

Praxis - Workshop

3D-Metalldruck – Drucken in der dritten Dimension – umfassend und kritisch.

Wiener Neustadt

03/11/2020

Dr. Markus Hatzenbichler
Gruppenleiter TEC Space – Advanced Manufacturing

Vorstellung der Teilnehmer



FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Kurze Vorstellung des Teilnehmers

Erfahrungen mit 3D-Druck

Erwartungen an den Workshop

Ziele des Workshops



Kenntnis über:

Funktionsprinzipien aller relevanten additiven Fertigungstechnologien

Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie sowie deren typisches Einsatzgebiet

Physikalische und chemische Grundlagen der Schichterzeugung

Grundlagen der fertigungsgerechten CAD Konstruktion

Kostenkalkulation in der additiven Fertigung

Praktische Übungen im 3D-Druck Labor inkl. Besichtigung und Diskussion



Dr. Markus Hatzenbichler

Gruppenleiter
TEC Space – Advanced Manufacturing

Tel. 02622 90333 DW 202
Email. hatzenbichler@fotec.at

2009

Erster Kontakt mit additiver
Fertigung

2009-2014

Institut für Werkstoffwissenschaft
und Werkstofftechnologie, TU Wien

- AMT Gruppe von Prof. Stampfl
- Material- und Prozessentwicklung
- Keramik und Kunststoff AM

seit 2014

FOTEC Forschungs- und
Technologietransfer GmbH

- Technische Projektleitung
- Schulungen und Vorträge
- Metall AM



FIRMENVORSTELLUNG

FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH



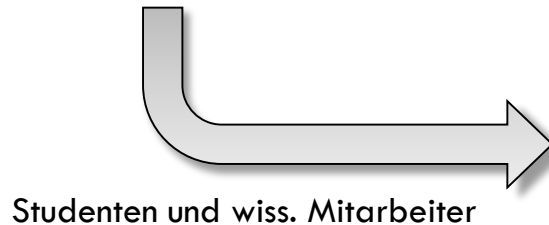
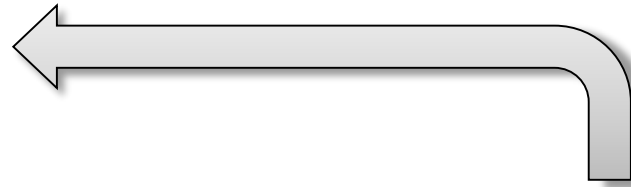
FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Allgemeine Informationen

Das Forschungsunternehmen der Fachhochschule Wiener Neustadt.



Ausbildung
(z.B. Studiengang Mechatronik mit Vertiefung
"Additive Manufacturing")



Eigentümer (100% FH WN)

FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH

Allgemeine Informationen

- Gründungsjahr: 1998
- Betriebsleistung: 3 Mio. EUR
- MitarbeiterInnen: 47
- Zertifiziert nach ISO 9001:2015

FOTEC

Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Geschäftsbereiche



Engineering Technologies

- Additive Manufacturing (3D Printing)
- 3D CAx methods
- Simulation-based topology optimization
- Automated Inspection systems
- Powder Injection Moulding (MIM, CIM)



Innovative Software Systems

- Software development
- Augmented and virtual reality (AR & VR)
- Smartphone APPs
- Parking & traffic
- Product design and development
- Web development / Platform as a Service



Aerospace Engineering

- Satellite propulsion systems
- Satellite potential control devices
- Hydrogen storage systems
- Energy conversion technologies
- Space qualification testing



WIEDERHOLUNG DER WEBINAR INHALTE

Einteilung der Fertigungsverfahren für Metalle

Subtraktive Fertigungsverfahren

Erzeugung der gewünschten Geometrie aus einem Halbzeug durch Abtragen definierter Bereiche (Drehen, Fräsen, etc.)

Formative Fertigungsverfahren

Formung eines gegebenen Volumens in die gewünschte Geometrie (Schmieden, Tiefziehen, etc.)

Additive Fertigungsverfahren (3D-Druck)

Erzeugung der gewünschten Geometrie durch Aneinanderfügen von Volumenelementen (Schichtbauprinzip)

Grundlegende Philosophie der additiven Fertigung

Additive Fertigung ist in der Regel kein Ersatz für subtraktive oder formative Fertigung, sondern eine Ergänzung.

Mehrwert schaffen durch:

- Leichtbau (Topologieoptimierung, Bionik, etc.)
- Funktionsintegration (Kühlkörper, Kopplung, Textur an der Oberfläche, etc.)
- Monolithische Bauweise (Reduktion der Einzelteile, im Idealfall 1 Stück)
- Beschleunigung der Produktentwicklung (Verifikation von Simulation, Haptik, etc.)

