

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 17.923N

## Thema

Sensorgestütztes MSG-Engspaltschweißen von Feinkornstählen mit modifizierter Prozessführung im Dickblechbereich

## Berichtszeitraum

01.01.2014 - 31.07.2016

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## Forschungsstelle(n)

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Berlin, den 31.01.2017

Dr.-Ing. Andreas Pittner

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

## 1. Zusammenfassung

In der industriellen Fertigung werden Bleche mit großen Wandstärken in vielen Bereichen eingesetzt, unter anderem in der chemischen Industrie, dem Behälter-, Schiffs- und Turbinenbau sowie beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Das Schweißen dickwandiger Bauteile mittels Lichtbogenverfahren erfordert dabei die Mehrlagentechnik, wodurch sich die Fertigungskosten erhöhen. Gleichzeitig nimmt der Wärmeeintrag ins Werkstück zu, was bei der Verarbeitung hochfester Feinkornbaustähle zu berücksichtigen ist. Dies geschieht meist durch Vorwärmung bzw. nachgelagerte Wärmebehandlung, was wiederum die Produktionskosten und -zeiten deutlich anheben kann. Wesentliches Ziel der schweißtechnischen Auslegung ist es daher, den Nahtquerschnitt möglichst klein zu halten. Dies führt zu technologischen Vorteilen, wie geringerer Energieeintrag und dadurch weniger Verzug und Eigenspannungen und besseren mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerten. Gleichzeitig sinkt der Fertigungsaufwand sowie Energie- und Zusatzwerkstoffbedarf, was die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Verfahrens erhöht.

Ein Verfahren, welches den technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen des Verschweißens von Bauteilen hoher Blechdicken gerecht wird, ist das MSG-Engspaltschweißen. Das MSG-Engspaltschweißen ist eine besondere Schweißtechnik, welche durch eine als Steiflanken ausgebildete Nahtvorbereitung gekennzeichnet ist, woraus sich eine deutliche Einsparung bezüglich des benötigten Zusatzwerkstoffmaterials ergibt. Hierbei werden üblicherweise Öffnungswinkel von  $1^{\circ}$ - $2^{\circ}$  gewählt, um die Nahtschumpfung zu berücksichtigen und ein Einklemmen des Engspaltschweißbrenners zu vermeiden.

Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stellt das Metallschutzgasschweißen aufgrund der relativ geringen Investitionskosten das wichtigste Schmelzschweißverfahren dar. Speziell für das MSG-Engspaltschweißen ergeben sich nachfolgend aufgeführte Vorteile:

- hohe Produktivität (kleinere Nahtquerschnitte und somit weniger Zusatzwerkstoffbedarf, einfache Nahtvorbereitung, z.B. durch Brennschnitt, einseitige Zugänglichkeit auch für große Bauteildicken und dadurch einfachere Handhabung großer Komponenten, beliebige Schweißpositionen/Zwangslagen zur Steigerung der Flexibilität)
- hohe Schweißnahtqualität (geringerer Wärmeeintrag im Vergleich zur DV-Nahtvorbereitung; die Mehrlagentechnik führt zu einer Verbesserung der mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften)
- Reduktion des Schweißverzuges und schweißbedingten Eigenspannungen (geringerer Wärmeeintrag sowie Nahtvolumen und günstige Nahtform durch parallele Flanken)
- Gute Automatisierbarkeit (einfache Nahtvorbereitung, geringer Energieeintrag und geringes Schmelzbadvolumen)
- Optimale konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten für dickwandige Bauteile

Gleichwohl stellt das MSG-Engspaltschweißverfahren hohe Anforderungen an die Schweißtechnik sowie den Anwender. Dies betrifft die Aspekte Zugänglichkeit, Wärmebelastung des Brenners sowie mögliche Flankenbindefehler. Ein robuster Prozess ist daher notwendig, um die Schweißnahtqualität und Reproduzierbarkeit beim MSG-Engspaltschweißen zu gewährleisten. Dies insbesondere mit Hinblick auf Einzelteilerfertigungen zu ermöglichen erfordert daher individuelle Mechanisierungs- sowie Automatisierungskonzepte. Bezüglich der Automatisierung des MSG-Engspaltschweißens stehen die Aspekte Höhen- und Seitenführung

des Schweißbrenners sowie die Füllgradregelung, d.h. das Regeln der Schweißparameter auf gleiche Füllhöhe auch bei unterschiedlich breiten Fugen oder Fugentiefen, im Vordergrund.

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Anwendung der Engspalttechnik für das Metallschutzgasschweißen dickwandiger Bauteile aus Feinkornbaustahl. Hierbei wird direkt auf den Bedarf der Industrie, vor allem KMU, eingegangen, flexible und stabile Automatisierungslösungen zur Fertigung von Kleinserien bereitzustellen. Deshalb liegt der Fokus auf der Implementierung eines sensorbasierten Automatisierungskonzepts, welches neben der Seiten- und Höhenführung des Brenners vor allem auch eine gleichbleibende Füllhöhe des Schweißguts im Engspalt (Füllgradregelung) gewährleistet und vom Anwender nur einen möglichst geringen Konfigurationsaufwand erfordert. Als Sensoren werden dabei sowohl prozessorientierte Sensorik (Lichtbogensensor) als auch geeignete optische Verfahren (Lichtschnittsensor) eingesetzt.

Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse zeigen konkrete technische Lösungen für die automatisierte Anwendung des MSG-Engspaltschweißen, sowohl mittels optischer als auch prozessorientierter Sensorik, und sprechen damit ein breites Spektrum möglicher Anwender, insbesondere KMU, an.

Die Seitenführung des Brenners auf Basis der optischen Messgrößen stellt eine robuste und einfach zu implementierende Möglichkeit zur Nahtverfolgung dar. Für die Höhenführung über der Schweißnaht wurde neben der Lösung mittels optischer Messverfahren zusätzlich eine direkt darauf aufbauende Möglichkeit zur Implementierung eines Lichtbogensensors abgeleitet. Das Vorgehen konnte sowohl für Sprühlichtbogenprozesse als auch bei Verwendung von Impulslichtbogenprozessen erfolgreich angewendet werden.

Die zur Sicherstellung eines gleichmäßigen Flankeneinbrandes entwickelte Pendelregelung ist ebenfalls für unterschiedliche Lichtbogenarten einsetzbar und muss vom Anwender auch beim Einsatz einer großen Bandbreite unterschiedlicher Prozessparameter nahezu nicht konfiguriert werden. Neben der im Rahmen der Verfahrensprüfung untersuchten Pendelraupentechnik konnte die Übertragbarkeit des Vorgehens auch auf die Strichraupentechnik anhand von gezielten Schweißversuchen aufgezeigt werden.

Die zunächst auf Basis der optischen Messwerte ausgelegte Füllgradregelung konnte die vorgesehenen Spaltvariationen von 18 bis 24 mm im Rahmen der durchgeführten Verfahrensprüfung ausgleichen. Die Ableitung eines äquivalenten Lichtbogensensors durch Kopplung beider Messprinzipien wurde am Laufzeitende des Vorhabens aufgezeigt, konnte jedoch durch zeitliche Beschränkung nicht für die Verfahrensprüfung berücksichtigt werden.

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde die Entwicklung der Prozessregelung für das Vorhaben auf Schweißungen in Wannennlage und Grundwerkstoffe der Güte S355J2 beschränkt.

Die Qualifizierung des Verfahrens unter Einsatz der beschriebenen Regelalgorithmen nach DIN EN ISO 15614-1 konnte für alle betrachteten Spaltbreiten zwischen 18 und 24 mm anhand einer 50 mm dicken Demonstratorprobe nachgewiesen werden.

**Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.**

## **2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

### **Beschlüsse des projektbegleitenden Ausschuss**

Im Rahmen der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses wurden mehrheitlich unter den teilnehmenden Industrievertretern die folgenden Beschlüsse gefasst:

- Fokussierung der Forschung auf Erweiterung der Sensorik für das MSG-Engspaltschweißen. (1. PA Sitzung)
- Durchführung sämtlicher Schweißversuche an Stählen der Güteklasse S355J2, eine Betrachtung höherfester Stähle ist für das Erreichen der Projektziele nicht notwendig. (1. PA Sitzung)
- Herstellung der Proben in Blechdicken 30 mm und 50 mm mittels Brennschnitt, Blechdicke des Demonstratorbauteils 50 mm. (1. PA Sitzung)
- Auslegung der Prozessregelung und die Verfahrensprüfung geschehen in Schweißposition PA, die Schweißpositionen PF und PC werden auf Empfehlung des projektbegleitenden Ausschusses nicht im Rahmen des Vorhabens berücksichtigt. (3. PA Sitzung)

### **Vorbereitende Schweißversuche (AP1)**

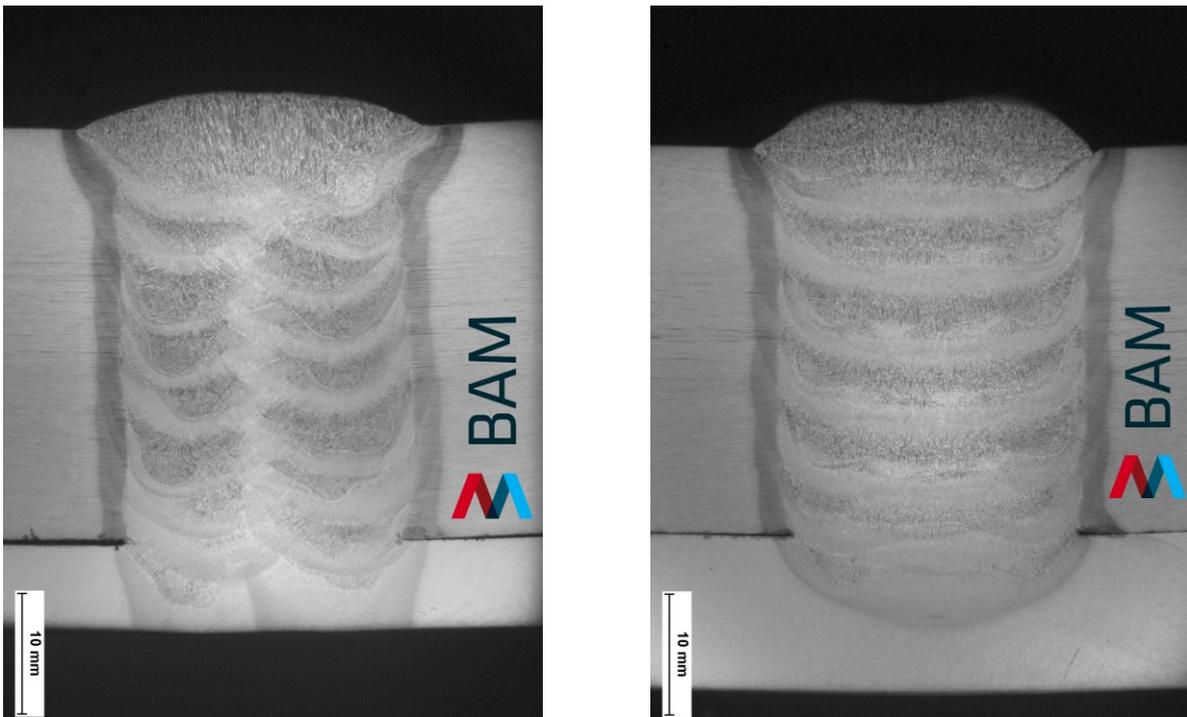
Zur Feststellung der allgemeinen Verfahrensstabilität wurden zunächst vorbereitende Schweißversuche in den Lagen PA, PF (bis 50° steigend) und PC (horizontal) durchgeführt. Hierzu wurde der vom Projektpartner CLOOS bereitgestellte Engspaltbrenner mit der bestehenden Roboterschweißanlage ohne weitere Prozessmodifikationen verwendet. Die Höhen- und Seitenführung wurde ebenfalls über Regler der Robotersteuerung realisiert. In den Schweißpositionen PA und PF war die vorhandene Regelung für die Höhen und Seitenführung mit Einschränkungen für die Prozessführung geeignet, für die PC-Position hingegen nicht. Weiterhin traten Schwierigkeiten beim gekoppelten Betrieb der unabhängig arbeitenden Regler für die Höhen- und Seitenführung auf. Hieraus wurde für den weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens das Ziel abgeleitet, möglichst unabhängig voneinander agierende Regelkreise aufzubauen und auch dahingehend zu testen. So sollte idealerweise ein Anpassen der Schweißgeschwindigkeit oder der Drahtvorschubgeschwindigkeit durch die Füllgradregelung keine Auswirkung auf die Regelung des Flankeneinbrandes durch ein Anpassen der Pendelbewegung haben.

Im Rahmen der Vorversuche wurden die wesentlichen Schweißparameter (u.a. Schweißgeschwindigkeit, Drahtvorschub, Schweißspannung) variiert um vorab geeignete Prozessfenster zu bestimmen. Darüber hinaus wurde das MSG-Engspaltverfahren sowohl mit Einsatz eines Sprühlichtbogenprozesses als auch mit einem Impulslichtbogen (U/I geregelt) getestet. Auf Grund der wesentlich geringeren Spritzerbildung und der hohen Prozessstabilität über einen großen Bereich der Drahtvorschubgeschwindigkeit von 8 bis 14 m/min (in Wannenlage) stellte sich hierbei der U/I geregelte Pulsprozess für die weiteren geplanten Arbeitsschritte als vorteilhaft heraus. In Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden im weiteren Ablauf des Forschungsvorhabens daher die Versuche größtenteils mit dem Pulslichtbogen durchgeführt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse bei der Verwendung von Sprühlichtbogenprozessen wurde an ausgewählten Stellen trotzdem überprüft, die Ergebnisse sind in der Darstellung der Ergebnisse von AP6 aufgeführt. Grundwerkstoff für die Vorversuche war ein normalisiert gewalzter Feinkornbaustahl der Güte S355J2+N nach DIN EN 10025-3, als Zusatzwerkstoff wurden Massivdrahtelektroden G4 Si1 nach DIN EN ISO 14341 mit 1,2 mm Durchmesser verwendet, als Schutzgas kam ein Gemisch aus 82% Argon und 18 % CO<sub>2</sub> zum Einsatz.

Die Schweißungen wurden sowohl in der Pendelraupentechnik (eine Raupe pro Lage) als auch in Strichraupentechnik (mehrere Raupen pro Lage) durchgeführt um die jeweilige

Prozessstabilität zu untersuchen. Während in PA- und PF-Schweißposition beide Techniken anwendbar sind, kann in PC technisch bedingt nur mit Strichraupen geschweißt werden. Da bei dieser Technik als Bezugskante für die Lichtbogensensorik nur noch eine Nahtflanke zur Verfügung steht, müsste die eingesetzte Lichtbogensensorik dahingehen angepasst werden, was die Schwierigkeiten beim Einsatz des konventionellen Algorithmus erklärt.

Insgesamt konnte mit Hilfe der Vorversuche die wesentliche Prozessstabilität nachgewiesen und darüber eine erste Abschätzung zu den anwendbaren Parameterräumen getroffen werden. Die Schweißungen aus den Vorversuchen wurden anhand von Schliffbildern untersucht und dem Projektausschuss präsentiert und sind exemplarisch in der unten stehenden Abbildung dargestellt.

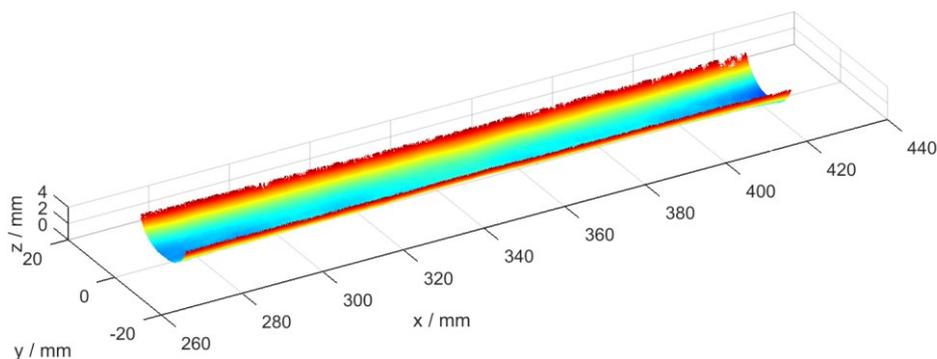


**Abbildung:** Schliffbilder aus Vorversuchen in mit Strichraupentechnik (links, PA, 30 mm S355J2+N) und Pendelraupentechnik (rechts, PF 50°, 30 mm S355J2+N)

