

Instrumentierung und Stabilisierung von Lichtbögen zur Plasma-Schmelzreduktion

Thomas Voglhuber-Brunnmaier¹, Benjamin Lehner¹, Lukas Ecker², Jakob Stanek¹, Erwin K. Reichel³

¹ *Institut für Mikroelektronik und Mikrosensorik, Johannes Kepler Universität, Linz, Altenberger Straße 69, 4040 Linz,*

² *Institut für Regelungstechnik, Johannes Kepler Universität, Linz, Altenberger Straße 69, 4040 Linz,*

³ *Metallurgisches Kompetenzzentrum K1-met, Stahlstraße 14, 4020 Linz*

Zusammenfassung

Der Wasserstoff-Plasma-Schmelzreduktionsprozess (HPSR) stellt eine vielversprechende Technologie zur CO₂-armen Stahlproduktion dar. Instabile Lichtbogenbedingungen limitieren jedoch Energieeffizienz, Wasserstoffausnutzung und Elektrodenverschleiß. Basierend auf experimentellen Untersuchungen wird ein Zusammenhang zwischen Lichtbogenlänge und elektrischen Kenngrößen im UI-Diagramm identifiziert und zur Stabilitätsbewertung genutzt. Zur aktiven Stabilisierung wird ein schneller Stromregler auf Basis eines Tiefsetzstellers entwickelt und implementiert. Ergänzend wird ein stereoskopisches Messsystem zur hochfrequenten Rekonstruktion der Lichtbogenlänge vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen eine Korrelation der Lichtbogenlängen mit der gemessenen Lichtbogenspannung. Dies stellt den ersten Schritt in Richtung elektrisch kontrollierbarer Lichtbogendynamik dar.

Keywords: Buck-Converter, Stereoskopie, adaptiver Zustandsregler, Stahlerzeugung

1. Einführung

Der Wasserstoffplasma-Schmelzreduktionsprozess (engl. hydrogen-plasma smelting reduction, HPSR) ist einer der vielversprechendsten Ansätze in Richtung dekarbonisierter Stahlproduktion. Feinerze werden in einem Schritt reduziert und zur Abtrennung von Gangart und flüssigem Rohstahl aufgeschmolzen. Die Reduktion des Eisenerzes wird nicht durch Zugabe von Kohlenstoff, sondern durch im Lichtbogen ionisiertem Wasserstoff bewerkstelligt. Sowohl die Einbringung von Schmelzenergie als auch die Bereitstellung des Reduktionsmittels können auf diese Art vollständig durch erneuerbare Energieträger erbracht werden. Im Zielprozess werden durch hohle Graphitelektroden Eisenerz und ein Gemisch aus Argon und Wasserstoff zugeführt. Das Argon begünstigt hierbei die Plasmabildung. In der Literatur [1-3] wird ausgeführt, dass instabile Plasmabedingungen, das heißt, Fluktuationen der Lichtbogenlängen bis hin zu temporären Lichtbogenabbrissen, zu ungewöhnlich hohem Verschleiß der Graphitelektroden und zu reduzierten elektrischen Wirkungsgraden und einer schlechteren Wasserstoffausnutzung führen können. Besagte Plasmainstabilitäten ergeben sich zum einen aus der komplexen Verkopplung der thermodynamischen und

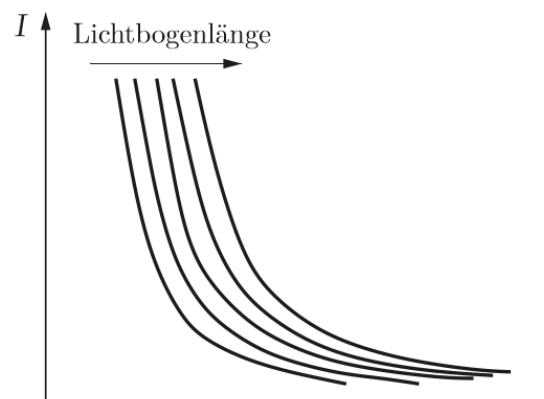


Abb. 1: Typische UI-Charakteristika von Lichtbögen unterschiedlicher Längen.

elektrischen Kräfte, aber auch aus dem Zusammenspiel der negativen differentiellen Leitfähigkeit des Lichtbogens und der Charakteristika des elektrischen Versorgungskreises. Diesem letzten Aspekt, der in der Literatur bisher weitgehend unberücksichtigt ist, wird in der Arbeit besonderes Augenmerk geschenkt. Ziel ist es verborgene Dynamiken des Lichtbogens zu erforschen und durch schnelle elektrische Intervention diesen zu stabilisieren.

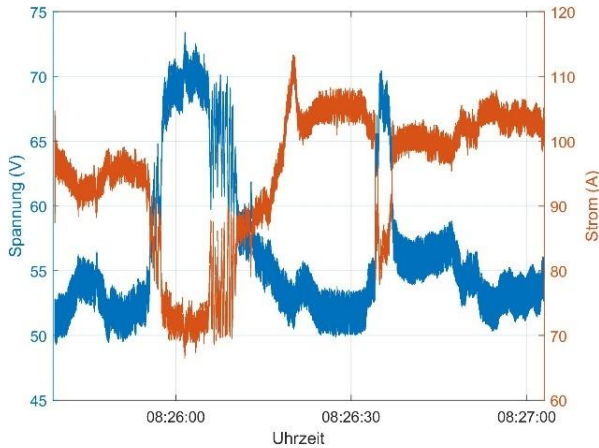


Abb. 2: Spannungs- und Strom-Rohdaten eines Lichtbogenversuchs.

