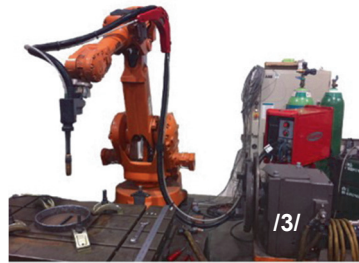


## Grundlegende Konstruktionsrichtlinien für das Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Quanz, M.; Lohrengel, A.



*Um es Konstruierenden zu ermöglichen, Bauteile WAAM-gerecht gestalten zu können, sind Konstruktionsrichtlinien notwendig, die Restriktionen und Freiheiten des Fertigungsprozesses gezielt zusammenfassen. In diesem Artikel werden in der Literatur vorhandene Grenzwerte dargestellt und Forschungspotentiale aufgezeigt.*

*In order to enable designers to design components in a WAAM-compatible manner, design guidelines are necessary that specify the restrictions and freedoms of the manufacturing process. In this article, a literature review is conducted to present existing limit values and research potentials are identified.*

### Einleitung

Zu den wichtigsten additiven Fertigungsverfahren, die geeignet sind, um Metallteile herzustellen, zählen neben dem Selective Laser Melting (SLM) und dem Selective Laser Sintering (SLS) auch das Wire Arc + Additive Manufacturing (WAAM). Dabei wird das Bauteil gefertigt, indem ein verfahrbarer Schweißbrenner den Schweißdraht aufschmilzt und das flüssige Material auf dem Substrat wieder erstarrt. Mithilfe der Positionierungsmöglichkeiten werden so Schweißpfade abgefahren, bis eine Schicht des Bauteils fertig gestellt wurde, der Schweißbrenner um eine Schichtdicke nach oben gefahren wird und mit der nächsten Lage fortfährt.

Ein Vorteil des WAAM-Prozesses ist die maximale Bauteilgröße. Es sind Bauteile herstellbar, deren Größe nur von dem Bauraum der Fertigungsmaschine anhängig ist. Im Vergleich zum SLM-Verfahren sind so deutlich größere Bauteile herstellbar, die so auch geringe Stückzahlen mit hoher Komplexität wirtschaftlich werden lassen. Zu den nutzbaren Materialien zählen Stahl, Aluminium und Titanlegierungen /2/. Die Legierung ist dabei abhängig vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff.

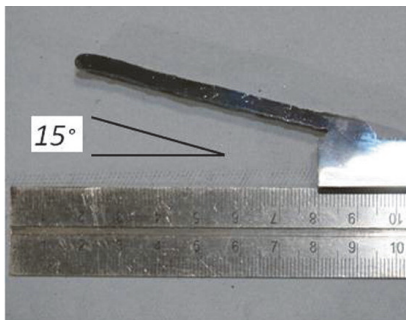
Der Fertigungsprozess WAAM bietet dem Konstrukteur viele Freiheiten, da komplexe Metallteile mit Geometrieelementen wie z. B. Hinterschneidungen herstellbar sind. Die WAAM-Fertigung bedingt jedoch ein hohes Maß an Expertenwissen. Um die konstruktiven Freiheiten nutzen zu können und das Prozessverständnis zu verbessern, werden konstruktive Richtlinien benötigt, die dem Konstruierenden Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufzeigen und dadurch die Produktentwicklungszeit verkürzen. Durch solche Richtlinien sind werden weniger Iterationen notwendig, um Bauteile WAAM-gerecht zu optimieren.

## Hauptteil

Die Forschung beschäftigt sich damit, den WAAM-Prozess immer weiter zu verbessern. Für Konstruierende ist es von großem Interesse, Fähigkeiten und Limitierungen des Prozesses zu kennen, um Bauteile entsprechend auslegen zu können. Nachfolgend werden einige der wichtigsten Konstruktionskenngrößen dargestellt, zu denen bereits in der Literatur Kennwerte existieren.

## Überhänge

Als Überhänge werden Schweißlagen bezeichnet, die im Vergleich zur darunter liegenden Lage so versetzt sind, dass ein Teil der oberen Lage übersteht. Zur Visualisierung sind Überhänge in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Sie sind besonders kritisch, da es abhängig vom Winkel zu Schweißfehlern kommen kann. Wenn der Winkel des Überhangs zu klein wird, die obere Lage also zu weit übersteht, verbleibt das Material nicht an der Position, an der es aufgebracht wurde. Das flüssige Metall fließt im schlimmsten Fall an der Körperkante herunter. Song et. al. haben 2005 dargestellt, dass Überhänge von  $45^\circ$  ohne eine Schrägstellung des Schweißbrenners und ohne Stützstrukturen herstellbar sind /5/.