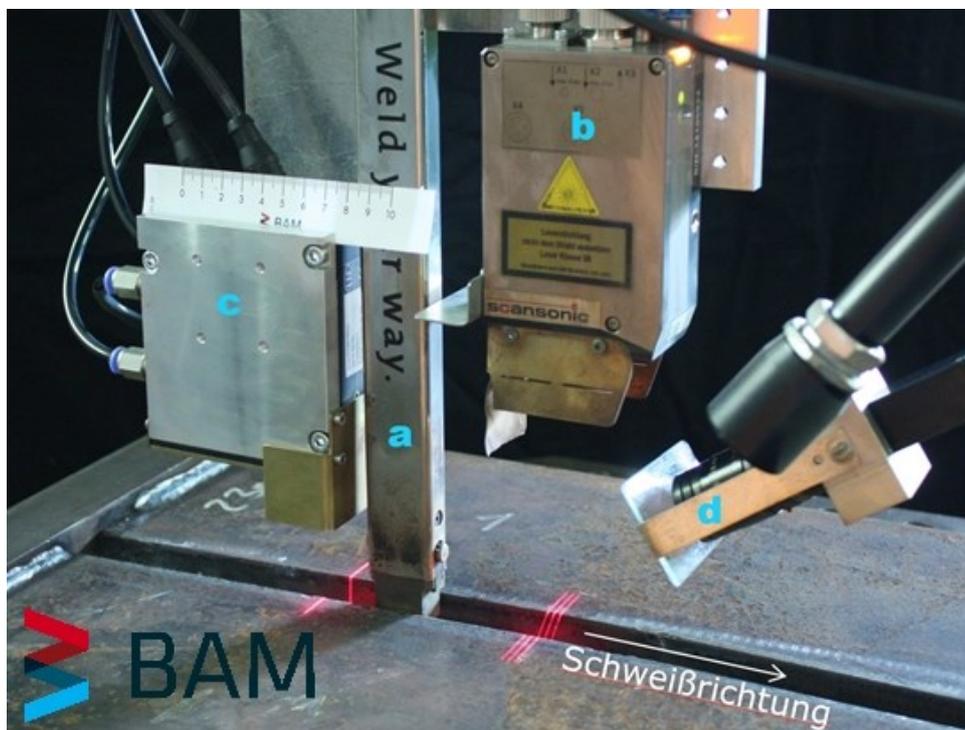
### **Analyse Sensorik offline (AP2)**

Im Rahmen der Vorversuche (s. AP1) wurde zunächst ein taktile Sensor am Roboter befestigt. Der taktile Sensor dient zur Feststellung der Orientierung des Werkstücks und der Fugengeometrie vor dem Schweißdurchgang an ausgewählten Punkten des Werkstücks. Der zu untersuchende Raum ist dabei im Vorfeld grob vom Benutzer festzulegen, die anschließende Nahtfindung und das Abtasten der Nahtgeometrie wird vom Roboter selbstständig im Rahmen eines eigens entwickelten Programms durchgeführt. Die taktile Nahtsuche ist robust aber verhältnismäßig langsam und in der Genauigkeit beschränkt. Darüber hinaus bietet sie keine Möglichkeit während des Schweißvorgangs Informationen über die Fugengeometrie zu erhalten, was eine Verwendung zur Regelung des laufenden Prozesses ausschließt. Als Erweiterung und Alternative zur taktilen Vermessung wurde die Integration eines optischen Sensors in den Versuchsaufbau vorgenommen um die Messgenauigkeit gegenüber dem taktilen Sensor zu erhöhen und den Arbeitsablauf zu beschleunigen. Der Laserschnittsensor TH6D wurde hierfür vom PA-Mitglied *Scansonic MI* für die Laufzeit des Projekts zur Verfügung gestellt und basiert auf dem Lichtschnittprinzip. Der Sensor ist in der Lage, anhand vorab programmierter

Nahtgeometrien Kenndaten wie die Spaltbreite, Nahttiefe und Nahtquerschnittsfläche zu berechnen und an die Steuerung zu übertragen. Mit einem Vorlauf von ca. 3 cm zur Prozesszone beim Lichtbogenschweißen ist der Sensor auch während des laufenden Schweißprozesses einsetzbar, so dass die ermittelten Messgrößen neben einer Offline-Vermessung auch zur Online-Regelung des Prozesses genutzt werden können. Zusätzlich wurde der Versuchsstand um einen weiteren Lichtschnittsensor der Firm *Micro-Epsilon* erweitert. Mit Hilfe dieses, nachlaufend montierten, Sensors ist zusätzlich eine hochaufgelöste Vermessung des Oberflächenprofils der Schweißnaht möglich, wobei die einzelnen Linienprofile zu einer dreidimensionalen Abbildung zusammengefügt werden können, welche offline eine sehr detaillierte Betrachtung der Fugengeometrie ermöglicht. Durch entsprechende Verarbeitung der Sensordaten ist es insbesondere möglich, die Spaltbreite auch direkt an der Nahtoberfläche statt der oberen Fugenkante zu ermitteln. Die untenstehenden Abbildungen zeigt beispielhaft das Oberflächenprofil einer Schweißnaht beim MSG-Engspaltschweißen sowie den Versuchsaufbau.



**Abbildung:** Profilscan einer Schweißnahtoberfläche (Lage geschweißt in Pendelraupentechnik)



**Abbildung:** Aufbau des Versuchsstandes mit MSG-Engspaltschwert (a), vorlaufendem Lichtschnittsensor (b), nachlaufendem Profilschwerter (c) sowie HDR-Kamera zur Prozessbeobachtung (d)

### **Automatisierte Bahnprogrammierung (AP3)**

Auf Grundlage der Messungen mit dem taktilen Sensor (s. AP2) können Positionsdaten für eine automatisierte Bahngenerierung am Roboter erstellt werden. Alternativ ist die Bahngenerierung mittels eines Offline-Programmiersystems weit verbreitet, welche sich auch bei den im PA vertretenen Anwendern der MSG-Engspalttechnologie bereits in der Anwendung befindet. Da insbesondere die Online-Sensorik von den PA-Mitgliedern als Schwerpunkt des Forschungsvorhabens festgelegt wurde und im Bereich der Bahnprogrammierung bereits zufriedenstellende Lösungen vorhanden sind, wurden auf weiterführende Arbeiten in diese Richtung nach Rücksprache mit dem PA verzichtet.

### **Analyse Sensorik online (AP4)**

Für die online Sensorik (d.h. während des laufenden Schweißvorgangs) wurde der bestehende Versuchsstand zunächst geeignet umgerüstet. Grundanforderung war dabei der Aufbau eines echtzeitfähigen Steuerungssystems zur Messdatenerfassung und Regelung während des Schweißvorgangs, das darüber hinaus die einfache Integration verschiedenster Messwerte und externer Geräte ermöglicht. Der gesamte Versuchsstand kann im Zuge dessen über einen zentralen PC in Echtzeit angesteuert werden.

Die umgesetzten Anforderungen an den Versuchsstand sind im Folgenden aufgelistet:

- Zentrale Vernetzung aller am Schweißvorgang beteiligten Geräte
  - Schweißroboter
  - Engspaltbrenner
  - Schweißstromquelle
  - Optische Sensorik
  - externe Strom/Spannungsmessung
- Integration der wesentlichen prozessorientierten Messdaten:
  - Strom/Spannungsmessung mit über 10kHz
  - Erfassen der Pendelgeometrie des Engspalt-Brennerschwerts zur Positionssteuerung
  - Erfassen digitaler Signale der Stromquelle
  - Temperaturmessung
  - Messwerte der optischen Sensoren
- Echtzeit-Steuerung der Prozessparameter
  - Höhen- & Seitenführung des Roboters
  - Pendelparameter des Engspaltbrennerschwertes
  - Schweißparameter der Stromquelle

Die Programmierung der Regler kann darauf aufbauend in den Programmiersprachen nach IEC 61131-3, C++ oder MATLAB/Simulink erfolgen und in die Steuerung integriert werden.

Der vorlaufend montierte Lichtschnittsensor TH6D des Projektpartners *Scansonics MI* wurde für die Erfassung der Spaltbreite, der Spaltmitte sowie des Höhenabstands über der Nahtmitte bzw. Werkstückoberkante konfiguriert und in den Versuchsaufbau integriert. Die Bestimmung der Position relativ zur Spaltmitte erlaubt online die optische Nahtführung entlang der Fuge,

welche anhand einer geschwungenen Nahtgeometrie mit brenngeschnittenen Kanten erfolgreich nachgewiesen werden konnte.

Zur Bestimmung und Untersuchung der Aufbauhöhe der einzelnen Lagen wurden geeignete Auswerteroutinen für die Profilmessungen des nachlaufenden Sensors entwickelt. Die Auflösung der Profilmessung mit  $< 0,1$  mm erlaubt dabei außerdem eine Betrachtung der Gleichmäßigkeit der Lagenanbindung an die Nahtflanken. Eine unzureichende Anbindung auf Grund einer zu geringen Pendelauslenkung oder Einbrandkerben bei zu weitem Pendeln der Drahtelektrode sind typischerweise an einem deutlich verringertem oder nicht vorhandenen Krümmungsradius an der Flanke im Nahtprofil zu erkennen. Die so ermittelten Messdaten (Aufbauhöhe, Spaltbreite an der Nahtoberfläche) können über die Verknüpfung mit der Position des Schweißbrenners entlang der Naht (in x-Richtung) ebenfalls zur Online-Regelung in der Steuerung bereitgestellt werden.

### Statistische Versuchsplanung (AP5)

In Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden sich auf mehrere, möglichst repräsentative Probengeometrien zur Entwicklung und Untersuchung der Prozessführung geeinigt. Die einzelnen Nahtformen sind in unten stehender Abbildung schematisch dargestellt.

	A	B	C	D	E
Geometrie					
Fertigung	gefräst Brennschnitt	gefräst Brennschnitt	gefräst Brennschnitt	Brennschnitt	gefräst Brennschnitt
Blechdicke	30 mm 50 mm	30 mm 50 mm	30 mm 50 mm	50 mm	30 mm 50 mm

**Abbildung:** Übersicht der Referenzgeometrien

Die Probengeometrien A, B & C wurden zunächst als gefräste Nahtvorbereitungen mit einer Nuttiefe von 15 mm bei 30 mm Probendicke gefertigt. Die Nahtvorbereitung mittels Fräsen bietet hierbei den Vorteil, dass die gewünschten Spaltbreiten exakt erreicht werden können und somit als Referenz für die Auswertung der abzuleitenden Regelalgorithmen (vgl. AP6) auch ohne optische Auswertung nutzbar sind.

Die Probengeometrie E wurde brenngeschnitten für die Erprobung und Anwendung einer optischen Nahtführung auf Grundlage des vorlaufend montierten Sensors benutzt.

Probengeometrie E steht für die am Projektende zu schweißende Demonstratorprobe. Ziel der Probengeometrie war es, sämtliche im Vorhaben abgedeckten Randbedingungen (Brennschnittvorbereitung, variierende Spaltbreiten und Nahtquerschnitte, öffnende und schließende Geometrien) in einer Probe zu vereinen und unter Einsatz der Prozessregelung zu schweißen. Die schlussendlich gewählte Probengeometrie ist in AP9 beschrieben, sie ist zudem Ausgangspunkt für die Verfahrensprüfung (vgl. AP8).

Die Proben der Geometrie A und B wurden zunächst zur Analyse des Systemverhaltens und als Ausgangspunkt für die Auslegung der Pendel- und Füllgradregelung mit konstanten Schweißparametern geschweißt, die Spaltbreite wurde dafür über mehrere Proben in 1 mm Abständen variiert. Die anschließenden Schweißversuche wurden unter Einsatz der in AP6 beschriebenen Regelalgorithmen durchgeführt.

### Aufbau eines Reglerkonzepts (AP6)

Betrachtet man häufig auftretende Fehler beim MSG-Engspaltschweißen und berücksichtigt veränderliche Spaltbreiten, sind für eine sichere und stabile Prozessführung über mehrere Lagen zunächst folgende Zielstellungen durch die automatisierte Prozessführung zu erreichen:

1. Seiten- und Höhenführung des Brenners entlang der Fuge
2. Sichere Flankenbindung und Vermeidung von Flankenbindefehlern
3. Gleichmäßiger und konstanter Lagenaufbau

Je nach der verfügbaren Ausstattung kann zur Erreichung dieser Ziele auf unterschiedliche Messgrößen, beispielsweise optische Messungen oder Lichtbogensensorik zurückgegriffen werden. Die untenstehende Tabelle listet die Regelaufgaben und die im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendeten Eingangs- und Steuergrößen auf. Grundsätzlich wurde die Forschungsarbeit daraufhin ausgerichtet, dass optische Sensorik und Lichtbogensensorik austauschbar gestaltet und somit an unterschiedliche Anlagenkonfigurationen angepasst werden können.

	Optische Sensorik	Lichtbogensensorik	Steuergrößen
Seitenführung	○		$V_y$
Höhenführung	○	○	$V_z$
Regelung Flankeneinbrand		○	$\varphi_{\max}, t_H, \omega$
Füllgradregelung	○	○	$V_d, V_S$

**Tabelle:** Übersicht der Regelaufgaben und möglicher Eingangs- sowie Steuergrößen

### Seitenführung

Die Regelung der online-Seitenführung entlang der Schweißnaht wurde mit dem zur Verfügung stehenden, vorlaufend montierten optischen Sensor TH6D umgesetzt. Hierfür wird an der Werkstückoberkante die Brennerstellung relativ zur Spaltmitte gemessen und an die Steuerung gesendet. Über eine einfache PID-Regelstrecke zum Ausgleich der Abweichungen von der Mittelstellung kann der Schweißbrenner anschließend entlang der Schweißnahtmitte geführt werden. Die Betrachtung der Werkstückoberkante im Gegensatz zur Spaltgeometrie auf der Nahtoberfläche hat dabei einen rein praktischen Hintergrund. Mit der online einsetzbaren optischen Sensorik war die Erfassung der oberen Nahtflanken bei größeren Nahttiefen deutlich stabiler als Messungen auf der Nahtoberfläche. Zudem ist bei sehr großen Blechdicken >100 mm davon auszugehen, dass ein verfügbarer Sensor nicht mehr bis zum Fugengrund messen kann. Die Werkstückoberkante ermöglicht hingegen jederzeit die Führung des Brenners entlang der Naht. Für das Forschungsvorhaben wurde daher die Seitenführung auf Basis der optischen Messwerte an der Werkstückoberkante implementiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine mittige Stellung bezogen auf die Werkstückoberfläche bei unregelmäßiger Nahtvorbereitung nicht zwingend zu einer mittigen Stellung des Brenners am Fugengrund führt.

## **Höhenführung**

Für die Höhenführung des Brenners über der Schweißnaht wurde zunächst ebenfalls die optische Sensorik eingebunden. Die Höhe über der Schweißnahtmitte wird gemessen und ähnlich der Seitenführung mittels eines PID-Algorithmus auf den gewünschten Sollwert geregelt. Zusätzlich wurde eine Höhenführung mittels Lichtbogensensorik entworfen. Üblicherweise wird für die Höhenregelung mittels Lichtbogensensorik abhängig von der gewählten Kennlinie direkt der gemessene Schweißstrom bzw. die Schweißspannung als Regelgröße betrachtet. Dies setzt allerdings voraus, dass die zu erreichende Sollgröße (z.B. der einzustellende Schweißstrom) in Abhängigkeit der Prozessrandbedingungen (beispielsweise der Drahtvorschubgeschwindigkeit) bekannt ist. Üblicherweise werden die notwendigen Kenngrößen anhand aufwändiger Vorversuche experimentell ermittelt und das Regelverhalten anschließend vom Anwender feinabgestimmt. Grundidee der hier entwickelten Lichtbogensensorik war es im Gegensatz zum konventionellen Vorgehen, die gemessenen Strom- und Spannungssignale zunächst über ein geeignetes Regressionsmodell mit geometrischen Zielgrößen, in diesem Falle dem Kontaktrohrabstand, in Verbindung zu bringen. Der Lichtbogensensor liefert also die gleichen geometrischen Bezugsgrößen wie der zuvor verwendete optische Sensor. Dies hat den Vorteil, dass zur Regelung des Systems bei beiden Sensoren die gleiche Eingangsgröße verwendet und folglich auch der gleiche Regelalgorithmus benutzt werden kann. Zur Auslegung des Regressionsmodells wurde über mehrere Schweißungen, bei denen sowohl Drahtvorschub als auch Kontaktrohrabstand beim Schweißen verändert wurden die online-Messdaten des optischen Sensors mit den Strom- und Spannungsmessdaten verknüpft und automatisiert ausgewertet. Die erreichte Genauigkeit der Höhenführung bei Verwendung des optischen Sensors lag dabei im Bereich von ca.  $\pm 0,1$  mm, bei Schweißversuchen mit Höhenführung der Lichtbogensensorik konnte eine Genauigkeit von ca.  $\pm 0,3$  mm erzielt werden. Die so erzielten Genauigkeiten sind ausreichend für eine sichere Prozessführung beim MSG-Engspaltschweißen.