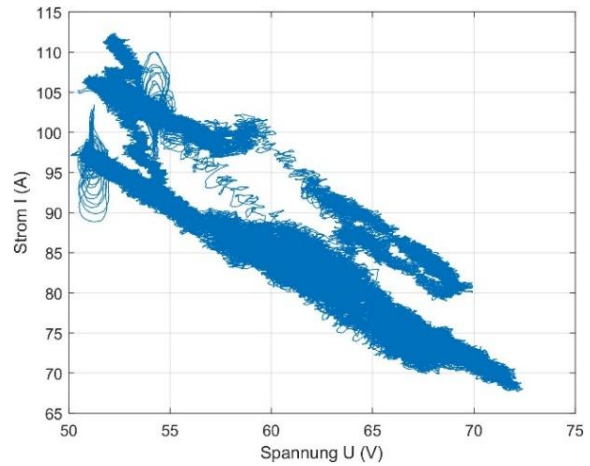


Abb. 3: UI-Darstellung der Daten in Abb. 2.

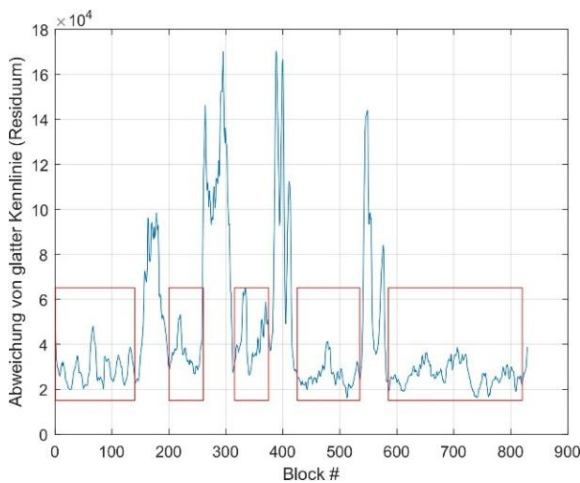


Abb. 4: Residuen der blockweisen Schätzungen von $\hat{r}_D$ und $\hat{I}_0$. (Fensterlänge 10^5 Werte = 1s, Blockversatz 1/10s). Rot umrandete Abschnitte werden ausgewertet.

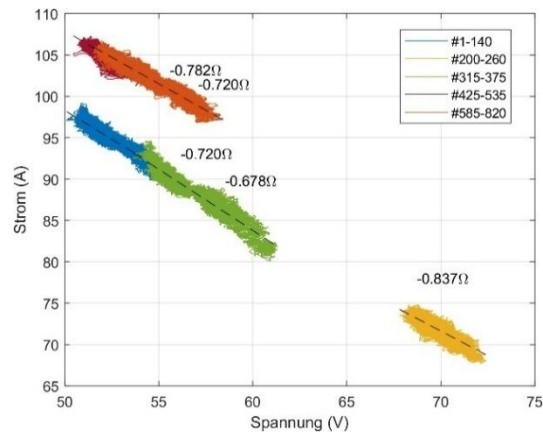


Abb. 5: Die selektierten Messdaten bilden die Lichtbogen-Kennlinien nach. Die lokalen Differenziellen Widerstände wurden individuell für die 5 in Abb. 4 gezeigten Blöcke berechnet.

Abb. 1 zeigt charakteristische Lichtbogenkennlinien unterschiedlicher Länge. Der negative differentielle Widerstand ist die Folge steigender Ionisation bei erhöhtem Leistungseintrag. Mit steigendem Strom steigt daher die Leitfähigkeit, wodurch sich der Spannungsabfall reduziert. Negative differentielle Widerstände führen potentiell zu Instabilitäten des Versorgungskreises sofern Zuleitungsinduktivitäten und Lichtbogenkapazitäten berücksichtigt werden [4]. Verlängerung des Lichtbogens bei konstant gehaltenem Strom bewirkt eine Erhöhung der Spannung. Dynamische Bogenlängenänderungen sind daher mit den UI-Daten korreliert. Abb. 2 zeigt Zeitreihen der gemessenen Spannung und des Stromes bei Versuchen an einem bestehenden Laborsystem zur Untersuchung metallurgischer Eigenschaften des Schmelzreduktionsprozesses. Die elektrischen Signale waren in

den originalen Untersuchungen nicht von Bedeutung. Der Versorgungskreis bestand aus einem thyristorgesteuerten Phasenanschnittsteller am Dreiphasennetz mit nachgeschaltetem Transformator und einem 6-Puls Gleichrichter. Der Arbeitspunkt wurde durch Einstellung des Phasenwinkels des Thyristorstellers festgelegt. Diese exemplarischen Spannungs- und Stromverläufe zeigen sich erratisch. Im zugehörigen UI-Diagramm in Abb. 3 deuten sich Abschnitte mit stabilen Lichtbögenlängen an. Zur Identifikation dieser Abschnitte wurde blockweise Schätzung des differentiellen Widerstands r_d und des (fiktiven) Kurzschlussstromes I_0 nach Gl. 1 bestimmt,

