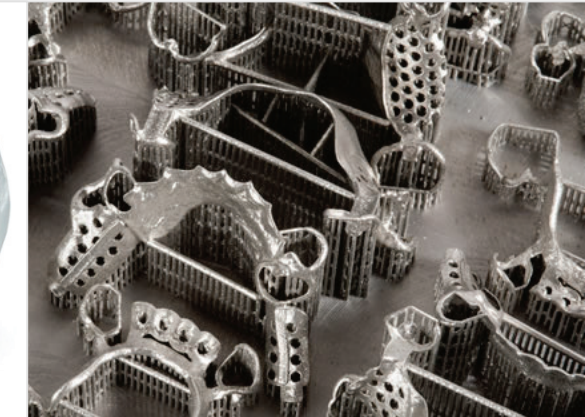
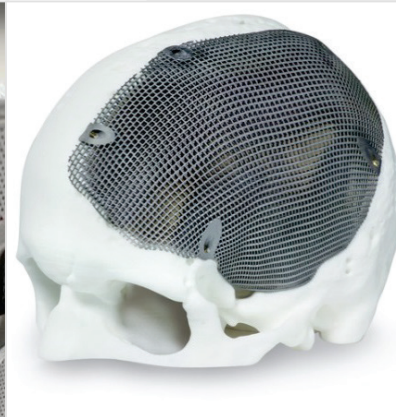
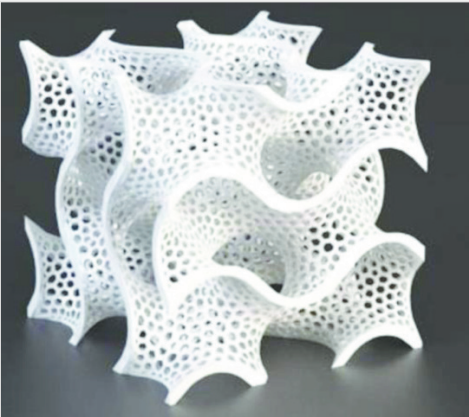


ADDITIVE FERTIGUNG



Sommersemester 2021

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Aufschmelzen und lokales Auftragen schmelzfähiger Materialien mittels Energiezufuhr und Düse; unmittelbares Erstarren nach Übergang von Düse auf Substrat (+ Abkühlen)
Ausgangsmaterial	Partikelförmig (Pulver), Fest (Draht), Fest und Pulverförmig (Fülldraht): Stahl und Stahlegierungen, Titanlegierungen, Ni-Basis-Legierungen, Cu-Basis-Legierungen, Aluminiumlegierungen
Bindungsmechanismus	Physikalisch (Thermisch)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Vektororientiert
Aktivierungsenergie	Wärme (je nach Ausprägung Laser, elektrische Energie/Lichtbogen u.w.)
Postprozess	kontrolliertes Abkühlen, Spanende Nachbearbeitung, Lösen vom Werkzeutisch, evtl. Sägen von Trägerplatte, Strahlen, Lackieren, Wärmebehandeln

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

DIRECTED ENERGY DEPOSITION – DED

- Prozessenergiequelle für Wärmeeintrag: Laser, Elektronenstrahl, Lichtbogen
- Ausgangsmaterial ist Metallpulver oder Draht
 - Pulver besitzen geringere Abscheidungseffizienz
 - nur ein Teil geht in Schmelze über und geht Verbindung mit Substrat ein
 - Pulververarbeitung erfordert bezüglich Personenschutz höhere Anforderung an Maschine (Lungengängigkeit des Pulvers)
- Unterschiede bzgl. Prozesskammer
 - Laser und Lichtbogen → Schutzgasatmosphäre
 - Elektronenstrahlprozess → vollständiges Vakuum (große Unterschiede in Hinblick auf Bauraumgestaltung; Anlagenpreis ↑↑)
- Vor- und Nachteile sind den Prozessen EBM und SLM äquivalent.

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

DIRECTED ENERGY DEPOSITION – DED

Technisch: Auftragschweißen

Info: Auftragschweißen im Englischen „cladding“ bzw. „(energy) welding deposition“

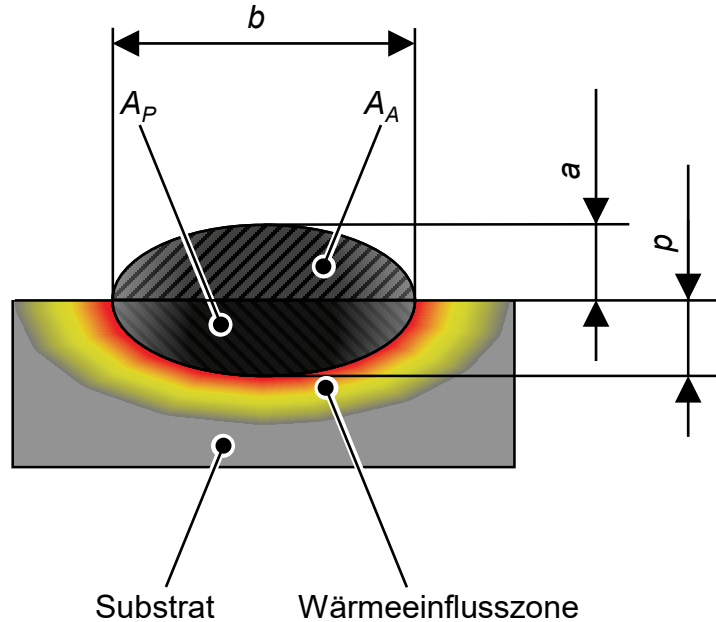
Prinzipiell Unterscheidung zwischen:

- Auftragschweißen: Aufschiessen auf eine vorhandene Kontur
- Formgebendes Schweißen: Erzeugung eines Produkts ausschließlich aus abgeschmolzenen Schweißgut