## **Regelung des Flankeneinbrandes**

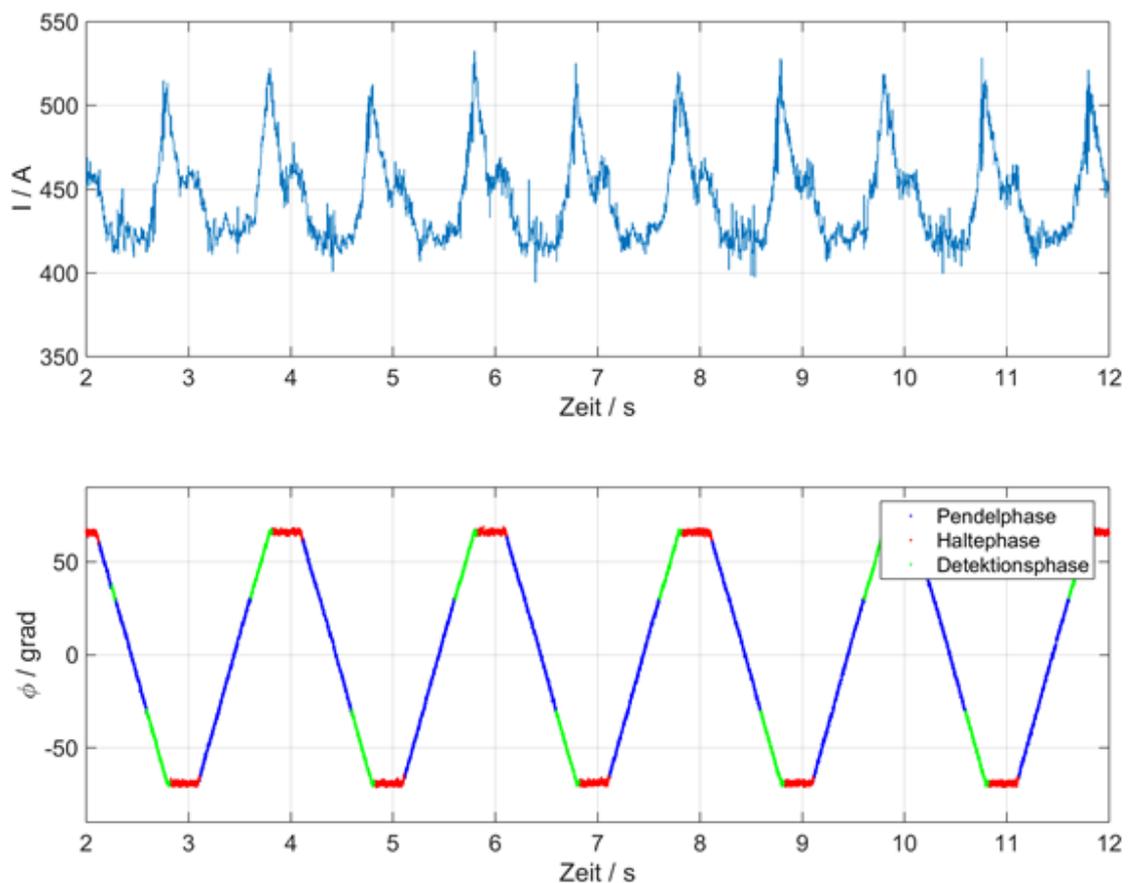
Die sichere Anbindung der Nahtflanken ist direkt von der gewählten maximalen Auslenkung der pendelnden Drahtelektrode abhängig. Ist der Pendelwinkel zu niedrig gewählt, werden die Flanken nicht ausreichend erfasst bzw. aufgeschmolzen, wohingegen bei zu weitem Pendeln schnell Einbrandkerben entstehen, die beim Schweißen der nachfolgenden Lage zu Flankenbindefehlern führen können. Die Pendelbreite muss demnach auf die Spaltbreite abgestimmt werden. Eine so ermittelte Pendelamplitude führt jedoch nur dann zu einem sicheren Schweißergebnis, wenn der Schweißbrenner mittig in der Fuge positioniert ist und zusätzlich mit gleichbleibendem Kontaktrohrabstand geschweißt wird. Befindet sich der Schweißbrenner nicht in der Fugenmitte, wird bei einer symmetrischen Pendelbewegung die in Versatzrichtung liegende Flanke stärker erfasst als die gegenüberliegende Nahtflanke, was schnell zu Flankenbindefehlern führen kann. Andererseits wirkt sich der Kontaktrohrabstand und damit die Länge des freien (pendelnden) Drahtendes auf die erreichbare seitliche Auslenkung der Pendelbewegung aus. Bei kürzerer Drahtelektrodenlänge ist die seitliche Auslenkung bei gleichem Pendelwinkel geringer als bei einem längeren freien Drahtende. Soll also die Pendelamplitude anhand der ermittelten Spaltbreite geregelt werden, muss gleichzeitig die exakte Positionierung des Brenners gewährleistet sein.

Um die oben beschriebene, komplexe Interaktion zwischen Seiten- und Höhenführung sowie der Regelung der Pendelbreite und damit verbundene Unsicherheiten zu umgehen, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein neuer Ansatz zur Regelung der Pendelamplitude ermittelt. Anstatt eine Pendelbreite vorzugeben (beispielsweise auf Grundlage der Spaltbreitenmessung), wird die Pendelbewegung einzig anhand der Lichtbogensensorik an

beiden Nahtflanken unabhängig gesteuert. Der Entwickelte Algorithmus zur Regelung des Pendelwinkels ist nachfolgend kurz beschrieben:

Während der Pendelbewegung von einer Flanke zur anderen wird in einem definierten Winkelbereich um die Mitte der Pendelbewegung der Schweißstrom aufsummiert und gemittelt. Der so ermittelte Pendelstrom ist abhängig von den gewählten Schweißparametern sowie dem Kontaktrahabstand und dient als Referenzmessung für den Abgleich des Stromverlaufs an den Flanken.

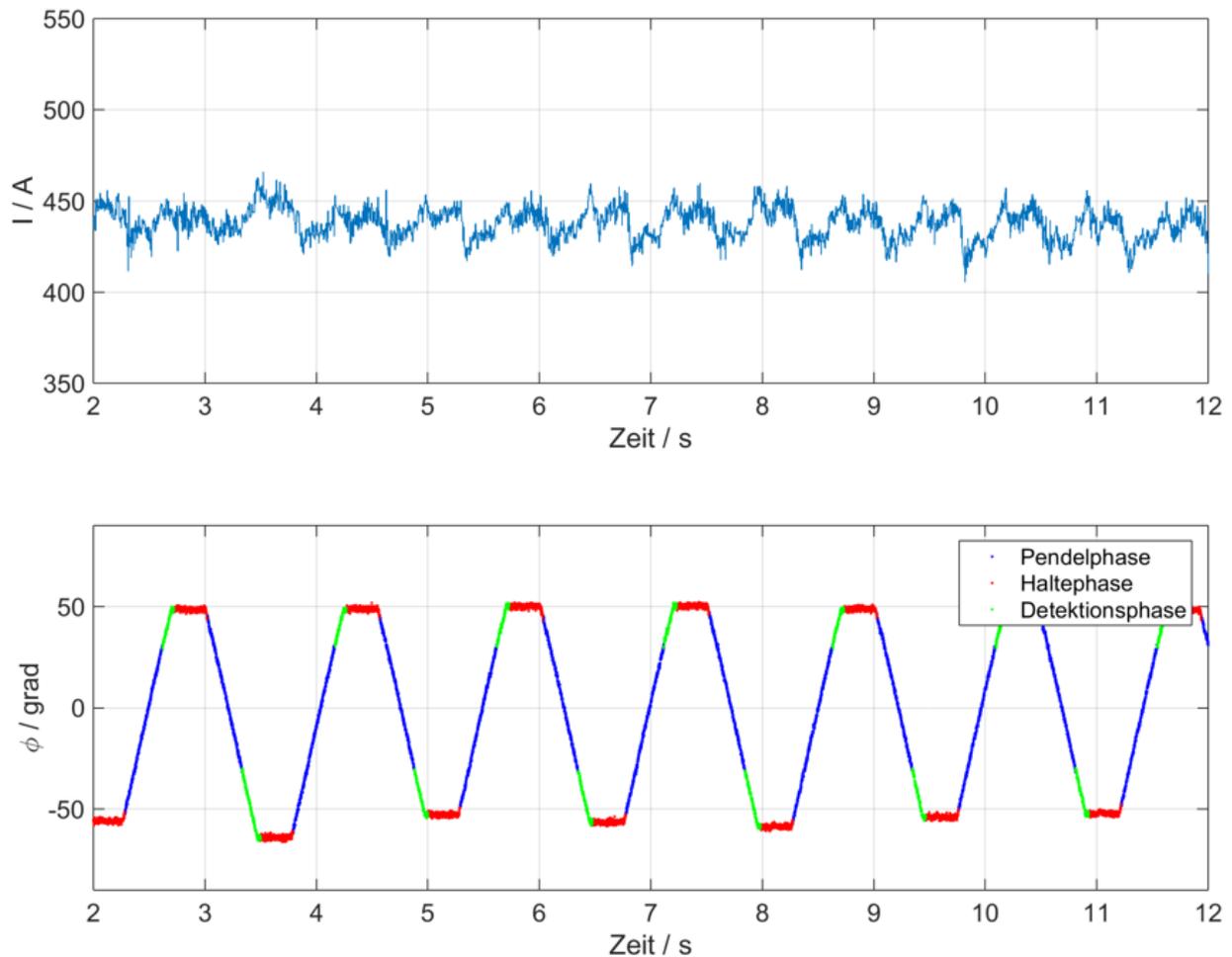
Beim Erfassen der Flanken durch den Lichtbogen steigt der Schweißstrom rapide an (vgl. untenstehende Abbildung). Dieser Anstieg relativ zum gemessenen Strom während der Pendelphase wird genutzt, um den optimalen Zeitpunkt zum Stoppen der Pendelbewegung zu bestimmen. Sobald die Flankenbindung im Stromsignal detektiert wurde, wechselt das System in die Haltephase und bleibt für die eingestellte Haltezeit an der aktuellen Winkelposition. Diese Steuerung des Pendelwinkels erfolgt unabhängig voneinander an beiden Flanken getrennt, was eine schnelle Reaktion auf Veränderungen und Unregelmäßigkeiten in der Spaltgeometrie sowie einen Ausgleich von außermittigen Brennerstellungen ermöglicht. Aus dem Vergleich der so ermittelten Pendelwinkel an der linken und rechten Flanke kann zudem die aktuelle Mitte der Pendelbewegung bestimmt werden.



**Abbildung:** unregelmäßiger Verlauf des Pulsstroms (oben) sowie des Pendelwinkels (unten)

Wie die obenstehende Abbildung zeigt Messwerte einer Engspaltschweißung gleichbleibender Spaltbreite bei konstant gewählter, unregelmäßiger Pendelamplitude von  $140^\circ$ . Während die Drahtelektrode mittig zwischen den Nahtflanken pendelt, befinden sich die Pulsströme im Bereich um 420-430 A (Winkelbereich  $-30^\circ$  bis  $+30^\circ$  im unteren Diagramm). Beim Erfassen der Nahtflanken steigt der Strom innerhalb weniger Zehntelsekunden auf über 500 A an. Dieser Anstieg wird für die Regelung mittels geeigneter Signalverarbeitung erfasst und die

Pendelbewegung angehalten. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Die Rahmenbedingungen beider Versuche (Spaltbreite, Kontaktrohrabstand, Drahtvorschub, Schweißgeschwindigkeit) sind dabei gleich. Im Bereich der Nahtmitte liegen die Pulsströme wieder im Bereich um 425 A, die starken Stromspitzen werden jedoch durch das rechtzeitige Anhalten der Pendelbewegung unterdrückt und liegen nur noch bei ca. 450 A. Im Verlauf der Pendelbewegung ist deutlich zu erkennen, dass der maximale Pendelausschlag nur noch bei ca.  $50^\circ$  bzw.  $-55^\circ$  auf der gegenüberliegenden Flanke liegt, was eine Pendelamplitude von  $105^\circ$  ergibt und damit deutlich geringer als die zuvor festeingestellte Amplitude von  $140^\circ$  liegt.

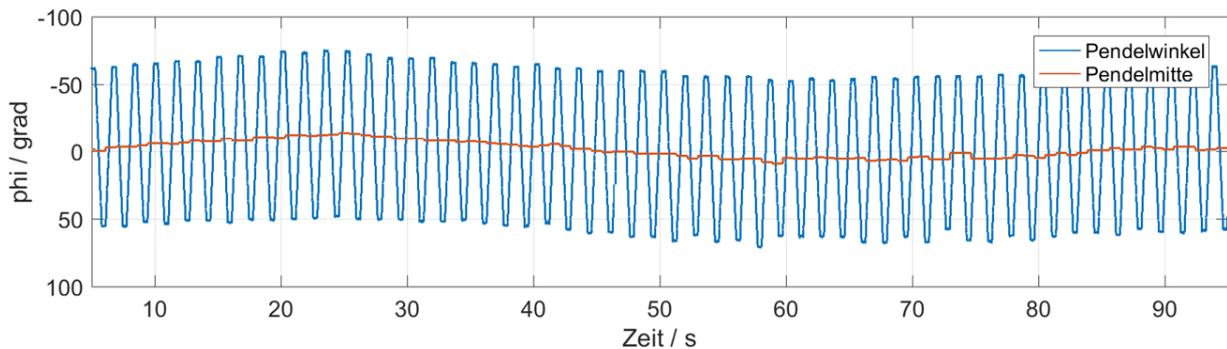


**Abbildung:** Verlauf von Pulsstrom und Pendelwinkel bei eingeschalteter Pendelregelung

Zum Test der Regelung wurden neben den geplanten Schweißversuchen zusätzliche Versuche durchgeführt, die typische mögliche Fehlerursachen widerspiegeln oder spezielle Regelfunktionen testen sollen, unter anderem:

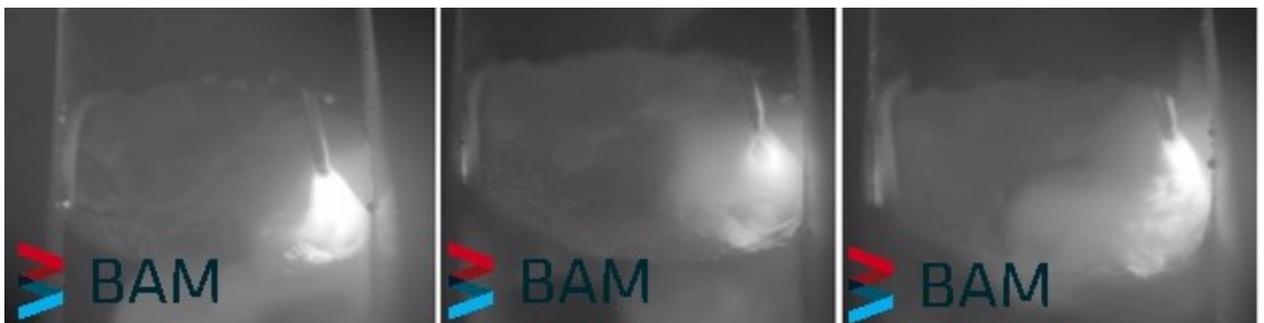
- außermittige Positionierung des Brenners in der Fuge  
Zum Test des Regelverhaltens wurde der Brenner entlang einer geraden Nahtvorbereitung (Referenzgeometrie A) während des Schweißvorgangs bewusst zunächst zur rechten und anschließend zur linken Flanke hin ausgelenkt. Bei der Annäherung des Brenners zu einer Flanke hin wird die Pendelbewegung an dieser Seite früher gestoppt, da die Flanke bereits bei einer geringeren Pendelauslenkung erreicht wird, auf der gegenüberliegenden Flanke wird der erreichte Pendelwinkel hingegen

vergrößert, um den größeren Abstand des Brenners zur Flanke hin auszugleichen. Entsprechend verschiebt sich die berechnete Mitte des Pendelwinkels, wie in folgender Abbildung erkennbar.



**Abbildung:** Verlauf des geregelten Pendelwinkels bei Versatz zur Nahtmitte

- Anpassung an Veränderungen des Drahtvorschubes bzw. der Schweißgeschwindigkeit  
Durch die kontinuierliche Bestimmung des Referenzstroms in der Pendelphase ist der entwickelte Regelalgorithmus weitestgehend unabhängig von den gewählten Prozessparametern, was durch erfolgreiche Anwendungen mit unterschiedlichen Drahtvorschüben zwischen 8 und 14 m/min nachgewiesen werden konnte. Auch plötzliche Veränderungen während des Schweißens konnten direkt kompensiert werden. Ebenso kann die Schweißgeschwindigkeit in den durch die Prozessstabilität vorgegeben Grenzen beliebig variiert werden, ohne die Pendelregelung zu beeinflussen.
- Anpassung an Veränderungen des Kontaktrohrabstandes  
Bei Vergrößerung des Kontaktrohrabstandes und damit verbundener Verlängerung des freien Drahtendes steigt bei gleichbleibender Pendelamplitude die seitliche Auslenkung der Drahtspitze und damit die seitliche Pendelbreite. Durch die kontinuierliche Regelung der Pendelbewegung kann auch eine Veränderung des Kontaktrohrabstandes kompensiert werden.
- Erweiterung um eine Anpassungsmöglichkeit für höheren Flankeneinbrand  
Die entwickelte Regelung stoppt die Pendelbewegung bei der Erkennung der Nahtflanke schnellstmöglich, um Einbrandkerben durch zu große Pendelwinkel auszuschließen. Auf Anfrage der PA-Mitglieder wurde der Algorithmus zudem um eine Möglichkeit erweitert, die Pendelregelung nach erkennen der Nahtflanke erst verzögert anzuhalten und bei Bedarf einen tieferen Flankeneinbrand zu erzwingen. Die folgende Abbildung zeigt anhand von Bildaufnahmen das Verhalten bei unterschiedlichen Verzögerungszeiten.



**Abbildung:** HDR-Bildaufnahme zur Darstellung des Abstands des freien Drahtendes zur Nahtflanke während der Flankenhaltezeit ohne Verzögerung des Pendelstopps (links),

*mit 50 ms Verzögerung (mitte) und mit 100 ms Verzögerung (rechts)*

Bei einer Verzögerungszeit von 50 ms konnte die Flanke weiterhin ohne Ausbildung von Einbrandkerben erfasst werden, bei 100 ms Verzögerung war die Bildung von Einbrandkerben entlang der gesamten Schweißnaht zu beobachten, weswegen von der Wahl dieser Einstellung der Pendelregelung abzuraten ist. Das Systemverhalten bei zeitlich verzögertem Anhalten der Pendelbewegung ist zudem abhängig von der zu Spaltbreite und dem aktuellen Kontaktrahabstand.

- Übertragbarkeit auf Sprühlichtbogenprozesse  
Um den Einsatzbereich der entwickelten Algorithmen zu erweitern und den Anwender der MSG-Engspalttechnologie größere Freiheit in der Prozessauslegung zu ermöglichen, wurde auf Wunsch von Mitgliedern des PA zusätzlich zum Impulsprozess auch das Verhalten der Regelung bei Verwendung eines Sprühlichtbogenprozesses getestet. Der Algorithmus wurde hierfür bis auf die vorgelagerte Signalaufbereitung des Schweißstromes weder angepasst, noch wurden die zur Verfügung stehenden Konfigurationsparameter geändert. Die Prozesseinstellungen des Sprühlichtbogens wurden dabei in Absprachen mit einem PA Mitglied möglichst nah an bereits in der Fertigung eingesetzte Parametersätze angelehnt um eine mögliche Übertragbarkeit aufzuzeigen. Der Einsatz der Pendelregelung bei Verwendung eines Sprühlichtbogenprozesses konnte anhand von Stichversuchen erfolgreich aufgezeigt werden.
- Einsatz beim Pendeln gegen eine Nahtflanke (Strichraupen)  
Auch wenn der überwiegende Teil des Forschungsvorhabens die Pendelraupentechnik betrachtet, wurde auf Wunsch von PA-Mitgliedern die Anwendbarkeit der Pendelregelung beim einseitigen Pendeln gegen eine Nahtflanke überprüft. Da der zugrundeliegende Algorithmus prinzipiell beide Nahtflanken unabhängig betrachtet, konnte auch hier von einer erfolgreichen Anwendung ausgegangen werden. Die Funktion der Pendelregelung für Strichraupen in Wannenlage konnte anhand von zusätzlichen Schweißversuchen sowohl für Impulsprozesse als auch beim Einsatz eines Sprühlichtbogens erfolgreich aufgezeigt werden.