$$I = U/r_D + I_0, \quad (1)$$

$$\text{res} = \sum |I - U/\hat{r}_D - \hat{I}_0|, \quad (2)$$

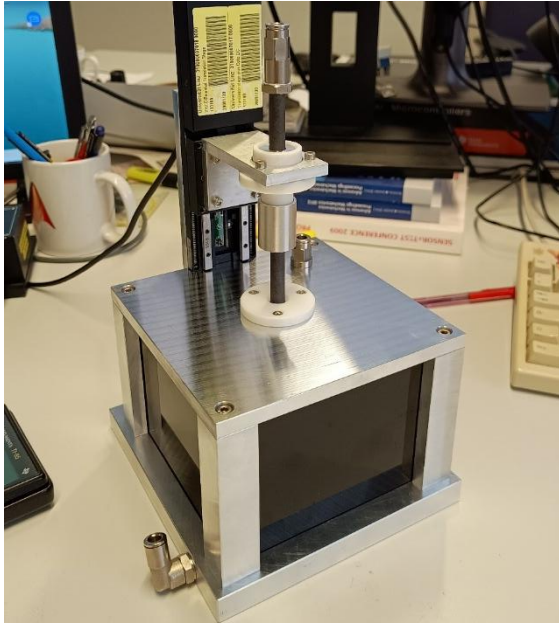


Abb. 6: Versuchsmesszelle für Lichtbogenversuche.

und die Residuen nach Gl. 2 berechnet. Bereiche mit geringen Werten deuten auf stabile Verhältnisse hin, wohingegen hohe Werte Lichtbogenübergänge anzeigen, die auf eine Änderung der Einschlagpunkte auf dem Schmelzbad oder einer Änderung des Arbeitspunktes hindeuten. Das UI-Diagramm der stabilen Abschnitte in Abb. 5 legt nahe, dass während eines Großteils des Betriebes der Lichtbogen zwischen zwei metastabilen Längen gesprungen ist und die Variationen der Zeitsignale hauptsächlich durch den instabilen Versorgungskreis hervorgerufen wurden.

1. Messzelle

Zur genauen Untersuchung der Eigenschaften des Lichtbogens wurde die Messkammer in Abb. 6 entworfen. Die vier Seiten der Kammer sind mit Schweißgläsern DIN6 der Größe 90x110mm² ausgestattet. Diese werden mittels Teflonband dicht in die Nuten der Aluminiumteile eingesetzt und bieten Schutz vor Blendung und UV-Strahlung. Die Deckelplatte beinhaltet eine wärmostabile Teflondurchführung für die Hohlelektrode die mittels Linearachse in vertikaler Richtung bewegt werden kann. Die Elektrode liegt gegen dem Aluminiumgehäuse auf negativem Potential und wird durch das Teflonelement zusätzlich elektrisch isoliert. Es ist entsprechend gestaltet, damit beim Aufziehen des Lichtbogens kein Überslag von Elektrode auf Deckelplatte entsteht. Das runde Aluminium-Element unterhalb des Elektrodenhalters in Abb. 6 ist ein Federelement. Dieses limitiert den Anpressdruck der Elektrode bei Kontakt-

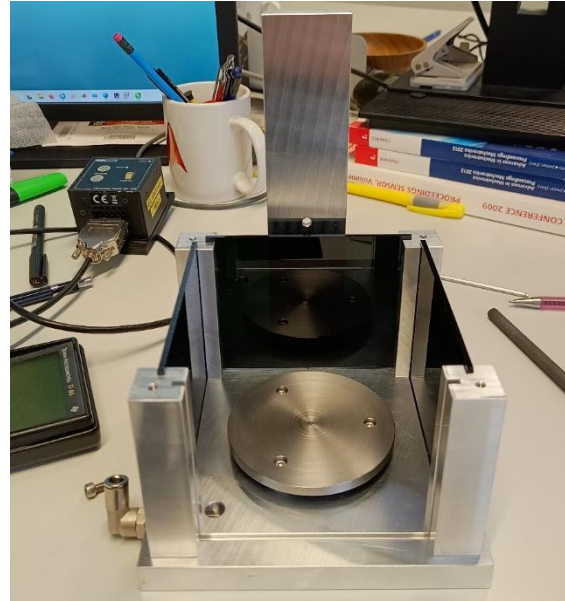
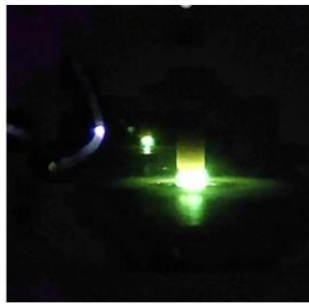


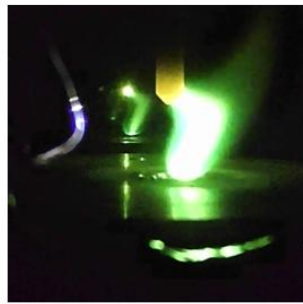
Abb. 7: Die geöffnete Messkammer.

zündung. Dies dient zum einen als mechanischer Schutz der Elektrode, wird aber auch dazu verwendet durch leichten Anpressdruck einen vergleichsweise hohen Kontaktwiderstand herzustellen der es erlaubt die Kontaktstelle vor der Plasmazündung vorzuheizen. Die Graphitelektrode hat einen Nenndurchmesser von 8mm und eine Länge von 200mm. Die Bohrung über die das Gas zugeführt werden kann, besitzt einen Durchmesser von 2mm. In den folgenden beschriebenen Versuchen wurden jedoch Vollelektroden verwendet. Bei diesen Versuchen wird das Gas über den Gasanschluss auf der Deckelplatte (links hinten in Abb. 6) oder über die Bodenplatte (rechts unten) zugeführt. Abb. 7. Zeigt die geöffnete Messkammer. Die runde Kontaktplatte besteht aus Baustahl St52 und ist mittels Keramikspacern thermisch von der Bodenplatte entkoppelt, aber über drei Schrauben M3 elektrisch mit dem Gehäuse verbunden. Erste Versuche wurden unter Verwendung des Labornetzgerätes HP6269B (Thyristorvorstufe mit nachgeschaltetem Linearregler, 45V, 50A) durchgeführt.

