

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-19
Datum der Einreichung: 16.02.2026
Datum der Annahme: 10.04.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Befähigung einer robotischen Wire-Arc-Additive-Manufacturing-Zelle für nonplanares Drucken

Fertigung von Strukturen mit Überhängen im WAAM

M. Mehner, F. Schwarz, S. Schabel, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG In dieser Arbeit wurde ein Modell entwickelt, um dünnwandige Strukturen aus unlegiertem Stahl mit Überhang im Wire-Arc-Additive-Manufacturing herzustellen. Ziel war es, komplexere Geometrien für nonplanaren Druck zu ermöglichen. Nach Vorversuchen und einem Central-Composite-Design Versuchsplan zeigte sich: Bei konstanter Materialaustragsrate beeinflusst die Druckgeschwindigkeit die Geometrie am stärksten, unabhängig vom Wandwinkel. Eine Validierung der Ergebnisse erfolgte am 3D-Benchy.

STICHWÖRTER

Wire-Arc-Additive-Manufacturing, Additive Fertigung

Manufacture of structures with inclined walls in WAAM

ABSTRACT In this work, a model was developed to produce thin-walled unalloyed steel structures with overhangs via wire arc additive manufacturing. The aim was to enable more complex geometries for non-planar printing. Preliminary tests and a full-factorial test plan showed that, at a constant material feed rate, printing speed has the most significant influence on the geometry, regardless of the inclined wall angle. The results were then validated by printing a 3D Benchy.

1 Einleitung

Wire-Arc-Additive-Manufacturing (WAAM) bietet einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Materialaustrag im 3D-Druck. Während für Funktionsflächen immer eine zerspanende Nachbearbeitung erforderlich ist, können hohe Austragsraten bis zu 9,5 kg/h [1] erreicht werden, der höchste Wert für metallische 3D-Druck-Verfahren. Hinzu kommt, dass zur Fertigung keine Schutzgasatmosphäre für den gesamten Bauraum nötig ist und somit nur die Grenzen der Aktorik, an der der Schweißkopf befestigt ist, die Bauteilgrenzen bestimmen.

WAAM bietet einige Anwendungsmöglichkeiten: So ist das Verfahren als Ersatz für größere Gussteile in sehr geringer Stückzahl, für Formen- und Werkzeugbau als Alternative zum rein zerspanenden Fertigen und für Additive-Repair-Prozesse nutzbar [2-4]. Insbesondere eine Kombination mit subtraktiven Bearbeitungsköpfen bietet nutzbare Synergieeffekte, wie sie bereits beim Fräsen angewendet wurden [5] und auch im Rahmen einer kinematischen Produktion denkbar sind [6].

Forschungs- und industrieseitig gibt es Bestrebungen, den Prozess weiter zu optimieren. Gerade in Bezug auf Prozessüberwachung und -regelung gibt es diverse Ansätze: Zum Beispiel Einbindungen von Schmelzbadüberwachung mittels Infrarot-Wärmebildkamera oder Mikrofonen zur Körperschallüberwachung für die Erkennung von Anomalien und Rissen [6-8]. Ein weiteres Entwicklungsfeld ist die Prozessplanung. Hier werden Methoden entwickelt, die durch geschickte Austragsstrategien die Maßhaltigkeit an Kreuzungspunkten verbessern oder den Porengehalt im

Druckteil reduzieren sowie durch Wärmeeintragsreduktion, beziehungsweise bessere Wärmeabführung, die Produktivität erhöhen. Weltweit wird hierzu in der Industrie und in Forschungseinrichtungen geforscht [9-12]. Hierbei ist WAAM ein Teil von verschiedenen drahtbasierte Druckverfahren, die sowohl mit Laser – Direct Energy Deposition (DED) – als auch mit Lichtbogen – Pulsverfahren (zum Beispiel Cold-Metal-Transfer) oder Metallaktivgas (MAG) – als Energiequelle erfolgen. Ergebnisse sind oft nur auf eines dieser Verfahren anwendbar.

