden kann.

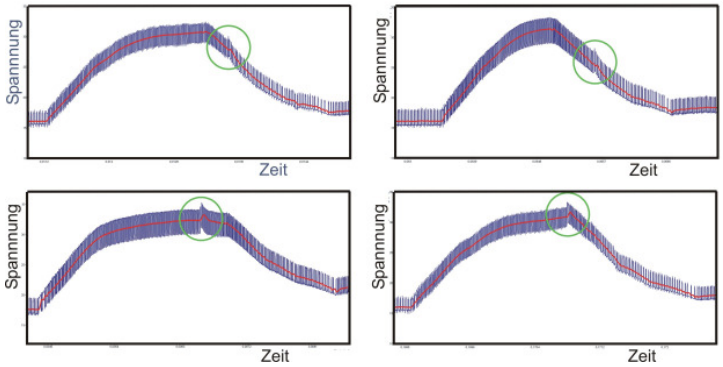

Abb. 4. Signaländerung bei der Tropfenablösung

Die Analyse der Signalverläufe zeigte, dass es aber auch möglich ist, den Tropfenübergang nachfolgend über die Schmelzbadbewegung, anhand der Variation der Grundspannung zu detektieren. Allerdings muss dieser Zusammenhang noch genauer untersucht werden, da die Schmelzbadschwingung durch mehrere sichüberlagernde Effekte beeinflusst wird.
Die Anwendung der im Rahmen der Nichtlinearen Dynamik (Chaosforschung) entwickelten Methoden der Zeitreihenanalyse eröffnet einen sehr breiten Zugang zur systematischen Analyse der Strom-, und Spannungsverläufe [1-5], (Abb. 5).

