

Diagnostik und Regelung beim Laserstrahlschweißen

A. Otto, R. Hohenstein, S. Dietrich

Lehrstuhl für Fertigungstechnologie

Die Regelung des Laserstrahlschweißprozesses erfordert die schnelle Erfassung der für das Bearbeitungsergebnis relevanten Prozessparameter mittels geeigneter Sensoren, die Identifikation der Regelstrecken sowie die Rückkopplung der erfassten Daten über einen Regelalgorithmus und geeignete Aktoren in den Prozess. Vorliegende Veröffentlichung beschreibt eine solche Regelung mit den verwendeten Sensoren und Aktoren und zeigt erste Ergebnisse zum geregelten Laserstrahlschweißen.

1 Einleitung

Bislang sind für die Regelung von Lasermaterialbearbeitungsvorgängen nur Eingrößenregelungen [1]–[10] bekannt, bei denen als Stellgröße entweder die Laserleistung oder die Lage des Laserfokus verwendet wird. Diese Regelkonzepte konnten sich bislang nur in Einzelfällen (z. B. beim Laserstrahlhärten) durchsetzen, da die zu regelnden Lasermaterialbearbeitungsprozesse nicht nur von einer, sondern von mehreren Prozessvariablen maßgeblich beeinflusst wird, es sich also um Mehrgrößensysteme handelt. Die Verwendung einer nicht-adaptiven Eingrößenregelung zur Regelung eines Mehrgrößensystems setzt die Konstanz derjenigen Größen voraus, die die Dynamik der Regelstrecke verändern. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, so führen die vom Regler nicht erkannten Streckenänderungen zu fehlerhaften Stellsignalen bzw. eine Neukalibrierung des Reglers wird erforderlich.

Das Fehlen geeigneter Mehrgrößenregelungen führt in der Anwendung dazu, dass sich qualitätssichernde Maßnahmen auf eine möglichst perfekte und damit zeit- und kostenintensive Prozessvorbereitung konzentrieren. Dadurch sollen möglichst viele Störgrößen eliminiert und aktorisch beeinflussbare Stellgrößen konstant gehalten werden. Der Prozess wird dabei gezielt an einem Fixpunkt (ungeregelter Prozess) bzw. eine Fixachse (Eingrößen-geregelter Prozess) im Prozessfenster betrieben. Um zu vermeiden, dass nicht eliminierbare Störungen, die zu Fluktuationen um den Fixpunkt bzw. die Fixachse führen, Prozessfehler verursachen, werden die Prozesse in möglichst stabilen Bereichen des Prozessfensters betrieben. Diese stabilen Bereiche befinden sich meist weit entfernt von den jeweiligen Prozessgrenzen, wodurch das Potential des Prozesses z.B. bezüglich der erreichbaren Bearbeitungsgeschwindigkeiten nicht genutzt wird. Prozesse, die nur über ein enges Prozessfenster verfügen, sind bei dieser Vorgehensweise oft überhaupt nicht oder nur mit großem Aufwand umsetzbar.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Veröffentlichung ein Mehrgrößenregelungssystem vorgestellt, das konzeptionell für alle (quasistationären) Lasermaterialbearbeitungsprozesse genutzt werden kann und am Beispiel des Laserstrahlschweißens derzeit prototypisch umgesetzt wird. Der Vorteil einer solchen Mehrgrößen-

regelung liegt darin, dass diese durch die gleichzeitige Ansteuerung mehrerer Aktoren in der Lage ist, flexibel im mehrdimensionalen Prozessfenster zu navigieren und Prozessfehler zu vermeiden. Dies kann entsprechend den jeweiligen Nutzervorgaben in mehrfacher Hinsicht genutzt werden. Zum einen wird es durch die Regelung möglich, gezielt an den jeweiligen Prozessgrenzen (etwa bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit) prozesssicher zu arbeiten. Zum anderen kann durch die Nutzung eines solchen Mehrgrößenreglers der Aufwand bei der Prozessplanung beispielsweise zum Schweißen dreidimensionaler Bauteile erheblich reduziert werden, da zum Beispiel die Fokusslage und die Laserleistung automatisch an die jeweilige Prozesssituation angepasst werden.

2 Prozess- und Systemdiagnostik

Basis für die Mehrgrößenregelung sind Sensorsignale, die online während des Prozesses erfasst werden und die jeweiligen Prozess- und Systemzustände charakterisieren.

2.1 Sensorik zur Identifikation der absorbierten Laserleistung

Für das Prozessergebnis ist nicht die vom Laser ausgesendete Strahlleistung relevant, sondern die vom Werkstück absorbierte Laserleistung. Zur Erfassung dieser Größe wurde ein Identifikationsverfahren entwickelt, das in [11] näher beschrieben ist.