Das wbk Institut für Produktionstechnik des KIT nutzt das MAG-Verfahren, weil dieses, verbunden mit geringen Anschaffungskosten, die Untersuchung zahlreicher methodischer Fragestellungen ermöglicht. Im Zuge der Prozesserprobung für eine Anwendung im Bereich Additive Repair im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wurde sich nach der Untersuchung von dünnwandigen und massiven Druckteilen dem Drucken von nonplanaren Überhängen gewidmet. Dies bietet den Vorteil, dass die Druckplattform nicht mit weiteren Achsen ausgestattet werden muss und es bei umliegenden bestehenden Strukturen sein kann, dass ein planares Drucken nicht möglich ist. Auch wenn nonplanares Drucken noch keine allgemeine softwarebasierte Lösung besitzt, ist eine prozessseitige Erprobung dessen interessant. Hierdurch lassen sich zum Beispiel geometrische Features einzeln slicen. Slicen bezeichnet den Vorgang, das CAD-Modell in einzelne Druckschichten zu zerteilen. Dies hat einen Vorteil hinsichtlich des Wärmeeintrags, der Gestaltung der Oberflächenqualität und in der Einstellbarkeit der Orientierung von Eigenspannungen im Druckteil [13-14].

Bild 1. WAAM-Versuchsstand (links) und digitales Abbild des Versuchsstands in RoboDK (rechts). Foto: wbk



Tabelle 1 Schweißparameterübersicht für dünnwandige Strukturen: Kurzlichtbogen (KLB), Wurzelschweißmodus (ROOT), Gepulstes Schweißen (PULS).

Schweißparameter	Einheit	KLB 0,8	KLB 1,0	ROOT 1,0	PULS 1,0
Schweißprozessart	-	MSG Normal PowerArc	MSG Normal PowerArc	FocusRoot	PowerPuls
Drahtdurchmesser	mm	0,8	1,0	1,0	1,0
Drahtvorschub WFS	m/min	7	5,1	5,2	5,2
Spannung U	V	17,6	18,1	18	21
Stromstärke I	A	100	120	120	105
Lichtbogenlängenkorrektur*	-	-1	0,3	-1	0,4
Lichtbogenbreitenkorrektur SFI	-	-1	-0,5	0	0
Maximale Abschmelzleistung AL_{max}	kg/h	1,65	1,87	1,91	1,91
Stabiler Bereich					
Stabiler Druckgeschwindigkeitsbereich	mm/min	200-800	200-800	200-700	400-600
Lagengeometrie					
Lagenhöhe TS_{max}	mm	1,72	1,73	1,92	1,57
Lagenhöhe TS_{min}	mm	3,47	3,81	3,67	2,43
Lagenbreite TS_{max}	mm	3,14	3,9	3,88	5,24
Lagenbreite TS_{min}	mm	6,42	6,93	7,61	6,02

*Lichtbogenlänge wird je nach Schweißprozess über Spannung (U) oder über Drahtvorschub (WFS) geregelt

2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuchsanlage (vgl. **Bild 1** links) besteht aus einem „KR180 R2500 Extra“ von Kuka sowie einem Schweißgerät vom Typ Rehm „Focus.ARC P 250“ mit einem „TBi 411 Expert“ Brenner inklusive Schlauchpaket. Der Schweißstisch ist ein feststehender Tisch mit einer Grundfläche von 600 x 600 mm. Als Schweißdraht wird 1,0 mm dicker Fe G3/4 Si 2 mit einem Argon-basierten Schutzgas mit 3 % Kohlenstoffdioxid und 1 % Sauerstoff verwendet. Gedruckt wird auf ein Substrat aus unlegiertem Baustahl mit 8 mm Dicke, das auf den Schweißstisch gespannt wird.

Die hier beschriebenen Arbeiten sind zweigeteilt. Zuerst werden Versuche zum Drucken von Überhängen dargestellt. Im zweiten Teil werden diese Ergebnisse an einem Bauteil validiert und die Herausforderungen bezüglich der Programmerzeugung beschrieben.

Ausgangslage für die Überhangschweißversuche ist der Prozessparametersatz mit Kurzlichtbogen für das Drucken von dünnwandigen Strukturen (vgl. **Tabelle 1**), die wiederum die in **Bild 2** dargestellten Lagenquerschnitte ergeben. Für die Endkraterfüllung wurde eine 0,2 s lange Absenkezeit mit einem Absenkstrom von 50 % experimentell ermittelt. Als Zwischenschichttemperatur wurde 120 °C verwendet, was mit einem Infrarot-Thermometer überwacht wurde. Erst mit Erreichen der Temperatur wurde der Druckvorgang fortgesetzt. Aufgrund der geringen Probengröße war es notwendig, den Druck nach jeder Schicht kurz, etwa 30 Sekunden, zu unterbrechen, bis eine Mindestzwischenlagentemperatur von 120 °C erreicht war.

