

# **Verifizierung der Prozessstabilität einer konstruierten WAAM-Anlage zum Induzieren von Eigenspannungen in generativ gefertigten Strukturen**

Sebastian Gersch, M. Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Carsten Schulz  
Christopher Kral, M. Eng.

## **Zusammenfassung**

Heutzutage werden Strukturen häufig aufwendig konstruiert und nachträglich mithilfe von numerischen Verfahren optimiert. Dennoch kommt es zu erheblichen Schäden infolge von Ermüdungsbrüchen bei wechselnd beanspruchten Bauteilen. Ein Großteil dieser Schäden hat den Ursprung in den im Inneren herrschenden Spannungszuständen, den sogenannten Eigenspannungen. Diese Eigenspannungen heben sich innerhalb des Bauteils auf und führen zu keiner Formabweichung des Bauteils, weswegen diese Spannungen in Form und Lage nur schwer detektierbar sind und sich häufig negativ auf die Betriebsfestigkeit von Strukturen auswirken. Mithilfe neuartiger numerischer Methoden können thermomechanische Simulationen angefertigt und Verformungen, sowie Spannungszustände abgeleitet werden. Durch diese Optionen ergeben sich neue Anwendungen, die das Potenzial von Fertigungsverfahren in Hinblick auf die Ausnutzung spezieller Eigenschaften neu eröffnen. Durch die geschickte Anwendung und Vernetzung der Simulation mit der Fertigung können Eigenspannungen gezielt in Lage und Richtung schon während der Produktion des Bauteils eingebracht werden. Im theoretischen Vergleich zu konventionell gefertigten Bauteilen entstehen Strukturen, die hinsichtlich ihrer Bauteillebensdauer optimiert sind.

## **1 Einführung und Theorie**

Die Einsparung von elektrischer Energie und die Reduzierung des Materialeinsatzes nehmen in der heutigen Industrielandschaft einen immer größer werdenden Stellenwert ein und entscheiden nicht zuletzt über die Konkurrenzfähigkeit des Unternehmens und dem Erfolg auf dem internationalen Markt. Durch generativ gefertigte Bauteile mit induzierten Eigenspannungsfeldern, werden drei positive Aspekte erreicht, vgl. Bild 1.

In der Fertigungstechnik werden immer häufiger konventionelle Verfahren mit neuartigen generativen Prozessen ergänzt. Hierdurch ergeben sich Möglichkeiten, die in der Vergangenheit nicht umsetzbar gewesen sind und neue Chancen bieten. Durch die gezielte Einbringung der Eigenspannungsphasen in gewählte Strukturbereiche kann bei optimaler Lage und Position eine Optimierung der Betriebsfestigkeit erzielt werden, vgl. Bild 1 I [1].

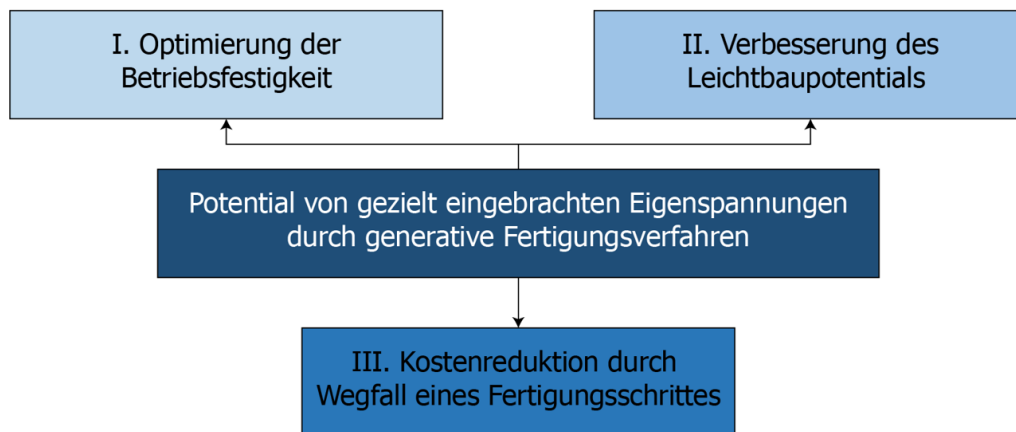


Bild 1: Chancen der generativ eingebrachten Druckeigenspannungen [1, S.497]