Zum Einsatz kommen hier zwei unterschiedliche Sensoren:

- Ein IR-Sensor beobachtet über eine Glasfaser insbesondere die vom Prozess emittierte Wärmestrahlung. Das Sensorelement auf Siliziumbasis arbeitet mit einem vorgesetzten Wellenlängenfilter, der die stark fluktuierenden Plasmaemissionen weitgehend ausblendet.
- Am Resonator der Laserquelle wird mit einer hohen zeitlichen Auflösung die aktuelle Laserleistung gemessen. Hierfür wird eine Atomlagenthermosäule (ALT-Sensor) eingesetzt, mit der Messfrequenzen bis zu 300 kHz möglich sind.

Mittels des erwähnten Identifikationsverfahrens lässt sich aus den beiden Sensorsignalen die vom Werkstück tatsächlich absorbierte Laserleistung abschätzen.

2.2 Abstandssensorik

Neben der dem Prozess zur Verfügung stehenden Leistung sind die Strahlparameter am Werkstück entscheidend für das Prozessergebnis. Daher wurde ein faseroptisches Messsystem entwickelt, das den Abstand der optischen Prozessemissionen von der Bearbeitungsdüse ermittelt. Geht man davon aus, dass sich der Schwerpunkt der optischen Emissionen an der Werkstückoberfläche befindet, so misst das System also den Abstand zwischen Düse und Blech. Bei als konstant angenommenen Strahlparametern lässt sich damit die Fokusslage relativ zur Blechoberfläche bestimmen.

In diesem Messsystem werden vier jeweils um 90° versetzte Faserpaare eingesetzt. Die beiden Fasern eines Faserpaares weisen dabei jeweils unterschiedliche, vom Arbeitsabstand abhängige Übertragungsfunktionen für die Prozessemissionen auf. Durch Quotientenbildung der mittels Photodioden erfassten Prozesssignale lässt sich dann ein von der absoluten Leuchtintensität unabhängiger Wert ermitteln, aus dem nach einer Kalibrierung auf den tatsächlichen Abstand zwischen Düse und Blech geschlossen werden kann. Mittels einer Adaptiven Optik kann so die

Lage des Fokus relativ zur Blechoberfläche geregelt werden. Die komplette Sensorik ist in eine spezielle Bearbeitungsdüse integriert, die daher auch als optische Düse bezeichnet wird (s. Bild 1).

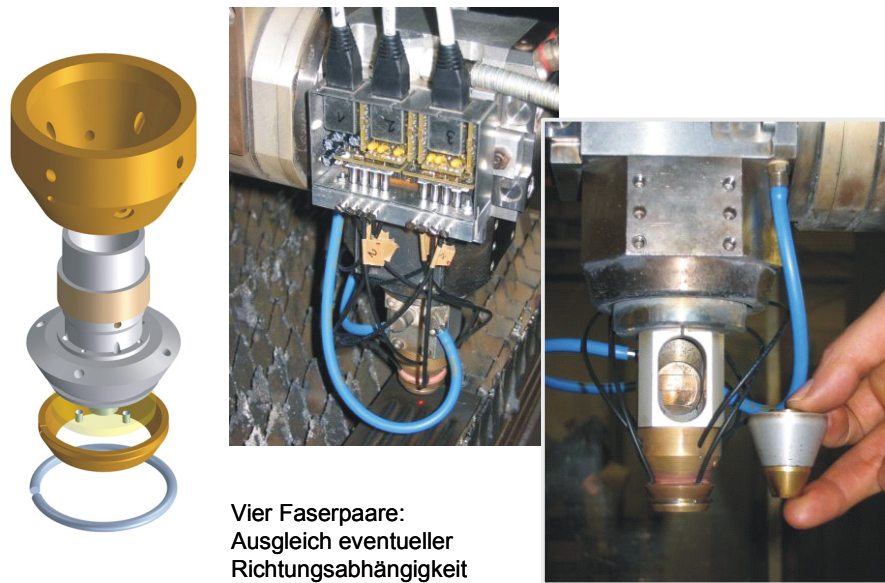


Bild 1: „Optische Düse“

Versuche am Prozess haben gezeigt, dass das resultierende Signal tatsächlich unabhängig von der stark fluktuierenden Intensität der Prozessemissionen ist. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass die Messergebnisse von den sonstigen Prozessparametern (Laserleistung, Vorschub ...) kaum beeinflusst werden (s. Bild 2).