- DED ist das vollmechanisierte Auftragschweißen mittels CNC-Maschine
- CAD-Bauteile können über eine geeignete Schnittstelle (CAM) direkt an die DED-Maschine übergeben werden
- Bauteil nach Prozessbeendigung konturnah → Erzeugung finaler Endkontur durch Folgeprozess (CNC-Fräsen)

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

INZELNE SCHWEIßBAHN



- a Auftragsdicke
- b Auftragsbreite
- p Einbrandtiefe
- γ Vermischungsgrad
- A_A Auftragsfläche
- A_P Einbrandfläche

Günstige Kriterien:

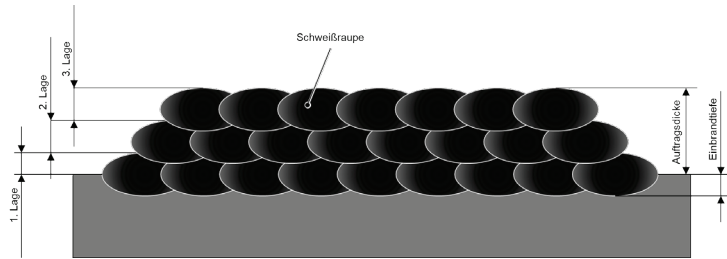
$$b/a = 4 \dots 5$$

$$A_P / (A_A + A_P) = 0,1 \dots 0,15$$

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

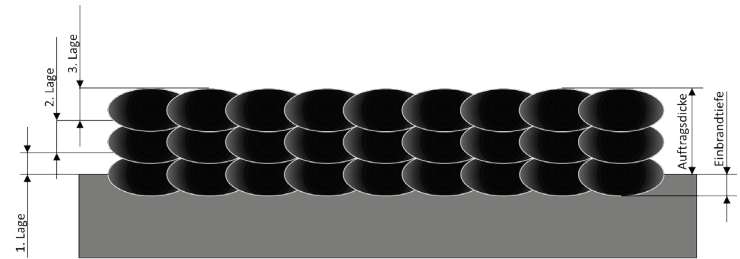
SCHICHTAUFBAU

Versetzt



- Absetzen der Folgelage im Tal der aktuellen Lage
- + Guter Lückenschluss
- + Verminderung der Gefahr von Lunkern
- Kein Wandaufbau möglich
- Bevorzugt beim Puffern, Panzern, Plattieren

Übereinander



- Absetzen Bahn auf Bahn
- + Einlagiger Wandaufbau möglich
- + Geringere Anforderung an die Ansteuerung
- Beim Erzeugen von Flächen größere Gefahr vor Lunkerbildung
- Bevorzugt beim Erzeugen von Körpern

6 Additive Fertigungsverfahren – DED

DED – INDUSTRIELLER EINSATZ

Stand der Technik:

- 1) Vollmechanisiertes Schweißen auf Maschinen, welche eine permanent senkrechte Werkzeugrichtung besitzen
 - Ausführung der Dreh- und Kippbewegungen durch Werkzeuggestisch
 - Schweißen in Wannenlage
- 2) auf 6-Achs-Robotern
 - Alle Bewegungen werden durch Werkzeug durchgeführt

Meistverwendeter Energieträger ist Laser → LMD:

- Schnelle Reaktionszeit
- Energieeintrag gut dosierbar
- Schnelle Ablenkbarkeit

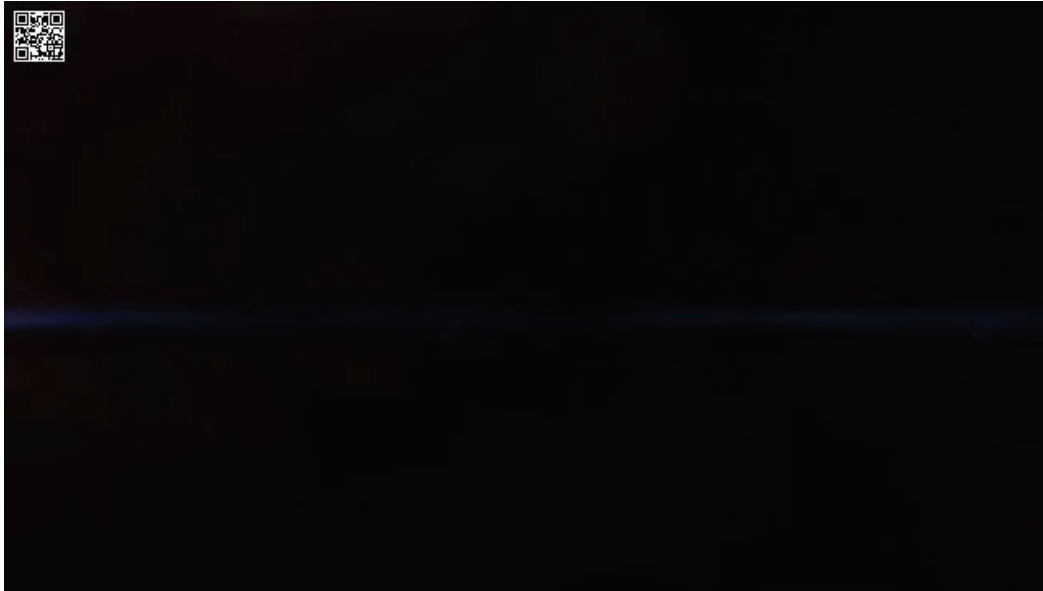
Forschung (TUBAF):

Herauslösen des Werkzeugs aus der permanent senkrechten zu stets wechselnder Position, der Kontur des Zielwerkstücks entsprechend mittels WAAM-Technologie

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)

Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Aufschmelzen und lokales Auftragen schmelzfähiger Materialien mittels Lichtbogen und Brenner; unmittelbares Erstarren nach Übergang von Düse auf Substrat (+ Abkühlen)
Ausgangsmaterial	Fest (Draht), Fest und Pulverförmig (Fülldraht): Stahl und Stahlegierungen, Titanlegierungen, Ni-Basis-Legierungen, Cu-Basis-Legierungen, Aluminiumlegierungen
Bindungsmechanismus	Physikalisch (Thermisch)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Vektororientiert
Aktivierungsenergie	Wärme durch elektrisch erzeugten Lichtbogen
Postprozess	kontrolliertes Abkühlen, Spanende Nachbearbeitung, Lösen vom Werkzeutisch, evtl. Sägen von Trägerplatte, Strahlen, Lackieren, Wärmebehandeln

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM



WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM

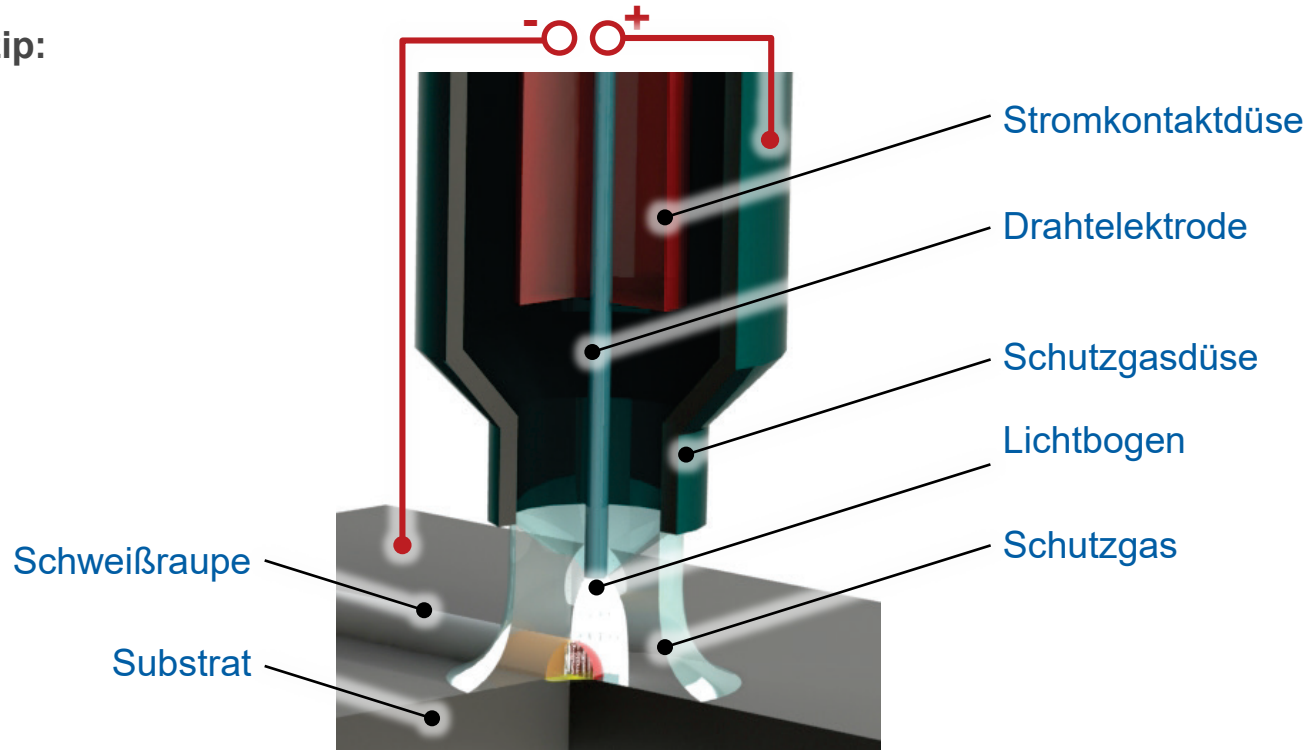
Auftragschweißen im Lichtbogen (MSG-Verfahren)

MSG-Auftragschweißen im Englischen auch „arc welding deposition“

- Einordnung bzgl. der DED-Verfahren:
 - größte Ungenauigkeit
 - **größter** Materialdurchsatz möglich (4 ... 7 kg/h)

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM

Prinzip:



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – ENERGIEEINTRAG

- Energieeintrag mittels Lichtbogen
- Energieeintrag ist bestimmt durch
 - Schweißstrom [A]
 - Schweißspannung [V]
 - Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
 - Thermischer Wirkungsgrad = 0,6...1

$$E_{\text{Strecke}} = I_S \cdot U_S \cdot \eta_{th} \cdot 60 \cdot v_s^{-1}$$

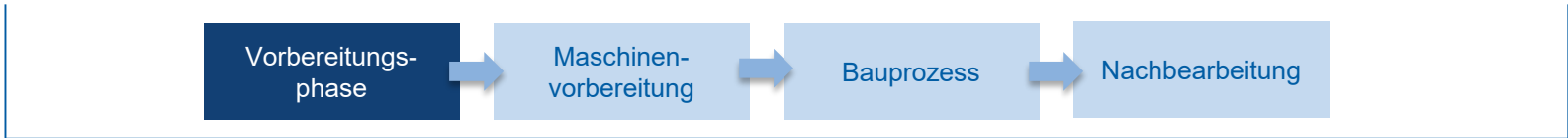
$$E_{\text{Strecke}} = 4000 \dots 7000 \text{ J/cm}$$

Besonders geeignet für das Erzeugen von Bauteilen mit WAAM ist der Kurzlichtbogen