Die optimierten, internen Spannungszustände können bei konkret ausgerichteter Lage zu besseren mechanischen Eigenschaften der Struktur führen. Hierdurch wird die Möglichkeit eröffnet, die Masse des Bauteils bei gleichbleibender Bauteillebensdauer zu erhöhen, wodurch das Leichtbaupotential gesteigert werden kann, vgl. Bild 1 II. Die neuartigen, generativen Fertigungsverfahren in Kombination mit der thermomechanischen Simulation bieten eine völlig neue und ökonomisch wertvolle Chance, Spannungsfelder gezielt in Lage und Ausprägung in Bauteile zu induzieren, ohne jedoch einen weiteren Fertigungsschritt auszuführen. Es lassen sich dadurch Anlagenkosten reduzieren und Ressourcen schonen, vgl. Bild 1 III [1], [2].

### 1.1 Interdisziplinarität der Forschung zu generativ eingebrachten Druckeigenspannungen

Für die Umsetzung der Forschung zum Realpotential von eingebrachten Druckeigenspannungen werden Autorensseitig vier Disziplinen als zielführend angesehen. Computer-Aided Design (CAD) ermöglicht die Anfertigung beliebiger digitaler Modelle, die eine Grundlage für die weiterführende Kategorie aus dem Bereich des Computer-Aided Engineering (CAE) darstellt. Zu dieser Disziplin zählen vor allem die Finite-Elemente-Analyse und die Mehrkörperanalyse. Nach dem Stand der Technik lassen sich mithilfe von Simulationstools, wie Simufact, generative Prozesse simulieren und im Zusammenhang mit der thermomechanischen Analyse die vorherrschenden Spannungen und Verformungen ausgeben. Computer-Aided Manufacturing (CAM) ermöglicht, die digital erstellten und im Nachgang simulierten Modelle mithilfe generativer Verfahren anzufertigen und herzustellen. Im Laufe des Forschungsprojektes werden die numerisch errechneten Modelle mithilfe eines Schnittstellentools in einen Maschinencode umgewandelt. Das favorisierte Verfahren zur Anfertigung der Strukturen mit eingebrachten Druckeigenspannungen ist der Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Prozess, der Prozessbedingt ein hohes Maß an Eigenspannungen schon während der Fertigung einbringt und eine hohe Aufbaurate besitzt. Durch die etablierten CAQ-Methoden können Kennlinien der angefertigten Strukturen aufgezeichnet werden [1], [3], [4].

## 1.2 Eigenspannungen und deren Ausnutzung in Strukturen

Als Eigenspannungen werden Spannungen definiert, die ohne äußere Kraft- und Momenteinwirkung oder Temperaturgradienten im Inneren eines Bauteils vorherrschen. Hierbei ist die Summe der vorherrschenden Kräfte ausgeglichen und es liegt keine plastische Verformung vor. Sind die Summe der im Inneren des Bauteils herrschenden Kräfte je Koordinatenrichtung nicht ausgeglichen, kommt es zu plastischen Verformungen und zum Verzug [2].

In Abbildung 2 ist ein schematischer Vergleich der Eigenspannungsverteilung zwischen einer konventionellen gefertigten Welle und einer generativ hergestellten Welle mit gezielt eingebrachten Eigenspannungen dargestellt.