**Abbildung 1:** Beispielhafter Überhang im Winkel von  $15^\circ$  zum Substrat /1/



**Abbildung 2:** Horizontaler Überhang mit schräggestelltem Schweißbrenner /1/

2012 haben Kazanas et. al. eine Methode aufgezeigt, mit der Überhänge bis zu  $0^\circ$  fertigbar sind. Um das zu erreichen, wurde der Winkel des Schweißbrenners auf den Winkel der Wand eingestellt. Dadurch konnten im Gegensatz zu /5/ noch deutlich kleinere Winkel gefertigt werden. In Abbildung 2 wird dargestellt, dass sogar horizontale Überhänge möglich sind, wenn der Schweißbrenner passend eingestellt wird. /1/

Durch die Positionierung des Schweißbrenners haben Kazanas et. al. gezeigt, dass es möglich ist, Überhänge beliebiger Größe zu fertigen. Um diese Möglichkeit zu

nutzen ist ein entsprechende Fertigungsmaschine mit genügend bewegbaren Achsen notwendig.

### **Minimale Wandstärken und Lagenhöhen**

Durch den schichtweisen Aufbau von WAAM-Bauteilen sind theoretisch beliebig große Wandstärken herstellbar. Von besonderem Interesse ist jedoch die minimal herstellbare Wandstärke. Die in /1/ gefertigten Proben wiesen Wandstärken zwischen 4-5 mm auf. In /4/ wird dagegen eine minimale Wandstärke von 2 mm angegeben. Die erzielbaren minimalen Wandstärken sind abhängig von den Schweißparametern und vom Schweißzusatzwerkstoff. Falls Wandstärken technologisch notwendig sind, die diesen Wert unterschreiten, ist eine abtragende Nachbearbeitung notwendig. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch den Wärmeeintrag bei der Bauteilfertigung Eigenspannungen im Bauteil vorhanden sein können, die durch die Nachbearbeitung zu Verzug führen können.

Die minimal fertigbare Höhe von Geometriefeatures entspricht einer Schweißraupe, diese liegt ungefähr bei 0,5-2mm /3, 5/. Um geringere Höhen herzustellen, ist ebenfalls eine abtragende Nachbearbeitung notwendig.

### **Maximale Bauteilgröße**

In /3/ wird beschrieben, dass die maximal herstellbare Bauteilgröße für Stahl und Aluminiumbauteile nur vom Bauraum der Maschine abhängig ist. Lockett et. al. geben dafür einen maximalen Wert von 10 m an /4/.

Für Bauteile aus Materialien wie Titan, die in einer Schutzgasatmosphäre hergestellt werden müssen, ist die Größe der Einhausung ausschlaggebend /3/. In /7/ wurde dagegen eine Abschirmeinrichtung entwickelt, die keine Einhausung der kompletten Fertigungsmaschine erfordert. Mit der Verwendung einer solchen Abschirmung ist die maximale Bauteilgröße von Titanbauteilen ebenfalls nur noch vom Bauraum der Maschine abhängig.

### **Aufmaß für Nachbearbeitungsflächen**

Im Vergleich zum Gießen müssen Funktionsflächen ebenfalls nachbearbeitet werden, um notwendige Toleranzen und Oberflächenqualitäten einzustellen. In /5/ wird eine erreichbare Maßtoleranz von  $\pm 0,5$  mm angegeben. Um genug Material zu haben, um eine Nachbearbeitung durchführen zu können, ist deshalb ein Aufmaß von mindestens 1 mm notwendig.

### Erreichbare Oberflächenqualität

In /5/ wird ebenfalls angegeben, dass ein Mittenrauwert von  $R_a = 150 \mu\text{m}$  erreicht werden kann. Zum Vergleich: In /6/ werden nach der zurückgezogenen DIN 4766-1 erreichbare Mittenrauwerte für diverse Fertigungsverfahren aufgelistet. Durch Fräsen sind Mittenrauwerte von  $R_a = 0,4 - 25 \mu\text{m}$  und durch Sandformgießen Mittenrauwerte von  $R_a = 12,5 - 100 \mu\text{m}$  erzielbar /6/.

### Konstruktionsrichtwerte für WAAM

In der Literatur ist es gängige Praxis, Prozesswissen von Fertigungsverfahren in Konstruktionskatalogen zu sammeln, in denen für verschiedene Problemstellungen Lösungsvorschläge beschrieben werden. Für die additive Fertigung sind bisher jedoch nur erste Ansätze vorhanden.