Zusammengefasst wurden mit Hilfe der entwickelten Pendelregelung die folgenden Ziele erreicht:

- direkte Anpassung der Pendelbreite an Spaltbreite
- Einsatz unabhängig von den gewählten Prozessparametern
- Ausgleich von Fehlstellungen des Brenners zur Flanke
- Abstand des Lichtbogens zur Flanke einstellbar
- auch für Pendeln gegen einzelne Flanke nutzbar
- ohne Anpassung der Regelparameter anwendbar für Sprüh- und Impulslichtbogen

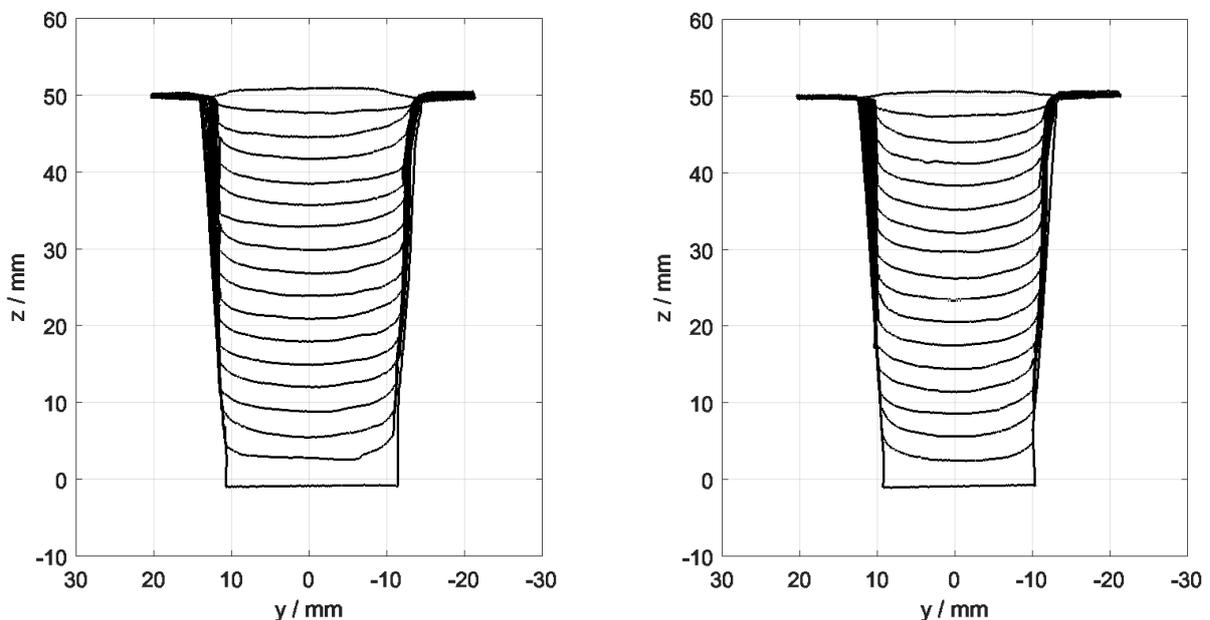
Voraussetzung für die Funktion der Pendelregelung ist das Detektieren der nahezu senkrechten Nahtflanke durch die Lichtbogensensorik. Die Anwendung der Pendelregelung beim Schweißen der Decklage ist nicht zu empfehlen, da hier in der überwiegenden Anzahl der Fälle beim Schweißen der vorhergehenden Lage die Nahtflanken soweit aufgeschmolzen wurden, dass die ehemals scharfe Kante der I-Naht nicht mehr sauber detektiert werden kann. Für die Decklage wird daher empfohlen auf die geregelten Pendelwinkel der vorhergehenden Lage zurückzugreifen.

## Füllgradregelung

Ziel der Füllgradregelung ist das Erreichen eines gleichmäßigen Lagenaufbaus mit definierter Aufbauhöhe entlang der gesamten Schweißnaht beim Mehrlagenschweißen. Sind die Abmessungen der Schweißnaht über die gesamte Länge konstant, kann ein gleichmäßiger Lagenaufbau erreicht werden indem die Schweißparameter (Schweißgeschwindigkeit  $v_S$ , Drahtvorschubgeschwindigkeit  $v_D$ ) konstant gewählt werden und damit der zugeführte Massenstrom an Zusatzwerkstoff pro Längeneinheit ebenfalls gleich bleibt. Geht man von der Pendelraupentechnik beim MSG-Mehrlagenschweißen aus, d.h. der Lagenaufbau pro Raupe verteilt sich näherungsweise gleichmäßig über den Nahtquerschnitt, ergibt sich zunächst für die Annahme eines rechteckigen Querschnitts der eingebrachten Schweißraupe mit der Spaltbreite  $b$  (gemessen direkt an der Nahtoberfläche) abhängig von der Querschnittsfläche  $A_D$  des Zusatzwerkstoffs die Höhe der eingebrachten Schweißraupe  $h_R$  zu

$$h_R = \frac{v_D A_D}{v_S b}.$$

Wie in der untenstehenden Abbildung zu sehen ist, haben die aufgebauten Schweißraupen beim MSG-Engspaltschweißen in Pendelraupentechnik nicht die oben angenommene, idealisierte Rechteckform. Durch die Haltezeit des Pendelmechanismus der Elektrode an den Nahtflanken und das zusätzliche Abschmelzen des Grundwerkstoffs an diesen Stellen bildet sich hier eine gekrümmte Anbindung an die Nahtflanke aus. Betrachtet man den Lagenaufbau über annähernd gleichbleibenden Spaltbreiten (s.u.) ist zu sehen, dass die Raupenform insgesamt kaum variiert. Der eingebrachte Zusatzwerkstoff verteilt sich demnach über die gesamte Schweißnahtbreite annähernd gleichmäßig, so dass obige Formel auch unter Berücksichtigung der gekrümmten Flankenbindung nutzbar bleibt.



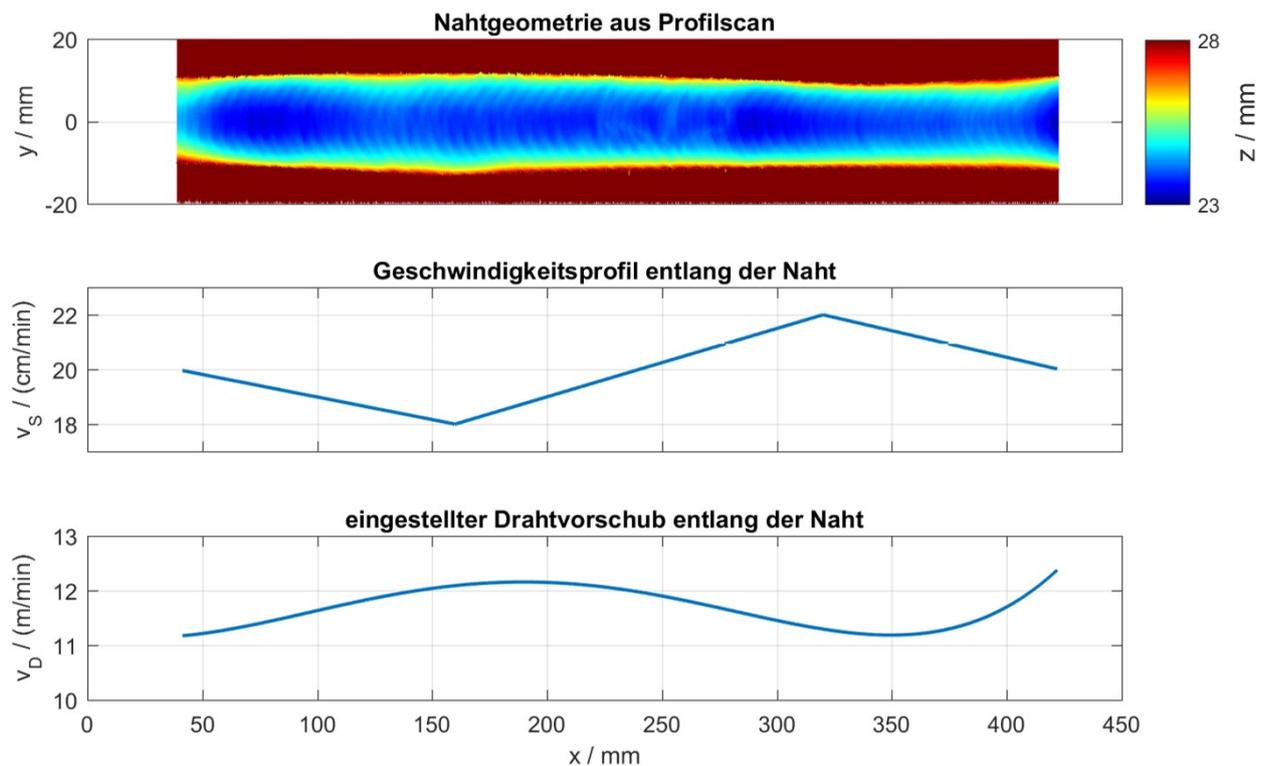
**Abbildung:** optisch vermessene Nahtprofile mehrerer Lagen einer 50 mm Engspaltsnaht bei ca. 24 mm Spaltbreite (links) und ca. 18 mm Spaltbreite (rechts)

Eine Füllgradregelung zum Erreichen einer gewünschten, konstanten Lagenhöhe für veränderliche Nahtquerschnitte entlang der Schweißnaht (im Fall des MSG-Engspaltschweißens also veränderliche Spaltbreiten  $b(x)$ ) wird näherungsweise dann erreicht, wenn der

(dimensionslose) Quotient aus Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit dem Quotient aus Drahtquerschnittsfläche und Lagenquerschnittsfläche  $b(x)h_R$  entspricht.

$$\frac{v_S(x)}{v_D(x)} = \frac{A_D}{b(x)h_R}$$

Da sowohl die Schweißgeschwindigkeit als auch die Drahtvorschubgeschwindigkeit als Steuergrößen zur Verfügung stehen kann der obige Zusammenhang bei Wahl einer Führungsgröße (z.B.  $v_S$ ) durch Anpassen der übrigen Größe erfüllt werden. Dies ist natürlich nur soweit möglich, wie die Prozessstabilität bei den gewählten Parametern noch gewährleistet werden kann. Die folgende Abbildung zeigt beispielhafte Verläufe der Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit bei einer stark variierenden Spaltbreite entlang der Engspaltnaht.



**Abbildung:** exemplarischer Verlauf der Prozessparameter Schweißgeschwindigkeit (Mitte) und Drahtvorschubgeschwindigkeit (unten) sowie Profilscan der resultierenden Schweißnaht (oben)

Wir der oben beschriebene Zusammenhang zur Füllgradregelung benutzt, kann zwar ein Lagenaufbau mit gleichmäßiger Lagenhöhe erzielt werden, jedoch pflanzen sich bereits vorhandene Unregelmäßigkeiten im Lagenaufbau ungehindert bis zur Decklage fort. Zum Ausgleich von vorhandenen Unregelmäßigkeiten (beispielsweise in der Badstütze) ist es zielführend, die Berechnungsvorschrift für den Quotienten aus Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit auf eine entlang der Naht konstante Zielaufbauhöhe  $h_A$  zu beziehen. Ist die an einer Stelle  $x$  ermittelte Höhe der vorherigen Lage  $h(x)$ , ergibt sich als Vorschrift damit

$$\frac{v_S(x)}{v_D(x)} = \frac{A_D}{b(x)(h_A - h(x))}$$

Voraussetzung für die Anwendung ist, dass die Spaltbreite  $b(x)$  und die Höhe  $h(x)$  an jeder Stelle bekannt ist oder ermittelt werden kann. Dies ist beispielsweise durch geeignetes Auswerten der Profilmessung möglich. In den Ausführungen zu AP9 sind die mit diesem Vorgehen erzielten Ergebnisse beim Schweißen des Demonstrators in 50 mm Blechdicke beschrieben. Zur Bestimmung der aktuellen Höhe  $h(x)$  wurde dabei der Mittelwert des Schweißnahtprofils im Bereich  $-2 \text{ mm} < y < 2 \text{ mm}$  ermittelt.

Besteht die Möglichkeit der optischen Vermessung nicht, können die notwendigen Größen beispielsweise durch den Einsatz eines Lichtbogensensors ermittelt werden. Hier besteht vor allem die Schwierigkeit, die Spaltbreite  $b(x)$  aus den Signalen des Lichtbogensensors zu ermitteln. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde hierfür ein Vorgehen abgeleitet, um mittels Regressionsmodellierung die Spaltbreite aus der Lichtbogensensorik ableiten zu können. Ausgangspunkt für den Aufbau eines geeigneten Regressionsmodells ist zunächst die Ermittlung der tatsächlichen Spaltbreite aus den optischen Messwerten der Profilmessung, diese stellen vom Modell zu berechnende Zielgröße dar. Zur Berechnung dieser Zielgröße aus online verfügbaren Prozessmessdaten wurde im Forschungsvorhaben folgender Ansatz verfolgt:

Der zeitliche Ablauf des MSG-Engspaltschweißens in Pendelraupentechnik wurde in einzelne Pendelsequenzen unterteilt. Eine Pendelsequenz umfasst die Haltezeit an der linken Flanke, das Pendeln der Elektrode hinüber zur Rechten Flanke, die Haltezeit an der rechten Flanke und abschließend das Pendeln der Elektrode zurück zur linken Flanke. Abhängig von den gewählten Prozessparametern und Randbedingungen (Pendelgeschwindigkeit, Spaltbreite) ist bei den betrachteten Spaltbreiten zwischen 18 und 24 mm von einer Dauer zwischen 1-2 s pro Pendelsequenz auszugehen. Für eine Pendelsequenz werden dabei von der Steuerung die folgenden Kenndaten ermittelt:

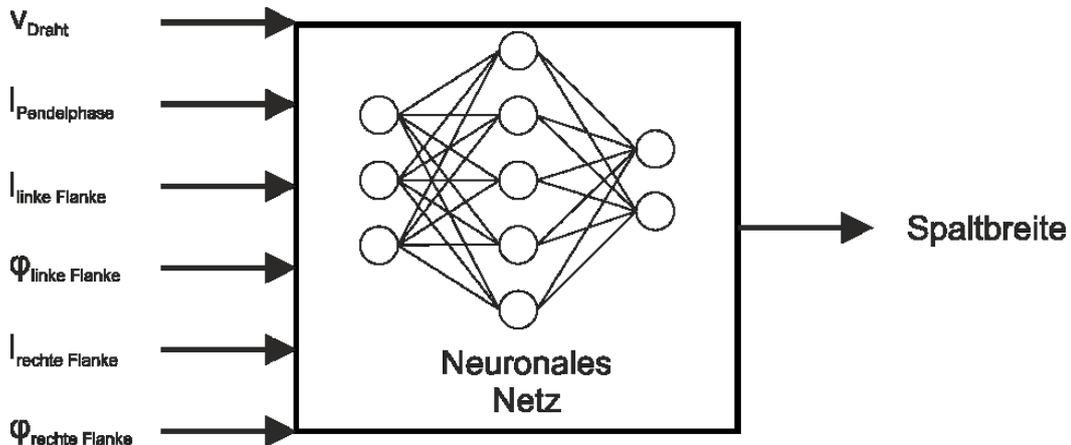
- die mittlere eingestellte Drahtvorschubgeschwindigkeit
- der mittlere Impulsstrom während des Pendelns zwischen den Flanken
- jeweils der Pendelwinkel während des Verweilens an der linken und rechten Flanke
- jeweils der mittlere Impulsstrom während des Verweilens an der linken und rechten Flanke

Der Grundgedanke für die Auswahl der Pendelparameter ist dabei wie folgt:

- Die Wahl der Drahtvorschubgeschwindigkeit beeinflusst die gewählten Prozessparameter und damit auch die auftretenden Pulsströme.
- Der gemessene Strom während des Pendels zwischen den Flanken korreliert mit dem aktuellen Kontaktrohrstand (in Abhängigkeit von der Drahtvorschubgeschwindigkeit).
- Der Pendelwinkel an den Flanken wird durch die Pendelregelung (vgl. AP6 - „Regelung des Flankeneinbrandes“) an die Spaltbreite angepasst. Der sich einstellende Wert ist abhängig vom Kontaktrohrstand.
- Der gemessene Strom während der Haltezeit an den Flanken gibt Aufschluss über den tatsächlichen Abstand der Drahtelektrodenspitze zur Nahtflanke.

Für die Bestimmung des Zusammenhangs der aufgezählten Parameter mit der tatsächlichen Spaltbreite wird als Methode der Regressionsmodellierung auf das Trainieren eines künstlichen Neuronalen Netzes (kNN) zurückgegriffen. Die folgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau des kNN mit den erwähnten Ein- und Ausgangsgrößen. Das trainierte Netz besitzt eine verdeckte Schicht mit 45 Neuronen. Die Ein- und Ausgänge wurden zum Training und zur Berechnung bezogen auf den Messbereich normalisiert. Als Trainingsalgorithmus wurde das

Levenberg-Marquardt-Verfahren mit Regularisierung angewandt, um ein mögliches Überfitten der Daten zu verhindern.