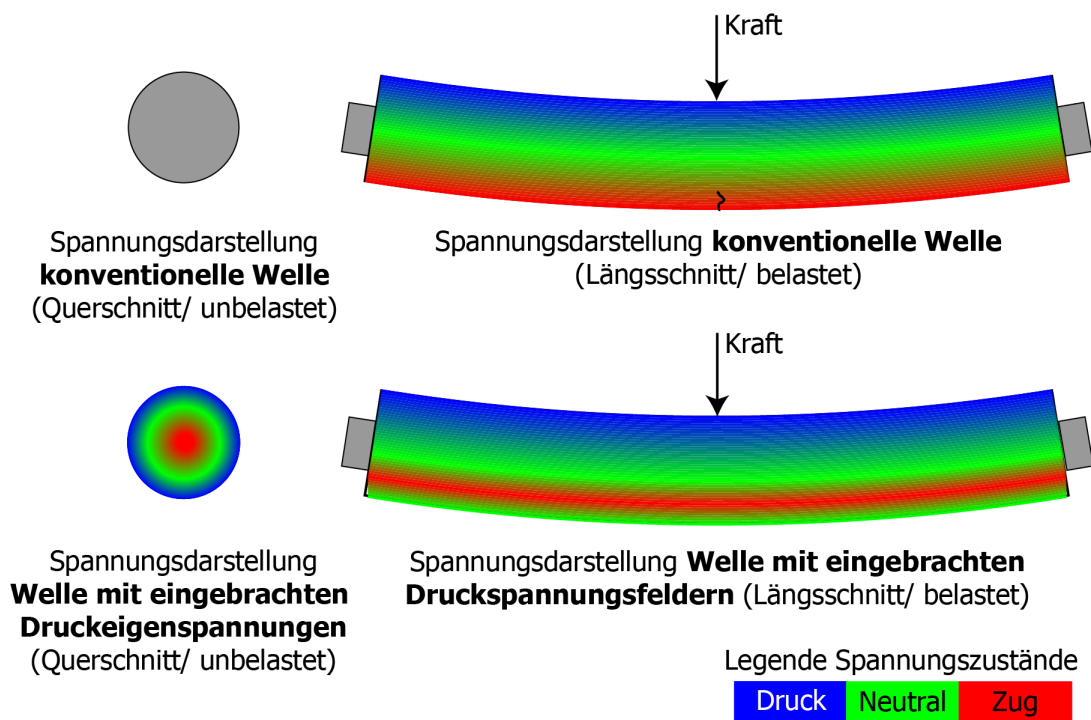


Bild 2: Eigenspannungsverteilung Antriebswelle; oben konventionell, unten generativ mit gezielter Eigenspannungsverteilung [1, S.499]

In der Abbildung 2 ist die Druckeigenspannungsphase blau, die neutralen Phasen grün und die Zugeigenspannungsphase rot dargestellt sind. In der schematischen Darstellung des unbelasteten Wellenquerschnitts ist ein homogener, spannungsfreier Bereich abgebildet, vgl. Bild 2 oben links. Der schematisch dargestellte, unbelastete Wellenquerschnitt der generativ gefertigten Welle mit eingebrachten Eigenspannungen ist durch eine Zugeigenspannungsphase im Inneren gekennzeichnet. Abgelöst wird diese Zone von einer neutralen Phase, an die im äußeren Bereich des Bauteils eine Druckeigenspannungsphase anknüpft, vgl. Bild 2 unten links. Bei einer äußeren Belastung der Welle resultieren, aufgrund der eingebrachten Druckeigen-

spannungen, unterschiedliche Beanspruchungszonen im Inneren der konventionell gefertigten, bzw. der generativ gefertigten Welle. Hierbei ist das Maximum der Zugspannung auf der entgegen gesetzter Seite der Belastung zu finden. Durch die hohe Beanspruchung des Randbereichs sind die Kerbwirkungseffekte durch mechanische Strukturen besonders kritisch und können zu einem Anriss führen, vgl. Bild 2 oben rechts. Die Spannungsverteilung der generativ gefertigten Welle weist hingegen ein Zugspannungsmaximum im Inneren des Bauteils auf. Theoretisch ergibt sich bei gleich großen eingebrachten Druckeigenspannungsphasen in den äußeren Bereich und resultierenden Zugspannungen in der Summe eine neutrale Phase, vgl. Bild 2 unten rechts. Die abgebildete schematische Spannungsverteilung der generativ hergestellten Welle besitzt ein hohes theoretisches Potenzial, die Betriebsfestigkeit positiv zu beeinflussen [1], [2].

