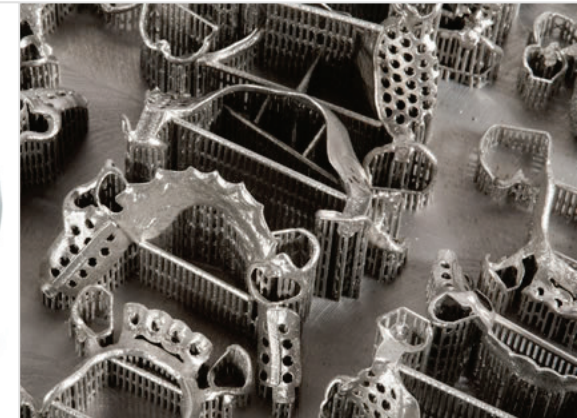
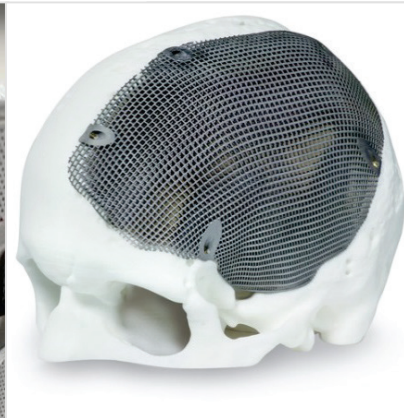
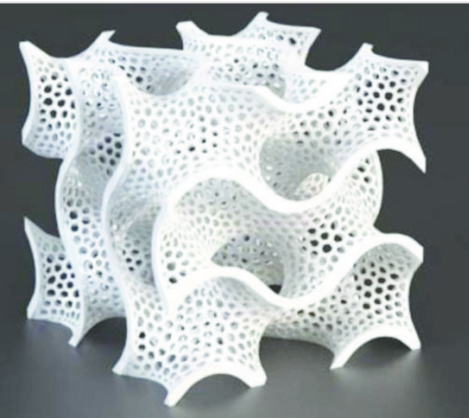


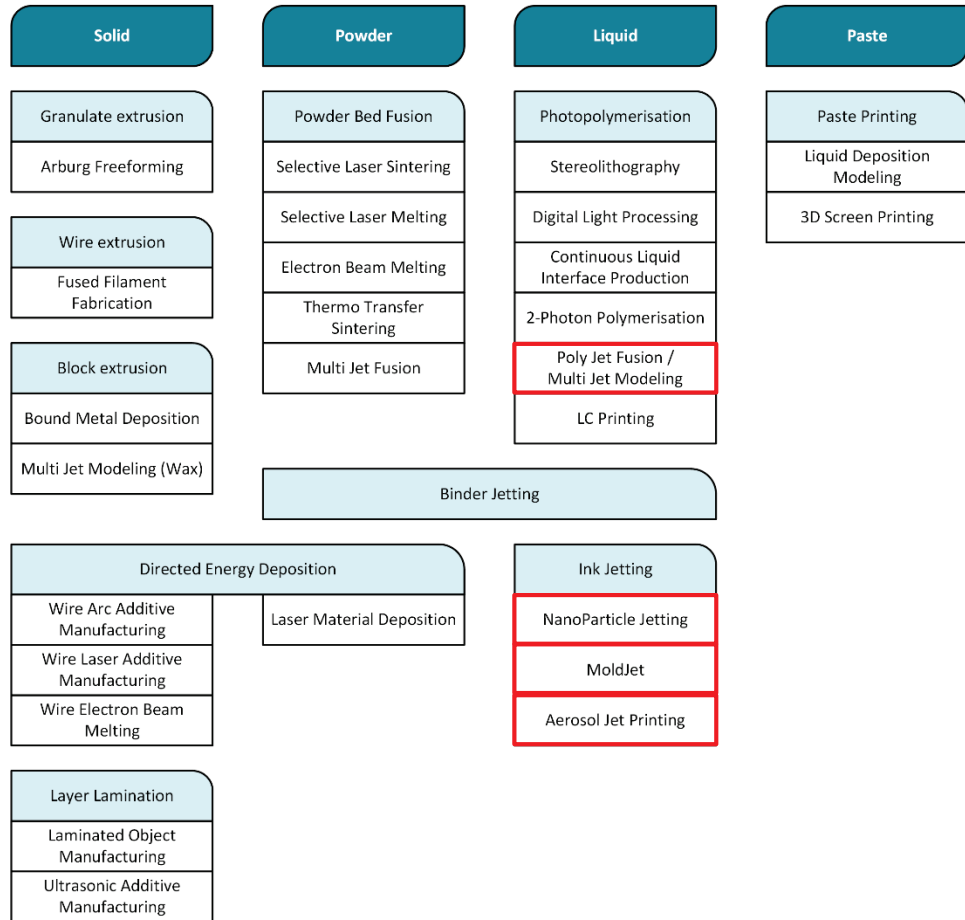
ADDITIVE FERTIGUNG – MATERIAL JETTING



Sommersemester 2021

MATERIAL JETTING

Definition nach ISO/DIS 17296-1:
 “additive manufacturing process in
 which droplets of build material are
 selectively deposited“

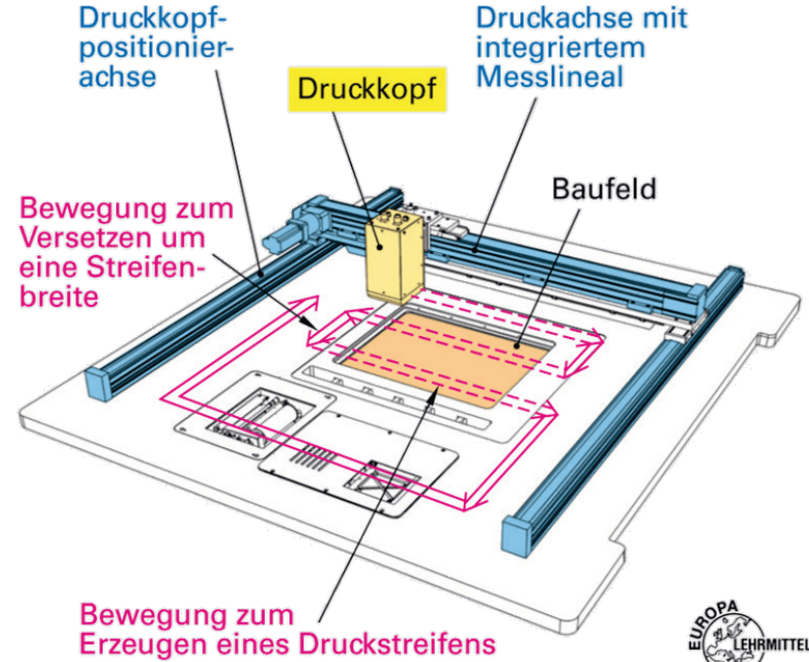


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

EINFÜHRUNG: DRUCKKOPF

Aufgabe

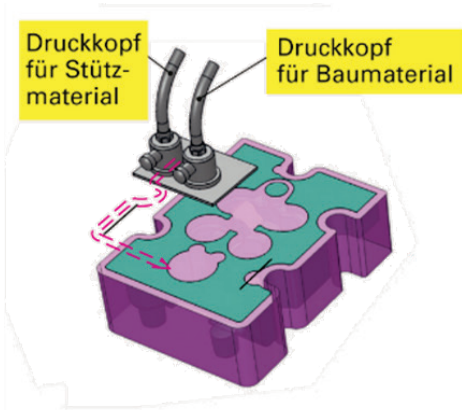
- Dosierung feinsten Flüssigkeitstropfen mit einer begrenzten Anzahl einzeln ansteuerbarer Düsen
- Punktgenaues Auftragen auf die Bauteiloberfläche



DRUCKKOPFSYSTEME UND -PRINZIPIEN

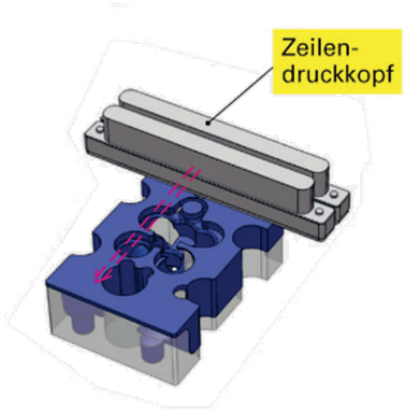
Vektorgesteuert

- Druckkopf fährt die Bauteilkontur ab („Plotter“)
- Hohe Auflösung
- Eignung für kleine und feine Modelle



Zeilendruckkopf

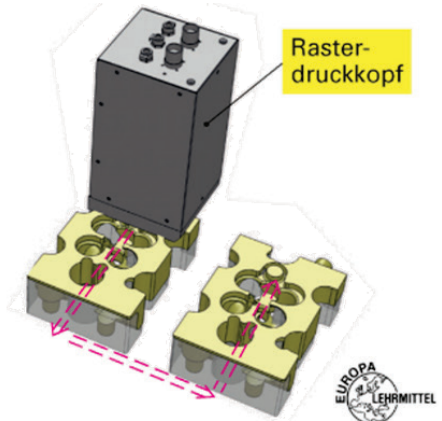
- Druckkopf über gesamte Bettbreite -> Erzeugung **einer** Druckzeile pro Schicht
- Reduzierung der Schichtbauzeit