- Relativ geringer Energieeintrag
 - Damit im schweißtechnischen Sinne geringe Wärmeeinbringung (kleinere Wärmeeinflusszone)
 - Geringere Aufmischung mit darunter liegender Schicht
 - Weniger Eigenspannung
- Schweißen in Zwangslagen möglich (Außerhalb der Wannensposition)
- Besondere Art des Kurzlichtbogens: CMT („Cold Metal Transfer“)

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Mittels CAM-Software wird CAD-Modell für Fertigung vorbereitet

- Erstellung von Werkzeugbahnen
- Werkzeugbahnen sind Strecken bzw. Pfade mit folgenden Informationen:
 - Vorschubgeschwindigkeit
 - Drahtvorschub
 - Stromstärke
 - Schweißkennlinie (Spannung)
 - Brennerstellung (meist realisiert durch Dreh-/Schwenktisch)

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

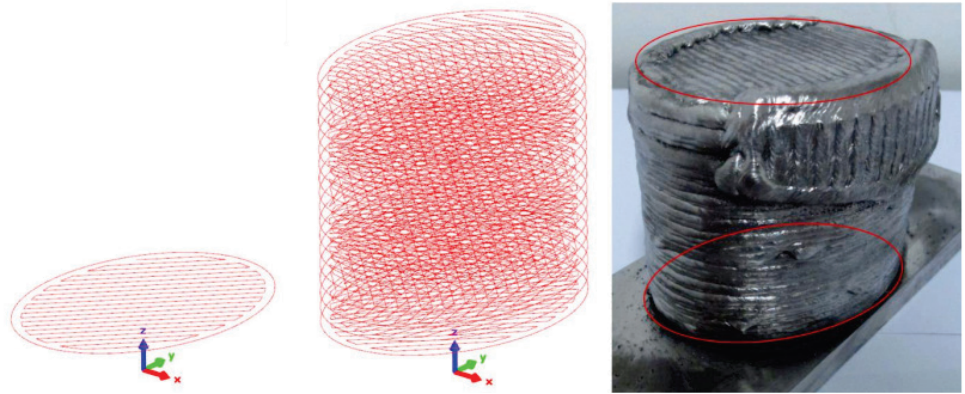
WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Die Wahl der Aufbaustrategie ist vom Bauteil abhängig

Aufbau auf Ebene → „**Volumen schichtweise Aufbauen**“

- Schichtweiser Aufbau entlang z-Achse (= koaxial zum Brenner, normal zur Fläche)
- **Verfahrstrategie** der Werkzeugbahnen der einzelnen Querschnitte frei wählbar



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

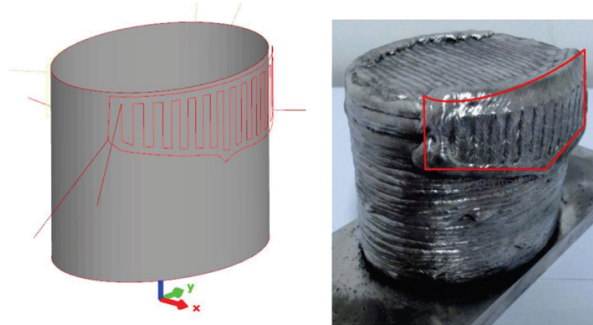
WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Die Wahl der Aufbaustrategie ist vom Bauteil abhängig

Aufbau einer Kontur auf einer Fläche → „**Fläche beschichten**“

- Schichtweiser Aufbau auf vorhandener Fläche (Bauteilhöhe / Schichthöhe = Anzahl der Schichten)
- Mittels Dreh und Kippbewegung Brennerachse normal zur Fläche
- **Verfahrstrategie** der Werkzeugbahnen der einzelnen Querschnitte frei wählbar



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

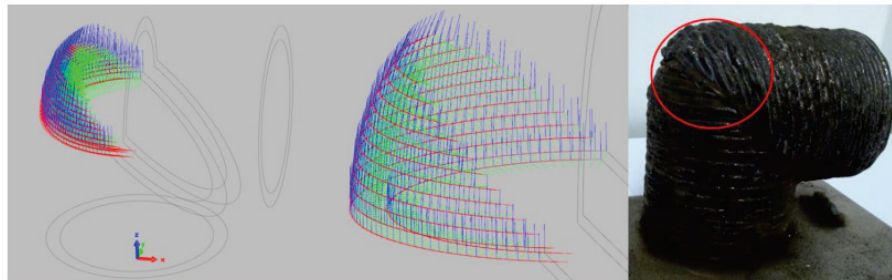
WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Die Wahl der Aufbaustrategie ist vom Bauteil abhängig

Aufbau eines Körper mit wechselnder Ausrichtung → „**5-Achs-Bearbeitung**“

- Erstellung von Konturgruppen mit Vektorinformationen
- Brennerachse wird durch Vektorgruppe (=Vektorkonturgruppe) der Kontur entsprechend hinreichend oft gedreht
- **Verfahrstrategie** der Werkzeugbahnen der einzelnen Querschnitte ist vorgegeben (nicht wählbar)



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Die Wahl der Verfahrenstrategie ist möglich bei „Volumen schichtweise Aufbauen“ und „Fläche beschichten“

- Strategie Kontur
- Strategie Linear
- Strategie Mäander
- Strategie Konturparallel
- Strategie Offset von Basisfläche

Die richtige Wahl der Verfahrenstrategie ist ebenfalls vom Bauteil und dessen Funktion abhängig

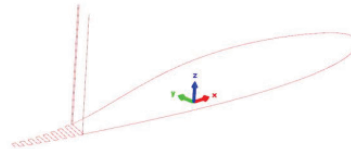
6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Strategie Kontur

- Abfahren der Flächenkontur in jeder einzelnen Querschnittebene
- Anwendung bei Bauteilen mit einfach gebauten Wänden
→ Eine Schweißnaht pro Schicht
- Offset ist einstellbar
- Möglichkeit vollvolumige Bauteile hohl zu generieren
→ Einsparung an Kosten und Gewicht