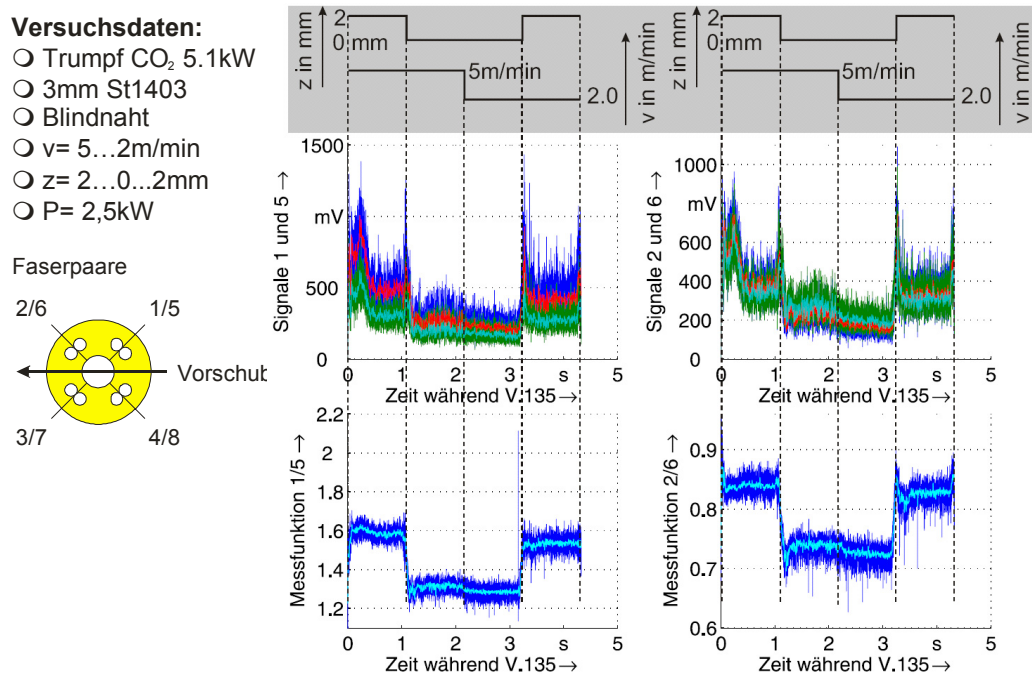


Bild 2: Abstandsmessung bei Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit

Die Messgenauigkeit des Systems liegt bei ca. 200 μm , was für das Laserstrahlschweißen in jedem Fall ausreichend ist.

2.3 Achssensorik der Werkzeugmaschine

Als weiterer Input für den Mehrgrößenprozessregler muss die Geschwindigkeit des Brennflecks relativ zur Werkstückoberfläche erfasst werden. Dazu werden zunächst die Bewegungen der Führungsmaschine im Raum erfasst. Mit den Inkrementalgebern in der verwendeten Portalanlage erreicht die Werkzeugmaschinensteuerung eine mittlere, auch für die Regelung ausreichende Positionierstreuweite von ± 0.03 mm. Diese Achsinformationen werden mit den Informationen des Abstandensensors verrechnet, woraus sich dann über eine Vorwärtstransformation nach Denavit-Hartenberg die tatsächliche Brennfleckgeschwindigkeit errechnen lässt.

3 Aktorik

Zur Beeinflussung des Laserschweißprozesses durch eine Regelung sind die notwendigen Aktorsysteme zu integrieren und geeignete Schnittstellen zu schaffen. Für die hier dargestellte Prozessregelung wurden drei Steuermöglichkeiten (Laserleistung, Fokusslage und Vorschub) realisiert, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Für das geregelte Laserstrahlschweißen kommt ein hochfrequenzangeregter CO₂-Laser der Firma Trumpf mit einer maximalen Ausgangsleistung von 5,2 kW zum Einsatz. Die Laserleistung ist bei diesem Lasertyp über die Ansteuerung der Hochfrequenzgeneratoren zum Pumpen des laseraktiven Mediums einstellbar. Über zwei Schnittstellen, deren Vorgaben multiplikativ wirken, kann die Ausgangsleistung am Resonator kontrolliert werden. Diese sind:

- Faseroptische Schnittstelle für die Pulsweitenmodulation
- Schnittstelle zur Vorgabe der Pulshöhe über Analogspannung

Die Anlogschnittstelle wird wegen ihrer geringeren Dynamik und ihrem kleineren Einstellbereich nicht verwendet. Mit der faseroptischen Schnittstelle kann, durch die Ansteuerung mit einem PWM-Signal mit einer Grundfrequenz von über 90 kHz, eine sehr hohe Ansteuerdynamik realisiert werden. Regelfrequenzen von über 20kHz sind mit dieser Schnittstelle zu erreichen.

Ein weiterer Aktor, der in der Regelung angesprochen wird, ist die adaptive Optik. Sie nimmt Einfluss auf den Verlauf des fokussierten Strahls. Mit ihr sind im Teilhubbereich Regelfrequenzen von bis zu 1 kHz realisierbar.