Zur Erzeugung der Versuchsprogramme wurde eine Softwarepipeline aufgebaut, die auch für komplexere Bauteile funktioniert. Hierzu wird zuerst die gewünschte Probengeometrie in einem CAD-Programm erzeugt und mittels Orca-Slicer ein G-Code

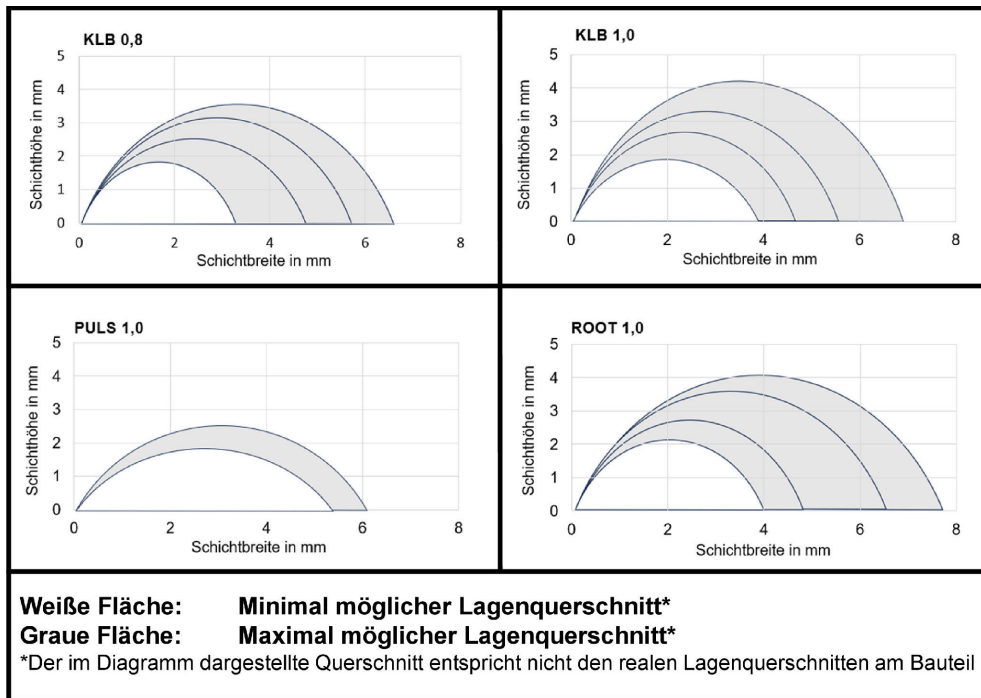


Bild 2. Lagenquerschnitte bei verschiedenen Schweißprozessarten.
 Grafik: wbk

für den Druck erzeugt. Dieser wurde anschließend in ein digitales Modell der Versuchsanlage in RoboDK geladen, um einen Robotercode daraus abzuleiten, sowie die Befehle für die Ansteuerung des Schweißgeräts über die digitalen Ausgänge des Roboters zu erzeugen. Des Weiteren wird der Ablauf simuliert, um eventuelle Kollisionen zu erkennen und festzustellen, ob die Steuersignale für das Schweißgerät an der richtigen Roboterposition erfolgen.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Parametergrenzen festgelegt. Hierzu zählt die maximale Wandneigung. Ebenfalls wurde die Schichtdicke vermessen und die Form der geneigten Wand untersucht. In 10°-Schritten von 0 bis 60° wurden gerade Proben, ohne Krümmung, mit der jeweiligen Wandneigung im KLB 1,0-Modus erzeugt. Auf einen planaren Sockel von 3 Lagen wurde der Überhang aufgesetzt. Die Brennerneigung entsprach hierbei der Neigung des Überhangs. Die maximale Wandneigung ist von der Druckgeschwindigkeit und dem freien Raum unter der Position, wo der Brenner angesetzt wird, abhängig. Einerseits kann es zu Kollisionen kommen und andererseits kommt es, wenn die Druckgeschwindigkeit zu niedrig ist, zu einer zu großen Wärmekonzentration, sodass das Material zu fließen beginnt. Mit steigender Überhangsneigung wird dieser Effekt aufgrund des größeren Schwerkraftanteils stärker. Mithilfe der Vorversuche konnte ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem maximalen Winkel der Wandneigung und der vorliegenden Druckgeschwindigkeit abgeleitet werden: $\alpha_{max}(v_p) \leq \frac{1}{15}v_p - \frac{10}{3}$. Insgesamt ergibt sich für eine Wandneigung von 10° eine minimale Druckgeschwindigkeit von 200 mm/min und für 50° eine minimale Druckgeschwindigkeit von 800 mm/min.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein Versuchsplan mit den Faktoren Druckgeschwindigkeit und Winkel der Wandneigung aufgestellt. Mithilfe der Software „JMP 17“ wurde ein Central-Composite-Design auf die im Vorversuch ermittelte Faktorraumbegrenzung angepasst und optimiert (Bild 3). Ausgewertet wurde hinsichtlich der Qualitätsmerkmale Schichtbreite und -höhe. Hierzu wurde ein quadratischer Modellansatz gewählt. Dies ergibt in der