**Abbildung:** schematische Darstellung der Ein- und Ausgangsgrößen des trainierten künstlichen Neuronalen Netzes zur Bestimmung der Spaltbreite aus Prozessmessdaten

Für die Generierung der notwendigen Trainingsdaten dient als erstes Beispiel die Schweißung des Demonstratorbauteils in 50 mm Blechdicke über 17 Lagen (vgl. AP9). Die gewählte Nahtform hat dabei den Vorteil, dass anhand einer einzigen Probe das gesamte zu betrachtende Spektrum zwischen 18 und 24 mm Spaltbreite abgedeckt werden kann. Müsste dies anhand einzelner Schweißproben geschehen wäre ein deutlich höherer Versuchsaufwand notwendig. Da die Decklagenschweißung keine sinnvolle Auswertung der Spaltbreite ermöglicht, wurde sie für die folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Aus den 16 vorherigen Lagen ergibt sich ein Umfang von ca. 1000 Pendelsequenzen welche zur Regressionsmodellierung herangezogen wurden. Die Verteilung der Pendelsequenzen über den Drahtvorschub und die gemessene Spaltbreite zeigt die folgende Abbildung.

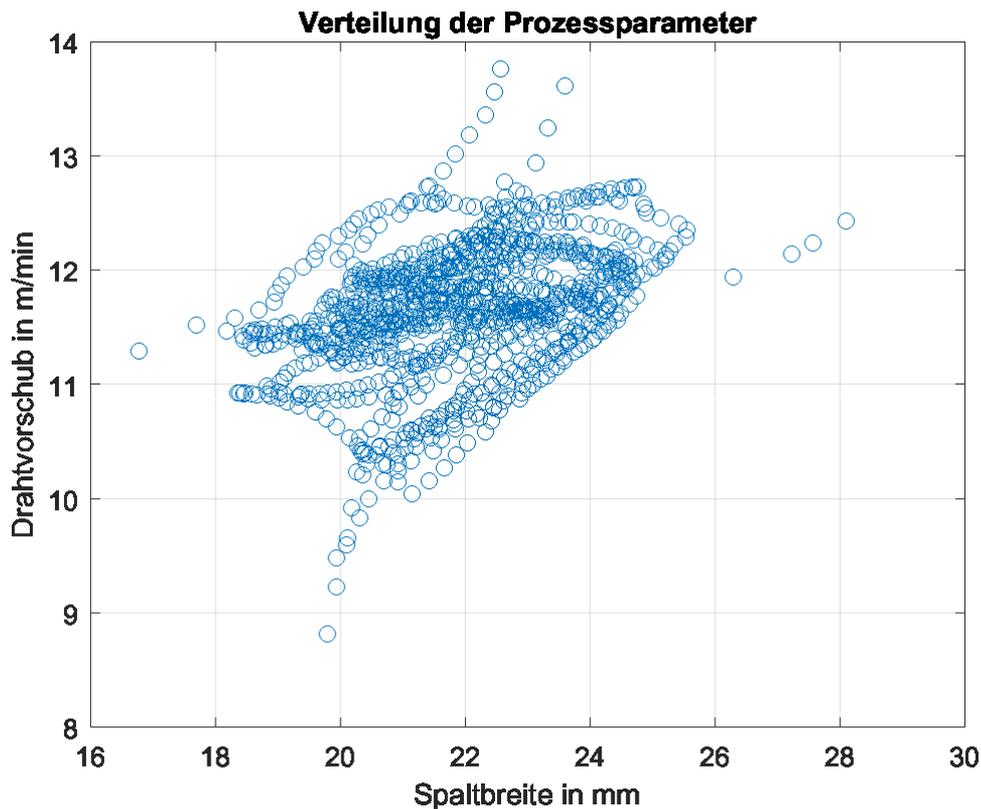
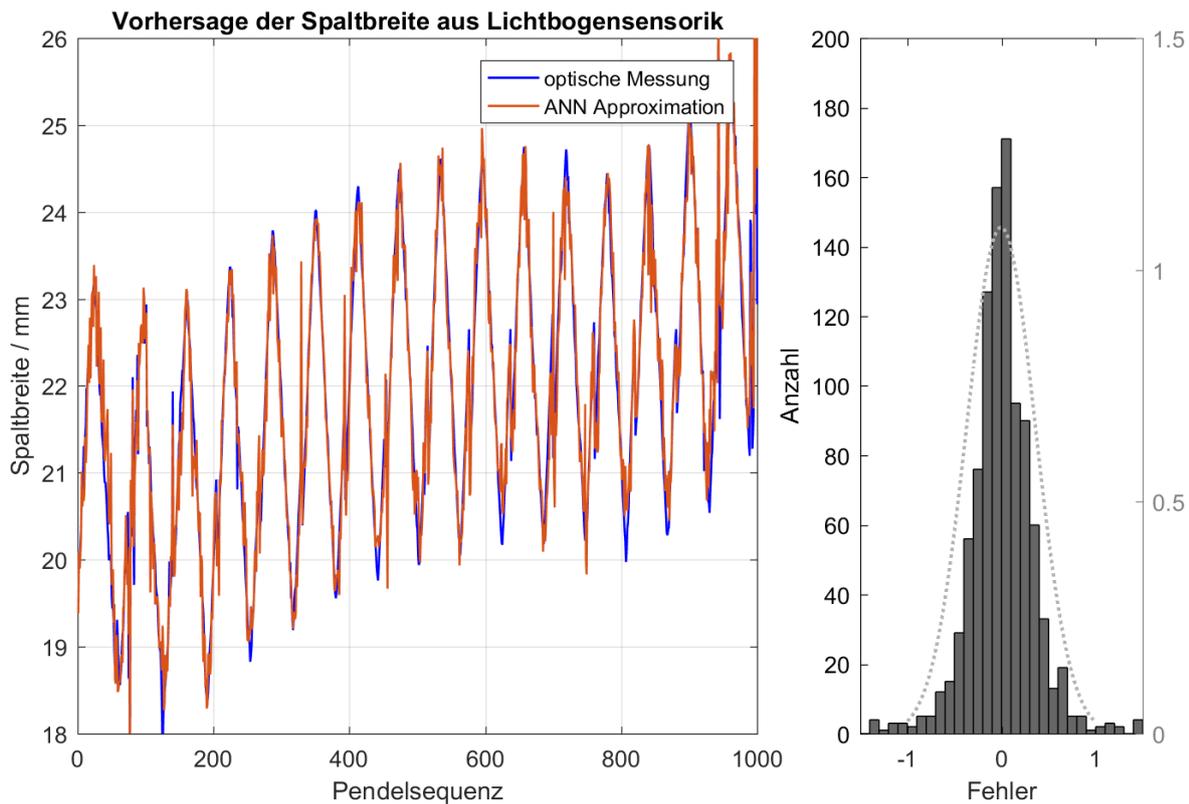


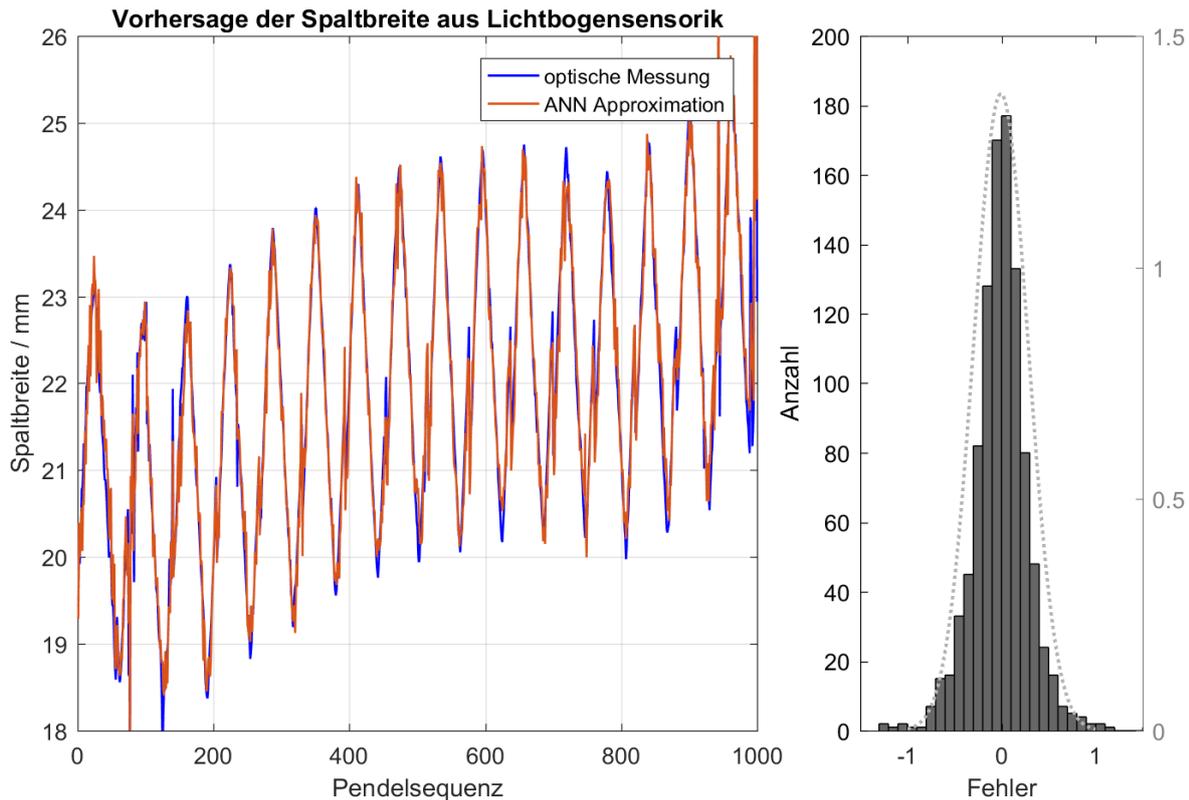
Abbildung: Verteilung der geregelten Prozessparameter für die 50 mm Demonstratorprobe

Bei der Betrachtung des Parameterraumes zeigt sich ein weiterer Vorteil der gewählten Methode: Die sich ergebende Verteilung der Prozessparameter ist durch die kontinuierliche Veränderung deutlich dichter als dies mit vertretbarem Aufwand bei Verwendung statischer Prozessparameter und konstanter Probengeometrien möglich wäre. Voraussetzung ist natürlich die kontinuierliche Aufzeichnung aller Prozessparameter und Verknüpfung dieser mit den optisch ermittelten Spaltbreiten. Zum Aufbau des Regressionsmodells wurden 500 kNN mit zufällig verteilten Startgewichten trainiert. Anschließend wurde das kNN mit dem geringsten quadratischen Fehler über die Gesamte Datenbasis ausgewählt. Die Abbildung zeigt den Vergleich der Vorhersage der Spaltbreite aus dem Regressionsmodell und der optischen Messung. Zusätzlich ist die Verteilung der Fehler dargestellt. Insgesamt liefert das Regressionsmodell eine gute Vorhersage für die Spaltbreite. Bei über 80% der Datenpunkte liegt der Fehler im Bereich zwischen  $-0,5$  mm und  $+0,5$  mm, was als Genauigkeit für die Füllgradregelung beim MSG-Engspaltschweißen ausreichend ist. Die Fehler sind annähernd normalverteilt um den Erwartungswert 0.



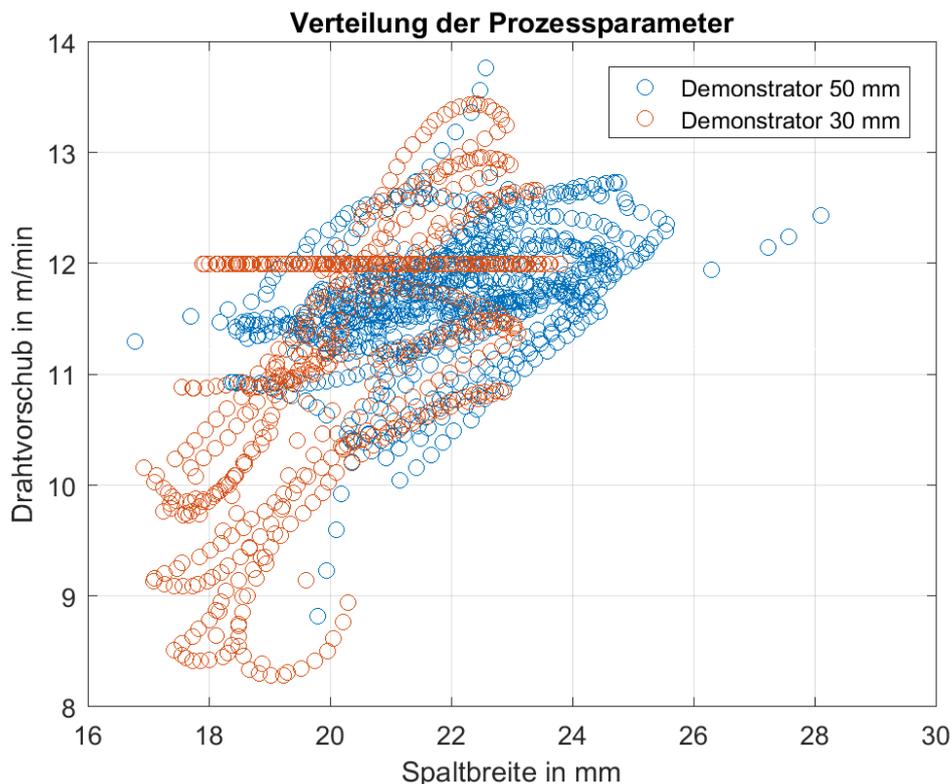
**Abbildung:** Vergleich der vorhergesagten Spaltbreiten aus Regressionsmodellierung zur optischen Messung (links) und Darstellung der Fehlerverteilung (rechts) mit Approximation einer zugehörigen Normalverteilung

Eine verbesserte Näherung bei der Regressionsmodellierung mittels kNN kann erzielt werden, wenn statt den Ergebnissen nur eines Modells über die Ergebnisse mehrerer Netze gemittelt wird. Dieses Vorgehen hat insbesondere bei kleiner Datenbasis einen glättenden Effekt und kann somit den Einfluss von Störgrößen auf das Ergebnis reduzieren. Im folgenden Beispiel wurden hierzu die zehn besten kNN ausgewählt und parallel zur Berechnung der Spaltbreite eingesetzt. Im Vergleich zur vorherigen Darstellung kann der mittlere Fehler so nochmals reduziert werden. Die abgeleiteten Regressionsmodelle konnten auf die Steuerung übertragen und zur Echtzeitberechnung genutzt werden.



**Abbildung:** Ergebnisse der Regressionsmodellierung bei Mittelung über 10 kNN. Vergleich zur optischen Messung (links) und Darstellung der Fehlerverteilung (rechts) mit Approximation einer zugehörigen Normalverteilung

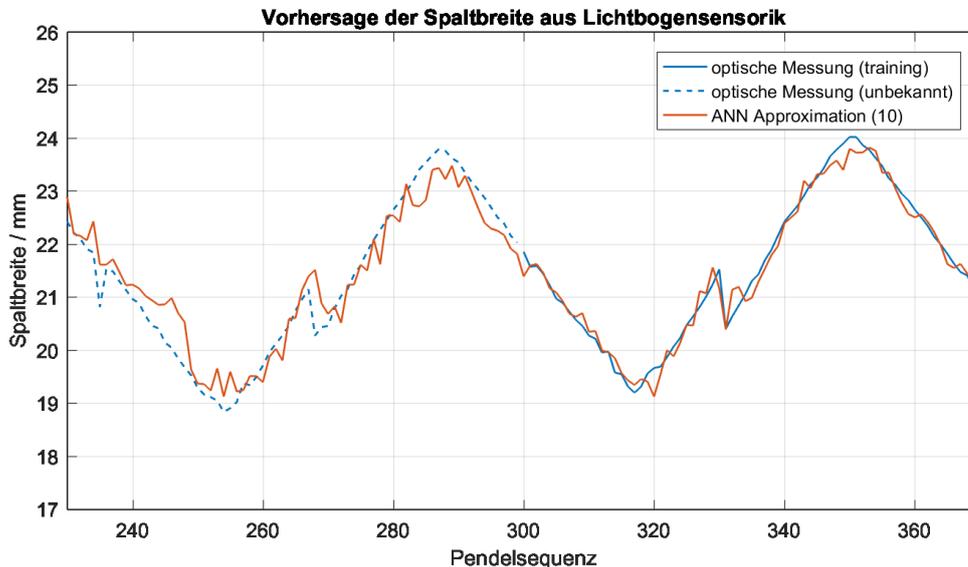
Um den Parameterraum der Regressionsmodellierung zu erweitern, müssen Daten aus einem zuvor nicht enthaltenen Bereich des Parameterraums hinzugefügt werden. Im Forschungsvorhaben wurde dies durch Hinzunahme der 30 mm Demonstratorprobe zu den bestehenden Datensätzen betrachtet. Da die 30 mm Probe in 10 Lagen geschweißt wurde bedeutet dies die Erweiterung der Messdaten um ungefähr weitere 600 Pendelsequenzen. Obwohl die Probe mit dem gleichen Brennschnittvorgang wie der 50 mm Demonstrator gefertigt wurde, ist eine Verteilung hin zu geringeren Spaltbreiten zu erkennen (s. Abbildung unten). Dies ist beispielsweise auf Ungenauigkeiten im Brennschnitt oder beim manuellen Heftvorgang zurückzuführen. Die untenstehende Abbildung zeigt die Verteilung nach Spaltbreite und Drahtvorschubgeschwindigkeit aufgeteilt auf die Demonstratorprobe in 50 mm Dicke (blau) und 30 mm Dicke (rot). Durch die Hinzunahme der 30 mm Probe wird der gesamte betrachtete Parameterraum vor allem im Bereich niedriger Spaltbreiten  $< 21$  mm und bei geringeren Drahtvorschubgeschwindigkeiten  $< 11$  m/min erweitert. Das Beispiel zeigt damit wiederum das Ausnutzen der gesamten Probe zur Analyse eines großen Spektrums von Nahtvorbereitungen und gewählten Prozessparametern und damit einhergehend die Reduzierung des notwendigen Proben- und Versuchsumfangs. Wird das Vorgehen zum Ableiten eines Regressionsmodells wie eingangs beschrieben für den gesamten Datensatz beider Proben durchgeführt, ergeben sich vergleichbare Ergebnisse wie bei der Betrachtung des 50 mm Demonstrators.