Neben der Laserleistung und der Fokusslage soll mittels des Mehrgrößenreglers auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Mangels einer direkten Zugriffsmöglichkeit auf die Achsantriebe wird hierzu auf die 5-Bit Binärschnittstelle des manuellen Geschwindigkeitswahlschalters an der Anlagensteuerung zugegriffen. Diese Schnittstelle erlaubt die globale Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit aller Achsen in diskreten 5%-Schritten von 100% auf 0%. Die eigentliche Regelung der Achsengeschwindigkeiten übernimmt dabei weiterhin die Steuerung der Werkzeugmaschine. Der Einfluss der Vorschubvorgabe auf die Verfahrbewegungen der Anlage erfolgt aufgrund der Masseträgheit der Achsen vergleichsweise langsam. Die maximal erreichbaren Regelfrequenzen des Vorschubs liegen im Bereich zwischen 10 und 100 Hz.

Die Steuerdaten für die einzelnen Aktoren werden über einen Echtzeitbus aus der Regelungshardware übertragen.

4 Multiparameterregelung

4.1 Energiedosismodell

Für die Prozessregelung wird ein Energiedosismodell verwendet, das davon ausgeht, dass das jeweilige Bearbeitungsergebnis von dem in den Werkstoff eindringenden spezifischen Energiestrom D_s abhängt:

$$D_s = \frac{E_V \cdot ds}{A \cdot v_t}$$

mit:

- E_V : absorbierte Laserleistung
- ds : infinitesimaler Steckenabschnitt
- A : Bestrahlungsfläche
- v_t : tangentiale Brennfleckgeschwindigkeit

Für die Bestimmung der tangentialen Brennfleckgeschwindigkeit v_t wird der Vorschubvektor \vec{n} aus den Achsbewegungen und der zeitlichen Veränderung des Abstandes zwischen Werkzeugspitze (Düse) und Werkstück abgeleitet. Der Vorschubvektor beschreibt dann die Bewegung der Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone (also nicht die des Fokus) im Raum.

$$v_t = \frac{|\vec{n}|}{\Delta t}$$

Zur Bestimmung der Bestrahlungsfläche A wird ein Modell verwendet, das es ermöglicht, A rechenzeitoptimiert aus dem Anstellwinkel des Strahls und dem Abstand des Strahlfokus gegenüber dem Werkstück näherungsweise zu berechnen.

Die letzte zu bestimmende Größe für das Prozessmodell ist die vom Werkstück absorbierte Laserleistung. Diese kann nicht direkt aus den Geometrieinformationen bestimmt werden, sondern wird mit Hilfe des in Abschnitt 2.1 bereits angesprochenen Identifikationsverfahrens ermittelt.

Damit sind alle Größen zur Berechnung des spezifischen Energiestroms in das Werkstück aus den erfassten Sensordaten (s. Abschnitt 2) bestimmbar. Dieser spezifische Energiestrom stellt die übergeordnete Führungsgröße für den im Folgenden dargestellten Mehrgrößenregler dar.

4.2 Struktur der Mehrgrößenregelung

Der Mehrgrößenregler besteht aus kaskadierten Einzelreglern, die gemäß einer übergeordneten Regelstrategie auf Basis des Energiedosismodells und entsprechend den Nutzervorgaben angesteuert werden (s. Bild 3). Da der Regler mit unterschiedlichen Maßnahmen auf eine Veränderung der in das Werkstück eindringenden Energiestromdichte reagieren kann, muss er eigenständig entscheiden, welcher Aktor zuerst angesprochen werden soll. In der dahinter stehenden Regelstrategie muss berücksichtigt werden, welche Dynamik die zu regelnde Aktorik hat (s. Abschnitt 3) und welche Ursachen die sich ändernde Energiestromdichte hat. So muss eine sich sprunghaft ändernde Fokusslage zunächst durch eine (sehr schnell ansteuerbare) Leistungsänderung kompensiert werden, um Schweißnahtfehler zu vermeiden. Gleichzeitig wird

der (etwas langsamer ansteuerbare) Fokus nachgeführt, um das System wieder in eine stabile Lage zu bringen.