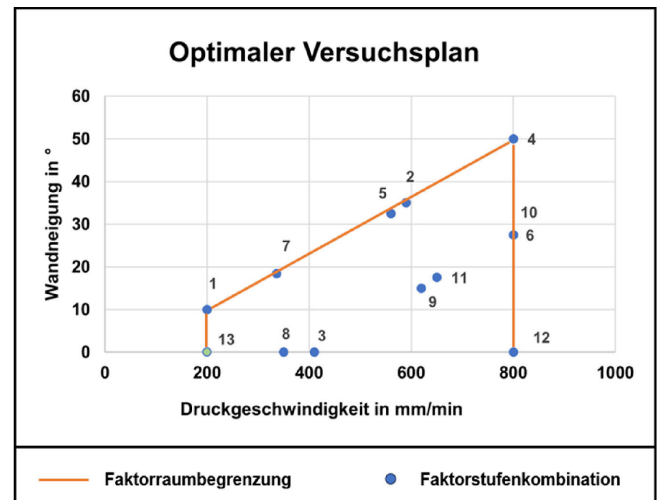


Bild 3. Prozesspunkte im optimierten Versuchsplan. Grafik: wbk

Software 12 Einzelversuche, die um einen 13. Versuch, bei 0° Wandneigung, ergänzt wurde. Es wurden 60 mm lange lineare Proben gewählt, die Breite ist der zu messende Wert. Bei jedem Versuch wurden 10 Lagen gedruckt. Die ersten drei Lagen wurden senkrecht auf das Substrat aufgetragen, die nächsten sieben Lagen im entsprechenden Winkel.

3 Ergebnisse und Diskussion

Ein Teil der gefertigten Proben ist in Bild 4 dargestellt. Die resultierende Schichtbreite und -höhe wurden insgesamt siebenmal im Abstand von 10 mm über die Probenlänge vermessen, wobei der Ansatz und Absatz nicht mitvermessen wurden. Dieser Wert wurde gemittelt und für jede Lage durchgeführt. Die ersten drei Lagen wurden nicht berücksichtigt, da diese stark durch die Wärmesenke des Substrats beeinflusst werden [15]. Es wurde für

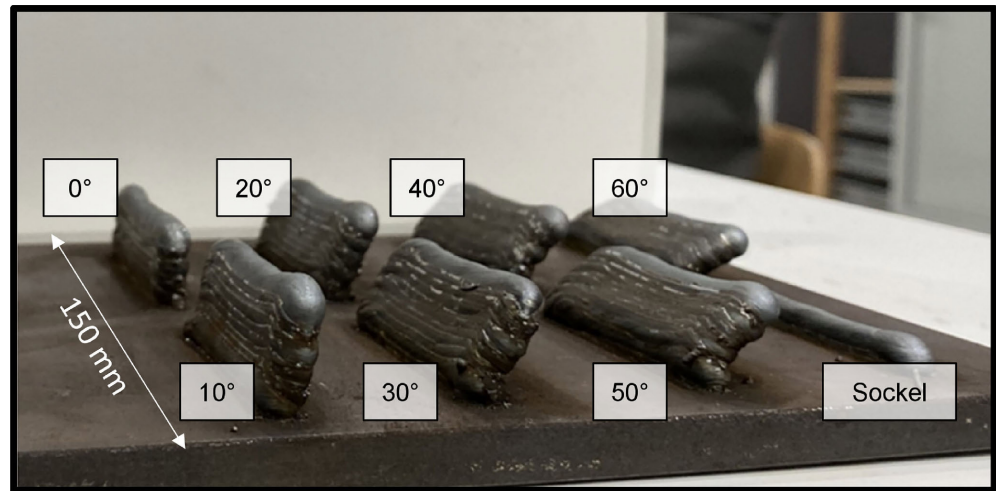


Bild 4. Teil der gefertigten Proben mit Neigungswinkel. Grafik: wbk

geringere Geschwindigkeiten und geringere Wandneigungen eine größere Schichtbreite und -höhe ermittelt. Mit zunehmendem Neigungswinkel nimmt das Volumen der Schweißlage zu. Hierbei war die Lagenbreite sehr homogen verteilt mit einer maximalen Varianz von unter einem Prozent des Messwerts. Die Lagenhöhe hingegen ist einer deutlich größeren Schwankung mit einer Varianz, welche zwischen 5 % bis 10 % des Messwerts liegt, unterworfen.

