

# ADDITIVE FERTIGUNG



Sommersemester 2020



## 6 Additive Fertigungsverfahren – DED

# DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

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

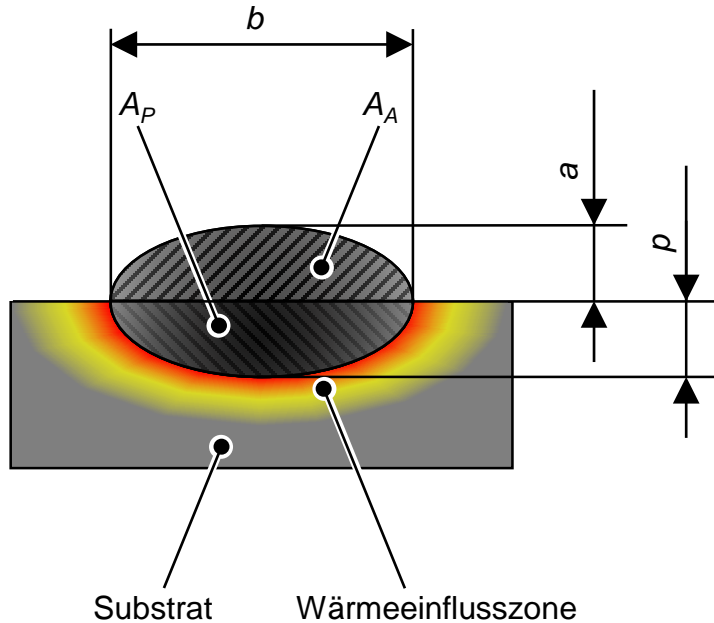
Prinzipiell Unterscheidung zwischen:

- Auftragschweißen: Aufschweißen 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

# EINZELNE SCHWEIßBAHN



- $a$  Auftragsdicke
- $b$  Auftragsbreite
- $p$  Einbrandtiefe
- $\gamma$  Vermischungsgrad
- $A_A$  Auftragsfläche
- $A_P$  Einbrandfläche

### Günstige Kriterien:

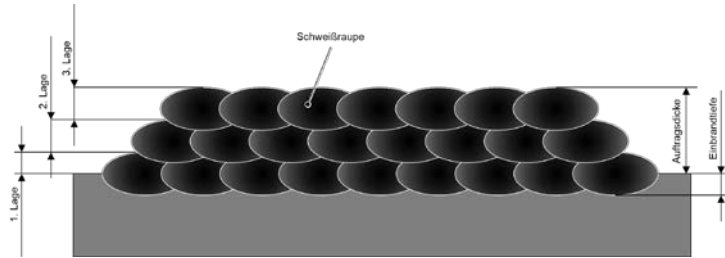
$$b/a = 4 \dots 5$$

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

## 6 Additive Fertigungsverfahren – DED

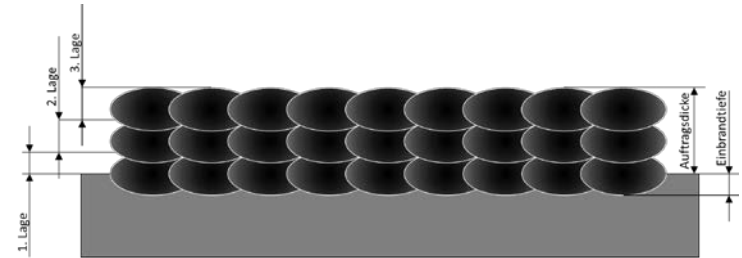
# SCHICHTAUFBAU

### 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 Wannennlage
- 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)