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Strategie Linear

Ausfüllen der einzelnen Querschnittsflächen durch parallele Bahnen

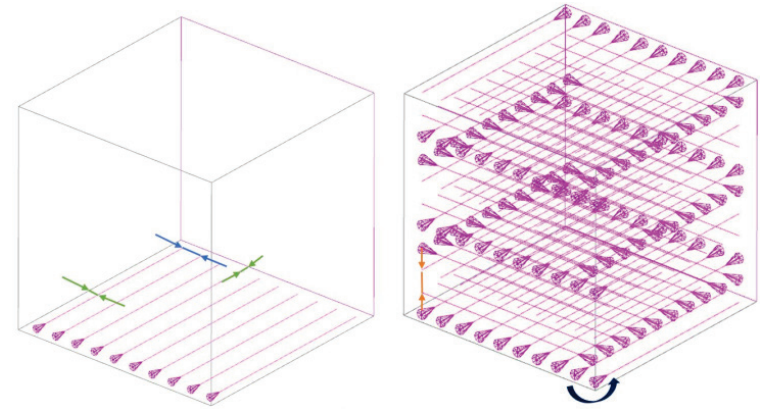
- Bidirektional
- Unidirektional

Wichtige Parameter sind:

- Bahnabstand
- Abstand zur Flächenkontur
- Winkelschritt
(Ausrichtungsänderung zweier aufeinanderfolgender Schichten)

Nachteil:

Viele Start- und Stopp-Punkte



- Abstand zur Kontur
- Spurabstand
- Schichthöhe

- Werkzeugbahn
- ↻ Winkelschritt

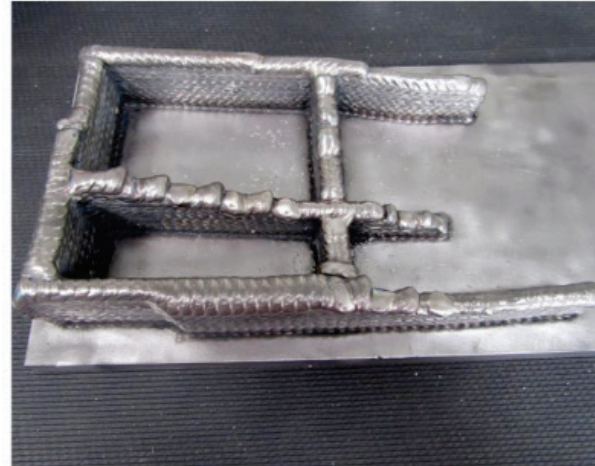
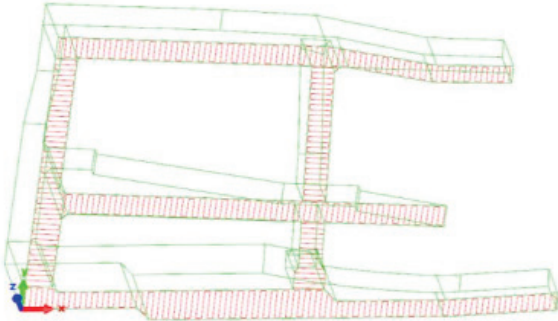
6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Strategie Mäander

Entspricht der Strategie „Linear-bidirektional“ - wobei die einzelnen Linien verbunden sind und damit im Idealfall nur eine einzige Schweißbahn pro Schicht entsteht.



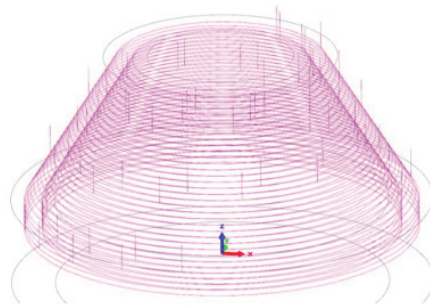
6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Strategie Konturparallel

- Orientierung an der Außenkontur
- Offsetkonturen einstellbar → Erzeugen der Fläche
- Sowohl von außen nach innen als auch von innen nach außen möglich
- Besonders geeignet bei rotationssymmetrischen Körpern



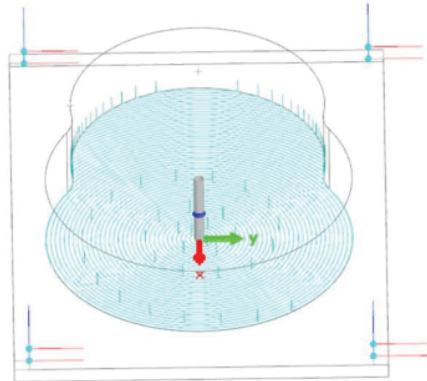
6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



Strategie Offset von Basisfläche

- Ähnlich der Strategie „Konturparallel“ dient eine Kontur als Referenz
- Kontur ist hier jedoch eine gewählte Basisfläche
- Anwendung bei großvolumigen nicht rotationssymmetrischen Körpern



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – MASCHINENVORBEREITUNG



Handgriffe vor dem Start der Maschine und dem Zünden des Lichtbogens

- Einschalten der Maschine
- Sicherstellung der Zuführung aller relevanter Medien
 - Schutzgas
 - Kühlmittel
 - Hydraulikflüssigkeit
 - Luftdruck
 - Draht
- Hochfahren der Maschine
- Spannen der Grundplatte oder des zu überarbeitenden Werkstücks
- Sicherstellung des Personenschutzes um die Maschine (Lichtbogen / Gas)

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – MASCHINENVORBEREITUNG



Handgriffe vor dem Start der Maschine und dem Zünden des Lichtbogens

- Wahl der geeigneten Aufbaustrategie
- Wahl der Verfahrenstrategie (falls möglich)
- Anwahl des Programms / Bauteildatei
- Start