Die Modellauswertung zeigt, dass die Wandneigung einen sehr geringen Einfluss auf die beiden Qualitätsmerkmale Schichthöhe und -breite besitzt. Für die Schichtbreite bestimmt das Modell eine Unabhängigkeit von der Wandneigung. Für die Schichthöhe ist ein geringer Trend zu beobachten, dass mit steigendem Neigungswinkel, die Schichthöhe zunimmt. Aufgrund der zu den Messwerten gehörenden hohen Varianz, die nur eine Größenordnung kleiner als die Messwerte selber sind, ist die Aussagekräftigkeit mit einer Unsicherheit versehen. Für den Einflussfaktor Druckgeschwindigkeit ergibt sich eine signifikante Abhängigkeit. Dies wird mit P-Werten, die die Nullhypothese stützen von 0,00001 beziehungsweise 0,00016 für beziehungsweise belegt. Für steigende Druckgeschwindigkeiten ergibt sich eine quadratische Abnahme des Messwerts, sowohl für Schichthöhe als auch -breite. Für die Schichthöhe und die Schichtbreite ergeben sich damit nachfolgende empirisch ermittelten mathematischen Modelle:

$$l_h = 0,172v_p^2 + 0,480v_p + 1,550 \quad (1)$$

$$l_w = 1,331v_p^2 - 5,392v_p + 0,446\alpha_w^2 + 5,942 \quad (2)$$

Die Modelle wurden mit drei zusätzlichen Faktorstufenkombinationen, die über den aus den Vorversuchen aufgespannten Parameterraum verteilt wurden (vgl. **Tabelle 2**, Versuch 14-16) validiert. Alle Versuchsergebnisse zu den Versuchspunkten aus Bild 3 sind in Tabelle 2 notiert. Hierbei wurde eine maximale Abweichung von 10,4 % gegenüber dem empirischen Modell berechnet, was für den WAAM-Prozess einen akzeptablen Wert darstellt, da bei diesem 3D-Druck-Verfahren die Austragsgeschwindigkeit gegenüber der geometrischen Genauigkeit bevorzugt wird.

Insgesamt ist für nonplanar gedruckte Überhänge, wie auch für planare Schichtaufbauten, die Druckgeschwindigkeit bei fester Materialaustragsrate die bestimmende Einflussgröße. Überhänge verhalten sich hier in den Maßen nahezu identisch zu senkrech-

tem Drucken. Lediglich die Varianz der Messwerte nimmt um über eine Größenordnung zu, was für eine größere Schwankung in der geometrischen Maßhaltigkeit spricht. Dies ist auf den gefertigten Proben, insbesondere für größere Überhangswinkel, sichtbar. Es ist für den Prozess allerdings nur geringfügig einschränkend, da die Oberfläche bei lichtbogenbasierten WAAM-Verfahren geringere Qualitätsanforderungen aufweist und Funktionsflächen spanend nachbearbeitet werden müssen. Somit ist der Einfluss der Schwerkraft, wenn Schweißbrenner und Schwerkraft nicht koaxial sind, sehr gering.

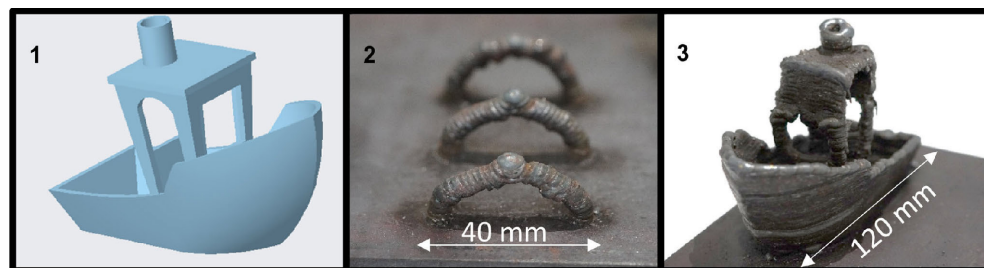
Beim Drucken von Überhängen gilt es zu berücksichtigen, dass beim Zünden des Lichtbogens, dieser am nächsten Punkt ansetzt. Insbesondere für den Fall, dass an bestehenden Flächen in einem Winkel eine neue Struktur angesetzt wird, gilt es dies zu beachten. Hierbei kann es zu einer Abweichung des geplanten Überhangswinkels kommen. Zur Erzielung des korrekten Neigungswinkels hat es sich bewährt, die oberste planare Lage bereits mit geneigter Schweißbrennerhaltung zu drucken und an diese Schicht die erste nonplanare Lage aufzutragen. Wird direkt seitlich angesetzt, ergeben sich für die ersten beiden nonplanaren Schichten größere Neigungswinkel, da der Lichtbogen stärker seitlich abgelenkt wird.