Rasterverfahren

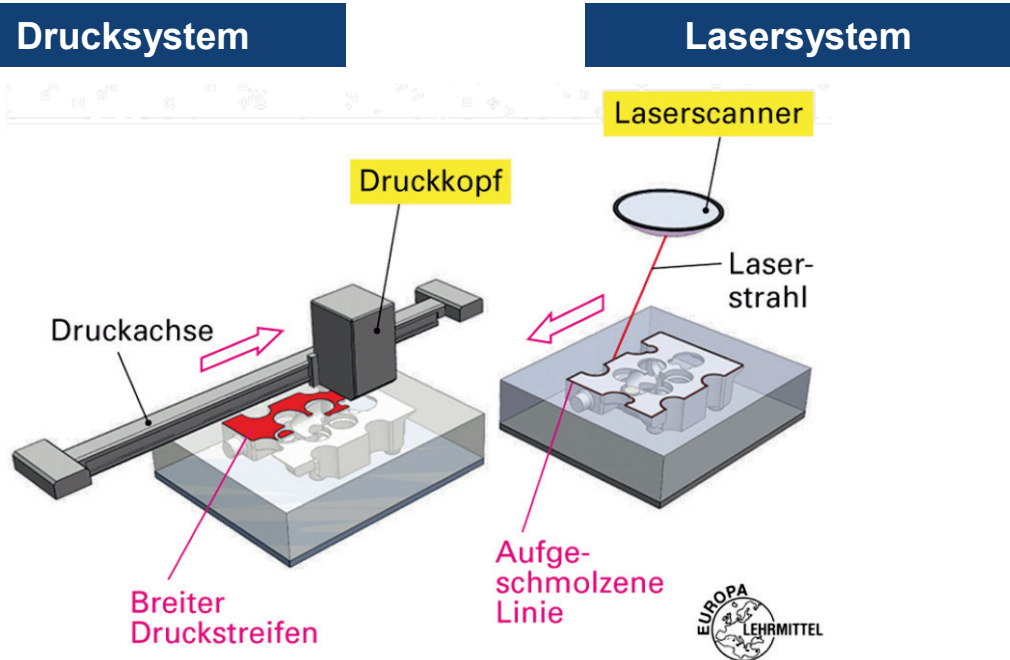
Unterscheidung zwischen:

- Richtung in der ein druckbreiter Streifen erzeugt wird
- Richtung in der der Druckkopf um eine Streifenbreite versetzt wird



DRUCKKOPFSYSTEME

Vergleich mit Laser-Systemen

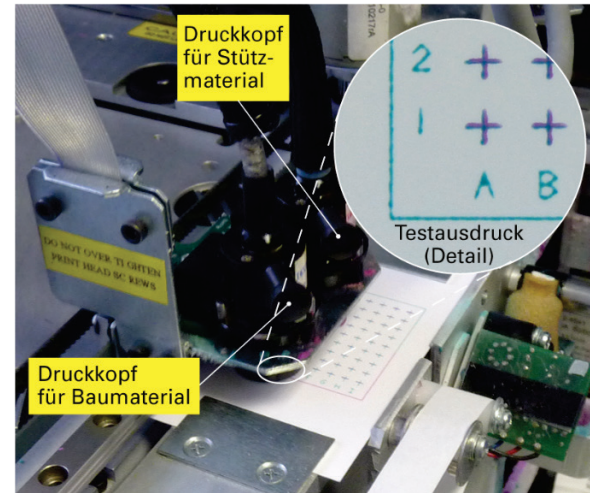
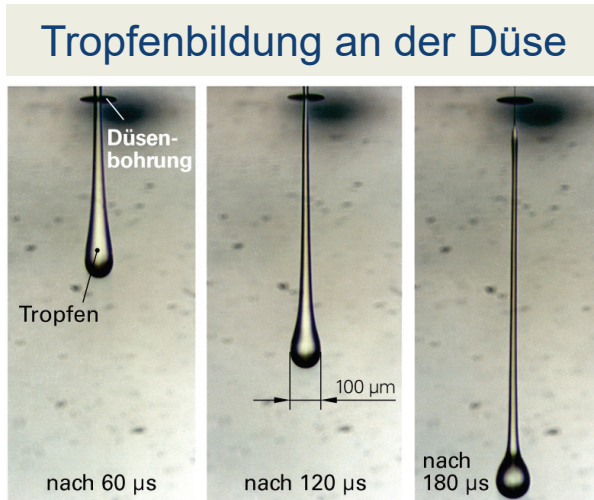


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

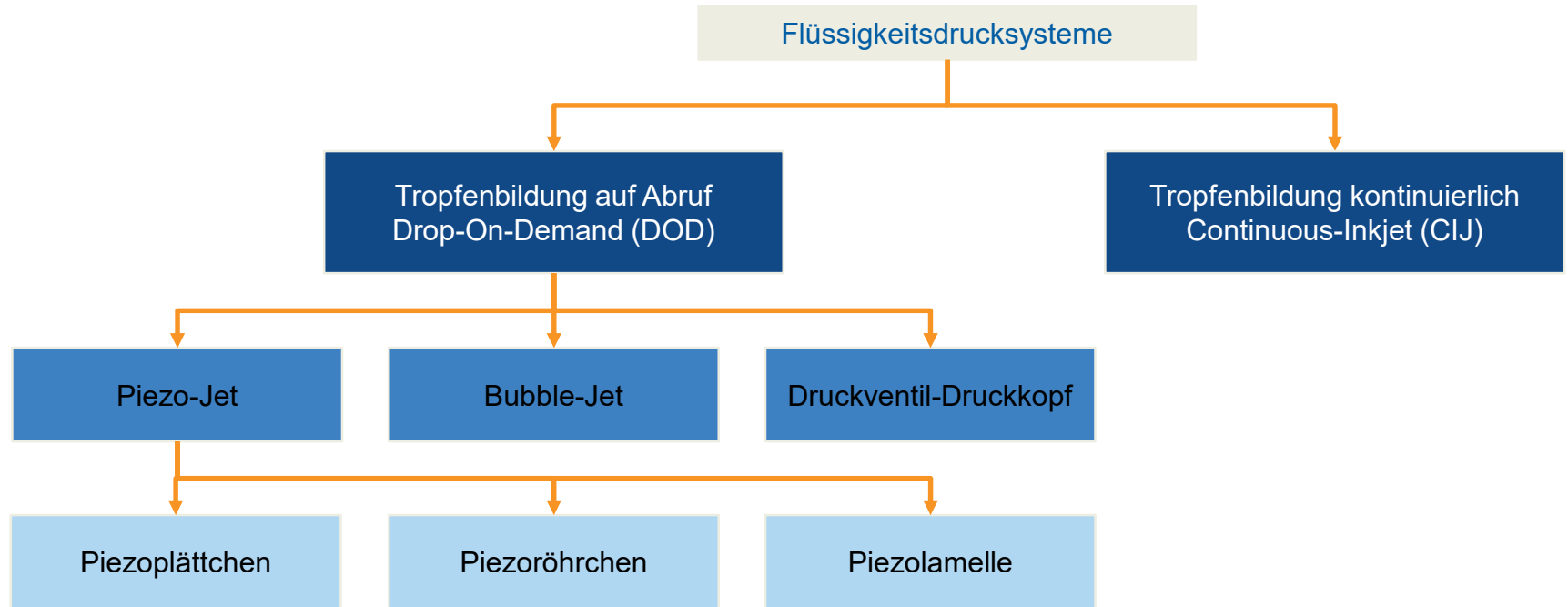
Druckkopftestfahrt und Testkarte

- Ausrichtung beider Druckköpfe
- Prüfung der Deckungsgleichheit bei der Fertigung von Testkörpern (im Beispiel Kreuze)



DRUCKKOPFSYSTEME

Einteilung der Drucksysteme

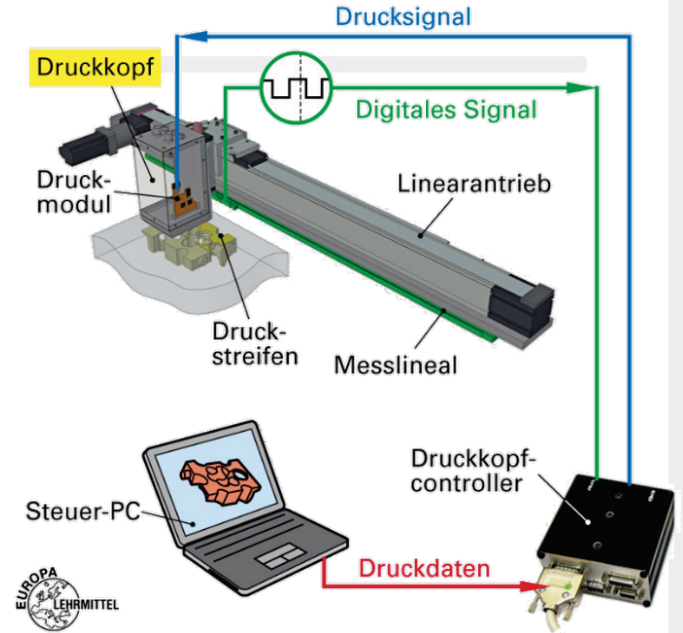


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Drop-On-Demand-Verfahren (DOD)