## 2 Forschungsstand der Untersuchungen

Die aktive Untersuchung lässt sich in einen simulativen und in einen praktischen Teil der Versuchsdurchführung untergliedern. In diesem Kapitel wird der derzeitige Forschungsstand dargestellt.

### 2.1 Forschungsstand der Simulation

Im Bereich der Simulation müssen zu Beginn Strategien zur Einbringung der Eigenspannungsfelder erarbeitet werden. Es lassen sich drei theoretisch günstige Möglichkeiten zur Beeinflussung der Eigenspannung bei Verwendung des WAAM-Verfahrens beschreiben. Wobei zwei der drei Möglichkeiten im direkten Zusammenhang mit der Temperatur des Schweißgutes stehen. Durch die Anpassung der Streckenenergie, einer aktiven Kühlung der Struktur und durch das Einhalten bestimmter Fertigungsreihenfolgen und Zwischenlagentemperaturen können gezielt Eigenspannungsfelder eingebracht werden. Um die These der eingebrachten Druckeigenspannungen durch die Schweißreihenfolge zu untermauern, werden erste Simulationen des Prozesses durchgeführt. Hierbei wurde die Fertigungsreihenfolge wie im Bild 3 links angelegt [1].

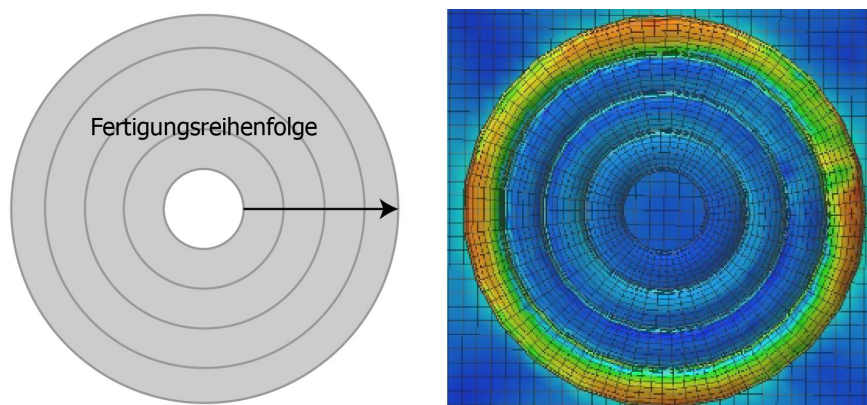


Bild 3: Simulierte Fertigungsreihenfolge (links) und Darstellung der vorläufigen Simulation (rechts) [1, S.503]

Zur Berechnung der thermomechanischen Analyse wird ein gleichmäßiges Netz erzeugt und die durch den Wärmeeintrag auftretenden Spannungen numerisch berechnet. Erste Resultate der Simulation liefern unterstützende Ergebnisse, dass durch eine definierte Fertigungsreihenfolge im Schichtauftragsverfahren Eigenspannungsphasen innerhalb des Bauteils vorherrschen, vgl. Bild 3 rechts.

## 2.2 Forschungsstand der praktischen Versuchsdurchführung

Bei der für das Forschungsvorhaben eingesetzten WAAM-Anlage handelt es sich um eine Neukonstruktion aus einer Inverter-Schweißstromquelle (Rehm Panther 202Puls), einer kartesischen Kinematik und einem Kühlsystem des Bauteilhalters. Die Schweißstromquelle liefert Prozessparameter für eine geeignete Anwendung im WAAM-Bereich, vgl. Bild 4.