Die Messmethodik soll für spätere Versuche weiter verbessert werden. So wurde die Zwischenlagentemperatur manuell erfasst und es kam hierdurch zu Verzögerungen im weiteren Schichtaufbau. Hierbei konnte nur eine maximale Zwischenlagentemperatur gewährleistet werden, jedoch keine konstante Zwischenlagentemperatur über den gesamten Versuch hinweg. Eine aktive Temperierung des Substrats kann für eine weitere Temperaturkonstanz, insbesondere in den untersten Druckschichten, sorgen. Eine Temperierung des gesamten Arbeitsraums ist durch die offene Gestaltung des robotischen Ansatzes mit einem flexiblen, großvolumigen Arbeitsraum nicht geplant.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Versuche anhand eines 3D-Druck-Benchys angewandt. Um den Druck zu vereinfachen wurde das Modell auf die doppelte Größe skaliert. Zudem wurden einige Details entfernt, die in der Größe nicht abbildbar sind: Abgesetzte Rahmen an Fenster und Türen, Ankerklüse und Flaggenstockhalter. Bei der Analyse der Druckbarkeit ergibt sich für den Fenstersturz und die Dachkonstruktion ein nonplanares Drucken, da der Lichtbogen zwingend Material zum Anbinden benötigt. Für den Bogen der

Tabelle 2 Ergebnisse aus dem Versuchsplan (1-13) sowie Validierungsversuche (14-16).

Versuchsnummer	Wandneigung [°]	T_s [mm/min]	Gemittelte Schichthöhe [mm]	Schichthöhe Modell [mm]	Abweichung [%]	Gemittelte Schichtbreite [mm]	Schichtbreite Modell [mm]	Abweichung [%]
1	10,30	200	2,31	2,3	0,4	8,81	8,46	4,0
2	34,90	590	1,38	1,33	3,6	4,57	4,79	-4,8
3	0	410	1,58	1,56	1,3	6,22	6,18	0,6
4	50,00	800	1,08	1,09	-0,9	4,11	3,98	3,2
5	32,50	560	1,39	1,38	0,7	5,1	4,98	2,4
6	27,50	800	1,18	1,19	-0,8	4,3	4,3	0,0
7	18,40	336	1,8	1,87	-3,9	6,56	6,86	-4,6
8	0	350	1,64	1,71	-4,3	6,63	6,74	-1,7
9	15,10	620	1,25	1,28	-2,4	4,92	4,82	2,0
10	27,50	800	1,18	1,2	-1,7	4,03	4,3	-6,7
11	17,50	650	1,32	1,26	4,5	5,05	4,69	7,1
12	0	800	1,19	1,18	0,8	4,24	4,26	-0,5
13	0	200	2,26	2,21	2,2	8,32	8,47	-1,8
14	0	650	1,34	1,2	10,4	4,54	4,64	-2,2
15	10,20	300	2,08	1,94	6,6	6,62	7,28	-10,0
16	14,20	500	1,48	1,45	2,0	5,3	5,49	-3,6

**Bild 5.** 1. Simplifiziertes Benchy-CAD-Modell, 2. Gedruckte Bögen, 3. Gedrucktes Benchy. Grafik: wbk

Tür konnte im Rahmen eines Versuchs die Druckbarkeit im planaren Druck nachgewiesen werden (**Bild 5_2**). Somit wurde das Benchy in mehrere Segmente aufgeteilt, die einzeln geslicet wurden: Rumpf, Aufbau bis zur Oberkannte des Fensters, Fenstersturz, Aufbau bis zum Dachansatz, Dach und Schornstein. Für diese Segmente wurden einzeln G-Codes, ansetzend auf der Substratplatte, erzeugt und anschließend werden diese Segmente mit dem zugehörigen G-Code in die entsprechende Endlage verschoben und rotiert. Anschließend erfolgte der Druck (Bild 5_3).