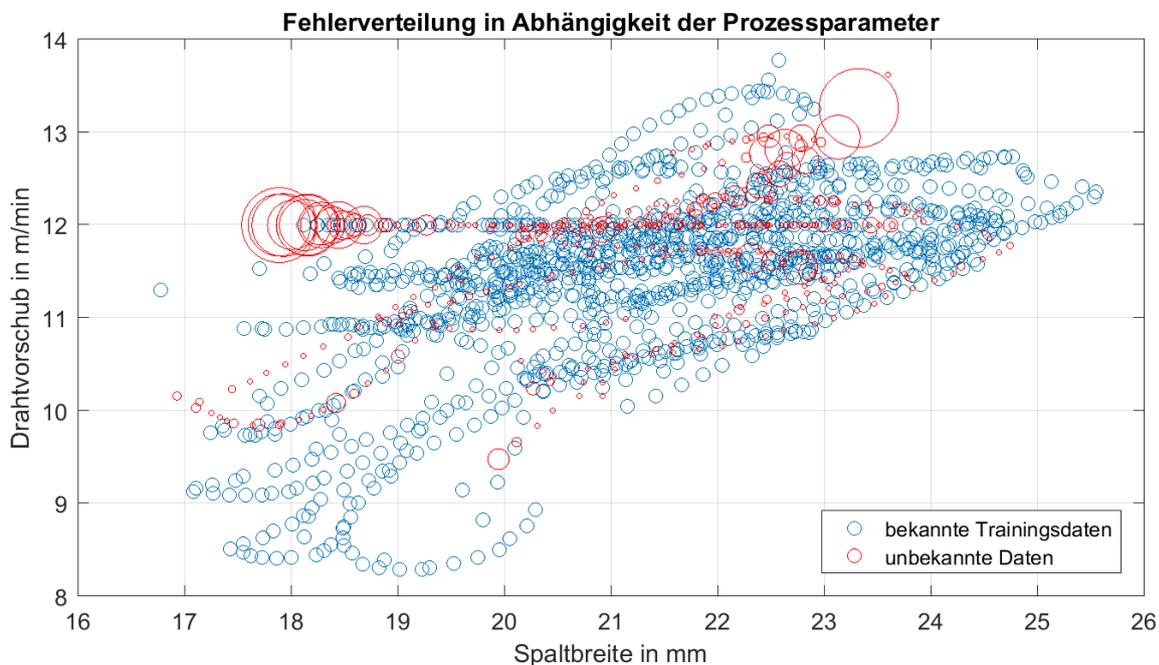
**Abbildung:** *erweiterter Parameterraum aus Datensätzen des 30 mm & 50 mm Demonstrators*

Um die Eignung des Vorgehens auch für unbekannte Probengeometrien und Spaltmaße (wie in der Fertigung zu erwarten) zu überprüfen, wurden die aus beiden Demonstratorschweißungen zur Verfügung stehenden Datenpunkte zufällig ca. ein Viertel der Punkte ausgewählt und im Folgenden bei der Berücksichtigung einer erneuten Regressionsmodellierung ausgeschlossen, so dass für die Auslegung des Regressionsmodells nun nur noch die restlichen drei Viertel dienen. Die nicht beim Training des kNN einbezogenen Daten dienen dabei als Kontrollpunkte um die Möglichkeiten zur Interpolation bzw. Extrapolation bei der Berechnung der Spaltbreite zu untersuchen. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Vorhersage der Spaltbreite aus den gebildeten Regressionsmodellen (rot, Darstellung der Mittelung über 10 beste Modelle) mit der optischen Messung (blau, durchgezogene Linie: Bereichen mit beim Training bekannten Messdaten, gestrichelte Linie: Bereich mit beim Training unbekanntem Messdaten). Bei Messpunkten an denen die optische Messung als Referenz für das Training dem Regressionsmodell vorgegeben wurde ist wie zu erwarten eine sehr gute Vorhersage der Spaltbreite durch das kNN erkennbar. Die auftretenden Abweichungen befinden sich im Bereich einiger weniger Zehntel Millimeter. Für die Vorhersage bei unbekanntem Datensätzen ist die Approximation ebenfalls gut, wenn auch wie zu erwarten nicht so exakt wie für die bekannten Referenzdaten. In diesem Bereich liegen die Abweichungen bis auf wenige Ausnahmen ebenfalls noch in einem Band von  $\pm 0,5$  mm und wären damit bspw. ausreichend für die Anwendung einer Füllgradregelung. Für den Einsatz des Modells zur Prozessregelung empfiehlt sich zusätzlich eine Glättung der vom Modell vorhergesagten Spaltbreiten durchzuführen, um zu schnelle (unrealistische) Sprünge der Spaltbreitenvorhersage zu kompensieren. Abschließend ist in der letzten Abbildung noch eine Übersicht der Lage der unbekanntem Datenpunkte (rot) im Vergleich zu den bekannten Datenpunkten (blau) dargestellt. Die Kreisdurchmesser der zum Zeitpunkt des Trainings unbekanntem Datensätze sind für die Darstellung anhand des ermittelten Fehlers bezogen auf die optische Referenzmessung skaliert. Es wird deutlich, dass in den von bekannten

(blauen) Datenpunkten umschlossenen Bereichen die Fehler bis auf wenige Ausnahmen klein sind und die auftretenden großen Abweichungen in Randbereichen der bekannten Datenbasis auftreten (z.B. 18 – 19 mm Spaltbreite, 12 m/min Drahtvorschub). Um die Vorhersage in solchen Bereichen zu verbessern müsste an diesen Stellen die bestehende Datenbasis um weitere Datensätze ergänzt werden, beispielsweise durch die gezielte Versuchsführung anhand von Proben der entsprechenden Spaltbreite.



**Abbildung:** Vergleich der Vorhersage der Spaltbreite im Vergleich zur optischen Messung für beim Training bekannte und unbekannte Daten



**Abbildung:** Darstellung der Aufteilung von bekannten Datensätzen für das Netzwerktraining (blau) und unbekanntem Datensätzen (rot). Die Skalierung der roten Kreisdurchmesser repräsentiert die Abweichung der vorhergesagten Spaltbreite zur tatsächlichen Spaltbreite.

## Testschweißungen (AP7)

Die Durchführung ergänzender Testschweißungen, insbesondere für Probengeometrien B und C sowie zur Erprobung des Pendel- und Füllgradregelung erfolgte kontinuierlich begleitend zu AP6 und sind darin beschrieben.

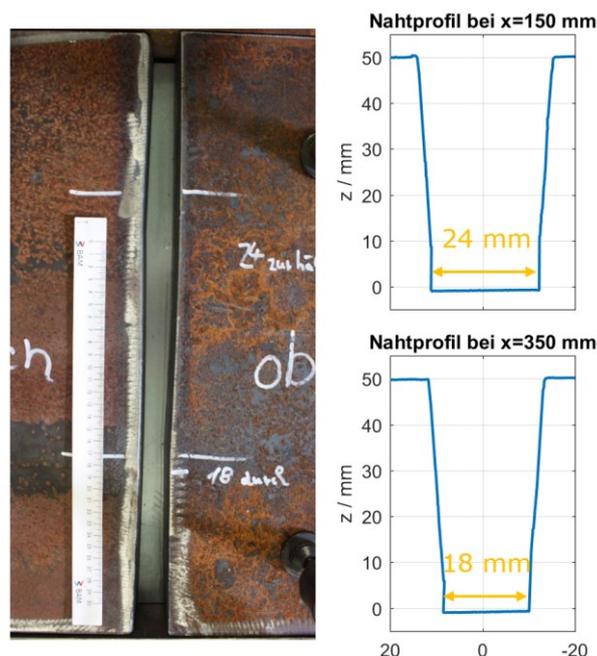
## Bauteilähnliches Prüfstück (AP9)

Als bauteilähnliches Prüfstück wurde in Absprache mit den PA-Mitgliedern eine 50 mm dicke Engspalt-Nahtvorbereitung gewählt, die in einem Bauteil eine Spaltbreitenänderungen von 18 bis 24 mm einschließt. Die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs der Güte S355J2+N nach Werkszeugnis ist untenstehend aufgeführt.

Massenanteil in %	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Ni	Cr	Mo
Charge S355J2+N	0,18	0,20	1,47	0,019	0,004	0,006	0,019	0,015	0,032	0,003
DIN EN 10225-2:2011 (Maxima)	0,22	0,55	1,6	0,025	0,025	-	0,55	0,42	0,42	0,11

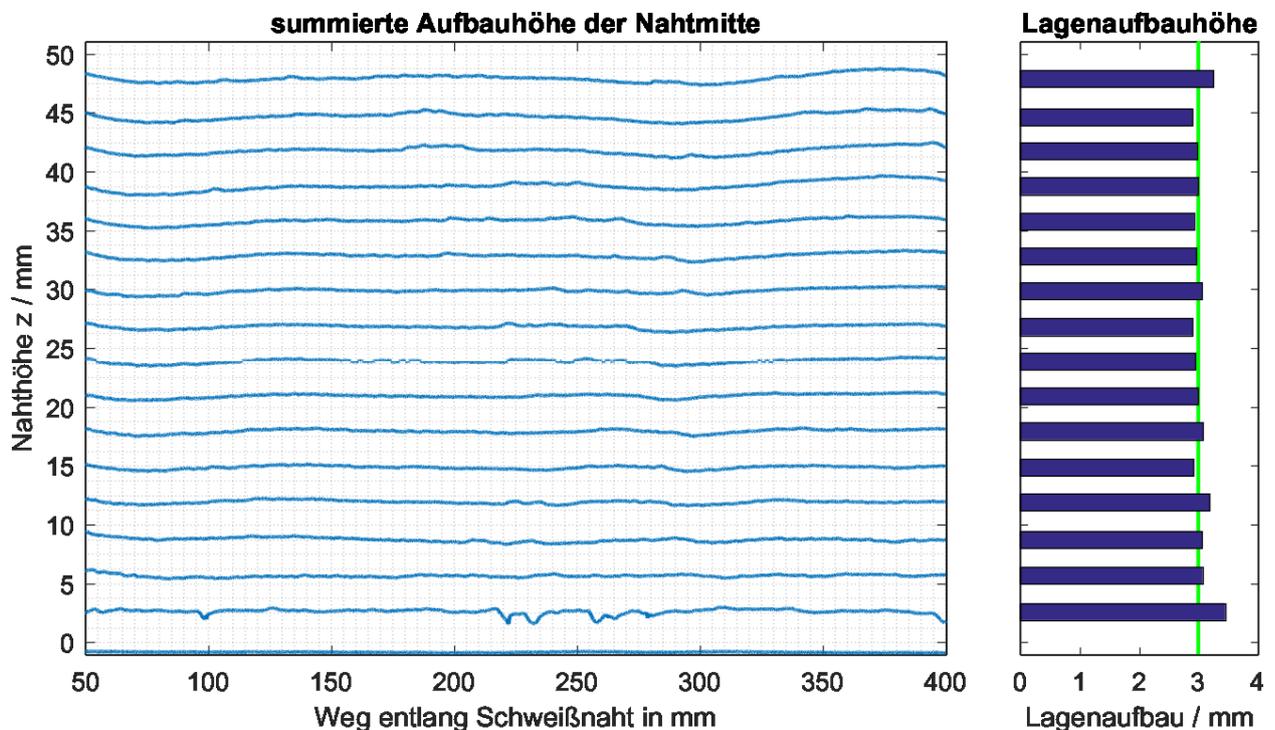
**Tabelle:** Vergleich der chemischen Analyse des verwendeten Werkstoffs mit den nach DIN EN 10025-2 zulässigen Maximalwerten nach der Schmelzenanalyse

Die etwa 400 mm lange Schweißnaht beginnt bei einer Spaltbreite von ca. 20 mm und öffnet sich innerhalb von etwa 100 mm zur breitesten Stelle auf etwa 24 mm. Anschließend verjüngt sich die Spaltbreite über eine Strecke von 200 mm bis zur engsten Stelle auf ca. 18 mm um sich danach zum Ende der Schweißnaht hin wieder auf 20 mm zu verbreitern. Die zu füllende Nahtquerschnittsfläche liegt an der breitesten Stelle damit ca. 30% über der Nahtquerschnittsfläche der engsten Stelle. Die untenstehende Abbildung zeigt eine Draufsicht der Schweißnahtvorbereitung (Schweißrichtung im Bild von oben nach unten) sowie die mittels optischer Sensorik gemessenen Profile an der jeweils breitesten und engsten Stelle.



**Abbildung:** Foto der Nahtvorbereitung des 50 mm Demonstrators vor dem Schweißen (rechts) Profilvermessung an der Stelle des größten (oben) und geringsten (unten) Querschnitts

Die Durchführung der Schweißung erfolgte in Wannenlage, die Zwischenlagentemperaturen lagen im Bereich von 80 bis 100 °C. Die Anpassung der Pendelbewegung erfolgte durch den in AP6 beschriebenen Algorithmus zur Pendelregelung, für die Füllgradregelung wurden die optischen Messdaten wie in AP6 beschrieben zur Anpassung der Schweißgeschwindigkeit sowie der Drahtvorschubgeschwindigkeit ermittelt. Als Zielvorgabe für die Füllgradregelung wurde mit Ausnahme der Wurzellage für jede Lage eine Aufbauhöhe von 3 mm vorgegeben. Für die Wurzellage lag die Zielaufbauhöhe bei 3,5 mm um durch die damit verbundene höhere Abschmelzleistung in der Wurzellage eine sicherere Anbindung an den Nahtflanken sicherzustellen. Die anhand der optischen Messdaten bestimmte Aufbauhöhe in der Nahtmitte ist über die 16 geschweißten Fülllagen in untenstehender Abbildung dargestellt. Insgesamt könnte mit dem beschriebenen Algorithmus ein sehr gleichmäßiger Lagenaufbau erreicht werden. An den Start- und Endpunkten der Schweißnaht bilden sich durch das unkontrolliert wegfließende Schmelzbad ab etwa der 8. Lage Unregelmäßigkeiten aus die sich mit steigender Lagenzahl fortpflanzen. Dieses Verhalten ließe sich beispielsweise durch die Verwendung von Ein- und Auslaufblechen vermeiden.



**Abbildung:** Verlauf des Lagenaufbaus entlang 50 mm Demonstrator-schweißung (links) und vergleich der mittleren Lagenaufbauhöhe zur Zielaufbauhöhe von 3 mm (rechts)

## Verfahrensprüfung (AP8)

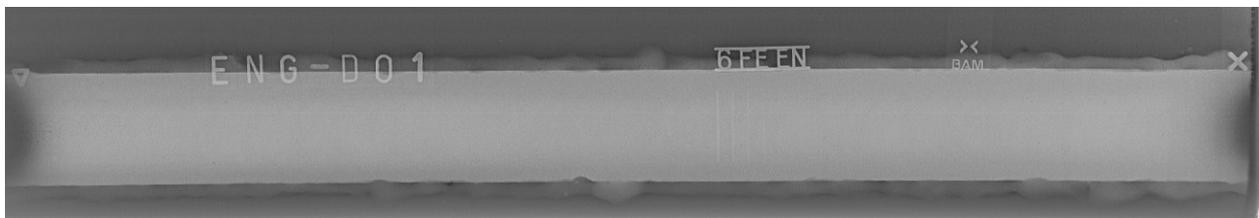
Zu Überprüfung der Ergebnisse und Eignung der entwickelten Regelalgorithmen wurde die nach DIN EN ISO 15614-1 für Verfahrensprüfungen vorgeschriebenen zerstörungsfreien und zerstörende Prüfungen durchgeführt. In Rücksprache mit den PA-Mitgliedern wurde als Werkstückgeometrie für die Verfahrensprüfung die Demonstratorprobe (vgl. AP9) in 30 mm und 50 mm Dicke ausgewählt um die Eignung auch für komplexe Regelaufgaben nachzuweisen. Beim Schweißen der Werkstücke wurden für sämtliche Schweißungen die in AP6 beschriebenen Regelalgorithmen eingesetzt.

## Zerstörungsfreie Prüfung

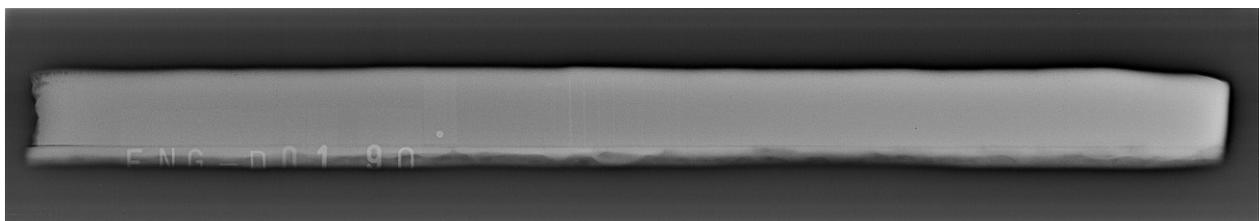
Die Sichtprüfung zeigte keinerlei Auffälligkeiten oder Fehlstellen.

Die Nahtüberhöhung der Decklage wurde mittels der optischen Sensorik entlang der gesamten Nahtoberfläche vermessen und ausgewertet. Die Nahtüberhöhung des Prüfstücks lag zwischen 0,5 mm und 1,7 mm.

Für die Probe in 50 mm Blechdicke war keine Durchstrahlungsprüfung durchführbar, daher werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung der 30 mm dicken bauteilähnlichen Prüfstücks diskutiert. Die untenstehenden Abbildungen zeigen die Bilder der Durchstrahlungsprüfung des Prüfstücks in der Draufsicht sowie die herausgesägte Schweißnaht des Prüfstücks in der Seitenansicht. Am Nahtanfang ist in beiden Abbildungen eine vermehrte Porenbildung zu sehen, die ab etwa dreiviertel der Schweißnahthöhe beginnt. Dies ist durch die schlechte Schutzgasabdeckung an der sich ausbildenden scharfen Kante des Nahtbeginns zurückzuführen und kann zumindest teilweise durch eine Erhöhung des Schutzgasstromes kompensiert werden.