- Signalgebundene Erzeugung der Tropfen bei Bedarf
- Der Druckkopfcontroller nimmt Druckdaten (Bitmaps bzw. Pixeldaten) auf und gibt sie synchron zur Druckbewegung an den Druckkopf aus
- Signal zur Synchronisierung liefert entweder ein Encoder am Antriebsmotor oder ein Wegmesssystem mit optischem oder magnetischem Messlineal
- Verwendung unterschiedlicher Messsysteme:
 - Inkrementelle Messsysteme mit Impulsen für die Zuwachswerte
 - Absolute Messsysteme mit einer Messwertcodierung

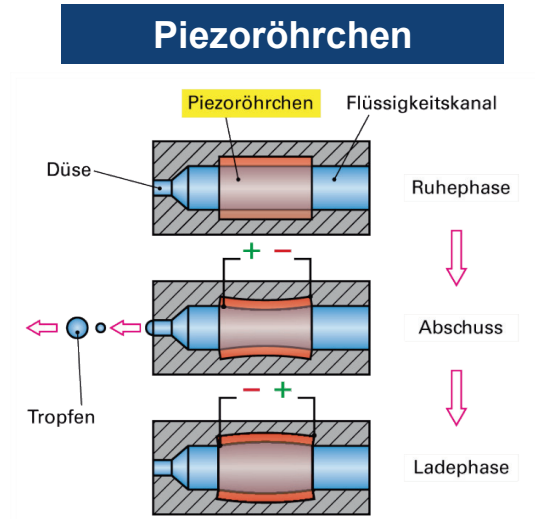
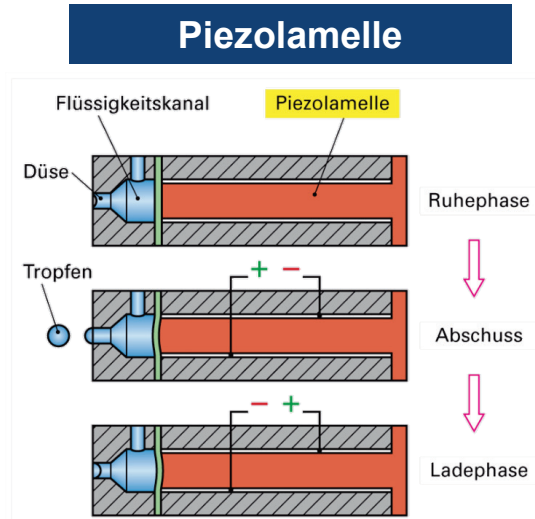
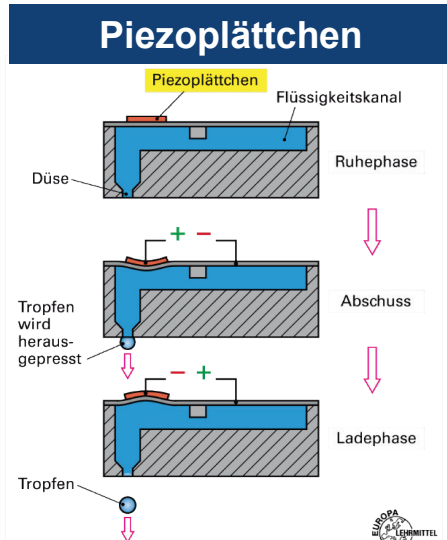


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Piezo-Tropfenerzeugung

- Elektromechanische Erzeugung der einzelnen Tröpfchen
- Integration von Flüssigkeitskanälen mit Piezokeramiken, die sich unter Bestromung abwechselnd verengen und erweitern

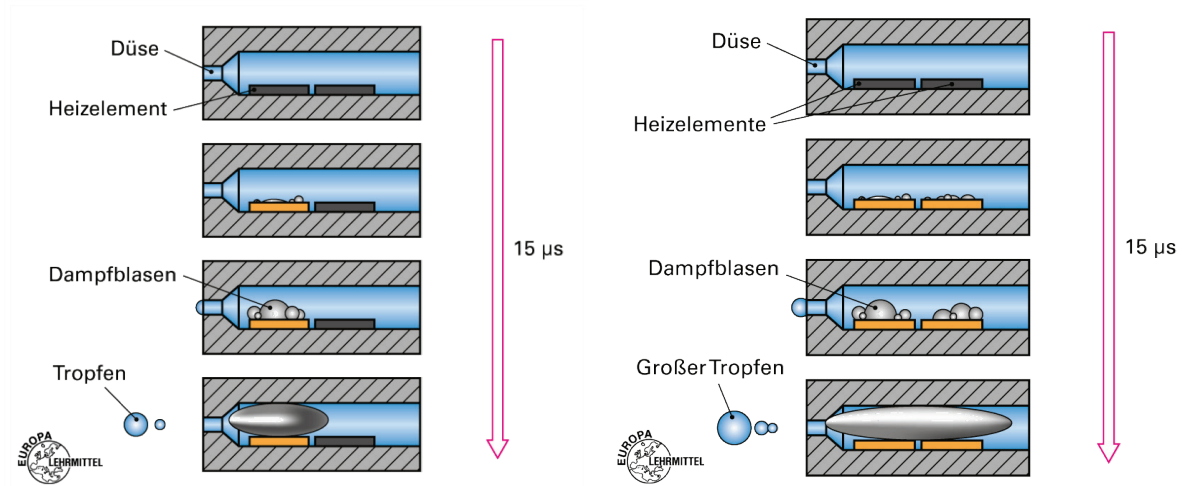


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Bubble-Jet-Prinzip

- Dosierung der Druckflüssigkeit in dünnen Röhrcchen über Kapillarkräfte
- Erhitzung der Flüssigkeit über ein Heizelement, so dass sich augenblicklich Gasbläschen ausbilden
- Gasblasen verdrängen Tropfen unter hohem Druck aus der Düse
- Zur Erzeugung großer Tropfen werden weitere Heizelemente zugeschaltet

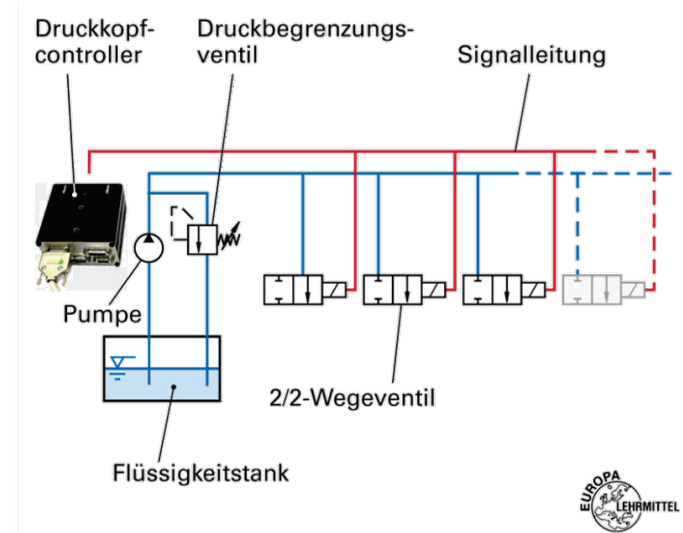


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Pumpe-Ventil-Prinzip

- Flüssigkeitsdruck wird über eine hydraulische Druckquelle erzeugt
- Strahl- bzw. Tropfenabschuss wird über ein mechanisches Ventil gesteuert
- Tropfengröße wird über Zeitsteuerung der Ventile gesteuert
- Frequenz und Tropfenqualität gering

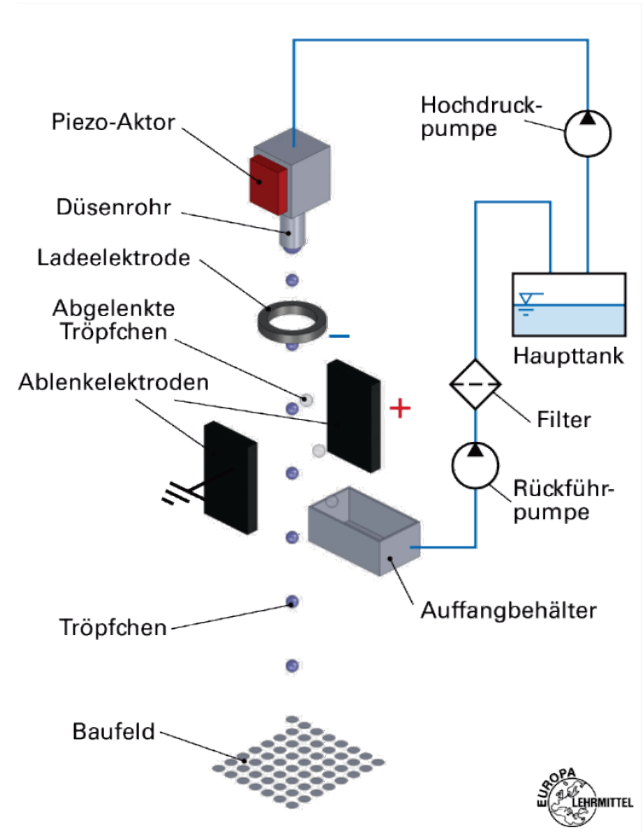


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Continuous-Inkjet-Verfahren (CIJ)