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

# WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM



# WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM

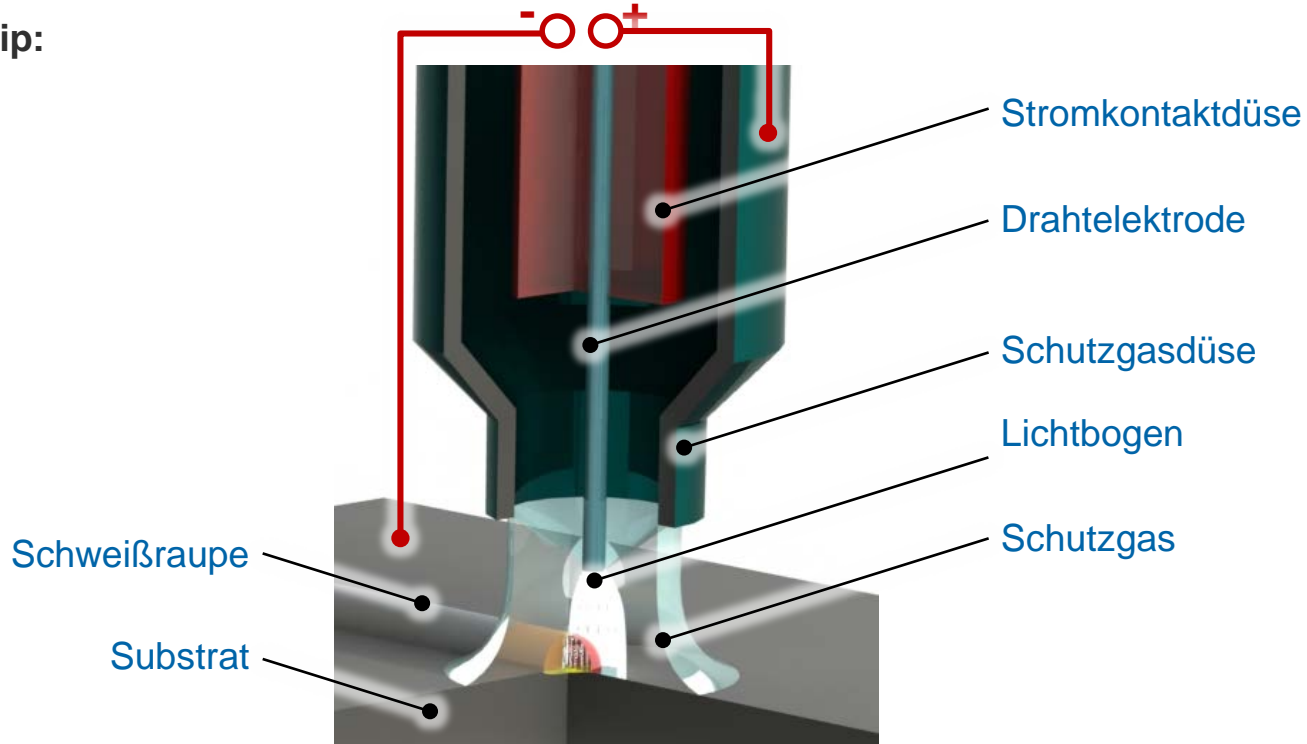
## Auftragschweißen im Lichtbogen (MSG-Verfahren)

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

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

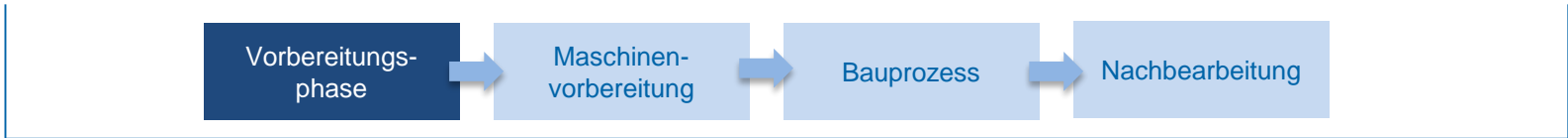
$$E_{\text{Strecke}} = 4000 \dots 7000 \text{ J/cm}$$

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 Wannenposition)
- 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