Das Etablieren des Lichtbogens erfolgt durch Kontaktzündung und nachfolgendem Aufziehen (siehe Abb. 8). Es zeigt sich, dass beim Verlassen der Kontaktbedingung, der zur Aufrechterhaltung des Stromes nötige sprungartige Spannungsanstieg nicht schnell genug bereitgestellt werden konnte, wodurch die Zündung nicht funktionierte.



Kurz nach Kontaktzündung



Lichtbogen tritt normal auf Elektrodenfläche aus



Längerer Lichtbogen -> höhere Leistung -> höherer Strömungsauftrieb -> Lichtbogen tritt normal auf Elektrode aber an kälterer Stelle aus (Der Strömungsauftrieb dominiert)



Frühphase der Plasmainstabilität



Plasmainstabilität kurz vor Plasmaabriss -> Starkes Flattern an Elektrode

Abb 8: Kameraaufnahmen des Lichtbogens (allerdings ohne Argoneinblasung) bei unterschiedlichen Elektrodenabständen mit herkömmlichen Labornetzgerät (45V/50A) im Konstantstrombetrieb bei 20A. Längere Lichtbögen gehen mit höheren thermischen Energien einher, welche Instabilität begünstigen. Die Plasmafluktuationen kurz vor Abriss gehen mit der starken Oszillation des Versorgungskreises einher. Der schnelle optimierte Stromsteller eliminiert diese Instabilität und erlaubt das Erreichen höherer Lichtbogenleistungen.

Durch Hinzuschalten einer Induktivität von $L = 100\text{mH}$ mit einem Serienwiderstand von $R_s = 1\Omega$ konnte dieses Problem behoben werden. Jedoch kam es im höheren Leistungsbereich zu starken Oszillationen des Lichtbogens, die vom Netzteil induziert wurden.

moduliertes (PWM) Signal (Tastverhältnis $p = [0 \dots 1]$). Die Ausgangsspannung U_A beträgt bei Eingangsspannung U_B (unter Vernachlässigung der Diodenspannung und des Basis-Kollektor Abfalls des IGBT)

$$U_A = p U_B \quad (3)$$

2. Leistungselektronik

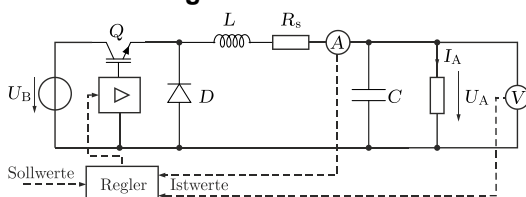


Abb. 9: Schaltbild des Tiefsetzstellers.

Wegen der oben angeführten Einschränkungen wurde ein auf einem Tiefsetzsteller (Buck-Converter) basierter Stromregler implementiert, der dem Labornetzteil nachgeschaltet wird. Diese Topologie (siehe Abb. 9) eignet sich besonders für diese Aufgabe, da die Ausgangsinduktivität den Ausgangsstrom bereits inhärent kurzzeitig stabilisiert. Die Eingangsgröße des Stellers ist ein Puls-Pausen

Dies bedeutet, dass ein überlagerter Stromregler den Wert p entsprechend der dynamischen Last und des Stromsollwerts nachregeln muss.

$$\Delta I_A = U_B (1 - p) p / (L f_{osc}) \quad (4)$$

$$\tau = L / R_{LB} \quad (5)$$

Ripplestrom ΔI_A und Zeitkonstante τ sind durch Gl. 4 und 5 gegeben, wobei R_{LB} den (positiven) Lichtbogenwiderstand beschreibt. Für geringe Rippleströme und Zeitkonstanten ist daher eine hohe Schaltfrequenz nötig. Der eingesetzte IGBT vom Typ IXXN100N65CH4H1 von IXYS eignet sich für Schaltfrequenzen bis zu 60 kHz, sodass eine Schaltfrequenz $f_{osc} = 50\text{ kHz}$ verwendet wird. Die Induktivität ist vom Typ Hammond 195C75 mit $L = 2.5\text{ mH}$ und $R_s = 8\text{ m}\Omega$.