- Erzeugung eines permanenten Flüssigkeitsstrahls
 - Flüssigkeit wird durch Pumpe zur Düse gepumpt
 - Teilung der Flüssigkeit durch piezoelektrischen Schwinger
 - Lenkung der Tropfen durch steuerbares elektrisches Feld
 - Tropfen, welche nicht auf das Baufeld aufgetragen werden sollen, werden in Richtung eines Reservoirs abgelenkt
- Praktisch jede Flüssigkeit lässt sich verarbeiten, solange sie leitfähig ist
- Technischer Aufwand für die Tropfenablenkung groß



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

DRUCKKOPFSYSTEME

Ausgangszustand des Verarbeitungswerkstoff

Granulatform

- Fester Ausgangszustand vor der Fertigung (z. B. Granulat)
- Erwärmung in beheizten Tanks bis zum Schmelzpunkt
- Geschmolzenes Material wird über beheizte Leitungen zum Druckkopf gepumpt

Extrusion

- Extrusion kleiner Mengen des Baumaterials aus beheizbaren Kartuschen in Vorlagebehälter am Druckkopf
- Material wird in Vorlagebehälter vollständig geschmolzen und direkt dem Druckkopf zugeführt

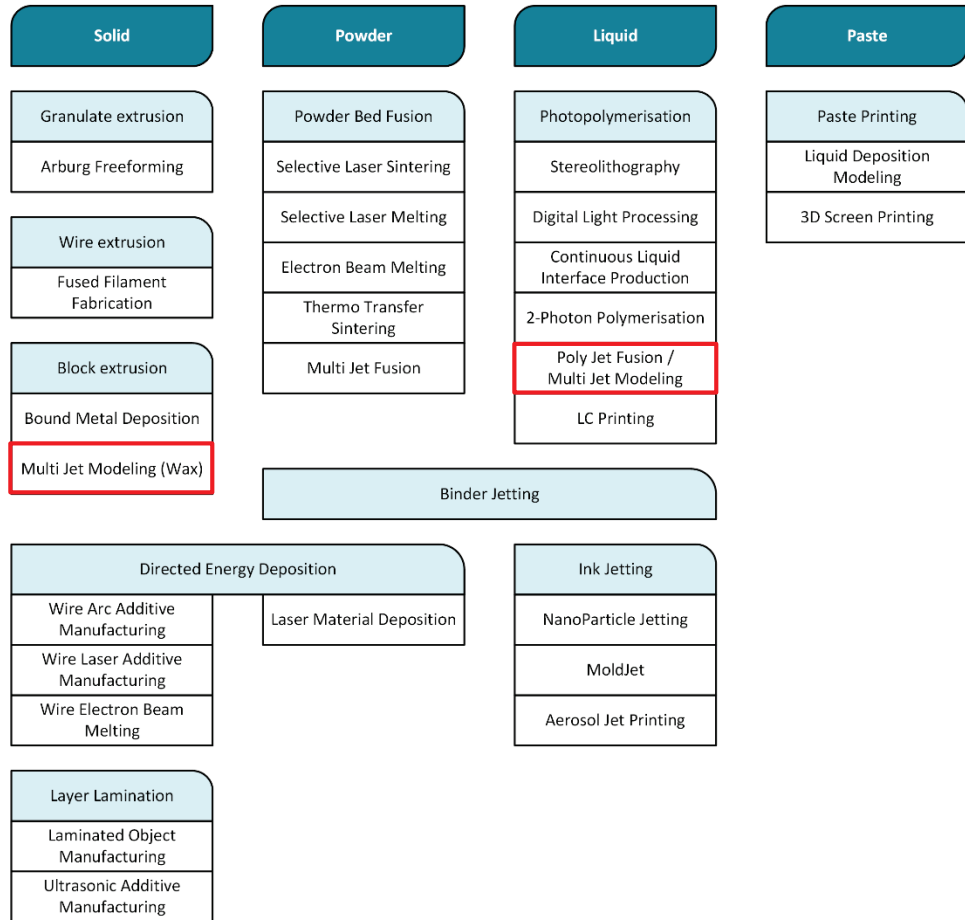
Wechselkartuschen

- Einsatz bei fotochemischen Verfahren in Kombination mit Pumpstationen
- Bevorzugter Einsatz von absaugbaren Einwegbeuteln, da geeignet für eine gute Restentleerung



MATERIAL JETTING

Definition nach ISO/DIS 17296-1:
 “additive manufacturing process in
 which droplets of build material are
 selectively deposited“

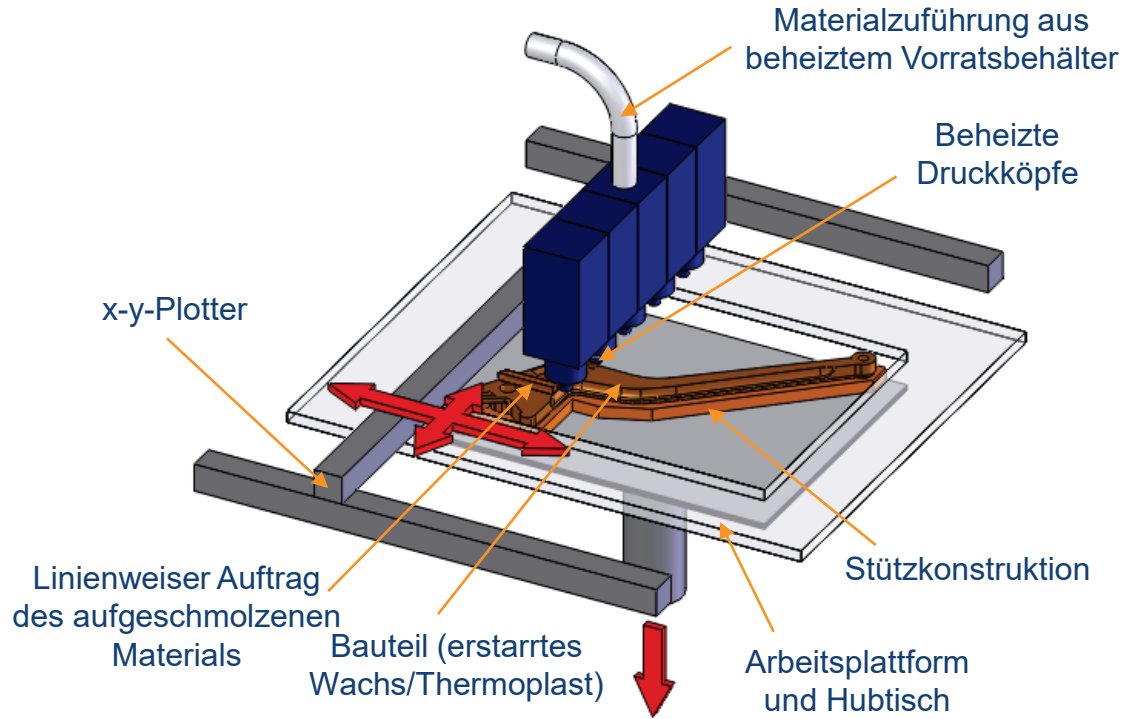


6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: KURZBESCHREIBUNG

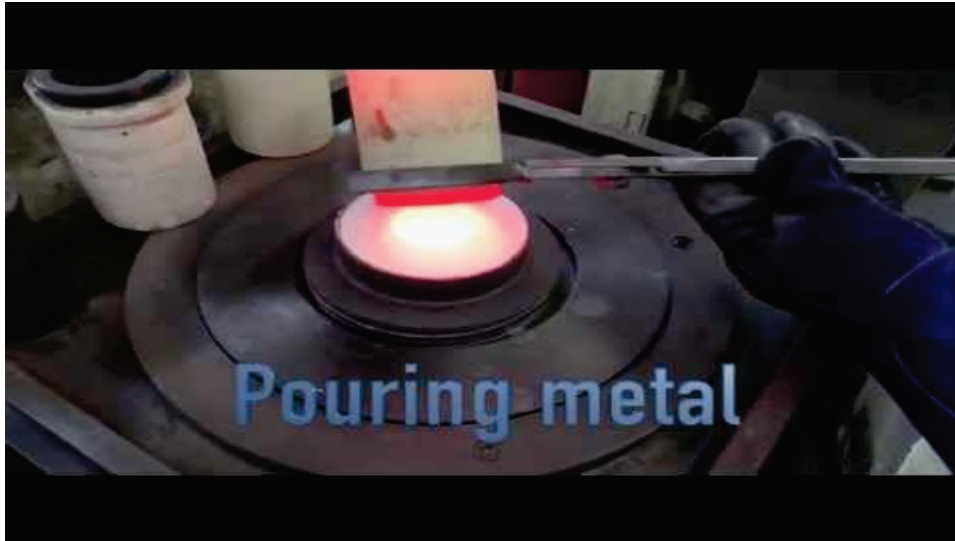
Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Aufschmelzen und Linie-für-Linie-Auftragen thermoplastischen Materials durch beheizte Düsen; unmittelbares Verfestigen des aufgetragenen Materials nach der Positionierung
Ausgangsmaterial	Wachse (niedrigviskose Polymere)
Bindungsmechanismus	Physikalisch (thermisch)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Rasterorientiert
Aktivierungsenergie	Wärmeleitung in Druckköpfen zum Erwärmen/ Verflüssigen des Ausgangsmaterials
Postprozess	Thermische Entfernung der Stützkonstruktionen

MJM: VERFAHRENSABLAUF



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MULTI-JET-MODELING: VIDEO (ANWENDUNG: WACHSMODELLE FÜR FEINGUSS)



https://youtu.be/_2gpPqwVzww

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: WERKSTOFFE

- Thermoplastische Hartwaxse
- Niedrigschmelzendere Supportmaterialien



Midas™

Castable Material

Consistent, reliable results
Clean burnout
No thermal expansion

RECOMMENDED TEMPERATURE SETTINGS:

S-Series & 3Z	Printhead	Heated line	Tank
Build	120 °C	125 °C	115 °C

360 gr. wt.

reorder # 970169

solidscape
HIGH PRECISION 3D PRINTERS

Material may change color over time. Will not impact performance.