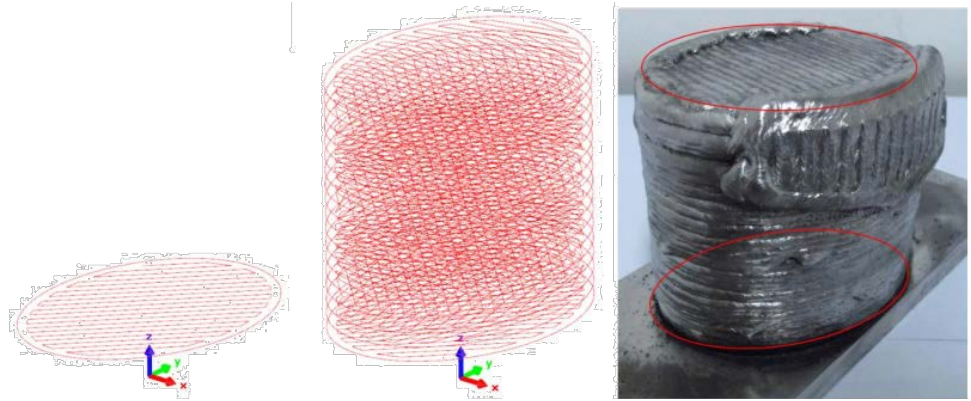
# WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



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

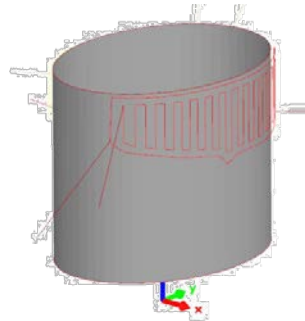
# WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



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
- **Verfahrenstrategie** der Werkzeugbahnen der einzelnen Querschnitte frei wählbar



## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

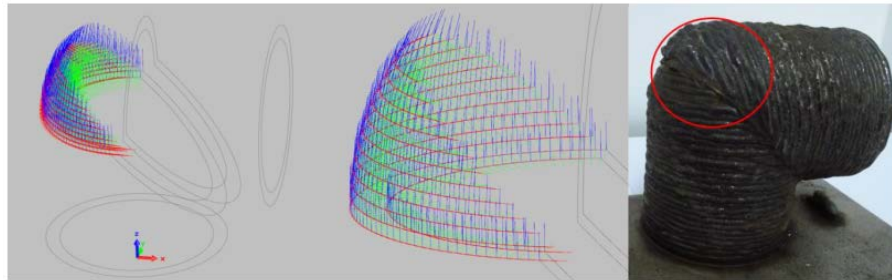
# WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



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

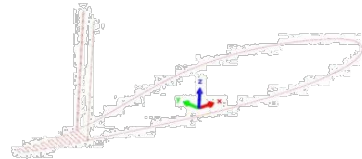
## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# 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



GEFERTEC – „Die 3DMP-Fibel“

## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# WAAM – VORBEREITUNGSPHASE