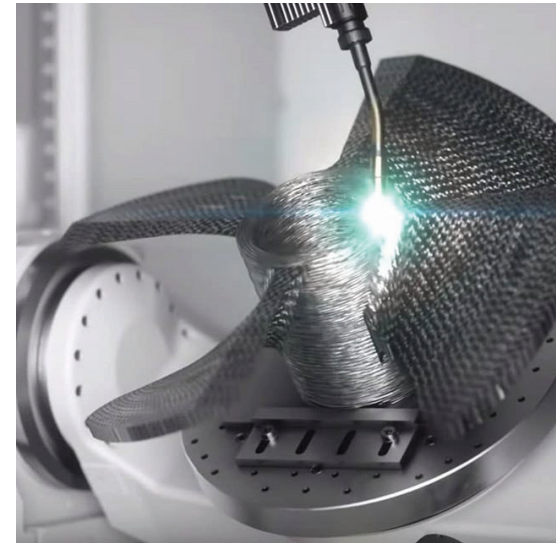
6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – BAUPROZESS



Automatischer Bauprozess

- Bauprozess voll automatisiert
- Überwachung durch verschiedene Komponenten und Sensoren möglich
- Regelmäßige Kontrolle durch Maschinenführer sinnvoll
- Bauprozess kann durch Soll/Ist Überprüfung in jeder Schicht optimiert werden (Life)
- Nach Beendigung
 - Abkühlen des Bauteils
 - Automatische Werkstückübergabe möglich



GEFERTEC – „Die 3DMP-Fibel“

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – NACHBEARBEITUNG



Mögliche Nachbearbeitungsschritte:

- Demontage vom Werkzeuggestisch bzw. Absägen von Trägerplatte
- Aufspannen in WZM und spanende Nachbearbeitung bis Sollkontur (Hybridmaschine: Aufbau und Konturschneiden in einer Aufspannung möglich)
- Beschichten
- Wärmebehandeln

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – ANWENDUNG

Das Verfahren bietet Aufbauraten bis zu 7 kg/h → Hoher Materialdurchsatz bedeutet im Umkehrschluss eine grobe, weniger exakte Bauteilgenerierung. Zur Erzielung diffiziler Bauteilgeometrien ist eine subtraktive Nachbearbeitung, beispielsweise mittels Fräsen durch ein CNC-Fräszentrum, unumgänglich.

Diesem Problem wird mit kombinierten Anlagen, Kombination eines CNC-Fräszentrums und einem WAAM-Aufsatz, entgegengetreten.

Das Verfahren eignet sich besonders zur Erzeugung von Hohlkörpern oder zur Generierung von Aufsätzen auf bereits bestehenden Bauteilen.