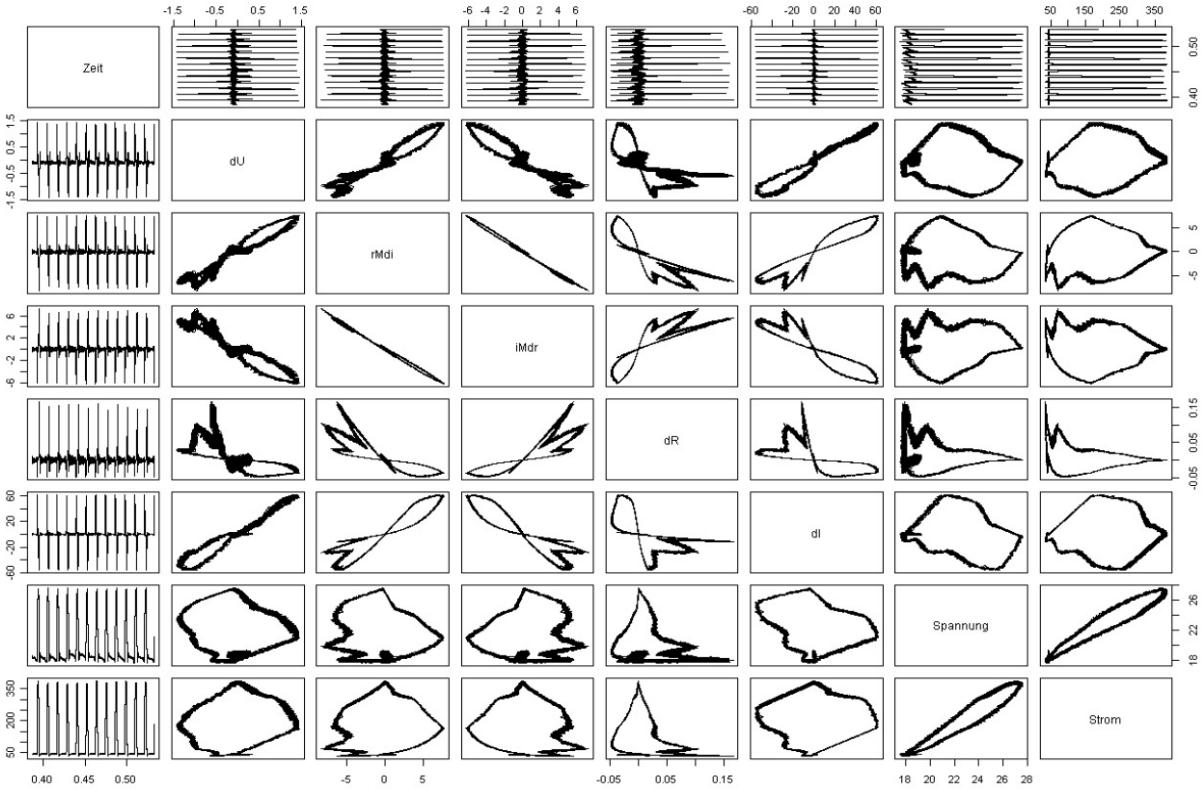

Abb. 5: Phasenraumdarstellungen unter Einbeziehung differentieller Größen

Dazu wurden umfangreiche Messreihen an verschiedenen Schweißstromquellen mit optimalen Prozesseinstellungen aufgenommen. Die aufgezeichneten transienten Prozessgrößen wurden anschließend durch geeignete numerische Operationen, wie z.B. Ableitungen, Divisionen und Multiplikationen, aufbereitet und in physikalisch relevanten Prozessphasendiagrammen dargestellt, die ein sehr aussagefähiges Instrument zum Verständnis der Prozess- und Regelungsdynamik zur Verfügung stellen (Abb. 5). Jede Zeitreihenmessung stellt eine eindimensionale Projektion einer höher dimensionalen Dynamik dar (durch Rauschen und Messfehler verfälscht). Ein topologisches Theorem [3] und eine Spezifizierung für die Zeitreihenanalyse (Takens-Theorem 1982) [2] beweisen, dass im allgemeinen – unter „günstigen Umständen“- aus einer eindimensionalen Projektion (Messung) die Gesamtdynamik des datengenerierenden Systems rekonstruiert werden kann. In diesem Sinne stellen die differentiellen Phasenraumdarstellungen in Abb. 5 Entfaltungen dar, die alle für sich in der Regel eine neue

physikalische Information über das Systemverhalten liefern. Die einzelnen differentiellen Größen stellen Bausteine für ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen dar. Im theoretischen grundlagenorientierten Teilprojektes G5 erfolgt in diesem Kontext im Rahmen der inversen Modellierung die Verallgemeinerung und Verdichtung dieser Information in der mathematischen Form von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Denn allein aus der graphischen Übersicht Abb. 5 sind bereits Grundmustertypen klassifizierbar und damit die entsprechenden funktionellen Zusammenhänge im Ansatz erkennbar.

Aber bereits auf einem anschaulichen „vormathematischen Niveau" stellen Phasenraumdarstellungen ein sehr hilfreiches Instrument zur Bewertung des Prozesses dar (Stabilitätsinseln) und zeigen Wege auf zur Verbesserung der Stabilität und Regelmäßigkeit der Gesamtprozessführung. Prozesszustandsänderungen lassen sich in den Phasenraumansichten sehr leicht detektieren und klassifizieren (Spitzen, Veränderung des Charakters der Kurve). Durch die Darstellung der Kurve des Zustandsvektors in einer zweidimensionalen Phasenraumdarstellung ist eine Identifikation von stabilen und instabilen Bereichen möglich. Ein konvergentes Zusammenlaufen der Phasenraumtrajektorien zeigt auf, dass der Prozess in diesen Phasenraumbereichen eine Stabilitätsinsel aufweist.

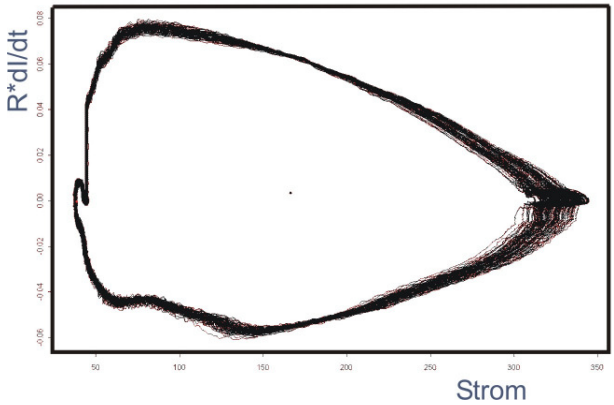

Abb.6: Darstellung des Phasenraums R*dI/dt = f(I) eines U/I-Prozesses mit sehr großem Kontaktrohrabstand und daraus resultierenden ausgeprägten Instabilitätsbereichen (R=U/I, wobei U den Spannungsabfall an der Messstrecke und I den aktuellen Stromwert darstellen).

Abb. 6 illustriert diese Zusammenhänge bei I = 50 A (Grundphase) und I ≈ 170 A (Pulsanstiegs und -abstiegsflanke) deutlich. Dem entgegen weisen Bereiche, in denen die Phasenraumkurven divergieren, also auseinanderlaufen, einen instabilitätsanfälligen Zustandsbereich auf, d. h. der Verlauf des Prozesses ist zumindest in diesen betrachteten Dimensionen nicht konvergent (I > 300 A der Pulsphase).