### Strategie Linear

Ausfüllen der einzelnen Querschnittsflächen durch parallele Bahnen

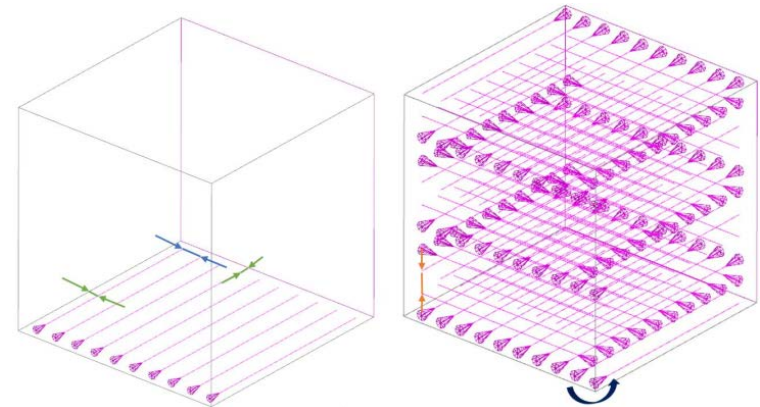
- Bidirektional
- Unidirektional

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

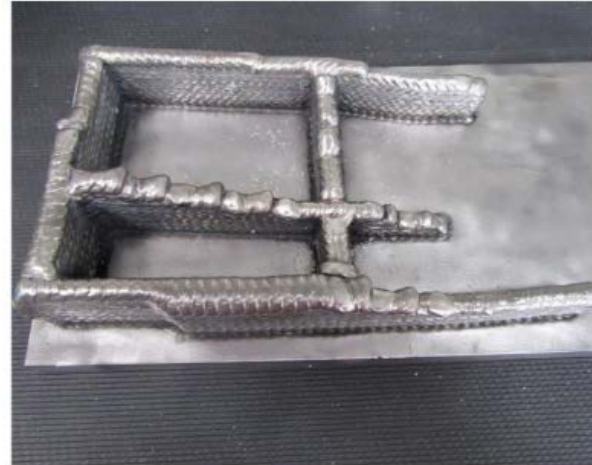
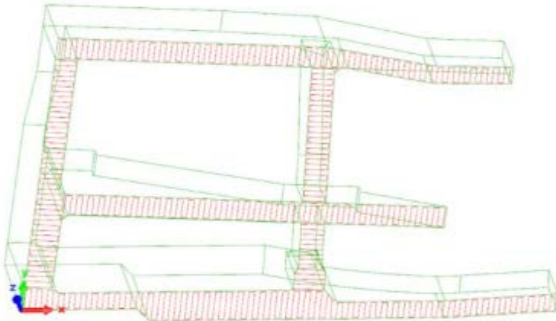
## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# 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.



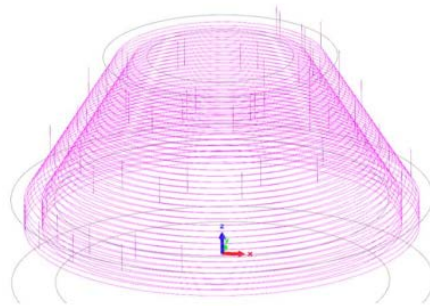
## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# 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



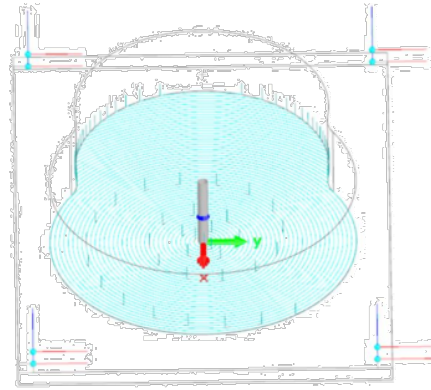
## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# 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

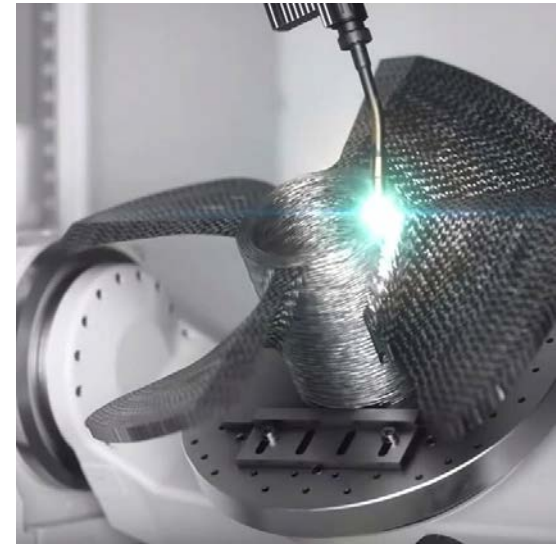
## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# 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, entgegnetreten.