Dieses System funktioniert für die meisten Segmente gut, jedoch ergeben sich beim Schließen des Daches Kollisionsprobleme mit der Wand. Dieses Problem ist bereits für Einzelfälle in der Literatur gelöst [16]. Jedoch muss dies, wenn das Konzept der Segmentierung weiterverfolgt wird, als eigenes, zusätzliches Segment erkannt werden. Das erweist sich für den Entwurf eines Algorithmus als schwierig. Zum einen ist das Segmentieren nur manuell erfolgt, kann mit der Logik der Kantenerkennung und Aufteilung in simple geometrische Körper erfolgen. Mit dem Schließen der

Struktur, bei der wechselseitiges Drucken erforderlich ist, muss diese Logik erweitert werden. Weiterhin zeigte sich ein Limit bei der Simulation und Visualisierung des Drucks in RoboDK. Während das Programm relativ einfach zu nutzen ist, hat sich anhand des komplexen Bauteils gezeigt, dass die Druckstruktur sukzessive mit erzeugt werden sollte, um Kollisionen mit dieser und dem Schweißbrenner berücksichtigen zu können. Hierfür kommen Simulationsumgebungen wie Pybullet in Frage, bei denen neben der Kinematiksimulation auch Partikel entsprechend der Größe, die mittels der Ergebnisse aus dem statistischen Versuchsplan berechnet werden, erzeugt werden können.

Für die Schweißparameterfestlegung wurde der Neigungswinkel-Term des mathematischen Modells für die Schichtbreite vernachlässigt, aufgrund des geringen Werts verglichen mit den Geschwindigkeits-Anteilen sowie der Konstante in der Gleichung. Diese Ungenauigkeit wird hingenommen angesichts der deutlichen Schwankungen der Schichtbreite im MAG-Schweißen, die den Prozess dominieren.

Für die gesamte Produktionszeit ergibt sich ein Verhältnis von fast 4:1 zwischen Abkühl- und Druckzeit. Dies ist ein großes Hindernis für die Prozessproduktivität. Zum einen liegt die lange Abkühlzeit daran, dass das Bauteil klein ist und daher in kurzer Zeit wieder übergeschweißt wird. Zum anderen verdeutlicht dies, wie wichtig eine gute Temperaturführung für den Prozess ist.

Es ist wichtig, die Zwischenlagentemperatur an den Prozess anzupassen, da eine große Variation dieser zwischen den einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Abmessungen der Einzelschichten führt und einen inhomogenen Schichtaufbau verursacht. Für die durchgeführten Versuche erfolgte die Temperaturüberwachung mittels Infrarotpyrometer nur punktuell auf dem letzten gedruckten Stück. Zum anderen sollte die Zwischenlagentemperatur immer so maximal wie möglich sein, um Wartezeiten zu reduzieren. Häufig ist der letzte gedruckte Abschnitt nicht immer der Teil des gesamten Druckteils mit der größten Temperatur nach kurzer Wartezeit. Ein Wärmekamerabild inklusive Temperaturentwicklung kann hier Abhilfe schaffen. Zuletzt sollte in die Planung der Druckpfade auch eine Berücksichtigung der Temperaturentwicklung einfließen, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu erreichen, die zu kürzeren Abkühlzeiten führt. Neben der kürzeren Wartezeit können hierdurch auch andere positive Nebeneffekte wie geringere thermische Spannungen, geringerer Verzug und geringere Porenbildung erwartet werden, was für schweißtechnisch anspruchsvollere Werkstoffe wichtig ist.

4 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten konnte gezeigt werden, dass das Drucken von nonplanaren Überhängen im MAG-schweißbasierten WAAM Verfahren bezüglich der Schichthöhe und Schichtbreite unabhängig vom Neigungswinkel ist und lediglich von der Druckgeschwindigkeit abhängt, wenn der Materialaustrag konstant gehalten wird. Des Weiteren wurde ein maximaler Winkel ermittelt bis zu dem mit einer bestimmten Druckgeschwindigkeit gedruckt werden konnte. Diese Erkenntnisse wurden durch den statistischen Versuchsplan in ein empirisches Modell überführt, mit dem Schichthöhe und -breite in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit und des Neigungswinkels vorhergesagt werden können und dabei maximal um 10 % von den experimentellen Messungen abweichen. Dies zeigt, dass nonplanares Drucken mit dem vorliegenden Verfahren auch ohne zwei Achsen im Werkstück möglich ist, da der Einfluss der Schwerkraft sehr gering ist. Hiermit ergeben sich Möglichkeiten mit einem einzelnen Industrieroboter komplexe Strukturen zu drucken und auch die Bewegungsfreiheit in sechs Raumachsen des Industrieroboters für nonplanares Drucken zu nutzen.