Die Sinnhaftigkeit der beschriebenen Stabilitätsbetrachtungsweise wird hiermit am Beispiel der Untersuchung des Einflusses von Abstandsänderungen auf den Prozessverlauf beispielhaft betrachtet. Hierbei wurde der Kontaktrohrabstand von einem typischen Wert auf den doppelten Abstand vergrößert, ohne dass eine Anpassung der Maschinenstellgrößen erfolgte. Die verwendete Schweißstromquelle nutzte hierzu eine U/I-Modulierung (geregelte Pulsspannung, geregelter Grundstrom) des Pulsverlaufes, so dass mit konstanter Pulsfrequenz gearbeitet werden konnte.

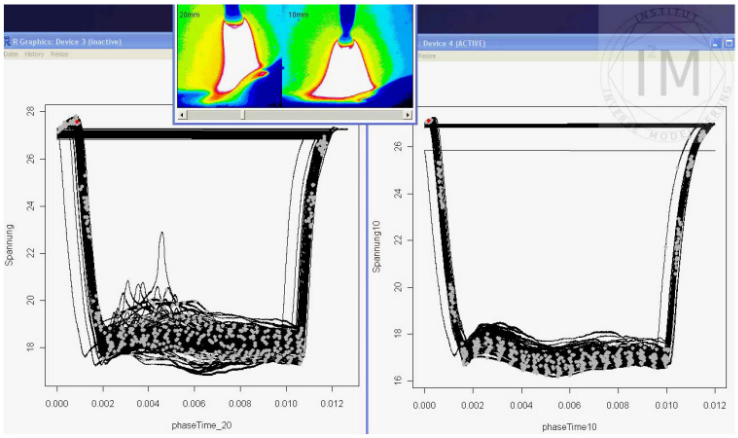

Abb. 7: Einfluss unterschiedlicher Kontaktrohrabstände bei konstanten Schweißprozess-parametern auf den Spannungsverlauf

In Abb. 7 ist dieser Einfluss auf den Schweißspannungsverlauf in Form einer Modulo-Darstellung bei unterschiedlichen Kontaktrohrabständen mit den entsprechenden bearbeiteten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dargestellt. Hierbei erfolgt in der Darstellung nach jedem Pulsdurchlauf, d. h. nach jeder Pulsperiode, ein Sprung zurück zur Ausgangsphasenlage, um die Prozessphasen in höherer zeitlicher Auflösung abzubilden. Sehr deutlich ist hier das Auseinanderlaufen des Spannungsverlaufs in der Grundphase bei vergrößertem Kontaktrohrabstand im linken Bild zu erkennen, da sich aufgrund der Modulationsart Schwankungen des Abstandes von Drahtende zu Schmelzbad in Schwankungen in der Spannung der Grundphase niederschlagen. Die U/I-Modulation führt bei dieser Verlängerung des freien Drahtendes zu einem starken Absinken des Pulsstroms, wodurch der Tropfenbildungs- und Ablösevorgang an Stabilität verliert. Wurde bei optimalem Abstand ein Tropfen pro Puls gebildet, löste sich bei vergrößertem Abstand nur alle 2–4 Pulse ein Tropfen.
Abb. 8 illustriert eine entsprechende Phasenraumanalyse anschaulich. Hier werden zwei Prozesse, optimaler Kontaktrohrabstand (rechts) und großer Kontaktrohrabstand (links), im Phasenraum R*dI/dt = f(I) gegenüber gestellt. R*dI/dt zeichnet den Teil der differentiellen Spannungsänderung dU/dt aus, der durch Stromänderungen hervorgerufen wird.

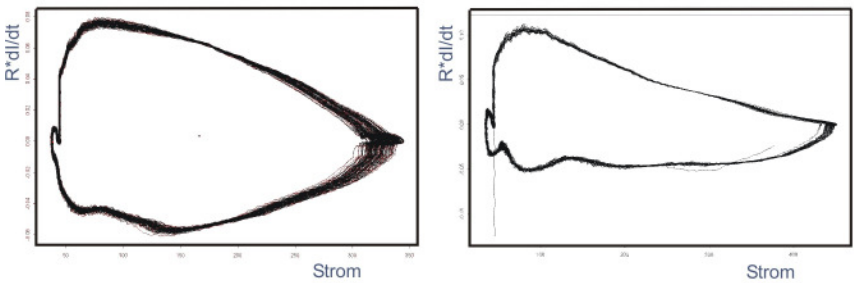

Abb 8: Darstellung des Phasenraums R*dI/dt = f(I) eines U/I-Prozesses mit optimalem (rechts) und zu großem (links) Kontaktrohrabstand