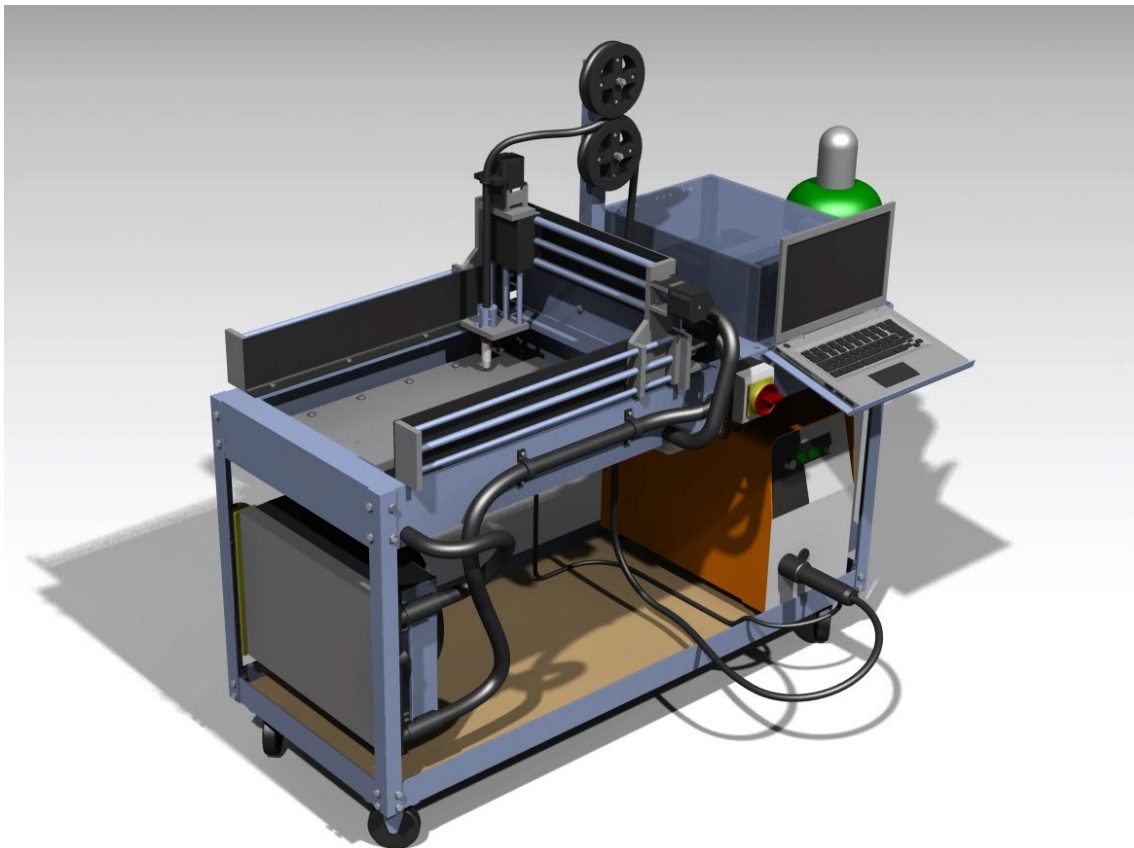


Bild 4: Schematischer Aufbau der Wire Arc Additive Manufacturing Versuchsanlage

Die aufgesetzte Kinematik bewegt den fixierten Schweißbrenner in der x-Achse, y-Achse und z-Achse. Hierbei stellen eine Kugelumlaufspindel, Rundführungen und Nema23 Schrittmotoren die Antriebselemente dar, vgl. Bild 4. Die WAAM-Anlage besitzt einen Bauraum von 350 mm x 650 mm x 175 mm (x, y, z). Mithilfe von Schrittmotortreibern und dem generierten G-Code können die nötigen Bahnbefehle zur Erzeugung des Realmodells genutzt werden und die Bahnsteuerung des Schweißbrenners übernehmen.