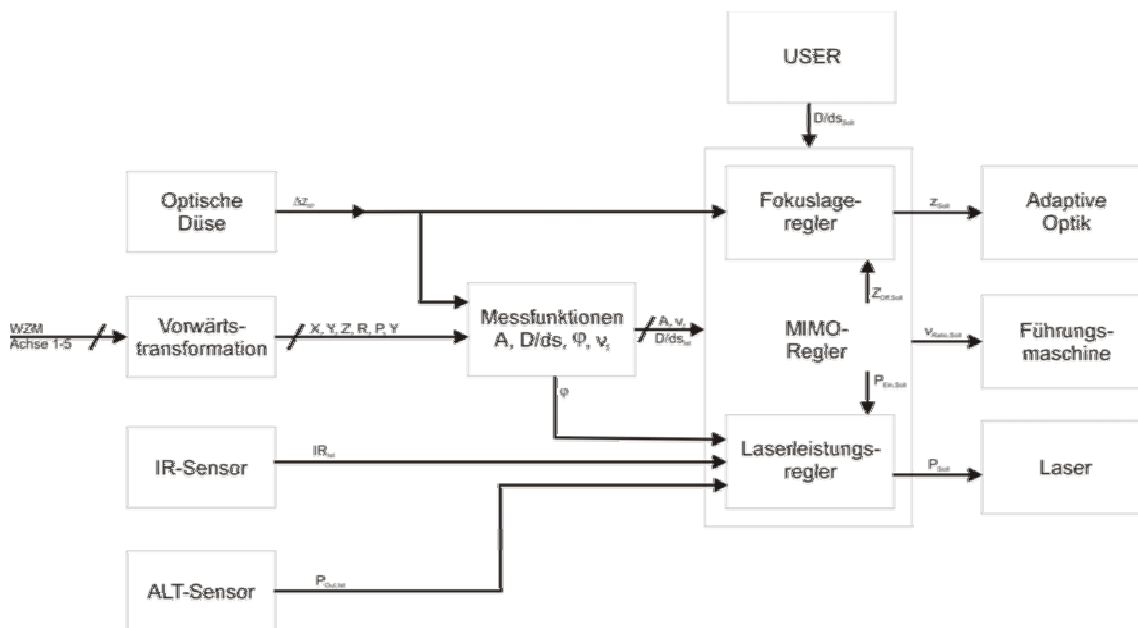


Bild 3: Struktur des Mehrgrößenreglers

Die einzelnen Regler können entsprechend ihrer Hierarchie im Gesamtsystem eingeteilt werden. In der ersten übergeordneten Stufe steht der Energiedosisregler. In der zweiten Ebene folgen die Regelsysteme für Fokusslage, Laserleistung (adaptiv) und Vorschub. Anlagen- bzw. aktoreninterne Regelsysteme wie der analoge Positionsregler der adaptiven Optik, der Vorschubregler der Werkzeugmaschine und die Regelung der HF-Anregung in der Strahlquelle sind in dieser Hierarchie noch eine Ebene weiter unten einzugruppieren. Die gegenseitige exakte Abstimmung der einzelnen Regler ist dabei auch Hierarchieebenen übergreifend sehr wichtig, um Auflösungsverluste und somit Regelabweichung zu minimieren. Dies bezieht sich sowohl auf zeitliche als auch auf wertmäßige Übergaben zwischen den einzelnen Regelebenen.

5 Experimentelle Untersuchungen zur Mehrgrößenregelung beim Laserstrahlschweißen

Primäre Aufgabe des Mehrgrößenreglers ist es, ein vorgegebenes Bearbeitungsergebnis auch bei Auftreten externer Störungen oder beim Schweißen dreidimensionaler Bauteilkonturen aufrecht zu erhalten. Dies wird gemäß der Annahme des Energiedosismodells (s. Abschnitt 4.1) dann erreicht, wenn der in das Bauteil fließende Energiestrom während der Bearbeitung konstant gehalten wird.

Im Folgenden wird zunächst gezeigt, dass die dem Mehrgrößenregler zugrunde liegende Algorithmik prinzipiell in der Lage ist, Änderungen des Energiestroms in das Bauteil ausreichend schnell zu erkennen. Danach wird auf erste Versuche zum geregelten Laserstrahlschweißen eingegangen.

5.1 Open-Loop Experiment

Voraussetzung für die Realisierung der Mehrgrößenregelung ist eine Algorithmik, die in der Lage ist, sich entwickelnde Schweißnahtfehler rechtzeitig zu erkennen, um diese zu vermeiden. Die prinzipielle Fähigkeit dazu kann in einem Open-Loop Experiment nachgewiesen werden.