Safety Data Sheet available online:
<http://www.solidscape.com/products/3d-materials/>

Melt™

Dissolvable Support

Eliminates support design
Dissolves away hands-free
Non-toxic

RECOMMENDED TEMPERATURE SETTINGS:

S-Series	Printhead	Heated line	Tank
Support	105 °C	105 °C	97 °C

3Z	Printhead	Heated line	Tank
Support	105 °C	105 °C	115 °C

230 gr. wt.

reorder # 970172

solidscape
HIGH PRECISION 3D PRINTERS

Material may change color over time. Will not impact performance.

Safety Data Sheet available online:
<http://www.solidscape.com/products/3d-materials/>

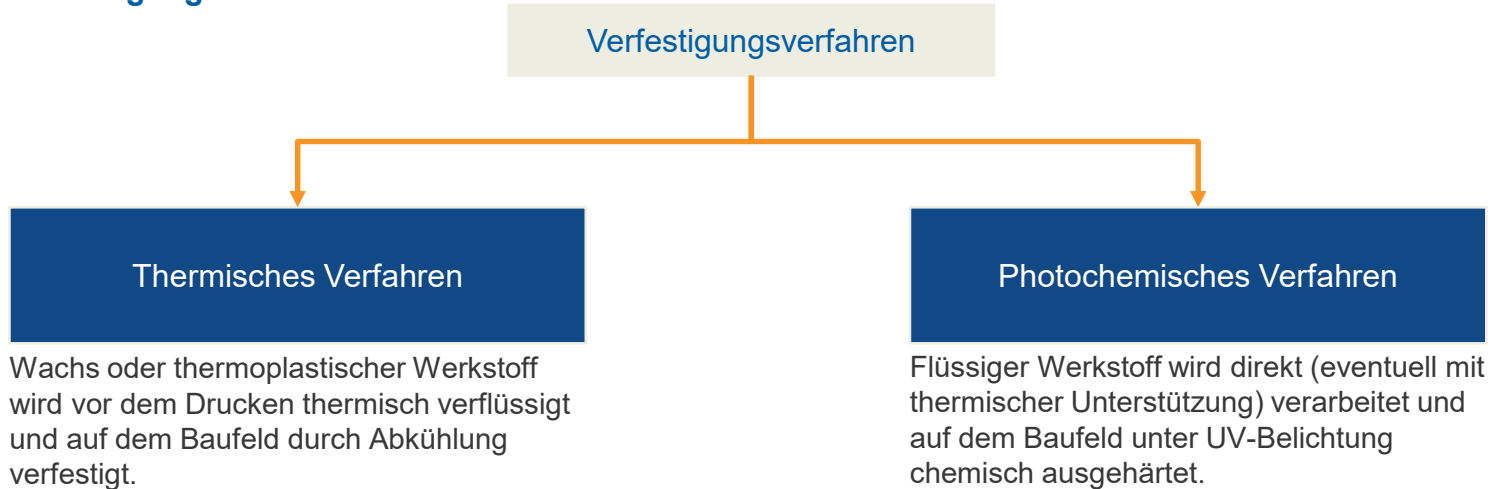
Solidscape.

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: VORBEREITUNGSPHASE



Verfestigungsverfahren



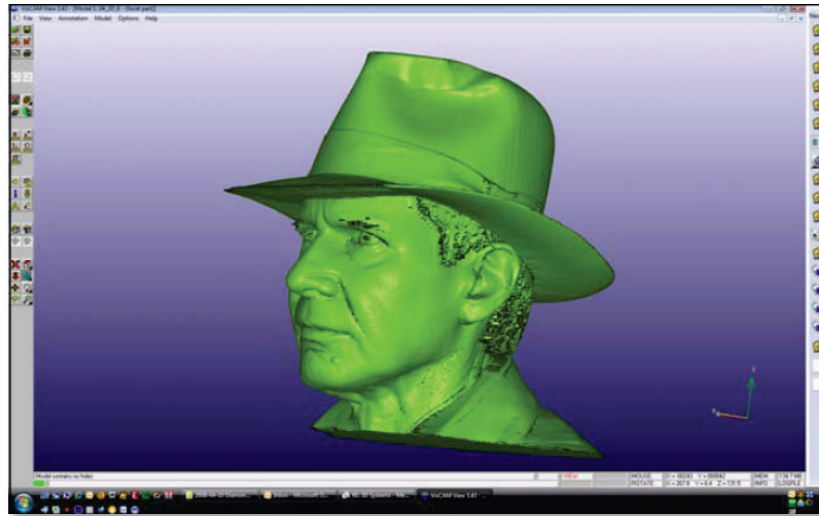
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: VORBEREITUNGSPHASE



Aufbereiten des CAD-Modells

- Automatische Supportgenerierung



www.uni-due.de/fertigungstechnik

[www.3dsystems.com]

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: VORBEREITUNGSPHASE



Materialversorgung bei thermischen Verfahren

- Baumaterial ist vor der Verarbeitung in festem Zustand
- Lieferung von Baumaterial und Stützmaterial in separaten Kartuschen



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BAUPROZESS

Vorbereitungsphase

Bauprozess

Nachbearbeitung

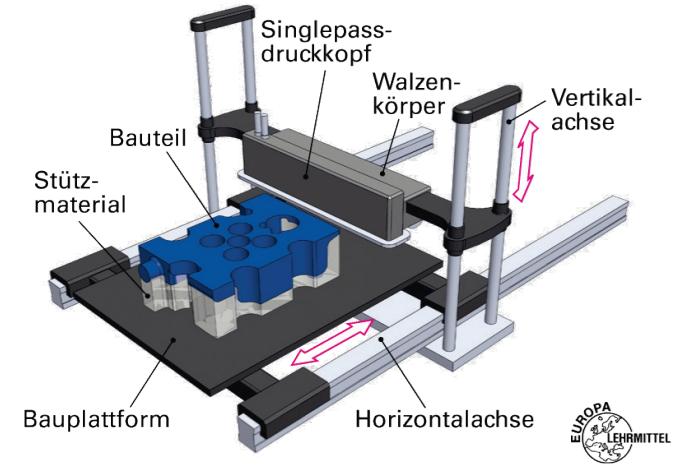
Prinzipieller Aufbau

Variante 1:

- Plattform bewegt sich nur horizontal
- Der Druckkopf verfährt schichtweise nach oben

Variante 2:

- Plattform bewegt sich nur vertikal
- Der Druckkopf verfährt schichtweise horizontal nur X (Single pass) oder X/Y (Raster)



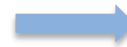
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BAUPROZESS

Vorbereitungsphase



Bauprozess

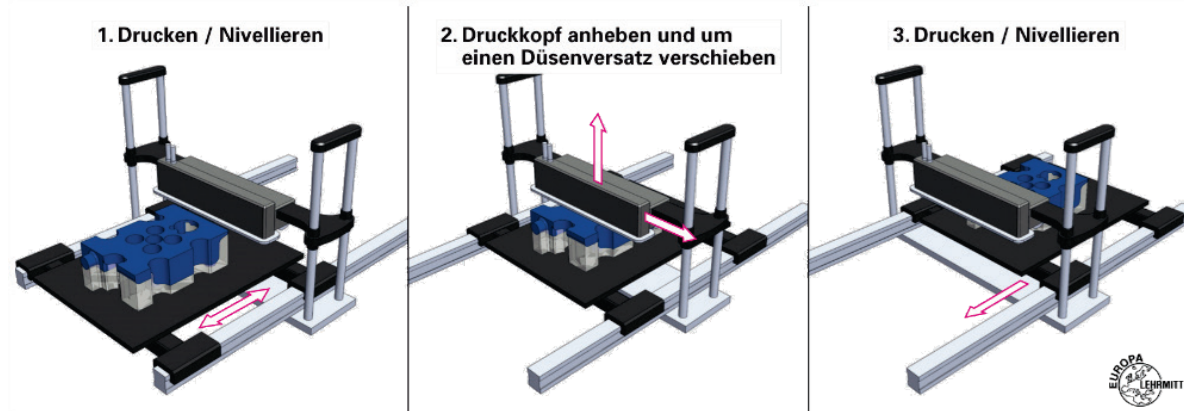


Nachbearbeitung

Verfahrensablauf

Bei Einsatz von Zeilendruckköpfen oder Singlepassdruckköpfen:

- Druckbreite entspricht der Baufeldbreite
- Zur Verbesserung des Druckbildes wird der Druckkopf nach jeder Schicht quer zur Druckrichtung abwechselnd um den Versatz einer Düse verschoben