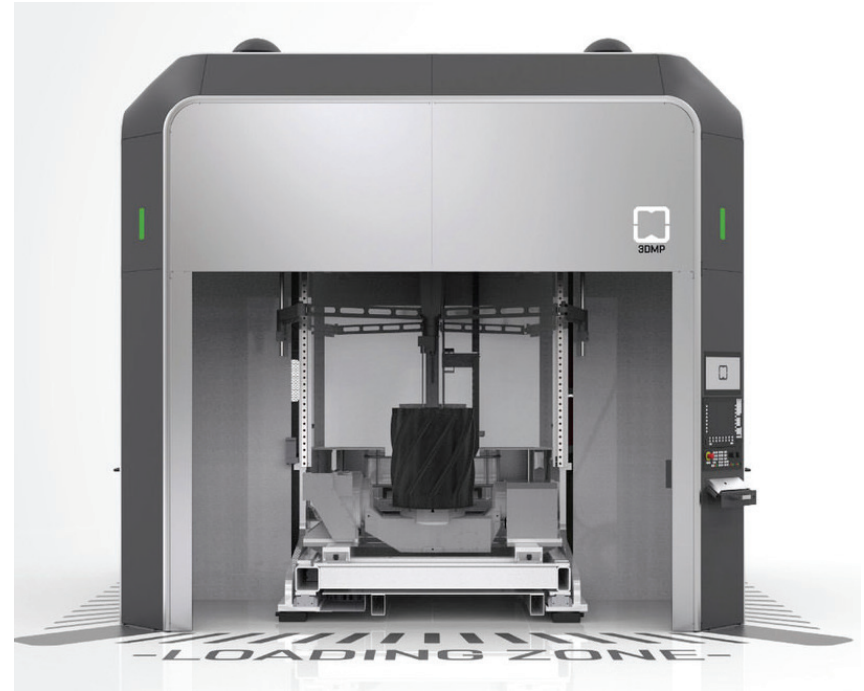


Turbinenflügel

6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – ANLAGEN

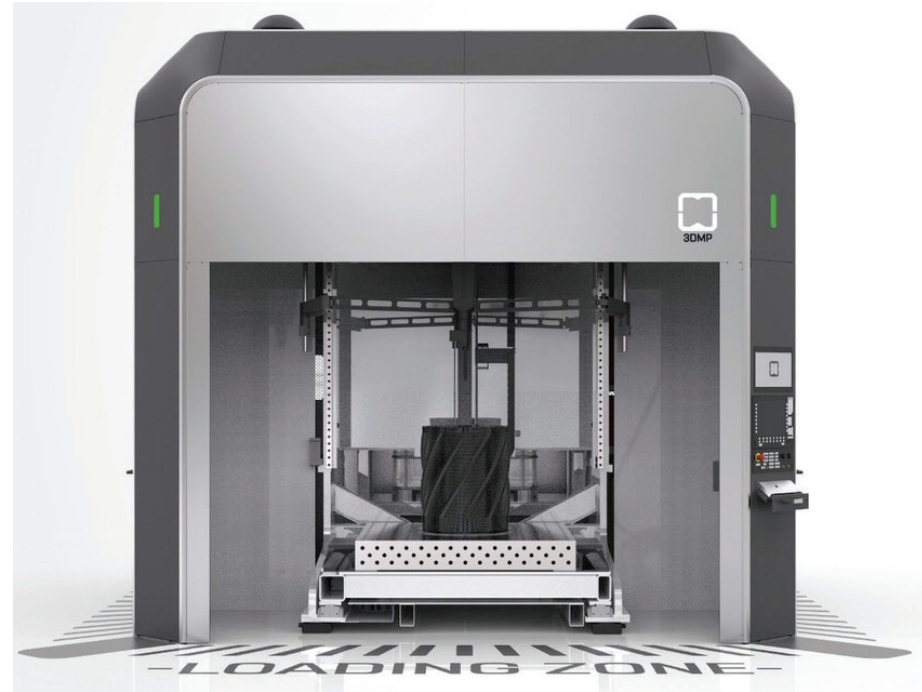
Maschine	GEFERTEC arc605
Bauraum	0,8 m ³
Max. Masse	500 Kg
Merkmal	5-achsige Bearbeitung



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

WAAM – ANLAGEN

Maschine	GEFERTEC arc603
Bauraum	3,0 m ³
Max. Masse	3000 Kg
Merkmal	3-achsige Bearbeitung



6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LASER METAL DEPOSITION (LMD)

Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Aufschmelzen und lokales Auftragen schmelzfähiger Materialien mittels Laser; unmittelbares Erstarren nach Übergang von Düse auf Substrat (+ Abkühlen)
Ausgangsmaterial	Partikelförmig (Pulver) oder fest (Draht) Stahl und Stahlegierungen, Titanlegierungen, Ni-Basis-Legierungen, Cu-Basis-Legierungen, Aluminiumlegierungen
Bindungsmechanismus	Physikalisch (Thermisch)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Vektororientiert
Aktivierungsenergie	Wärme (Laser)
Postprozess	kontrolliertes Abkühlen, Spanende Nachbearbeitung, Lösen vom Werkzeuggestisch, evtl. Sägen von Trägerplatte, Strahlen, Lackieren, Wärmebehandeln

LASER METAL DEPOSITION – LMD

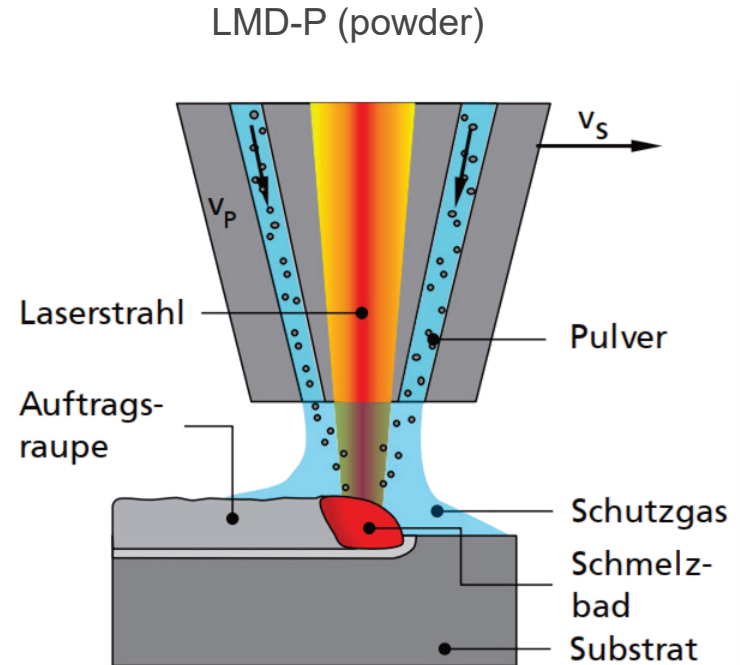
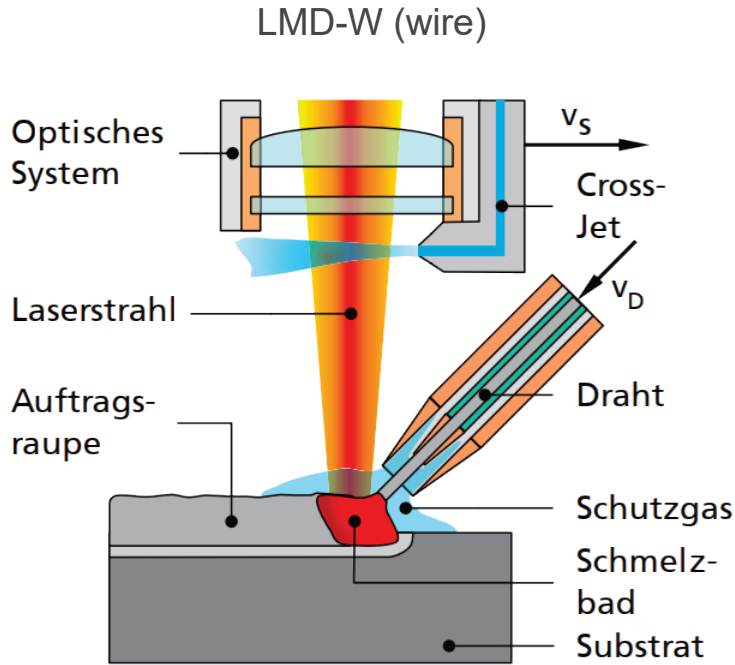
Laser – oder Laserauftragschweißen

Laser-Auftragschweißen im Englischen auch „laser welding deposition“

- Einordnung bzgl. der DED-Verfahren:
 - Gute konturnahe Bauteilgeometrie möglich
 - Vglw. geringer Materialdurchsatz

LASER METAL DEPOSITION – LMD

Prinzip:



6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LASER METAL DEPOSITION – DRAHT: LMD-W

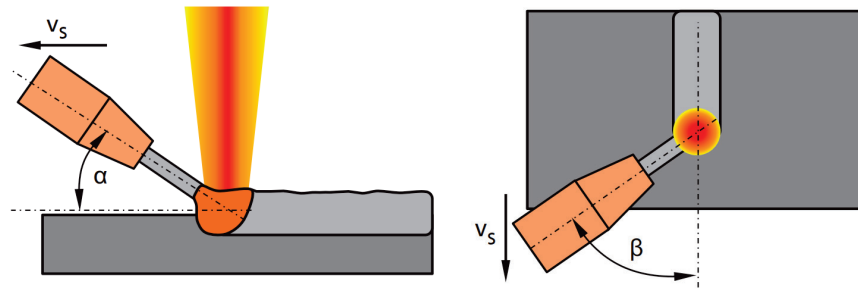
Wichtige Elemente zur Sicherstellung der Funktion und Qualität:

- Optisches System: Bündeln / fokussieren des Laserstrahls auf Arbeitspunkt
- Cross-Jet: Schutz der Fokussieroptik vor Schmutz und Zerstörung

Drahtzuführung bei lateraler Bauweise:

Ideale Winkelstellungen:

- Brenneranstellung zum Substrat $\alpha=45^\circ$
- Zuführwinkel der Drahtzuführung zur Schweißvorschubrichtung ist $\beta=65^\circ$ (seitlich schleppend)

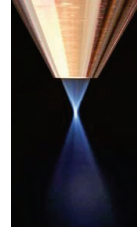


6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LASER METAL DEPOSITION – PULVER: LMD-P

Koaxiale Pulverzufuhr (häufig)

- Achsgleiche Pulverzufuhr zum Laserstrahl
- Unterscheidung in:
 - **Kontinuierliche Pulverzufuhr**
 - Pulververteilung mittels kegelartigem Ringspalt → Pulverhohlkegel umschließt Laser
 - Hohe Präzision (Pulvergasstrahlfokus min. 0,2 mm)
 - **Diskrete Pulverzufuhr**
 - Min. 3 koaxiale Pulvergasströme erzeugen Pulvergasstrahlfokus (DKern = 1...3 mm)
 - Eignung für dicke Schichten bei hoher Laserleistung (> 2 kW)
 - Zwangslagen



Laterale Pulverzufuhr (weniger verbreitet)

- Seitliche Pulverzufuhr zum Laserstrahl
- Besondere Eignung:
 - Rotationssymmetrische Bauteile
 - Schwer zugängliche Bereiche (Brennergeometrie)
- Bis 6kg/h

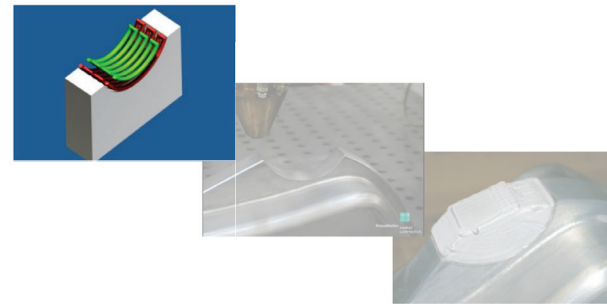
6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LMD – VORBEREITUNGSPHASE



Mittels CAM-Software wird CAD-Modell für Fertigung vorbereitet

- Erstellung von Werkzeugbahnen
- Werkzeugbahnen sind Strecken bzw. Pfade mit folgenden Informationen:
 - Vorschubgeschwindigkeit
 - Drahtvorschub / Pulverzufuhr (Menge pro Zeit)
 - Laserleistung
 - Schweißkennlinie (Spannung)
 - Schweißarmstellung



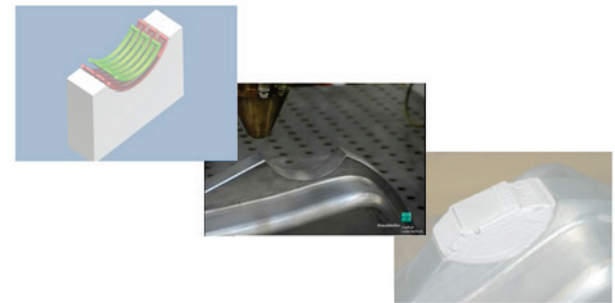
6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LMD – MASCHINENVORBEREITUNG



Automatischer Bauprozess

- Bauprozess voll automatisiert
- Überwachung durch verschiedene Komponenten und Sensoren möglich
- Regelmäßige Kontrolle durch Maschinenführer sinnvoll
- Bauprozess kann durch Soll/Ist Überprüfung in jeder Schicht optimiert werden (Life)
- Nach Beendigung
 - Abkühlen des Bauteils
 - Automatische Werkstückübergabe möglich



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

LMD – NACHBEARBEITUNG



Mögliche Nachbearbeitungsschritte:

- Demontage vom Werkzeuggestisch bzw. Absägen von Trägerplatte
- Aufspannen in WZM und spanende Nachbearbeitung bis Sollkontur (Hybridmaschine: Aufbau und Konturschneiden in einer Aufspannung möglich)
- Beschichten
- Wärmebehandeln



6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

LMD – ANLAGEN

Maschine	TRUMPF TruLaser Cell 3000
Dimension	1600 x 2840 x 2645 (BTH)
Laser	max. 8000 W
Bauraum	0,04 m ³
Max. Masse	95 Kg
Merkmal	5-achsige Bearbeitung; Sandwichstruktur
Aufbaurate	500 cm ³ /h





6 Additive Fertigungsverfahren – DED

Additive Fertigung 2021 – 06-04

Directed Energy Deposition

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de