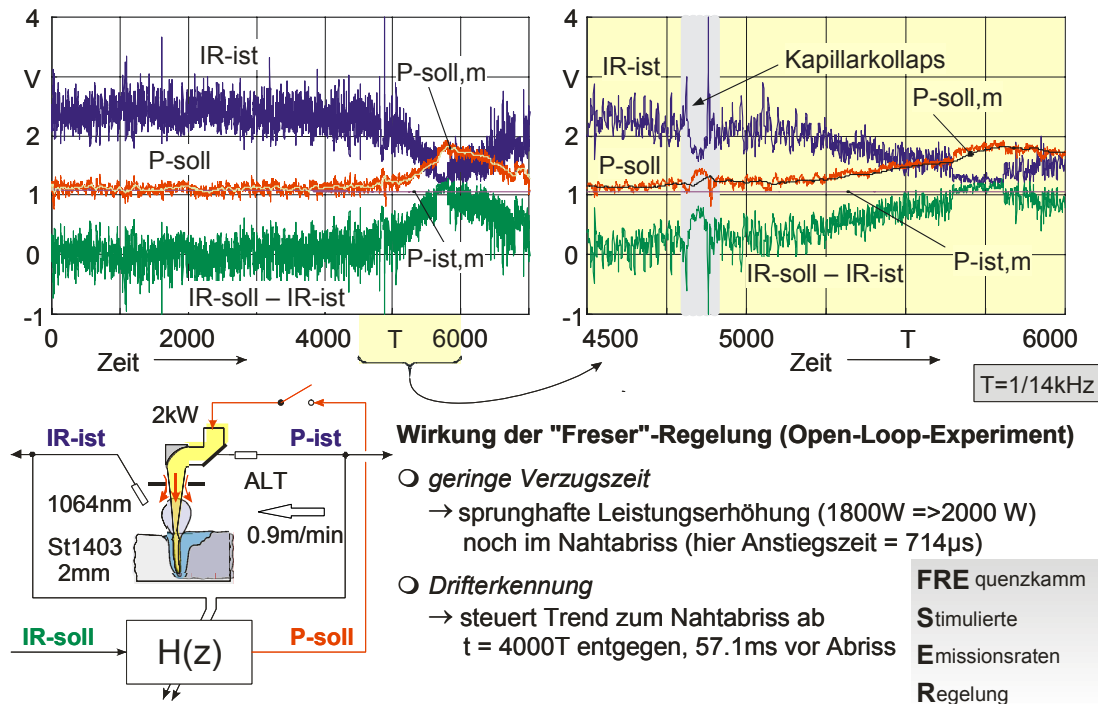


Bild 4: Ergebnis des Open-Loop Experiments

Bild 4 zeigt das Ergebnis eines solchen Experiments bei dem die Laserleistung während des Schweißprozesses ab $T=4000$ kontinuierlich gesenkt wurde, um den Energiestrom in das Bauteil zu verringern und damit Schweißnahtfehler zu provozieren. Gleichzeitig mit der Verringerung der Laserleistung steigt die von der Regleralgorithmik berechnete Sollleistung P_{soll} an¹. Ein erster Kapillarkollaps tritt bei $T=4700$ auf. Die berechnete Sollleistung steigt hier sehr schnell an. Ob damit bei geschlossenem Regelkreis ein Kapillarkollaps und der resultierende Nahtfehler vermieden werden, kann das Open-Loop Experiment nicht klären. Es zeigt jedoch, dass die Regelalgorithmik in der Lage ist, den Drift von Bearbeitungsparametern (hier die Laserleistung) zu erkennen und auch sehr schnell auf Prozessinstabilitäten zu reagieren.

5.2 Fokusalagenregelung

Die Regelung der Fokusalage beim Laserstrahlschweißen gestaltete sich in der Vergangenheit sehr schwierig. Konventionelle optische und kapazitive Verfahren, wie sie beispielsweise beim Laserstrahlschneiden verwendet werden, können aufgrund der störenden Wirkung des

¹Bemerkt sei, dass die Regelung hier, aufgrund des Open-Loop Charakters des Experiments, nicht in den Prozess eingreift.

Schweißplasma bzw. des Metaldampfes oberhalb der Werkstückoberfläche nicht eingesetzt werden. Das Messverfahren mittels der „Optischen Düse“ (s. Abschnitt 2.2) nutzt gerade diese, bislang störende Leuchterscheinung, um den Abstand zwischen Düse und Blech zu ermitteln. Durch die Kopplung mit einer adaptiven Optik kann so die Lage des Fokus relativ zur Blechoberfläche geregelt werden.