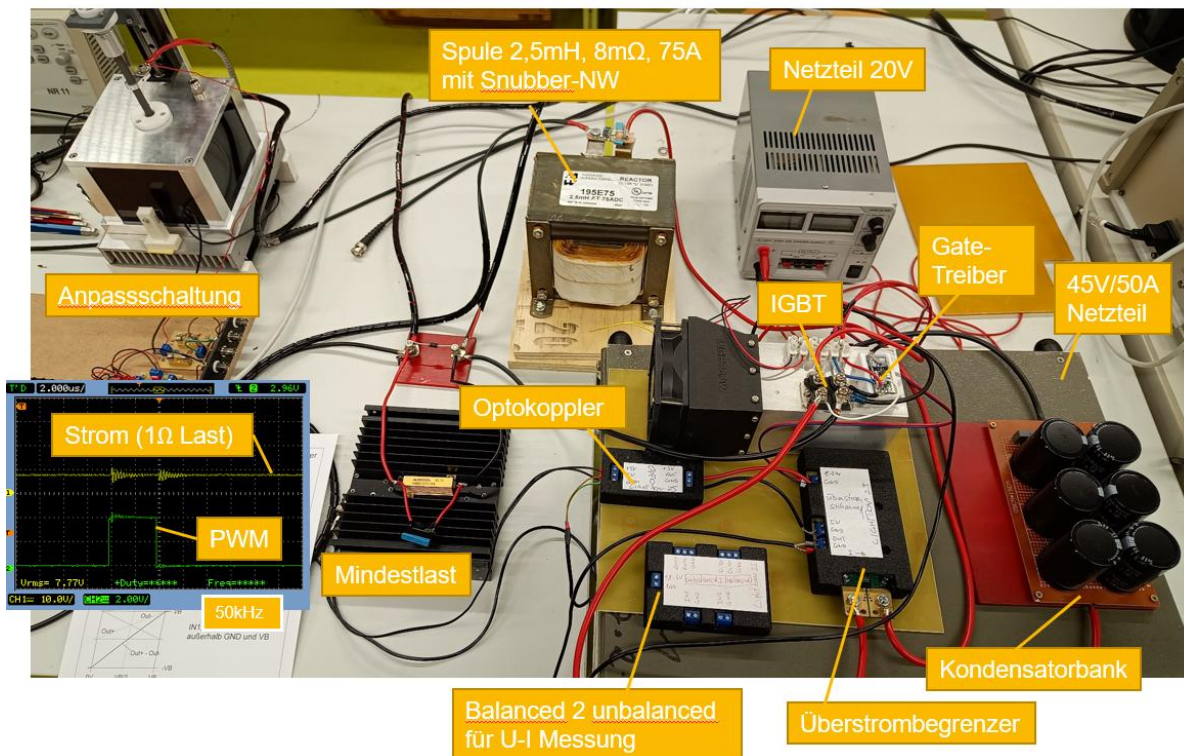


Abb. 11: Messaufbau mit elektronischen Komponenten. Das Regelsystem (nicht im Bild) misst den Strom mittels Flux-Gate Sensor und stellt die PWM des Tiefsetzstellers entsprechend einem Sollwert.

Abbildung 10 zeigt Spice-Simulationen des Regelverhaltens an einer konstanten Last von $R_{LB}=1\Omega$. Es wurde ein einfacher PI-Regler verwendet. Die Sollstromsprünge von 0A auf 5A, 10A, 20A, 30A, und 40A folgen mit der in Gl. 5 gegebenen Zeitkonstante $\tau = 2.5\text{ms}$. Stromänderungen auf höherem Stromniveau erfolgen daher naturgemäß langsamer. Die in der Simulation bestimmten Rippelströme $\Delta I_A = 40\text{mA}$, 65mA , 86mA , und 62mA stimmen mit den Werten, die durch Gl. 4 gegeben sind, überein. Der Maximalwert tritt bei $p = 0.5$ auf (20A). Abbildung 11 zeigt die elektrischen Komponenten des experimentellen Aufbaus. Die Kondensatorbank (60mF) wird verwendet um zu verhindern, dass beim Ausschalten des IGBTs Spannungsspitzen die Überspannungsabschaltung des Netzteils auslösen. Um den IGBT vor hohen Stromspitzen die bei Kurzschlussbedingungen durch die Kondensatoren hervorgerufen werden können, wurde eine Hysterese behaftete Überstromabschaltung basierend auf einem Hallstromsensor mit schneller Ansprechzeit ($<2\mu\text{s}$) implementiert.

Bei Kontaktzündung heizt sich die Graphitelektrode auf, was das Herauslösen der zur Erzeugung des Plasmas benötigten Elektronen erleichtert. Das Potential der

Graphitelektrode ist daher gegenüber der Bodenplatte negativ. Der Tiefsetzsteller in dieser Form liefert eine positive Spannung, weshalb zusätzlich galvanische Trenneinrichtungen für das Steuersignal und die gemessenen Größen eingesetzt werden.

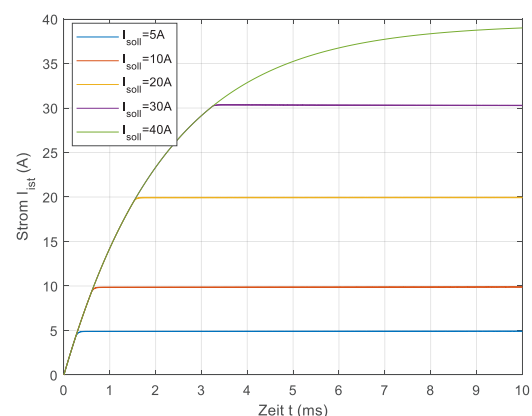


Abb. 10: Simuliertes Regelverhalten des Tiefsetzstellers bei verschiedenen Stromsollwerten