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BAUPROZESS

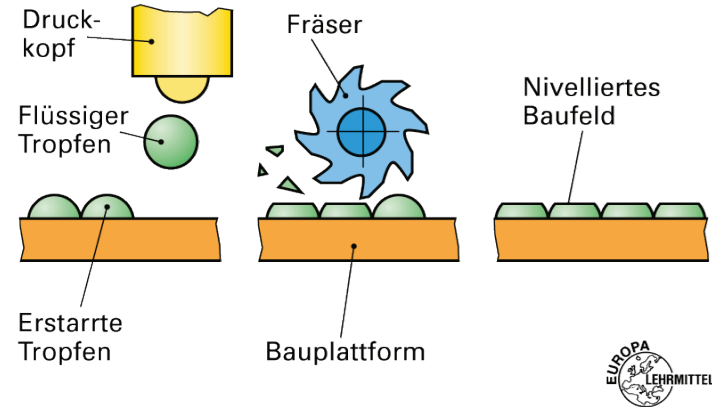
Vorbereitungsphase

Bauprozess

Nachbearbeitung

Schichtnivellierung

- Kugelförmige Tropfen erstarren in einem Höhen-Breiten-Verhältnis von etwa 2 : 1
- Spannungserzeugung durch Schrumpfungseffekte während des Erstarrens
- (Teilweises) Überfräsen der aktuellen Schicht für eine homogene Schichtgenerierung und der Reduktion innerer Spannungen



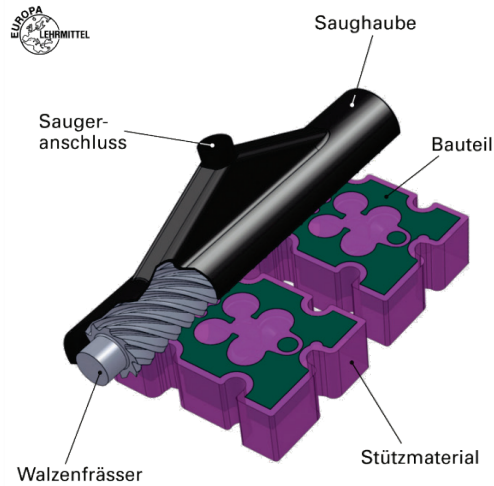
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BAUPROZESS

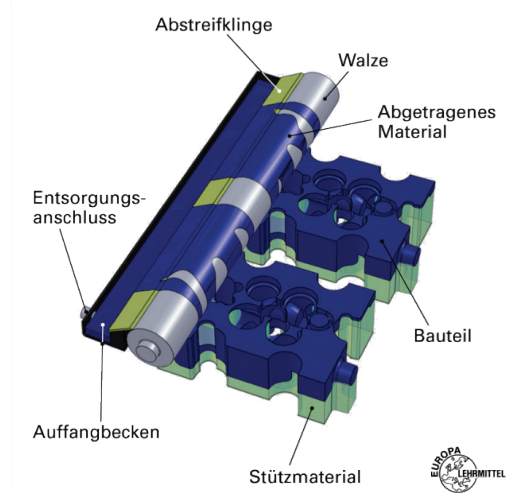


Technische Varianten zur Schichtthomogenisierung und Spannungsreduktion

Schichtnivellierung mit Fräser



Schichtnivellierung mit temperierter Walze



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BAUPROZESS

Vorbereitungsphase



Bauprozess



Nachbearbeitung

Visuelle Bauteileigenschaften

- Hohe Auflösung der Modelle
- In z-Richtung Schichtstärken von 800 DPI (entspricht ca. 32 μm)
- In x- und y-Richtung Auflösung von ca. 600 DPI bis 5000 DPI

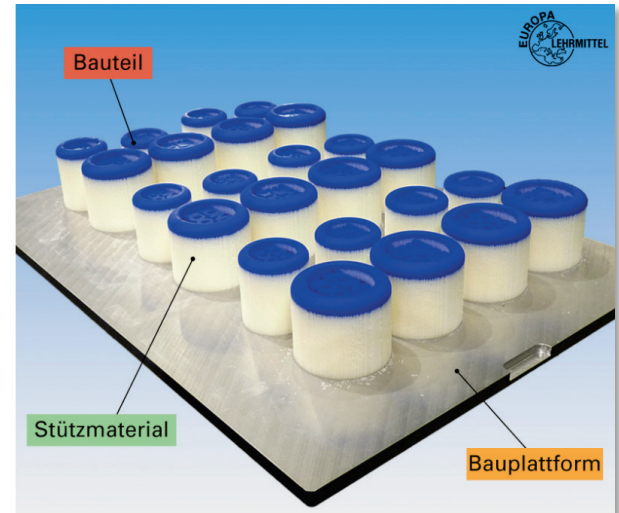
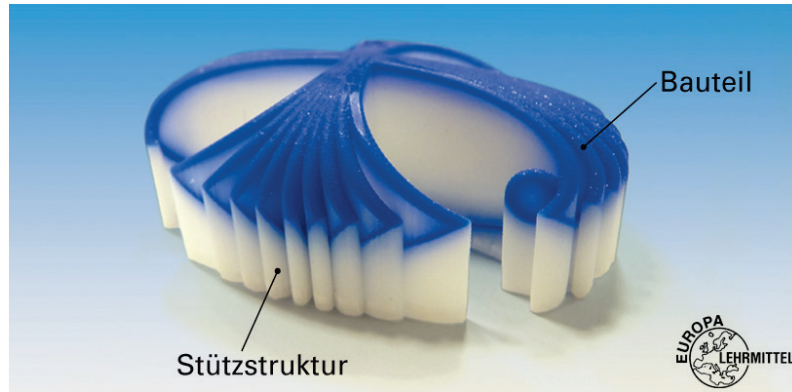
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: NACHBEARBEITUNG



Notwendige Nachbearbeitung

- Zum Ablösen von Wachsbauteilen wird die Platte erwärmt
- Stützmaterial hat einen niedrigeren Schmelzpunkt als das Baumaterial
 - Schmelzen des Stützmaterials in einem Ofen
 - Alternativ Auflösung in einem warmen Lösungsmittelbad



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: BEISPIELE

Visuelle Bauteileigenschaften

- Hohe Auflösung der Modelle
- In z-Richtung Schichtstärken von 800 DPI (entspricht ca. 32 µm)
- In x- und y-Richtung Auflösung von ca. 600 DPI bis 5000 DPI



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: VOR- UND NACHTEILE

- + Detaillierte Modelle
- + Anwenderfreundlichkeit
- + Kosteneffizient
- + Geringe Prozesszeit
- Kleines Bauvolumen
- Begrenzte Materialpalette
- Eingeschränkte Einsetzbarkeit der Modelle
- Stützkonstruktionen erforderlich

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: ANLAGEN

Anlagentyp:	ProJet™ HD3000
Hersteller:	3D-Systems
Bauraum:	HD Modus: 298 x 185 x 203 mm UHD Modus: 6450 mm ² (xy) x 50 mm (z)
Genauigkeit:	HD Modus: 328 x 328 x 606 DPI (xyz) UHD Modus: 656 x 656 x 800 DPI (xyz)
Druckmodi:	HD (High Definition) UHD (Ultra High Definition)
Abmessungen:	770 mm x 1240 mm x 1480 mm



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

MJM: ANLAGEN

Anlagentyp:	S500
Hersteller:	Solidscape
Bauraum:	150 mm x 150 mm x 100 mm
Genauigkeit:	5000 DPI XY; Schichtstärke 0,05 mm Z
Abmessungen:	560 mm x 500 mm x 420 mm



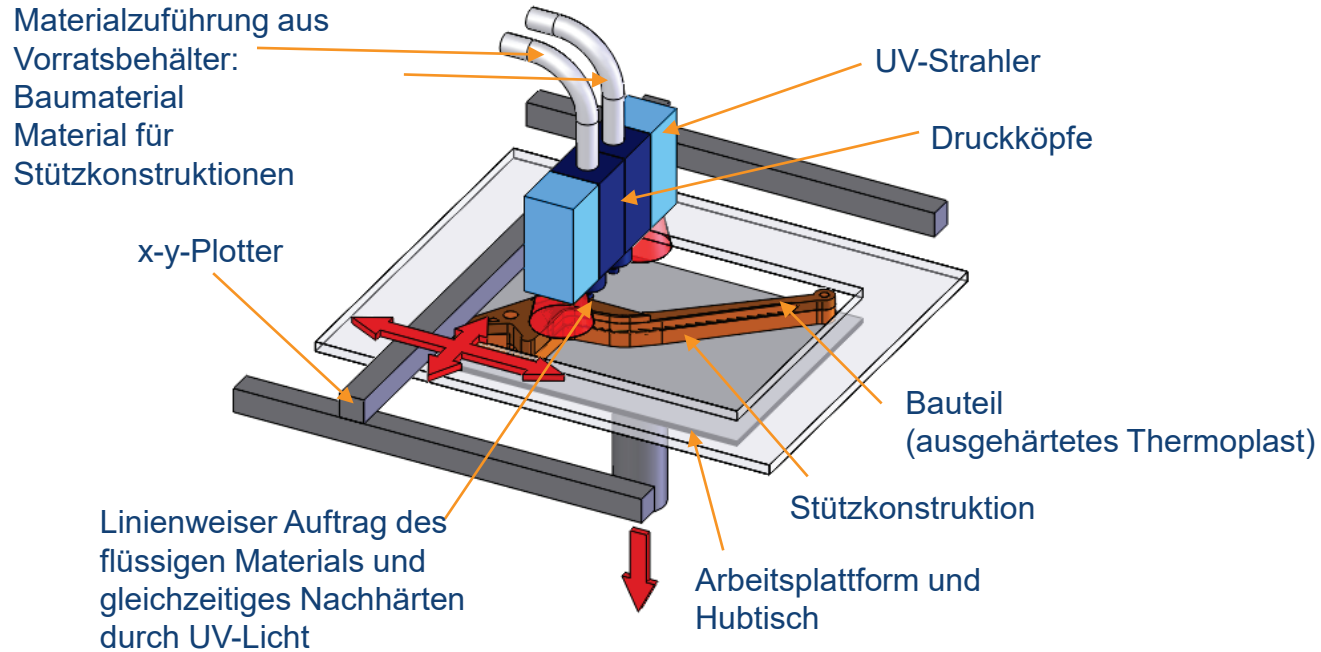
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: KURZBESCHREIBUNG

Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Auftragen von Fotomonomer-Flüssigharzen (mit Fotoaktivatoren) mit unmittelbarem Aushärten durch UV-Strahler; Multi-Material-Anwendung durch Materialmischung während des Bauprozesses
Ausgangsmaterial	flüssig/pastös: Stütz- und Modellmaterial (unterschiedliche Monomergemische zur Steuerung der Materialeigenschaften)
Bindungsmechanismus	Chemisch (UV-Vernetzung)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Rasterorientiert
Aktivierungsenergie	Wärmeleitung in Druckköpfen zum Erwärmen/ Verflüssigen des Ausgangsmaterials; UV-Strahlung zum Nachhärten
Postprozess	Mechanische Entfernung der Stützkonstruktionen, meist Wasserstrahl

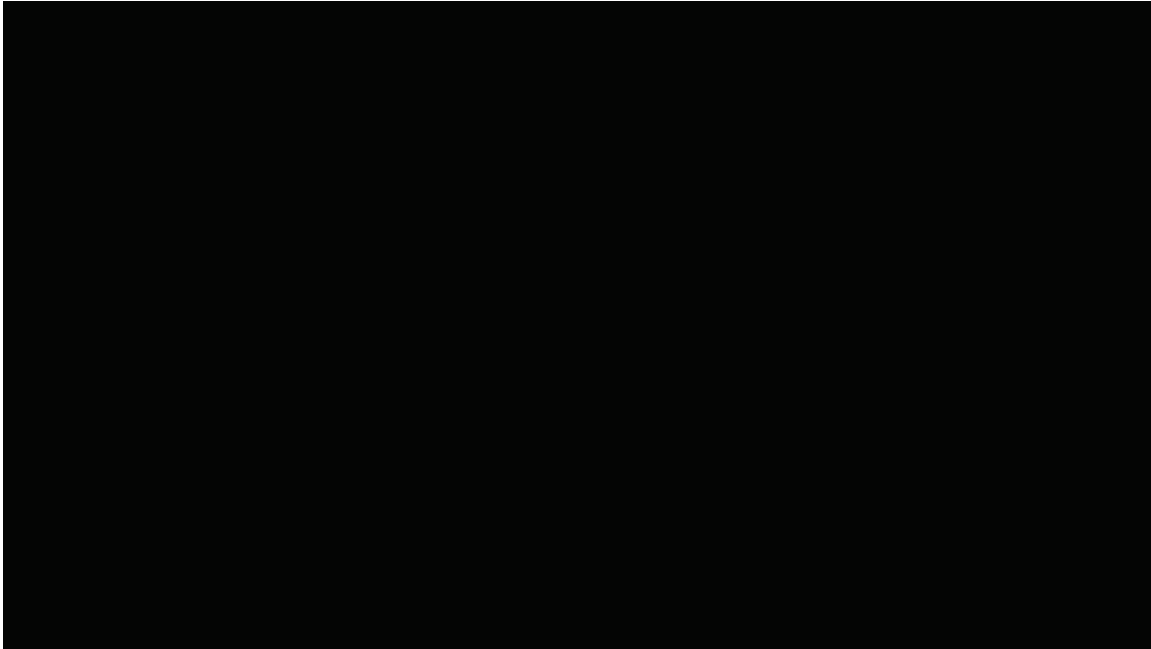
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: VERFAHRENSABLAUF



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF (VIDEO)



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: WERKSTOFFE

Kommerziell verfügbare Werkstoffe

- Photomomere ähnlich wie bei Stereolithografie

Digital Materials

Digital ABS-Material

Transparent

Hitzebeständig

Simuliertes Polypropylen

Bioverträglich

Fest, blickdicht

Gummiartig

Zahnmedizinisches Material

- SUP705 und SUP707: Geleearter Werkstoff, der gut mit Wasser ausgewaschen werden kann

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: VORBEREITUNGSPHASE



Notwendige Vorbereitungsschritte

- Bauteilkonstruktion und Aufbereitung
- Konstruktion der Stützkonstruktionen (teilautomatisch)
- Konvertieren in STL-Format
- Umwandeln in Schichtdaten (Slicen)
- Bereitstellen des Materials



[www.rtejournal.de]

www.uni-due.de/fertigungstechnik

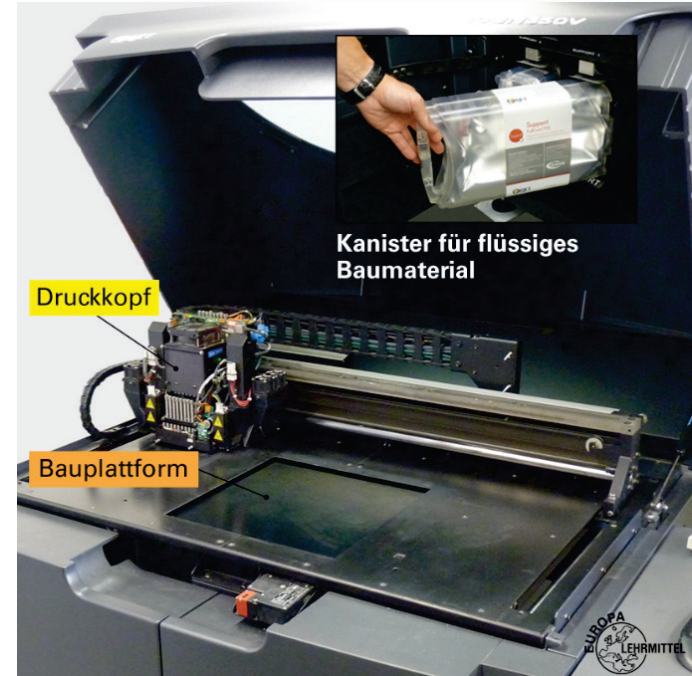
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: VORBEREITUNGSPHASE



Einrichtung der Poly-Jet Fusion Anlage

- Druckkopf besteht aus 4 oder 8 Multidüsenelementen
- Eine Hälfte der Düsenelemente stellt das Stütz-, die andere das Baumaterial zur Verfügung
- Je nach Maschinenausführung sind auch Vollfarbdrucke möglich



www.uni-due.de/fertigungstechnik



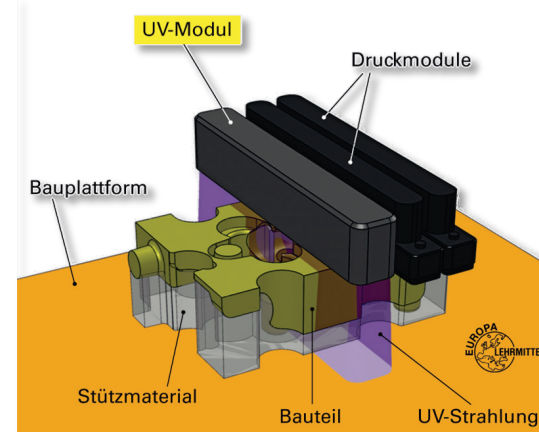
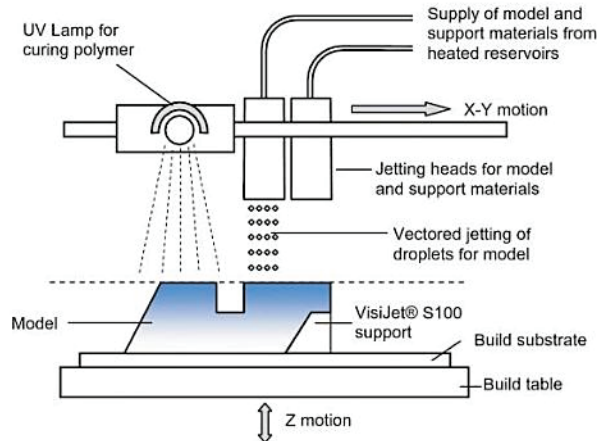
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: BAUPROZESS



Prinzip der Schichtgenerierung

- Jede Schicht wird durch simultanes Drucken des Bau- und Stützmaterials generiert
- Verfestigung des Monomers erfolgt durch mitlaufende Hochleistungslampen, welche das Monomer polymerisiert



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: NACHBEARBEITUNG



Auspacken

- Entfernung der geleeartigen Supportstrukturen zunächst mit Werkzeugen



[<http://printin3d.com>]