Zur Validierung der Verfahrensstabilität der Anlage und der Reproduzierbarkeit wurden statische Zugversuche durchgeführt. Hierfür wurde im Vorfeld geeignete Einstellungen der Schweißstromquelle im Zusammenhang mit der Fertigungsgeschwindigkeit und weiteren Verfahrensparametern ermittelt.

Für die statistische Untersuchung werden jeweils zehn linienförmige Geometrien auf einem Bauteilträger erzeugt. Zur Auswertung der Streuung der Prozessstabilität im statischen Zugversuch werden die Proben jeweils im oberen Bereich geplamt. Weiterführend wird eine Kerbe eingebracht, die eine definierte Bruchzone für die folgenden Zugversuche einstellt. Anschließend werden die Probekörper temperaturreduziert, mithilfe einer Bandsäge abgetrennt, vgl. Bild 5 oben.



Bild 5: Angefertigte Probe für die statistischen Versuchsauswertung (oben)  
3D-gescannte Probe (unten)

Zur optimalen Auswertung der Einzelproben werden die Strukturen im 3D-Scanning erfasst. Durch diesen zusätzlichen Schritt können die Ergebnisse in ihrer Qualität und Aussagefähigkeit gesteigert werden. Gescannte Strukturen geben Aufschluss über die Oberflächenwelligkeit, systematische Fehler und Unregelmäßigkeiten, vgl. Bild 5 unten. Insgesamt werden zwanzig Proben mithilfe einer statischen Untersuchung ausgewertet. Jeweils zehn Proben stammen aus einer Fertigungsreihe, die mit einem Kurzlichtbogen angefertigt werden und zehn Proben, die mit einem gepulsten Lichtbogen angefertigt werden.

Die Geometrien der Proben werden an den Enden leicht manuell geplamt, um eine Fixierung in der Zwick Zugmaschine ohne eine Relativbewegung zwischen den Spannzangen und der Probe zuzulassen. Weiterhin müssen die Proben orthogonal zu den Spannelementen befestigt werden. Jeweils eine aus zehn Proben wird nicht zur statistischen Untersuchung herangezogen, um ein Schliffbild zur metallurgischen Untersuchung anzufertigen.

Im Bild 6 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Versuchsreihe des Kurzlichtbogen (KLB) und der Pulslichtbogen (PLB) dargestellt. Hierbei ist die maximale Zugspannung dargestellt,

welche aus der maximalen Zugkraft und dem Bruchquerschnitt ermittelt. Hierbei wird die Bruchfläche der Probe mithilfe des 3D-Scanning Modells ermittelt.