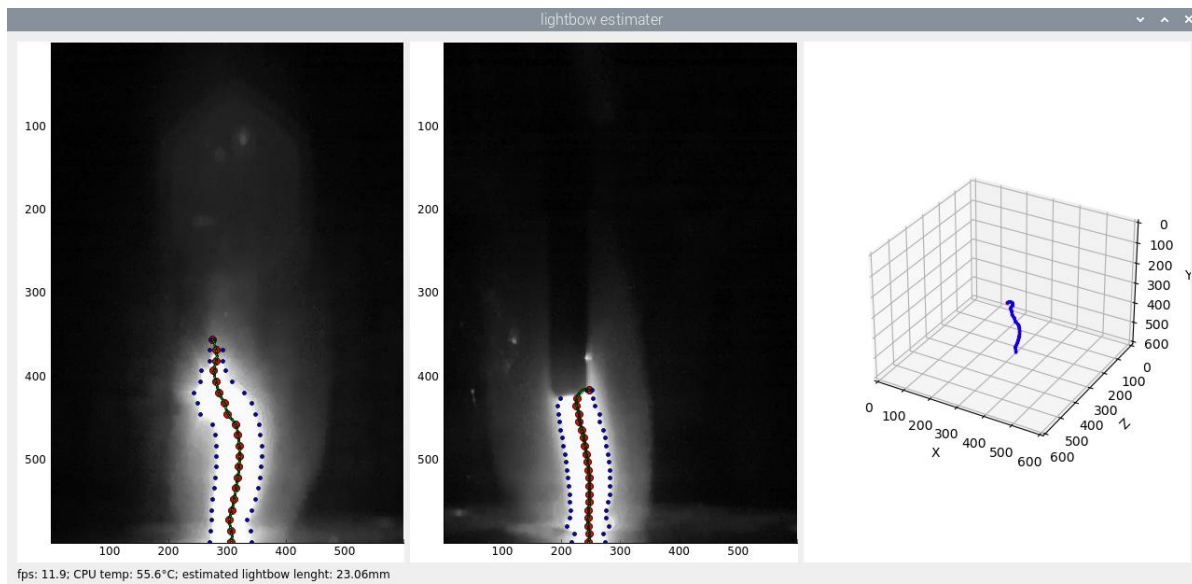
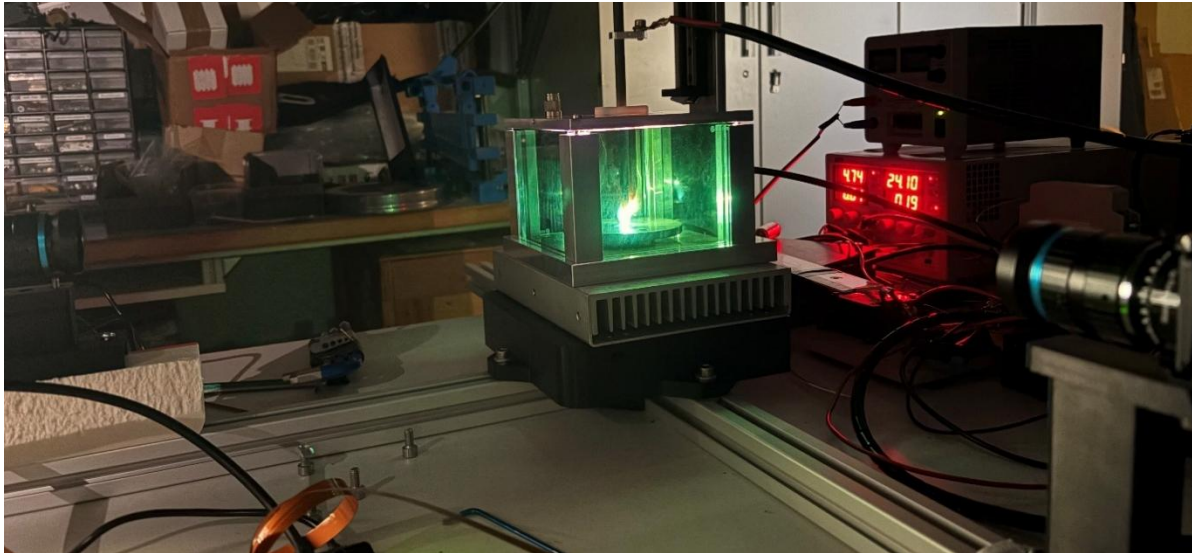


Abb. 12: Stereokamerasystem und Live-View der Lichtbogen-Rekonstruktion. Die Updaterate der geschätzten Längen und der Energien erhöht sich bei Deaktivierung der Visualisierung auf ca. 110Hz.

3. Regelungssystem und Implementierung

Zur Realisierung der Stromregelung wird ein industrieller Prozessrechner eingesetzt, auf welchem die Regelalgorithmen in der Echtzeitumgebung TwinCAT der Firma Beckhoff ausgeführt werden. Die Steuerung arbeitet mit einer festen Abtastzeit von $125\ \mu\text{s}$, wodurch eine ausreichend hohe zeitliche Auflösung erreicht wird, um die schnellen dynamischen Effekte des Lichtbogens sowie der Leistungselektronik präzise zu erfassen und zu kompensieren. Die kurze Zykluszeit ermöglicht insbesondere die gezielte Dämpfung jener Oszillationen, die aus dem Zusammenspiel von negativer differentieller Leitfähigkeit des Lichtbogens und der

parasitären Energiespeicher im Versorgungspfad resultieren. Der implementierte Regler ist als adaptiver Zustandsregler mit Störgrößenkompensation realisiert. Ziel der Regelung ist die präzise Vorgabe des Lichtbogenstroms trotz stark variierender Lastcharakteristik. Der Lichtbogen stellt eine nichtlineare und zeitvariante Last dar, deren effektiver differentieller Widerstand sich sowohl mit der Bogenlänge als auch mit der lokalen Plasmatemperatur ändert. Zusätzlich wirkt die Lichtbogen-Spannung als dominierende Störgröße, da sie direkt in die Dynamik der Spulenstromänderung eingeht jedoch durch eine entsprechende Vorsteuerung kompensiert werden kann. Die Kompensation verhindert, dass Änderungen der Lichtbogenlänge unmittelbar zu Stromabweichungen führen. Die Störgrößenkompensation verbessert somit