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: NACHBEARBEITUNG

Vorbereitungsphase



Bauprozess



Nachbearbeitung

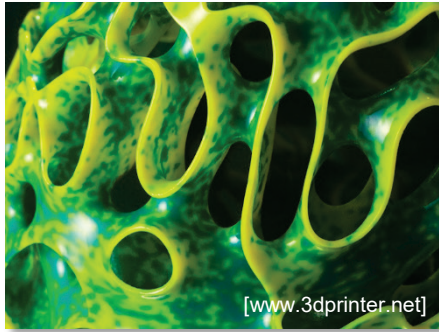
Auspacken

- Restliche Supportstrukturen können durch Auswaschen entfernt werden
 - WaterJet Station
 - kaum sichtbare Support-Spuren auf der Bauteiloberfläche
 - ggf. Nachbehandlung mit 2%-iger NaOH Lösung



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: ANWENDUNGSBEISPIELE



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

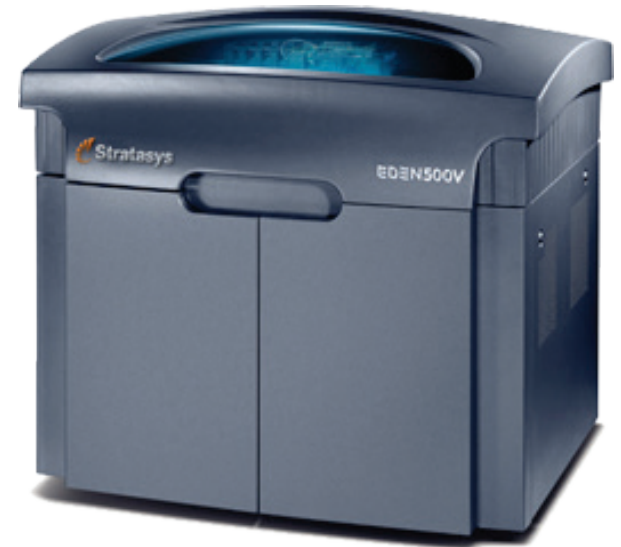
PJF: VOR- UND NACHTEILE

- + Detaillierte Modelle
- + Anwenderfreundlichkeit
- + Möglichkeit der Nachbearbeitung
- + Transparente Modelle
- + Prozesszeit
- + Verschiedene Farben möglich
- + Kein nachträgliches Aushärten
- Hohe Modellkosten
- Eingeschränkte Einsetzbarkeit der Modelle
- Stützkonstruktionen erforderlich
- Geringere Festigkeiten
- Geringere Bauteilhöhen

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: ANLAGEN

Anlagentyp:	Objet Eden 500V
Hersteller:	Stratasys
Bauraum:	500 mm x 400 mm x 200 mm
Schichtdicke:	min. 0,016 mm
Auflösung:	x-Achse: 600 dpi y-Achse: 600 dpi z-Achse: 1600 dpi
Abmessungen:	1320 mm x 990 mm x 1200 mm



www.stratasys.com

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

PJF: ANLAGEN

Anlagentyp:	3DUJ-553
Hersteller:	Mimaki
Bauraum:	508 mm x 508 mm x 305 mm
Schichtdicke:	min. 0,02 mm
Auflösung:	x-Achse: min. 600 dpi y-Achse: min. 600 dpi z-Achse: 1600 dpi
Abmessungen:	1420 mm x 1120 mm x 1130 mm



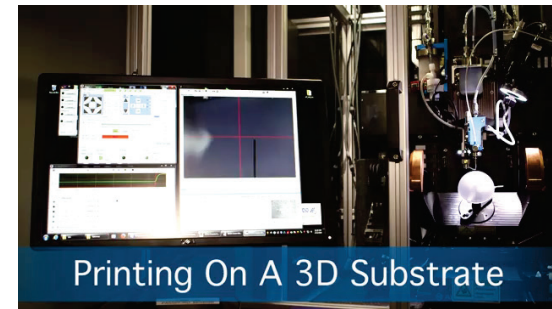
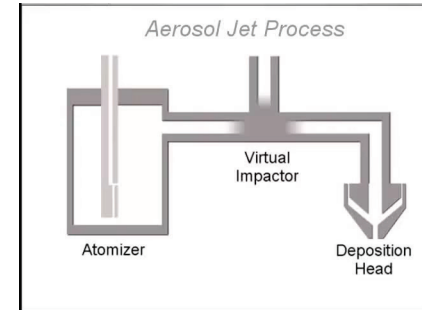
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

AJP: KURZBESCHREIBUNG

Bauprozess	Linie-für-Linie-Auftragen von Aerosol (Gasstrom mit flüssigen Tintenpartikeln, die wiederum feste Bestandteile enthalten) mit unmittelbarem Aushärten Trocknen oder Wärmebestrahlung
Ausgangsmaterial	flüssig/fest: Partikelgeladene Tinte (Metalle)
Bindungsmechanismus	Chemisch/Wärme
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Vektorbasiert
Aktivierungsenergie	Kinetische Energie des Strahls, Trocknen der Lösungsmittel, Wärme
Postprozess	Ggf. Schwalllötten

AJP: AEROSOL JET PRINTING

- Tinte wird im Zerstäuber in Tröpfchen von 1-5 μ m Durchmesser zerstäubt
- Aerosol wird in Düse mit einem Schutz-/Führungsgas (Stickstoff oder Druckluft) umgeben
- Nach 2-5mm trifft der schnelle Materialstrom auf der Oberfläche auf und die Tröpfchen/Partikel legen sich ab
- Typische minimale Auflösungen liegen im Bereich ab 10 μ m
- Durch größere Düsen können Spurbreiten bis in den mm-Bereich erzeugt werden
- Typische Bauhöhen ab 100nm bis mehrere 10 μ m



6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

AJP: ANLAGEN

Anlagentyp:	AJ 5X
Hersteller:	Optomec
Bauraum:	200 mm x 300 mm x 200 mm
Schichtdicke:	min. 0,0001 mm
Auflösung:	Ab 10 μm Spurbreite +/- 2 μm Wiederholgenauigkeit
Abmessungen:	1500 mm x 1000 mm x 2000 mm



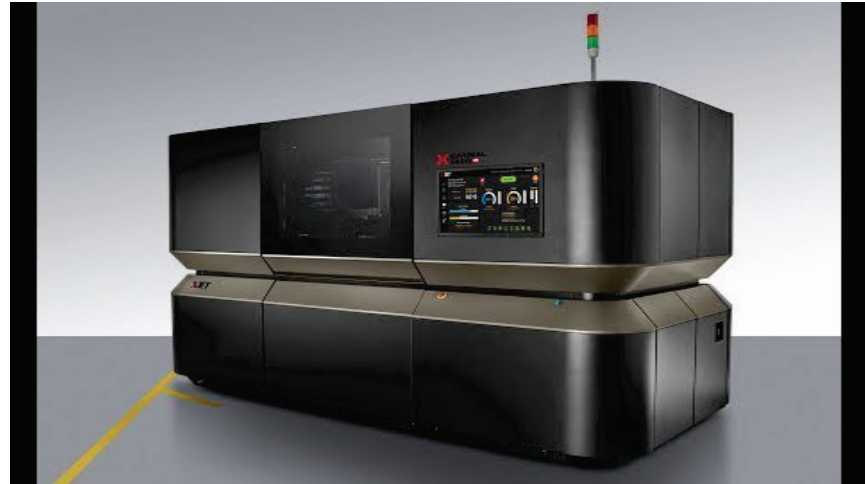
6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

NPJ: KURZBESCHREIBUNG

Bauprozess	Schichtweiser Bauprozess durch Auftragen von Tinte (die feste, i.d.R wenige Nanometer große Bestandteile enthält) mit unmittelbarem Aushärten durch Wärmebestrahlung und nachfolgendem Sintern
Ausgangsmaterial	flüssig/fest: Partikelgeladene Tinte (Metalle, Keramiken)
Bindungsmechanismus	Chemisch/Wärme
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Rasterbasiert
Aktivierungsenergie	Kinetische Energie des Strahls, Trocknen der Lösungsmittel, Wärme
Postprozess	Chemisches Lösen des Supportmaterials, Sintern

NPJ: NANOPARTICLE JETTING

- Ein Druckkopf mit mehreren Tausend Düsen druckt Nanopartikel-beladene Tinte (Baumaterial) und Supportmaterial – es sind metallische und keramische Werkstoffe als Baumaterial verfügbar
- Ein Wärmestrahler verfestigt zunächst einen Grünling durch Verdampfen/Verdunsten des Flüssiganteils
- Der Grünling wird chemisch vom Supportmaterial befreit und anschließend unter hoher Temperatur fertiggesintert (Schrumpfung beachten!)



<https://www.youtube.com/watch?v=dnlXAYvisus&feature=youtu.be>

6 Additive Fertigungsverfahren – Material Jetting

NPJ: ANLAGEN

Anlagentyp:	Carmel 1400M
Hersteller:	XJet
Bauraum:	500 mm x 280 mm x 200 mm
Schichtdicke:	min. 0,007 mm, typ. 0,01-0,015 mm
Auflösung:	24 Druckköpfe á 512 Düsen simultan
Abmessungen:	3100 mm x 1850 mm x 2120 mm





Additive Fertigung

Additive Fertigung 21 – 06-07

Material Jetting

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