Es existiert bereits gute kommerzielle Software zur Planung von planaren WAAM-Drucken, jedoch besteht softwareseitig im nonplanaren 3D-Druck noch ein großer Entwicklungsbedarf. Dies umfasst zum einen das Clustering von Bauteilsegmenten, um die einzelnen Druckorientierungen in Abhängigkeit von Fertigbarkeit, Produktivität, Wärmeeintrag oder Eigenspannungen zu bestimmen sowie die Ableitung von Maschinen- oder Robotercode. Bestehende Lösungsansätze sind nicht für WAAM optimiert und somit nur bedingt geeignet.

In den zukünftigen Arbeiten soll insbesondere die Pfadplanung optimiert werden, um die Druckergebnisse für komplexe Bauteile zu verbessern. Dazu sollen das empirische Modell zu den geometrischen Abmessungen sowie die vorherigen ermittelten

Modelle einfließen, um das 3D-Druck-Objekt realistisch abbilden zu können. Dies ermöglicht eine Kollisionüberprüfung angepasst an den aktuellen Druckfortschritt, was insbesondere bei wechselnden Druckpositionen und Schweißbrennerorientierungen von großer Relevanz ist.

Ebenfalls soll der Einfluss der Druckpfade auf die Temperaturentwicklung in der Pfadplanung berücksichtigt werden. Finite-Elemente-Modelle zur Temperaturentwicklung mit bewegter Wärmequelle sind jedoch zeitaufwändig und nicht geeignet. Ein Physics-Informed-Neural-Network kann ersatzweise Lösungen in ähnlicher Qualität in einem Bruchteil der Zeit eines Finite-Elemente-Modells nach dem Training erzeugen und ist ein Ansatz, der in kommenden Arbeiten untersucht wird.

Literatur

- [1] Martina, F. et al: Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Additive Manufacturing* 25 (2019), S. 545-550
- [2] Lee, J. et al: Repair of damaged parts using wire arc additive manufacturing in machine tools. *Journal of Materials Research and Technology* 16 (2022), S. 13-24
- [3] Priarone, P. et al: Life-cycle energy and carbon saving potential of Wire Arc Additive Manufacturing for repair of mold inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 35 (2021), S. 943-958
- [4] Gain, S., Veeman, D.: A review on advances and challenges in wire arc additive manufacturing: Process parameters, microstructural evolution and material performance across alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 1029 (2025)
- [5] Nguyen, D. et al: An integrated hybrid wire-arc directed energy deposition, friction stir processing, and milling system for multi-track, multi-layer part manufacturing. *Additive Manufacturing Letters* 11 (2024)
- [6] Mühlbeier, E. et al: Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht – Interdisziplinäres Forscherteam arbeitet an der Produktionstechnik der Zukunft (Teil1). *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) S. 847-851
- [7] Radel, S. et al: CAM for On-line Control for Wire Arc Additive Manufacturing. *Computer Aided Design and Applications* 16 (2019), S. 558-569
- [8] Rani, K. et al: Wire Arc Additive Manufactured Mild Steel and Austenitic Stainless Steel Components: Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses. *Materials* 15 (2022)
- [9] RAMLAB: Anomalieerkennung in WAAM (2025), <https://www.ramlab.com/de/resources/anomaly-detection-in-waam/>. Zugriff am 10.07.2025
- [10] Ferreira, R. et al: Development and implementation of a software for wire arc additive manufacturing preprocessing planning: trajectory planning and machine code generation. *Welding in the World* 66 (2022), S. 455-470
- [11] Nguyen, L. et al: Multibead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Process. *Procedia Manufacturing* 47 (2020), S. 1123-1128
- [12] Zhou, Z. et al: Continuous tool-path planning for optimizing thermo-mechanical properties in wire-arc additive manufacturing: An evolutionary method. *Journal of Manufacturing Processes* 83 (2022), S. 354-373
- [13] Eliat, H. et al: Void Identification & Management. *CAMufacturing Solutions* (2025), <https://sway.cloud.microsoft/G3Mh89op7NTbHkDc>. Zugriff am 10.07.2025
- [14] Baraya, N. et al: Non-planar Slicing and Scan Path for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Recent Advances in Additive Manufacturing* 2 (2025), S. 283-292
- [15] Shan, Y. et al: Additive manufacturing of non-planar layers using isothermal surface slicing. *Journal of Manufacturing Processes* 86 (2023), S. 326-335
- [16] Dahat, S. et al: A Methodology to Parameterize Wire + Arc Additive Manufacturing: A Case Study for Wall Quality Analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4, 14 (2020)
- [17] Kazanas, P. et al: Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Proceedings Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture* 0 (2012) p.1-1

Malte Mehner, M.Sc. 
malte.mehner@kit.edu

Felix Schwarz, B.Sc. 

Sebastian Schabel, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)