Im direkten Vergleich sind deutlich die Unterschiede im Konvergenzverhalten der Phasenraumtrajektorien zu erkennen. Besonders im Bereich hoher Stromstärken, welcher der Prozesssituation in der Pulsphase entspricht, ist im linken Bild ein divergieren zu erkennen. Dieses Auseinanderlaufen des Pulszustandes gilt es mit geeigneten integrierenden Stabilitätskriterien zu erfassen und zu qualifizieren. Neben dem divergierenden Verhalten des umlaufenden Prozesses ist die Änderung in der Morphologie der Kurven ein Kriterium für die Qualitäts- und Stabilitätsänderung des Prozesses. So findet sich das Muster bei kleinen Grundströmen (Grundphase) in beiden Zuständen ohne relevanten Unterschied wieder, die Krümmungen der Kurven im Bereich der mittleren Stromstärke (aufsteigende und absteigende Pulsflanke) verhalten sich allerdings stark gegensätzlich.
Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich, dass mit Hilfe der erarbeiteten Vorgehensweise ein erfolgversprechender Lösungsansatz zur quantitativen und qualitativen integrierten Bewertung des Schweißprozesses in jeder Pulsphase zur Verfügung steht.

4. Nächste Schritte

Die bisherigen Untersuchungen bezüglich der Phasenraumdarstellungen wurden an regelmäßigen und optimal eingestellten Schweißprozessen an einer Schweißstromquelle durchgeführt. In den nächsten Arbeiten soll untersucht werden inwieweit sich definiert geänderte Prozessrandbedingungen in den Phasenraumdiagrammen widerspiegeln. Hierzu sollen Schweißprozesse unterschiedlicher Güte eingestellt, messtechnisch erfasst und analysiert werden. Diese Untersuchungen zielen auf eine Klassifikation und Detektion schweißtechnisch relevanter Störereignisse anhand von charakteristischen Änderungen oder Instabilitäten des Prozessverhaltens mittels der Phasenraumdarstellungen.
Ein weiterer Arbeitspunkt soll die Übertragbarkeit dieses Lösungsansatzes, durch Versuche mit anderen Schweißstromquellen mit Prozesseinstellungen bei denen sich analoge schweißtechnisch-physikalische Prozessabläufe einstellen, untersuchen. Darüber hinaus sollen die unterschiedlichen Strategien zur Regelung des Impulsschweißprozesses im allgemeinen und die Regelung der Lichtbogenlänge im speziellen anhand der Verläufe in den unterschiedlichen Phasenräumen untersucht werden.
In einem AiF-Forschungsprojekt (Vorhaben-Nr. 14607 BG) [68] wurde durch die GFaI Berlin, dem IWF der TU Berlin und dem INP Greifswald ein Lösungsansatz zur Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik (Optispek) erarbeitet. Bei diesem Forschungsvorhaben wird die bevorstehende Tropfenablösung durch eine externe, spektralselektive Sensorik dadurch sichtbar gemacht, dass der zeitliche Verlauf der Emission von Metalllinien, der proportional zur Verdampfung dieser Metalle verläuft, gemessen und ausgewertet wird, um die Tropfenablösung zu steuern und den Energieeintrag zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen des Projektes untersucht werden, inwieweit diese Prozesszustände auch mit internen elektrischen Signalen durch Korrelation mit Messungen mittels Plasmadiagnostik detektiert werden können. Deshalb sind im weiteren Verlauf der Arbeiten im September und November 2009 mit dem Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) aus Greifswald und dem Labor für Plasmatechnik der Universität der Bundeswehr München gemeinschaftliche Messkampagnen geplant. Hierbei sollen synchrone Messungen von Strom-/Spannungsverläufen in Kombination mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und hochaufgelöster Plasmadiagnostik durchgeführt werden. Somit wird das Ziel verfolgt eine Vereinfachung der Plasmadiagnostik zu ermöglichen. Diese vereinfachte

Plasmadiagnostik soll danach am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik als Bestandteil des Messwerterfassungssystems integriert werden.

Literaturverzeichnis

[Kan99] Kantz, H., Nichtlineare Zeitreihenanalyse in der Physik: Möglichkeiten und Grenzen, in Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. (Klaus Mainzer -Hrsg.), Springer, 1999, pp.74-88

[Kan04] Kantz, H.; T. Schreiber, Nonlinear time series Analysis. Cambridge University Press, Sec. ed. 2004

[Gil98] Gilmore, R., Topological analysis of chaotic dynamical systems. Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 4, October 1998

[Goe07] Goecke, S.-F.; J. Kruscha, Theorie und Praxis des Elektrodenaufschmelzverhaltens und des Werkstoffübergangs im Kurzlichtbogenbereich. Große Schweißtechnische Tagung-Basel; 2007; Seiten 245-258

[Kru87] Kruscha, J., Grenzen der physikalischen Relevanz numerischer Untersuchungen der chaotischen Strahlrelaxation in einem Elektronenstrahl-Plasma System; Contrib. Plasma Phys.; Band 27, Seite 399-415, 1987

[Hei07] Heinz, G., Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik. AIF-Zwischenbericht der Forschungsstellen GFaI-Berlin – TU-Berlin IWF– INP Greifswald, 2007