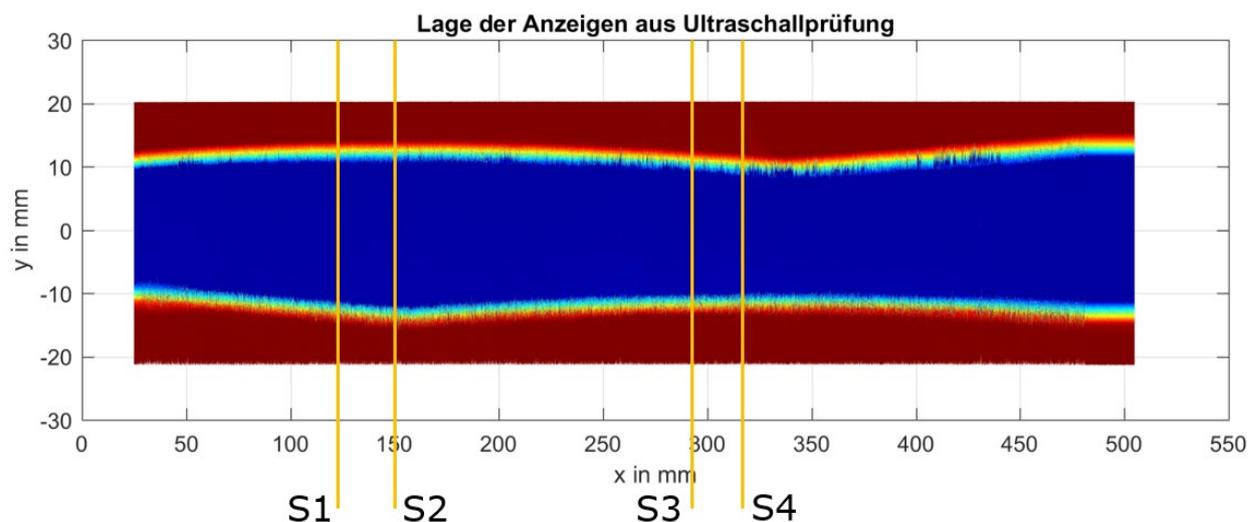
**Abbildung:** Durchstrahlungsprüfung der Demonstratorprobe in 30 mm (Draufsicht)



**Abbildung:** Durchstrahlungsprüfung der Demonstratorprobe in 30 mm (Seitenansicht 90°)

Für das Demonstratorbauteil mit 50 mm wurde auf Grund der Probendicke eine Ultraschallprüfung einer Durchstrahlungsprüfung vorgezogen. Die Ultraschallprüfung wurde manuell mit einem 10 MHz Senkrechtprüfkopf durchgeführt. Entlang der Schweißnaht wurden mögliche Fehlstellen an vier markanten Stellen detektiert. Die aufgezeigten Fehlstellen lagen dabei zum einen im Bereich des größten Nahtquerschnitts (S1, S2) und im Bereich des kleinsten Nahtquerschnitts bzw. unmittelbar davor (S3, S4). Zur genauen Klassifizierung der

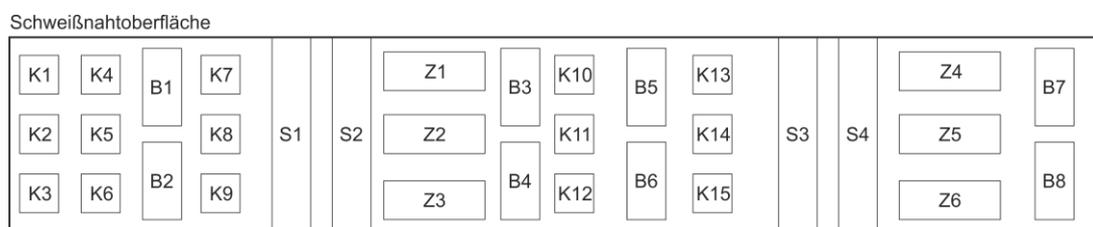
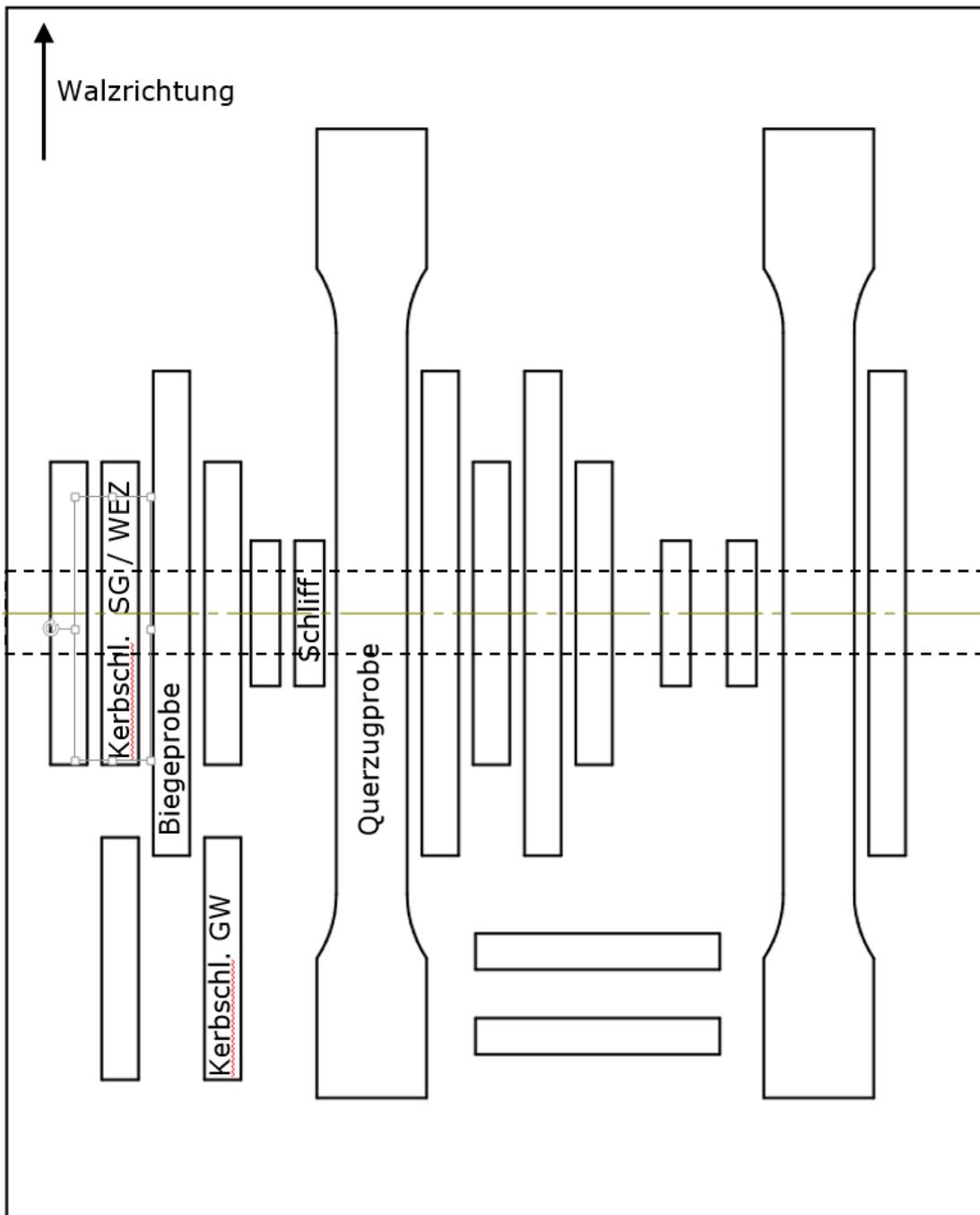
Anzeigen der Ultraschallprüfung wurde an den genannten Stellen die Entnahme der Querschliffe festgelegt.



**Abbildung:** Darstellung der Fehlstellenlage quer zur Schweißnaht über der Profilvermessung des Nahtprofils und Zuordnung der Querschliffproben S1 – S4.

### Probenentnahme

Für die zerstörenden Prüfungen wurden die Prüfstücke anhand des unten abgebildeten Entnahmeplans entnommen. Insgesamt wurden 6 Querschliffproben, 8 Biege, 9 Kerbschlagbiegeproben zur Prüfung der WEZ, 6 Kerbschlagbiegeproben zur Prüfung des Schweißguts sowie 4 Querschliffe entnommen und geprüft. Die Entnahmestellen der Querschliffproben wurden so gelegt, dass eine detaillierte Überprüfung der Anzeigen aus der Ultraschallprüfung ermöglicht wird.



**Abbildung:** Entnahmeplan der Probenstücke in der Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten)

### Zerstörende Prüfung

Die Querzugversuche wurden nach DIN EN ISO 4136:2011 durchgeführt, die Abmessungen der Proben wurden wie folgt gewählt:

- Gesamtlänge  $L_t = 400$  mm
- Parallele Länge  $L_c = 330$  mm
- Querschnitt:  $10 \times 25$  mm<sup>2</sup>

Die Ergebnisse der Querkzugprüfung sind in der untenstehenden Tabelle aufgeführt.

Probe	$R_m$ in MPa	$F_{max}$ in kN	Versagen
Z1	515	128,95	Grundwerkstoff
Z2	511	128,04	Grundwerkstoff
Z3	514	128,60	Grundwerkstoff
Z4	514	128,92	Grundwerkstoff
Z5	511	128,06	Grundwerkstoff
Z6	514	128,80	Grundwerkstoff

**Tabelle:** Ergebnisse der Querkzugprüfung

Bei allen Proben trat das Versagen im Grundwerkstoff auf und die Zugfestigkeit lag über der in DIN EN 10025-2 vorgeschriebenen Mindestzugfestigkeit.

Die Biegeprüfungen wurden nach DIN EN ISO 5173 als Seitenbiegeprobe quer zur Stumpfnahht durchgeführt, die Ergebnisse sind zusammen mit der jeweiligen Maximalkraft in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Probe	Lage in Schweißnaht	Bruch / Fehler > 3 mm	Maximalkraft
B1	Oben	keine	19,1
B2	Unten	keine	19,1
B3	Oben	keine	23,0
B4	Unten	keine	22,5
B5	Oben	keine	19,6
B6	Unten	keine	19,6
B7	Oben	keine	21,1
B8	Unten	keine	19,6

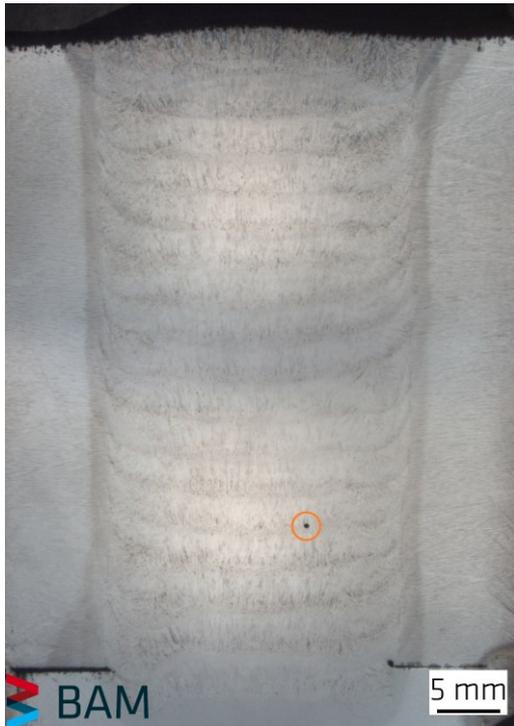
**Tabelle:** Ergebnisse der Biegeprüfung und Bewertung nach EN ISO 15614-1



**Abbildung links:** Querbiegeproben Demonstratorschweißung (links B5 – B8, rechts B1 – B4)

**Abbildung rechts:** Querbiegeproben Demonstratorschweißung (links B5,B6, rechts B3,B4)

Für die Makroschliffuntersuchung wurden an den zuvor genannten Stellen Querschliffe über die gesamte Schweißnaht entnommen und in den folgenden Abbildungen dargestellt.



**Abbildung:** Schliff S1 (Spaltbreite 23,5 mm)  
Poren < 0,5 mm in der 5. Lage



**Abbildung:** Schliff S2 (Spaltbreite 24 mm)  
keine erkennbare Fehlstelle



**Abbildung:** Schliff S3 (Spaltbreite 19 mm)  
Flankenbindefehler ca. 1,5 mm x 0,4 mm  
in der zweiten Lage



**Abbildung:** Schliff S4 (Spaltbreite 18 mm)  
Schlackeeinschlüsse < 0,1 mm zwischen  
9. und 10. Lage an linker Flanke

Der Poreneinschluss in S1 sowie die Schlackeeinschlüsse in S4 sind nach ISO 5817 für die Bewertungsgruppe B zulässig. Der Flankenbindefehler in S3 ist für Bewertungsgruppe B nicht

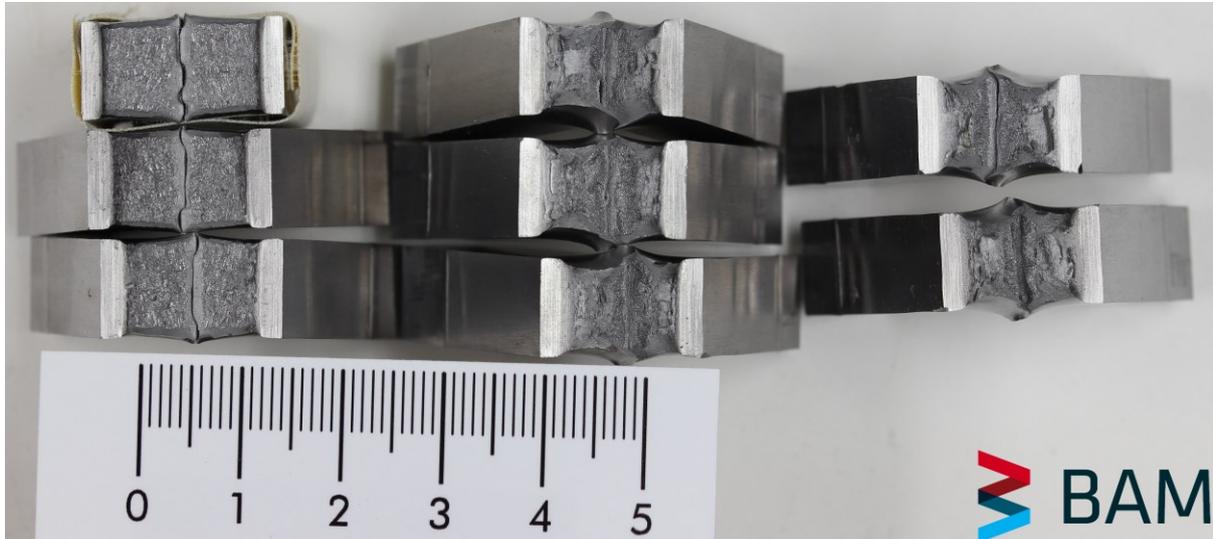
zulässig. Das mögliche Auftreten von Flankenbindefehlern beim Übergang der Wurzellage zur zweiten Lage bei Anwendung der Pendelraupentechnik wurde mit den PA-Mitgliedern ausgiebig diskutiert. Die für die Demonstratorschweißung eingesetzte Pendelregelung für Pendelraupentechnik ohne zeitliche Verzögerung des Pendelstopps (vgl. AP6) war bei Wurzelschweißungen nicht so prozesssicher wie die in den Vorversuchen betrachtete Strichraupentechnik. Die Strichraupentechnik ist daher der Pendelraupentechnik für die Wurzellagenschweißung ggf. vorzuziehen.

Die Kerbschlagbiegeprüfungen wurden nach DIN EN ISO 9016 durchgeführt, die Ergebnisse aller Proben sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

Probe	Kerblage	Prüfpeperatur in °C	L in mm	b in mm	h in mm	Kerbgrund in mm	A <sub>v</sub> in J	Position
K01	WEZ	-20	55,02	9,99	10,00	8,03	235	Oben
K02	WEZ	-20	55,01	9,99	9,99	8,04	108	Mitte
K03	WEZ	-20	55,00	9,99	10,00	8,03	196	Unten
K07	WEZ	-20	55,02	9,99	10,00	8,03	242	Oben
K08	WEZ	-20	55,01	9,99	9,99	8,03	180	Mitte
K09	WEZ	-20	55,01	9,99	10,00	8,03	121	Unten
K13	WEZ	-20	55,02	9,99	9,99	8,03	204	Oben
K14	WEZ	-20	55,01	9,99	10,00	8,03	169	Mitte
K15	WEZ	-20	55,01	9,99	10,00	8,03	185	Unten
K04	SG	-20	55,02	10,01	10,01	8,05	56	Oben
K05	SG	-20	55,01	10,00	10,01	8,04	54	Mitte
K06	SG	-20	55,00	9,99	10,00	8,03	74	Unten
K10	SG	-20	55,01	10,00	10,00	8,03	54	Oben
K11	SG	-20	55,02	9,99	10,00	8,03	52	Mitte
K12	SG	-20	55,01	9,99	10,00	8,04	65	Unten
G01	GWS	-20	55,04	10,00	10,01	8,04	159	Oben
G02	GWS	-20	55,00	10,00	10,00	8,04	184	Unten
G03	GWS	-20	55,03	10,00	10,00	8,03	172	Oben
G04	GWS	-20	55,02	9,99	10,00	8,04	163	Unten
G05	GWS	-20	55,03	10,00	10,00	8,02	152	Oben
G06	GWS	-20	55,03	9,99	10,00	8,03	155	Unten
G07	GWS	-20	55,02	9,99	10,00	8,03	156	Oben
G08	GWS	-20	54,98	10,00	10,00	8,05	148	Unten

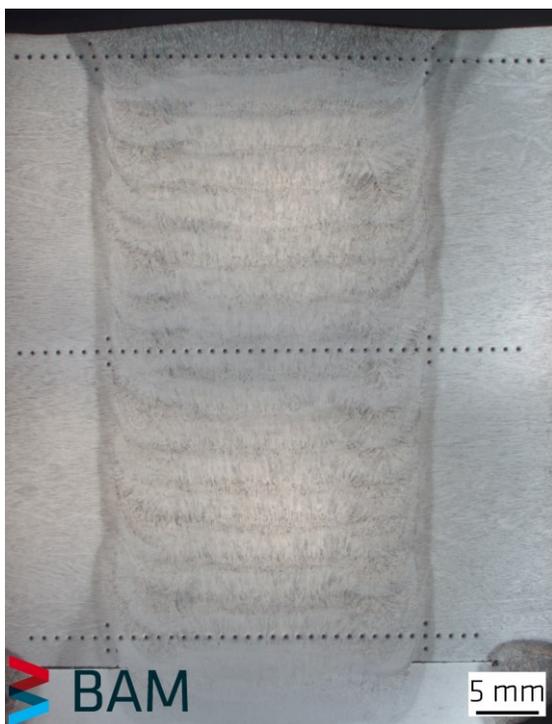
**Tabelle:** Übersicht der ermittelten Kerbschlagarbeiten

Alle Proben weisen bei -20°C eine höhere Kerbschlagarbeit als die geforderten 27 J auf und erfüllen somit die Bewertungsklasse B. Die Kerbschlagarbeiten der Grundwerkstoffproben liegen bei vergleichbaren Mittelwerten wie im Werkszeugnis ausgewiesen. Untenstehend sind exemplarisch Bruchflächen der Kerbschlagbiegeproben aus Schweißgut, WEZ und Grundwerkstoff gezeigt.