sowohl die Führungsdynamik als auch die Robustheit gegenüber abrupten Zustandsänderungen des Plasmas, beispielsweise beim Übergang zwischen metastabilen Bogenlängen oder bei kurzfristigen Bogenverlagerungen auf der Badoberfläche / Metallplatte. Der Regler passt seine Parameter adaptiv an Änderungen des differentiellen Lichtbogenwiderstands an, wodurch eine gleichbleibende Dynamik über einen weiten Arbeitsbereich von typischerweise 5 A bis 40 A erzielt werden kann. Die resultierende geschlossene Stromregelstrecke weist ein gut gedämpftes Verhalten mit kurzer Einschwingzeit auf und erlaubt eine stabile Einstellung auch bei stark schwankenden Plasmabedingungen. Die hardwarenahe Anbindung der Leistungselektronik erfolgt über eine Mikrocontrollerplattform auf Basis des Texas Instruments F28P65 (C2000-Serie). Der Mikrocontroller wird als EtherCAT-Slave betrieben und stellt die zeitkritischen Ein- und Ausgangseinheiten bereit. Dazu zählen insbesondere:

- Generierung des PWM-Signals für den IGBT des Tiefsetzstellers mit hoher zeitlicher Auflösung
- Erfassung der Lichtbogenspannung mittels schneller Analog-Digital-Wandlung
- Messung des Spulenstroms über einen Fluxgate- bzw. Hall-basierten Stromsensor
- deterministische Kommunikation mit dem übergeordneten Prozessrechner über EtherCAT

Durch die Auslagerung der zeitkritischen Signalverarbeitung auf den Mikrocontroller können sehr geringe Totzeiten erreicht werden. Gleichzeitig ermöglicht die EtherCAT-Kommunikation eine synchrone Einbindung in das Echtzeitsystem des Prozessrechners. Die resultierende Gesamtstruktur kombiniert die hohe Rechenleistung und Flexibilität der TwinCAT-Umgebung mit der schnellen Peripherieanbindung der C2000-Mikrocontrollerplattform. Die gewählte Architektur erlaubt zudem eine einfache Erweiterung um zusätzliche Regelungsfunktionen, beispielsweise eine überlagerte Leistungsregelung oder eine modellbasierte Schätzung der Lichtbogenlänge auf Basis der elektrischen Signale. Insgesamt zeigt sich, dass durch die Kombination aus schneller Echtzeitregelung, Störgrößenkompensation und leistungsfähiger leistungselektronischer Aktorik eine deutliche Verbesserung der Stromstabilität erreicht werden kann.

4. Instrumentierung

Die Lichtbogenstabilität wird als zeitliche Stabilität der Lichtbogenlänge definiert. In der Zielanwendung ist die optische Beobachtbarkeit des Lichtbogens in der Regel nicht gegeben, weshalb am Prüfstand untersucht wird inwieweit die elektrischen Signale mit der Lichtbogenlänge korrelieren. Dazu wurde ein Stereokamerasystem entworfen. Die verwendeten Kameras sind 1.6 Megapixel Global-Shutter mit Sony-IMX296 Sensor für Raspberry Pi mit 16mm Teleobjektiv. Der Global-Shutter bewirkt eine zeitgleiche Belichtung aller Bildpunkte des Sensors. Der Kamerateyp erlaubt die Festlegung einer Region-of-Interest (ROI), bei welcher nur ein Bildbereich ausgelesen werden muss, was die Bildrate wesentlich erhöht. Der Objektstand und die Blendeneinstellung wurden so gewählt, dass ein würfelförmiger Bereich mit 50mm Seitenlänge scharf abgebildet werden kann. Die Stereobilder werden auf einem Raspberry Pi 5 synchron aufgezeichnet. Der Lichtbogen wird in zwei orthogonalen Ebenen identifiziert und mittels Spline Funktionen interpoliert (siehe Abb. 12 unten). Die Länge wird aus der Mittellinie des Lichtbogens berechnet. Die Messmethode wurde mit gebogenen Drähten bekannter Länge kalibriert. Die Messdaten werden mit einer Updaterate von > 100Hz zum Prozessrechner übertragen.

5. Ergebnisse

Abbildung 13 zeigt gemessene Ströme, Spannungen und Lichtbogenlängen. Nach Kontaktzündung wird der Lichtbogen aufgezogen. Der Stromregler wurde auf Sollwerte im Bereich von 10-22A eingestellt. Stromsollwertänderungen erfolgten konsistent mit einer Anstiegszeit (10-90%) von ca. 4ms. Ab 450s wurde der Lichtbogen bis zum Abriss aufgezogen. Die Länge und die Spannung korrelieren, bedingt durch die Abrisse, naturgemäß. Abb. 14 zeigt daher die Korrelation im Zeitbereich zwischen 285s bis 318s. In diesem Abschnitt war der Strom konstant 18A (Variationskoeffizient 0.03%). Die Spannung und die Länge fluktuieren ohne erkennbaren Trend. Trotzdem ist eine Korrelation zwischen den beiden Größen ersichtlich. Der Längeneinbruch bei 350s ist ein Messartefakt. Die Elektrode verdeckte den Lichtbogen in den Bildern der beiden rechtwinkelig angeordneten Kameras.