Für die Fertigung von Titanlegierungen im SLM-Verfahren wurden von Kranz et. al. bereits Konstruktionsrichtlinien veröffentlicht. Darin werden für diverse konstruktive Probleme Lösungen präsentiert. Die Problemstellungen beziehen sich dabei unter anderem auf nicht fertigmögliche Geometrielemente, für die SLM-gerechte Alternativen dargestellt werden. /8/

In /4/ werden Konstruktionsrichtlinien für WAAM aufgelistet. Darin wird unter anderem die Symmetrie von Bauteilen ausgenutzt, um sie möglichst verzugsarm herstellen zu können. Weiterhin werden Vorschläge zur Optimierung gemacht, indem beispielsweise scharfe Innen- und Außenkanten vermieden werden und durch Radien ersetzt werden. /4/

Um das in der Literatur vorhandene Prozesswissen Konstruierenden zugänglich zu machen, werden die oben beschriebenen Kenngrößen nachfolgend in der Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: WAAM Konstruktionsrichtwerte**

Geometrielement	Richtwert	Zusätzliche Beschreibungen / Quellen
Erreichbare Winkel von Überhängen	$\alpha \geq 45^\circ$	ohne Schrägstellung des Brenners und ohne Stützstrukturen, /5/
	$\alpha = 0^\circ - 90^\circ$	mit Schrägstellung des Brenners, /1/

<b>Geometrieelement</b>	<b>Richtwert</b>	<b>Zusätzliche Beschreibungen / Quellen</b>
Minimal erreichbare Wandstärken	$t = 2 - 5 \text{ mm}$	/1, 4/
Maximale Bauteilgröße	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine	für Stahl, Aluminium /3/
	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine und der zur Verfügung stehenden Einhausung	für Titan /3/
	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine	für Titan, falls eine Abschirmeinrichtung wie in /7/ verwendet wird
Minimale Schichthöhe	$h \geq 0,5 - 2 \text{ mm}$	/3, 5/
Gestaltung von Ecken	Kanten müssen verrundet werden (innen und außen)	/4/
Aufmaß für Nachbearbeitungsflächen	$\geq 1 \text{ mm}$	/5/
Mittenrauwert $R_a$	$R_a = 150 \text{ }\mu\text{m}$	ohne Nachbearbeitung, /5/

## Zusammenfassung

Der WAAM-Prozess bietet neue Möglichkeiten, aber auch neue Herausforderungen in der Bauteilentwicklung und der anschließenden Fertigung. Um das in der Literatur vorhandene Prozesswissen zu sammeln, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und die gefundenen Kenngrößen dokumentiert.

Grundlegende Konstruktionskataloge wie in /4/ wurden bereits vorgeschlagen, um das Bauteildesign zu optimieren. Ein vollständiger Konstruktionskatalog ist jedoch

noch nicht vorhanden und bedarf weiterer Forschung, um Fähigkeiten und Grenzen des Prozesses weiter zu dokumentieren und nutzbar zu machen, um so WAAM als gängiges Fertigungsverfahren in der Industrie zu etablieren.

## Literatur

- /1/ Kazanas, P.; Deherkar, P.; Almeida, P.; Lockett, H.; Williams, S.: Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Volume 226 Issue 6; S. 1042-1051; 2012; DOI: 10.1177/0954405412437126
- /2/ Mehnen, J.; Ding, J.; Lockett, H.; Kazanas, P.: Design study for wire and arc additive manufacture. In: International Journal of Product Development. Volume 19, No. 1-3; S. 2-20; 2014; DOI: 10.1504/IJPD.2014.060028
- /3/ Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P.: Wire + Arc Additive Manufacturing. In: Materials Science and Technology. Volume 32 Issue 7, S. 641-647; 2016; DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073
- /4/ Lockett, H.; Ding, J.; Williams, S.; Martina, F.: Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection. In: Journal of Engineering Design. Volume 28 Issue 7-9, S. 568-598; 2017; DOI: 10.1080/09544828.2017.1365826
- /5/ Song, Y.-A.; Park, S.; Choi, D.; Jee, H.: 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture. Volume 45 Issue 9. S. 1057-1062; 2005; DOI: 10.1016/j.ijmactools.2004.11.021
- /6/ Wittel, H.; Spura, C.; Jannasch, D.: Roloff/Matek Maschinenelemente. 25. Auflage; S. 992; 2021; ISBN 978-3-658-34160-2
- /7/ Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams S.; Wiktorowicz, R.; Palt, M. R.: Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. In: Journal of Materials Processing Technology; Volume 226, S. 99-105; 2015; DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005
- /8/ Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In Journal of Laser Applications. Volume 27, S14001; 2015; DOI: 10.2351/1.4885235