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



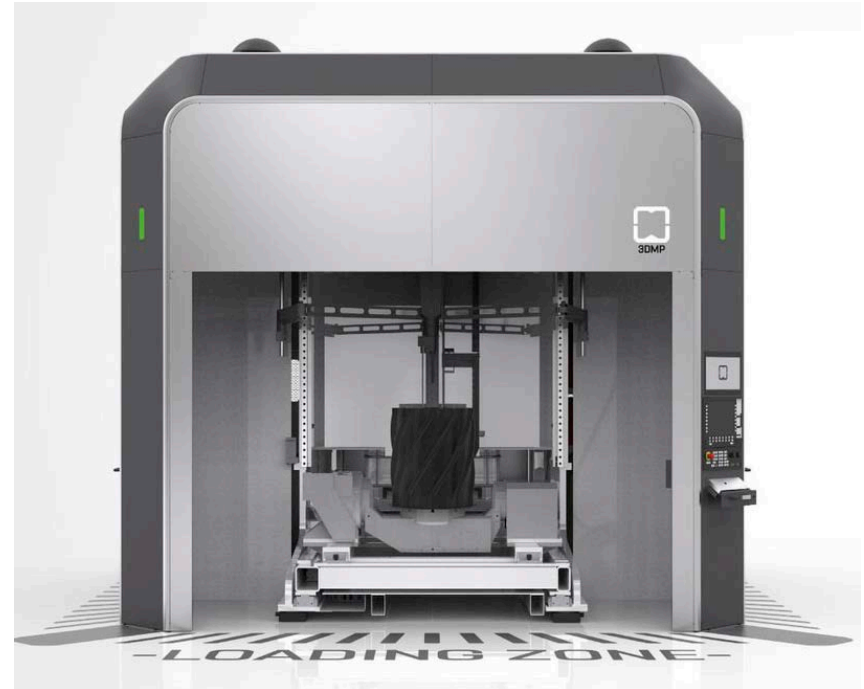
Turbinenflügel

GEFERTEC – „Die 3DMP-Fibel“

## 6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# WAAM – ANLAGEN

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



6 Additive Fertigungsverfahren – WAAM

# WAAM – ANLAGEN

Maschine	<b>GEFERTEC arc603</b>
Bauraum	3,0 m <sup>3</sup>
Max. Masse	3000 Kg
Merkmal	3-achsige Bearbeitung