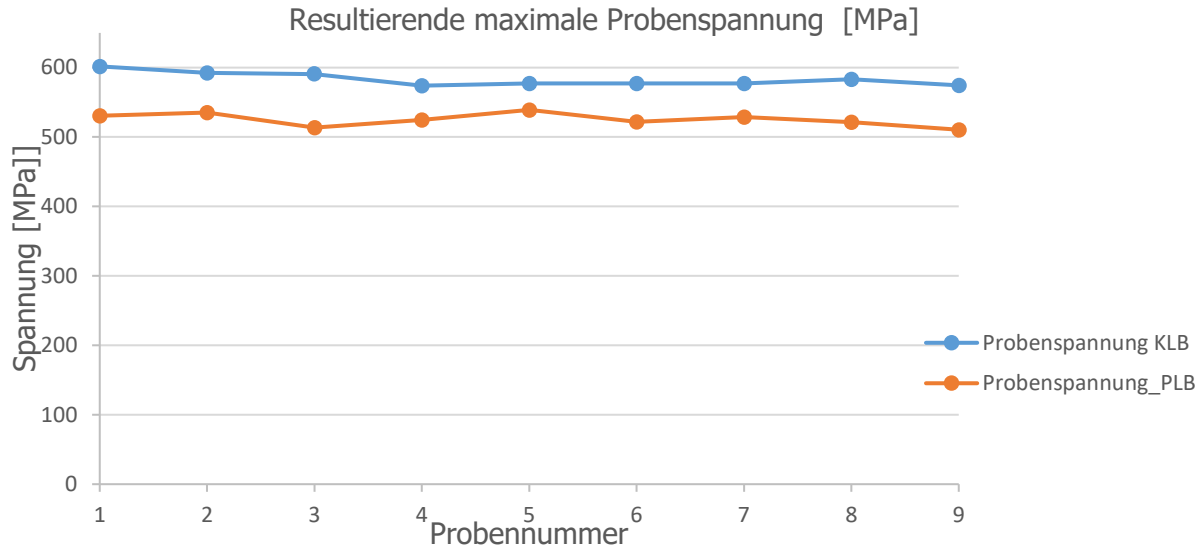


Bild 6: Ergebnisse der statischen Untersuchung der Proben

Die relative Abweichung der Versuchsreihen liegt bei 1,78 % (Pulslichtbogen) und 1,57 % (Kurzlichtbogen). Aufgrund der geringen Abweichung wird die Prozessstabilität der Anlage bestätigt. Auffällig ist die reduzierte ertragbare maximale Probenspannung der PLB-Proben, trotz identischem Zusatzdraht und gleichem Schutzgas. Hierbei liegt die ertragbare Probenspannung um ca. 10 % niedriger als die maximal Probenspannung der KLB-Proben, vgl. Bild 6.

Zur Analyse der verminderten ertragbaren maximalen Spannung der PLB-Proben im Hinblick auf die KLB-Proben werden mikroskopische Untersuchungen der Gefüge durchgeführt, vgl. Bild 7.