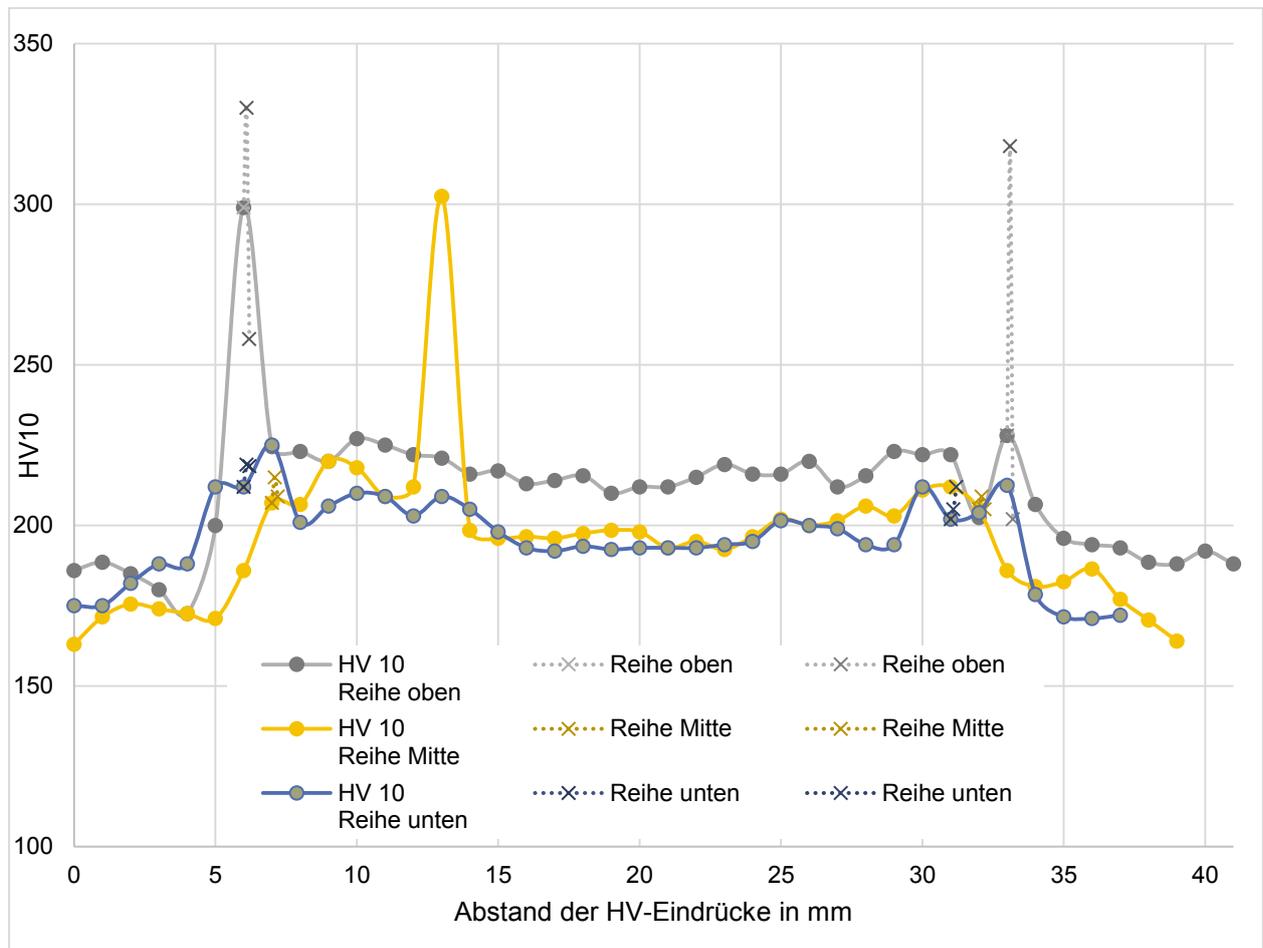


**Abbildung:** Bruchflächen im Schweißgut (links), der WEZ (Mitte) und Grundwerkstoff (rechts) Entnahmestelle wie abgebildet oben, Mitte, unten (SG, WEZ) bzw. oben, unten(SG)

Die Härteprüfung wurde nach EN 1043-1 an Schliff S2 des Demonstratorbauteils mit 50 mm Blechdicke durchgeführt. Die untenstehenden Abbildungen zeigen sowohl den zugehörigen Makroschliff als auch die gemessenen Härten in HV10 entlang der Härtereihen. Die die sichtbare Ausdehnung der WEZ mit ca. 2 mm vergleichsweise gering ist, wurden in der WEZ zusätzlich versetzte Eindrücke platziert um auf die geforderte Mindestanzahl an Eindrücken zu kommen.



**Abbildung:** Makroschliff mit Position der HV-Eindrücke



**Abbildung:** Ergebnisse der Härtemessung in HV10

Gegenüber den Härtewerten im Grundwerkstoff ist vor allem in den oberen Lagen eine leichte Aufhärtung erkennbar. Die mit höchsten Härtewerten werden in der WEZ der Decklage gemessen, was auf den hier wegfallenden Zwischenvergütungseffekt durch erneutes Anlassen zurückzuführen ist. Als Abhilfemaßnahme kann eine Wärmenachbehandlung herangezogen werden. Alle Härtewerte liegen unter den in DIN EN ISO 15614-1 geforderten Maximalwerten.

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien sowie zerstörenden Prüfung erfüllen im Einzelnen die Bewertungsgruppe B nach ISO 5817, so dass zusammenfassend festzuhalten bleibt, dass das MSG-Engsapltschweißen unter Einsatz der beschriebenen Vorgehens zur Prozessregelung für Spaltbreitenvariationen zwischen 18 und 24 mm nach ISO 15614-1 als qualifiziert gilt. Um etwaigen Unregelmäßigkeiten beim Schweißen der Wurzellage vorzubeugen wird empfohlen diese ggf. statt mit Pendelraupentechnik mit zwei Raupen pro Lage in Strichraupentechnik durchzuführen.

### 3. Verwendung der Zuwendung

Durchgeführte Arbeiten	Ressourceneinsatz			
	Wissenschaftl.-technisches Personal (A.1)		Geräte (B)	Leistungen Dritter (C)
AP1	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	1 MM	keine	keine
AP2	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	1 MM	keine	keine
AP3	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	1 MM	keine	keine
AP4	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	6 MM	keine	keine
AP5	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	4 MM	keine	keine
AP6	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	5 MM	keine	keine
AP7	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	4 MM	keine	keine
AP8	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	2 MM	keine	keine
AP9	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	2,5 MM	keine	keine
AP10	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	1,2 MM	keine	keine
<b>Gesamt</b>		<b>27,7 MM</b>	<b>keine</b>	<b>keine</b>

### 4. Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Versuche zur Festlegung der Prozessparameter wurden in Zusammenarbeit mit den PA-Mitgliedern erarbeitet.

Die geleistete Arbeit entspricht damit dem begutachteten und bewilligten Antrag sowie den Beschlüssen der PA-Sitzungen während der Projektlaufzeit. Daher war sie für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

## **5. Darstellung möglicher industrieller Anwendung für KMU**

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass das MSG-Engspaltschweißen insbesondere für Blechdicken von 50 mm oder höher eine gut automatisierbare Anwendung und Alternative beispielsweise zu Verfahren mit V-Nahtvorbereitung darstellt. Durch den gleichmäßigen Lagenaufbau über die gesamte Naht kann die Planung der Mehrlagenschweißung vereinfacht und Produktionskosten gesenkt werden. Für KMU ist hier vor allem der vergleichsweise geringe notwendige Invest positiv hervorzuheben, da lediglich der speziell für den Einsatz in I-Nähten ausgelegte Engspaltbrenner als Erweiterung einer mechanisierten MSG-Schweißstation notwendig ist. Durch die ermöglichte Umstellung eine I-Nahtvorbereitung ohne fräsende Nachbereitung der Kanten entfällt ein zusätzlicher, kostenintensiver Arbeitsschritt. Durch die im Forschungsvorhaben erarbeitete Prozessregelung kann die Prozessstabilität und -sicherheit dennoch gewährt bleiben.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Pendelregelung für das MSG-Engspaltschweißen auf Basis des Lichtbogensensors ist prinzipiell direkt auf entsprechende Anwendungen in der Industrie übertragbar. Da der Lichtbogensensor die Pendelbreite ohne eine vorhergehende zeitaufwändige Kalibrierung oder Anpassung an unterschiedliche konventionelle Lichtbogenprozesse anwendbar ist, ist der zu erwartende Versuchsaufwand zur Einrichtung minimal. Dies ist insbesondere für die Herstellung geringer Losgrößen, welche vor allem für von KMU bedienten Märkte relevant sind, hilfreich. Zusätzlich kann durch die automatische Anpassung der Pendelbreite die Notwendigkeit der manuellen Prozessüberwachung und -anpassung durch schweißtechnisch geschultes Personal reduziert werden, was die Produktionskosten weiter senken kann. Als Voraussetzung für den Einsatz der Pendelregelung ist die Umsetzung des entsprechenden Algorithmus in der eingesetzten Steuerung zu nennen. Da die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse bereits mit einem kommerziell verfügbaren Brennersystem für das MSG-Engspaltschweißen erzielt wurden, ist hier mit einer Übertragbarkeit der Ergebnisse auf analoge Systeme im Produktionsbetrieb auszugehen.

Für Anwendungen, bei denen eine optische Sensorik zur Vermessung der Spaltgeometrie zur Verfügung steht, können die herausgearbeiteten Ergebnisse bezüglich der Füllgradregelung ebenfalls direkt übernommen werden. Da sowohl eine Ansteuerung der Schweißgeschwindigkeit als auch des Drahtvorschubes zum Erreichen eines gleichmäßigen Lagenaufbaus bei stark variierender Spaltgeometrie erfolgreich nachgewiesen werden konnte, kann je nach spezifischer Anforderung der Anwendung (bspw. Unterschreiten eines maximalen Energieeintrages beim Einsatz bestimmter Werkstoffe) der Schweißvorgang flexibel angepasst werden. Durch den gleichmäßigen Lagenaufbau auch bei über 15 Lagen mit einer einheitlichen Nahtüberhöhung entlang der gesamten Schweißnaht können zusätzlich andernfalls notwendige, nachgelagerte Bearbeitungsschritte eingespart und somit die Herstellungskosten und –zeit gesenkt werden.

Steht an der Anlage keine optische Sensorik zur Verfügung, oder kann die Sensorik nicht für den gesamten Blechdickenbereich eingesetzt werden, ist bei starken Variationen der Spaltbreite eine Füllgradregelung mittels Lichtbogensensorik notwendig. Der hier vorgestellte Ansatz zur Auslegung dieser Sensorik hat das Ziel, die Informationen des Lichtbogensensors bezüglich der Spaltbreite analog zu optischen Messung bereitzustellen. Somit muss nur das Messprinzip geändert werden, der zugrundeliegende Regelalgorithmus basierend auf der ermittelten Spaltbreite bleibt jedoch gleich, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse sichert und den Einricht- und Konfigurationsaufwand sowie damit verbundene Kosten senkt. Für KMU ergeben sich heraus

ggf. folgende, Interessante Anwendungsgebiete: In Bereichen der Blechdicken oder Fugentiefen, die mittels optische Sensorik abgebildet werden können, kann die Sensorik im Zusammenspiel der den ermittelten Signalen des Lichtbogensensors zur Analyse des Systemverhaltens der Anlage genutzt werden. Mit den zuvor erläuterten Algorithmen ist es anschließend möglich, die Spaltbreite analog zu einer optischen Messung gänzlich aus der Lichtbogensensorik zu bestimmen und als Eingangsgröße für die Füllgradregelung zu verwenden. Dabei muss der Regelalgorithmus selbst nicht weiter adaptiert werden.

## 6. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahmen während der Projektlaufzeit	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum	Status
<b>Maßnahme A:</b> Veröffentlichung der Ergebnisse	Veröffentlichungen der Ergebnisse in Fachzeitschriften und auf Konferenzen	A1: Beitrag in „Schweißen und Schneiden“	4. Quartal 2016	laufend
		A2: Beitrag auf „IIW Annual Assembly“	3. Quartal 2016	erledigt
		A3: Beitrag auf „IIW Intermediate Meeting C-XII“	2. Quartal 2016	erledigt
		A4: Beitrag in „Welding in the World“	Nach IIW Ann. Ass. 2016	laufend
		A5: Vortrag auf dem DVS Congress 2015	3. Quartal 2015	erledigt
		A6: Beitrag in „DVS Berichte“	3. Quartal 2015	erledigt
		A7: Beitrag in „Schweißen und Schneiden“	3. Quartal 2016	laufend
<b>Maßnahme B:</b> Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Transfer der Forschungsergebnisse in die akademische Ausbildung	B1: Einbindung studentischer Hilfskräfte in das Thema	Kontinuierlich während der Laufzeit	erledigt
		B2: Vergabe von Studien- und Diplomarbeiten zu Teilbereichen des Themas	04/15 – 07/16	erledigt
		B3: Lehrveranstaltungen an der TU Berlin zum Thema „Sicherheit gefügter Bauteile I und II“, Prof. Rethmeier	kontinuierlich während der Laufzeit	erledigt
		B4: Lehrveranstaltungen an der TU Berlin zum Thema „Fügetechnik – Verfahren der Schweißtechnik“, Prof. Rethmeier	Wintersemester 2015/16	erledigt
<b>Maßnahme C:</b> Ergebnistransfer in die Industrie	Zeitnahe und direkte Weitergabe und Nutzung der Ergebnisse in der Industrie	C1: Unternehmen des PBA werden, zusätzlich zu den Sitzungen, auch direkt in die Untersuchungen mit einbezogen	kontinuierlich während der Laufzeit	erledigt
		C2: gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen auch außerhalb des Projekt begleitenden Ausschuss	kontinuierlich während der Laufzeit	erledigt
		C3: Workshops im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 1026 „Sustainable Manufacturing“ der TU/BAM Berlin	kontinuierlich während der Laufzeit	erledigt

<b>Maßnahme D:</b> Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Ergebnisse und Abgleich mit den Anforderungen der Industrie	D1: Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	2. Quartal 2014	erledigt
		D2: Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	1. Quartal 2015	erledigt
		D3: Vorstellung weiterer erzielter Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	1. Quartal 2016	erledigt
		D4: Abschlusspräsentation und Diskussion	3. Quartal 2016	erledigt
<b>Maßnahme E:</b> Übernahme der Ergebnisse in techn. Regelwerke / Normen	Einbringung der Forschungsergebnisse in Gremien des DVS / IIW zur Unterstützung der Arbeit für Normung und Richtlinien	E1: halbjährliche Sitzungen des DVS Fachausschuss FA3 „Lichtbogenschweißen“	Alle Sitzungen des FA3 innerhalb der Laufzeit	erledigt
		E2: Einbringen und Diskussion der Ergebnisse in der Arbeitsgruppe V 2.6 „Mechanisierung, Automatisierung, Robotereinsatz beim Lichtbogenschweißen“	Alle Sitzungen der Arbeitsgruppe innerhalb der Laufzeit	geplant
		E3: Einbringen und Diskussion der Ergebnisse in der Kommission IIW C-XII / „Arc welding processes and production systems“	Alle Sitzungen der Arbeitsgruppe innerhalb der Laufzeit	erledigt

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum	Status
<b>Maßnahme F:</b> Veröffentlichung der Ergebnisse	Veröffentlichung der Ergebnisse im Zuge einer angestrebten Promotion	F1: Beitrag zur Dissertation eines wissenschaftlichen Mitarbeiters	2014 - 2016	laufend
		F2: Abschlussbericht des Vorhabens	3. Quartal 2016	erledigt
		F3: Lehrveranstaltungen an der TU Berlin zum Thema „Sicherheit gefügter Bauteile I und II“, Prof. Rethmeier	kontinuierlich im Anschluss an die Laufzeit	laufend

### Einschätzung der Realisierbarkeit

Die Realisierbarkeit der Transferleistungen, sofern noch nicht abgeschlossen, wird als gut eingeschätzt. Weiterführende Arbeiten zur direkten Übertragung der Ergebnisse in die Wirtschaft sind im Rahmen eines bilateralen Projekts mit einem PA-Mitglieds für 2017 geplant und befinden sich in der Ausarbeitung.