GEFERTEC – „Die 3DMP-Fibel“



## 6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

# LASER METAL DEPOSITION (LMD)

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

## 6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

# LASER METAL DEPOSITION – LMD

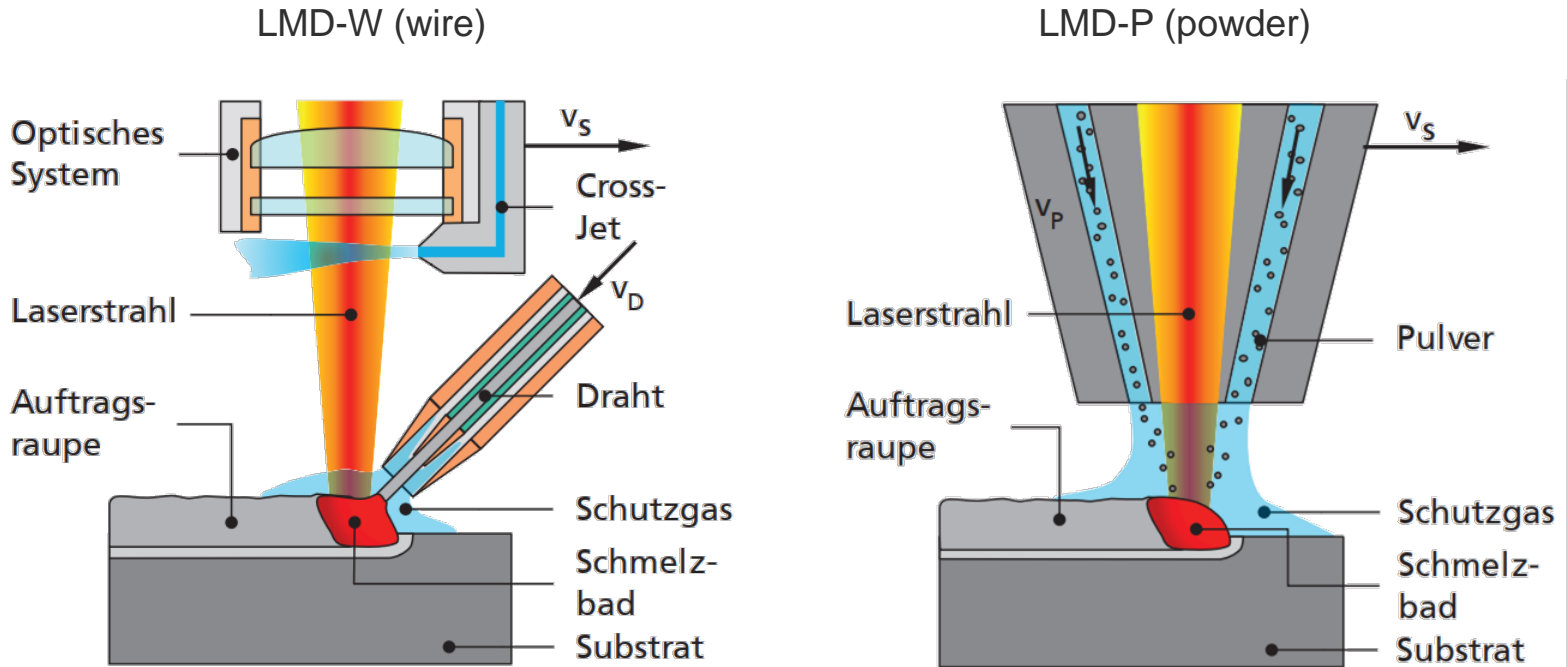
### Laser – oder Laserauftragschweißen

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

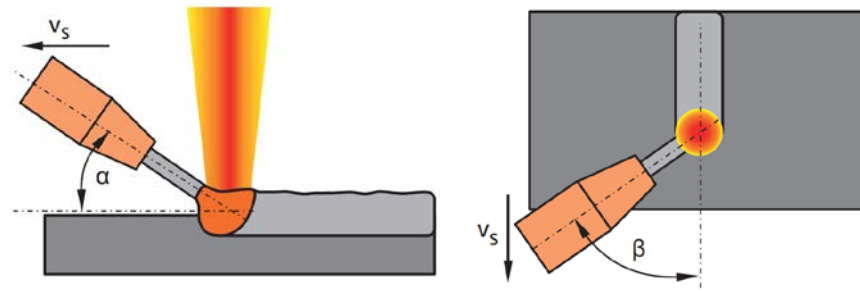
Wichtige Elemente zur Sicherstellung der Funktion und Qualität:

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)

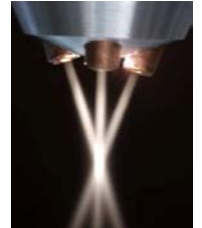


## 6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

# 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

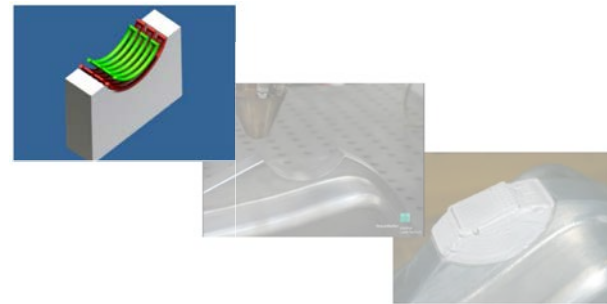
## 6 Additive Fertigungsverfahren – LMD

# 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 <sup>3</sup>
Max. Masse	95 Kg
Merkmal	5-achsige Bearbeitung; Sandwichstruktur
Aufbaurate	500 cm <sup>3</sup> /h





6 Additive Fertigungsverfahren – DED

# Additive Fertigung 2020 – 06-08

## 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