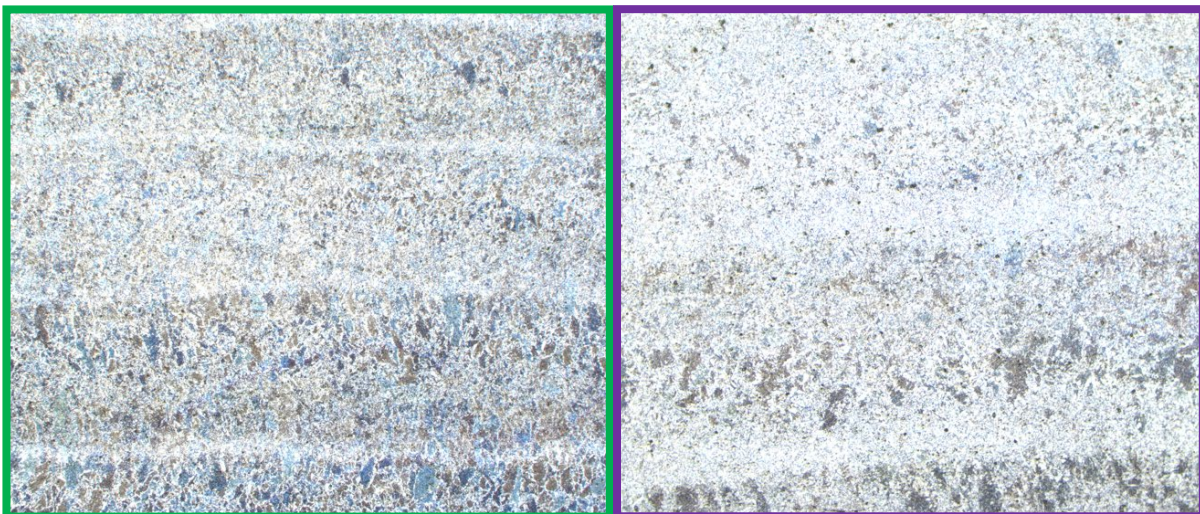


Bild 7: Schliffbild von KLB-Proben links; Schliffbild von PLB-Proben rechts

Die Schlißbilder zeigen deutlich die Einzelschichten der WAAM gefertigten Proben. Es liegen in beiden Proben keine schwerwiegenden Fehler, wie Bindefehler oder Poren vor. Das Gefüge der KLB-Proben weist eine teilweise gerichtete Erstarrung über die Lagengrenzen der einzelnen Schichten auf. Das Schlißbild der PLB-Probe weist eine homogene Verteilung an Mikroporen auf, vgl. Bild 7, rechts. Die porenbehaftete Gefügestruktur der Proben kann zur Verminderung der ertragbaren Zugkraft führen, wie es im Kapitel 2.2 beschrieben ist.

### **3 Zusammenfassung und Ausblick**

Mithilfe neuer numerischer Möglichkeiten im Bereich der thermomechanischen Simulation wird das Potenzial des WAAM-Verfahrens um ein Vielfaches gesteigert. Besonders profitieren Hersteller von dynamisch hoch beanspruchten Bauteilen.

Kurzfristig wird bei der WAAM-Anlage ein prozessüberwachendes System integriert. Hierbei werden der Drahtvorschub, die Prozessspannung und der Prozessstrom dauerhaft aufgezeichnet. Zudem werden die von dem Schweißbrenner zurückgelegten Wege aufgezeichnet und mit einem Zeitstempel versehen. Resultierend wird die Möglichkeit generiert, eine digitale Abbildung mit den Realparametern der gefertigten Struktur zu generieren. Hierdurch werden die Prozessüberwachung und die reproduzierbare Einbringung von Spannungsfeldern deutlich vereinfacht.

Längerfristig wird ein FE-Modell erzeugt, welches hauptsächlich für die Berechnung und Ausgabe der fertigungsinduzierten Eigenspannungen genutzt werden soll. Zu Beginn sollen einfache Grundgeometrien durch die WAAM-Technologie mit eingebrachten Eigenspannungsfeldern erzeugt werden. Ferner werden die Eigenspannungsfelder ebenfalls in SLM-gefertigten Bauteile eingebracht und in die Forschung mit einbezogen.

Durch die Möglichkeiten der Werkstückprüfungen werden die Eigenspannungen der angefertigten Probekörper bzgl. ihrer Dauerfestigkeit und ihrer Beträge aufgenommen. Mithilfe der Bohrlochmethode und Freischneiden können die im Inneren herrschenden Eigenspannungen gemessen und mit den simulativen Ergebnissen abgeglichen werden.

Eine abschließende Einschätzung über das Potenzial von Eigenspannungen kann durch dynamische Prüfverfahren gegeben werden. Hierzu kann ein konventionelles und ein generativ gefertigtes Bauteil jeweils bspw. in einem Dauerschwingversuch gegenübergestellt werden [1].



## Literatur

- [1] Gersch, S.; Schulz, C.: „Realpotential von Eigenspannungen zur Erhöhung der Bauteillebensdauer bei generativ gefertigten, dynamisch beanspruchten Bauteilen“  
Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2022, 26.04.2022 – 27.04.2022,  
Sierke Verlag, Göttingen, S. 496 - 504
  
- [2] Habschied, M.; de Graaff, B.; Klumpp, A.; Schulze, V.: Manufacturing and Residual  
Stresses, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010, S. 111 - 119
  
- [3] Töppel, Th; Müller, B; Hoeren, K; Witt, G: Eigenspannungen und Verzug bei der  
additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen, Fachbeitrag Schweißen und  
Schneiden 68 (2016) Heft 4, S. 176 - 186
  
- [4] Munsch, M Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug in der laseradditiven  
Fertigung, Schriftreihe Lasertechnik: Band 6, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2013,  
S. 1 - 15