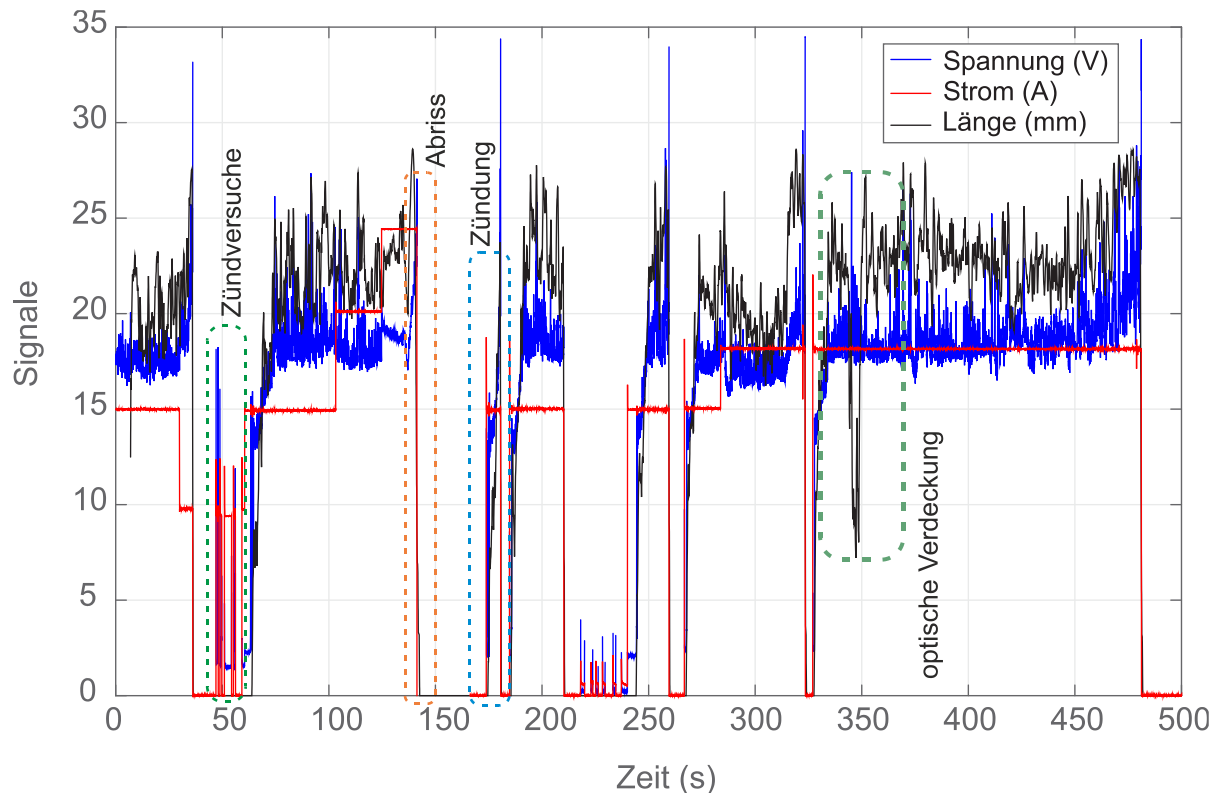


Abb. 13: Strom, Spannung und geschätzte Länge des Lichtbogens.

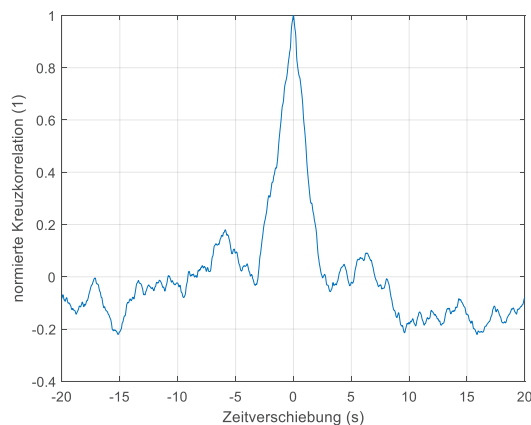


Abb. 14: Normierte Korrelationsfunktion von Lichtbogenlänge und Spannung im Bereich 285s-318s.

Ausblick

Die größere Messkammer mit einer thermischen Nennleistung von 5KW wird gegenwärtig realisiert. Diese besitzt bereits eine ähnliche Dimension wie die metallurgische Versuchsanlage, sodass die hier erforschten Mess- und Regelstrategien übertragbar sind. Der Leistungsteil wird durch einen speziell entwickelten, beliebig parallelisierbaren, GaN-FET basierten Leistungssteller ersetzt. Die einzelnen Module werden dazu mit mehrphasig

mit einer Schaltfrequenz von bis zu 500kHz betrieben. Dies verspricht noch bessere Kontrolle über die elektrischen Charakteristika des elektro-thermischen Systems „Lichtbogen“.

Aknowledgement

Das Projekt LIGHTBOW wurde durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen von Expedition Zukunft Wissenschaft gefördert.

Literaturnachweis

- [1] Zarl, M. A., Farkas, M. A., & Schenk, J. (2020). A study on the stability fields of arc plasma in the HPSR process. *Metals*, 10(10), 1394.
- [2] Leitner, E. M. (2023). Methodenentwicklung zur Stabilisation des Elektrischen Lichtbogens im Wasserstoff-Argon Schmelzreduktionsplasma.
- [3] Ernst, D., Zarl, M. A., Farkas, M. A., & Schenk, J. (2023). Effects of the Electrodes' Shape and Graphite Quality on the Arc Stability During Hydrogen Plasma Smelting Reduction of Iron Ores. *steel research international*, 94(7), 2200818.
- [4] Rieder, W. (1967). Plasma und Lichtbogen, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.