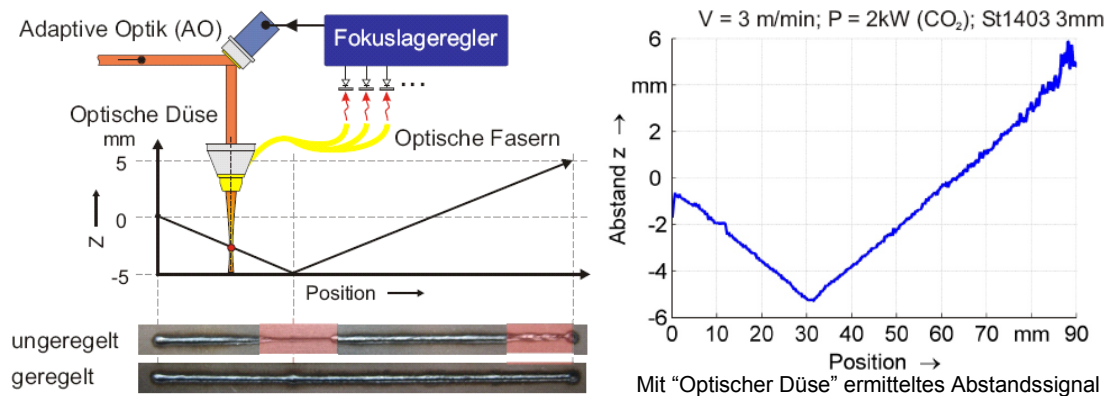


Bild 5: Fokusalagenregelung beim Laserstrahlschweißen

Bild 5 zeigt das Ergebnis einer solchen Regelung. In diesem Experiment wurde der Abstand zwischen Düse und Blech während des Prozesses entsprechend der Skizze in **Bild 5** verändert. Ohne Fokusalagenregelung führt dies zu Unterbrechungen des Tiefschweißprozesses. Mit Regelung wird dagegen ein konstantes Schweißergebnis erzielt. Das mit der „Optischen Düse“ ermittelte Abstandssignal (rechts im Bild) zeigt über nahezu den gesamten Messbereich einen glatten Verlauf. Lediglich bei sehr hohen Arbeitsabständen steigt die Messunsicherheit deutlich an. Die prinzipielle Funktionsweise des Fokusalagenregelkreises ist damit nachgewiesen.

5.3 Energiedosisregelung

Der Energiedosisregler hat innerhalb des Mehrgrößenreglers die größte Bedeutung. Ihm fällt die Aufgabe zu, sich ändernde Energieströme durch eine Anpassung der Laserleistung schnell auszugleichen. Falls die Ursachen für die Energiestromänderung mittels der in Abschnitt 2 dargestellten Diagnostikeinrichtungen erkannt werden können, so werden parallel die untergeordneten, langsameren Regelkreise für Fokusalage und Vorschub angesteuert, um diese zu kompensieren. Dabei stellen sich die Fragen, ob sich z. B. eine verändernde Vorschubgeschwindigkeit durch eine Laserleistungsänderung überhaupt kompensieren lässt und ob der entwickelte Regler auf Basis der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Sensorik hierzu in der Lage ist.

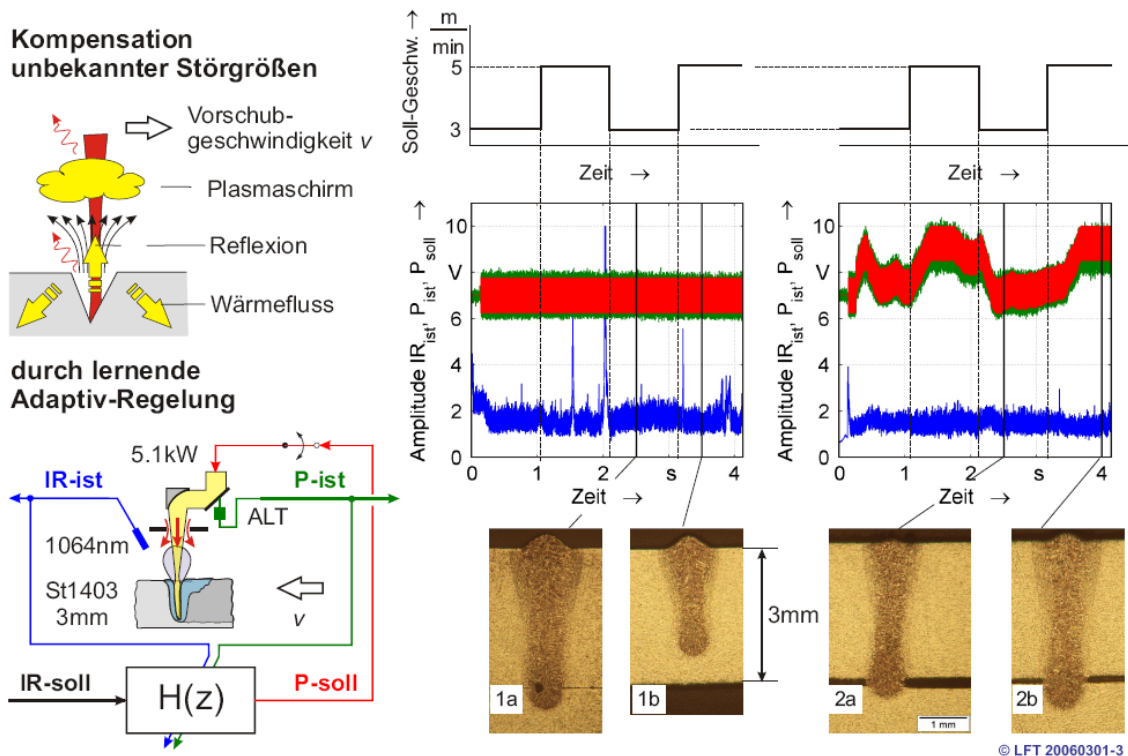


Bild 6: Energiedosisregelung beim Laserstrahlschweißen

Bild 6 zeigt erste Ergebnisse zur Energiedosisregelung. In diesem Experiment wurde die Vorschubgeschwindigkeit während des Schweißprozesses verändert. Demzufolge ändert sich auch die Einschweißtiefe im unregulierten Fall (Schliffbilder 1a und 1b). Im regulierten Fall bleibt die Einschweißtiefe dagegen über der gesamten Nahtlänge nahezu konstant (Schliffbilder 2a und 2b). Einer erhöhten Vorschubgeschwindigkeit wirkt hier der Regler durch eine gleichzeitige Erhöhung der Laserleistung entgegen. Damit können beide oben gestellten Fragen positiv beantwortet werden: Der Energiedosisregler ist in der Lage sich verändernde Prozessparameter zumindest in gewissen Grenzen durch eine Anpassung der Laserleistung automatisch auszugleichen. Diese Grenzen werden derzeit in weiterführenden Experimenten untersucht. Als besonders problematisch stellt sich dabei ein Übergang vom Einschweißen ins Durchschweißen heraus. Da sich dabei die Prozessdynamik, die durch den Regler analysiert wird, offenbar massiv ändert, scheitert die Regelung derzeit noch in diesem Fall.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Veröffentlichung wurde eine Multiparameterregelung für das Laserstrahlschweißen vorgestellt, die in der Lage ist, Störungen unbekannter Herkunft zu kompensieren. Basis dieser Regelung sind Sensoriken zur Erfassung der vom Werkstück absorbierten Laserleistung, der Fokusslage und des Vorschubs sowie Aktoren zur Beeinflussung dieser Größen. Die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Reglers wurde in ersten Experimenten erfolgreich nachgewiesen. In weiterführenden Arbeiten werden derzeit die einzelnen Regelkreise aufeinander abgestimmt und miteinander gekoppelt. Die vorgestellte Regelung wird zukünftig den Aufwand bei der Vorbereitung eines Schweißprozesses erheblich reduzieren. Schweißparameter

wie Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung oder Fokusslage müssen dann nicht mehr manuell durch den Anlagenbediener vorgegeben werden. Vielmehr soll der Regler dazu in der Lage sein, autonom die richtigen Schweißparameter zur Erzielung eines gewünschten Bearbeitungsergebnisses zu finden, also zum Beispiel bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit eine konstante Einschweißtiefe einzuhalten.

7 Literatur

- [1] Müller, M.; Dausinger, F.; Griebisch, J.: Online Process Monitoring and Control of Laser Welding. In: International Body Engineering Conference & Exposition. 1997.
- [2] Hillerich, B.; Overmeyer, L.; Schumacher, J.: Kapazitive Abstandsregelung für das Schweißen mit Nd:YAG-Lasern an dreidimensionalen Geometrien. In: Schweißen & Schneiden, 49(6) (1997).
- [3] Haran, M.; Hand, D.; Peters, C.; Jones, J.: Closed-Loop for Laser Welding. In: Proc. International Conference of the Applications of Lasers and ElectroOptics, Orlando, Florida: Laser Institute of America, 1996, S. 154-163.
- [4] Bagger, C.; Gong, H.; Olsen, F.: Focal point position optimization with neural networks in CO₂ laser welding. In: Beyer, E.; Cantello, M.; La Rocca, A.V.; Laude, L.D.; Olsen, F.O.; Sepold, G. (Hrsg.): Laser Material Processing: Industrial and Microelectronics Applications; Proc. SPIE, Bd. 2207. 1994. S. 369-380.
- [5] Kogel-Hollacher, M.: Prozesskontrolle des Laserstrahl-tiefschweißens durch Tiefenmessung und -regelung. In: Laser 2000: Qualifizierung von Laserverfahren, DVS-Berichte, Bd. 205. 2000, S. 98-101.
- [6] Meijer, J.; Postma, S.; Römer, G.: Optical Sensors for Penetration Control in Nd: YAG Laser Welding. In: Geiger, M.; Otto, A. (Hrsg.): Proc. Laser Assisted Net shape Engineering 3 (LANE'2001). Meisenbach Verlag, 2001. S. 75-86.
- [7] Seidel, B.: Plasmakontrolle für das Schweißen mit Laserstrahlung. Dissertation, RWTH Aachen, 1998.
- [8] Postma, S.; Aartsy, R.; Hesemansy, A.: Penetration feedback control in overlap laser welding of sheet metal. In: Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration (WESIC). The Netherlands, 2001.
- [9] Negendack, M.; Schwab, J.: Process Monitoring in Laser Beam Welding. In: Geiger, M.; Otto, A. (Hrsg.): Proc. Laser Assisted Net shape Engineering 3 (LANE'2001). Meisenbach Verlag, 2001, S. 697-706.
- [10] Schuberth, S.: Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂ – Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken. Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Bd. 81, Bamberg: Meisenbach Verlag, 1998.
- [11] Hohenstein, R.: Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung. Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Bd. 151. Meisenbach Verlag, 2003.