Es macht keinen Sinn ausgereifte und konventionell in Massenproduktion hergestellte Produkte additiv zu fertigen!

Beispiel: DIN 933 8.8 M8x20 Sechskantschraube

Relevante Fakten über additive Fertigung

Die additiven Fertigungstechnologien weisen aufgrund des Schichtbauprinzips besondere Eigenschaften auf:

1. Generierung der Schichtgeometrie erfolgt direkt aus den CAD Daten
2. **Kein Einsatz** von produktspezifischen **Werkzeugen** notwendig
3. Erzeugung der **mechanischen Eigenschaften** geschieht **während** des Bauprozesses
4. Bauteile können grundsätzlich in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden (**Entfall der Spannproblematik während der Herstellung**)
 - a) **Vorsicht:** Bei der mech. Nacharbeit ist die Strategie fürs Aufspannen sehr wohl von Bedeutung.
5. Am Markt befindliche Maschinen können mit dem **gleichen Datensatz (STL)** angesteuert werden
 - a) Additive Manufacturing Formt (AMF) wird als Nachfolger-Schnittstelle gehandelt

Vor- und Nachteile der additiven Fertigung

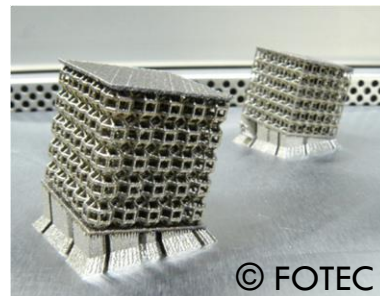


FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

**Hochkomplexe,
bionische Strukturen**

Vorteile

- Hohe Komplexität
- **Keine Werkzeuge** für die Herstellung notwendig
- Geometrieänderungen können rasch umgesetzt werden
- Bauteile aus **schwer zu zerspanenden** Metalllegierungen möglich (Titan)
- **Funktionsintegration**
- Effizienz bei Rohstoffen



© FOTEC



© FOTEC

Rohstoffeffizienz

Nachteile

- Hoher Nachbearbeitungsaufwand
- Prozess langsam und teuer
 - Druckzeiten von mehreren Tagen sind keine Seltenheit
 - Nur bei **voller Auslastung** der Bauplattform ist der Druck **wirtschaftlich**
- Materialauswahl ist beschränkt
 - **18 Metallegierungen** am Markt
 - Auswahl auch technologieabhängig
- **Keine** Plug & Play Technologie (speziell im Bereich Metall 3D-Druck)

Einteilung in direkte und indirekte Fertigung



Direkt

Herstellung von Prototypen

- *Rapid Prototyping*
- *Solid Imaging*
- *Functional prototyping*
- *Prototype tooling*

Herstellung von Funktionsbauteilen
und Werkzeugen

Rapid Manufacturing / Tooling

Indirekt

Abformen von additiv
gefertigten Urmodellen

Indirect Protoyping / Tooling

Einteilung in direkte und indirekte Fertigung

Herstellung von Prototypen

- *Rapid Prototyping*
- *Solid Imaging*
- *Functional prototyping*
- *Prototype tooling*

Produktentwicklung

- Haptik Tests
- Kundenfeedback
- Funktionsüberprüfung (in Prüfständen)

Verifikation von Simulationsergebnissen

- Wind- und/oder Wasserkanaltests
- Mechanische Belastungstests

Einteilung in direkte und indirekte Fertigung

Herstellung von Funktionsbauteilen
und Werkzeugen

Rapid Manufacturing / Tooling

Ersatz von konventionellen Bauteilen

- weniger Einzelteile
- erhöhte Effizienz
- weniger Wartungs- und Montageaufwand
- zusätzliche Funktionalität

Anpassung an geometrische Gegebenheiten

- komplexe Freiformflächen, die den vorhandenen Platz optimal nutzen
- mehr Stabilität durch bionisches Design

Einteilung in direkte und indirekte Fertigung

Abformen von additiv
gefertigten Urmodellen

Indirect Prototyping / Tooling

Negativformen werden additiv
gefertigt und das eigentliche Bauteile
konventionell abgeformt

- Spritzgussformen (Metall)
- Schmiedewerkzeuge
(Metall/Keramik Komposit)
- Klassische Gussformen
(Formsand mit Phenolharz)

Geschichte der additiven Fertigung



FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Die Idee, Objekte durch stapeln von Materialschichten zu erzeugen ist nicht neu, schon im alten Ägypten wurden die Pyramiden mit dem Schichtbauprinzip errichtet.

Die subtraktive Fertigung, z.B. das Fräsen, hat ihre Ursprünge im Jahr 1860 (erstes Patent).

Die additive Fertigung hat ihre Anfänge in den 80er Jahren bzw. Metalldruck erst 1995.
(135 Jahre nach dem ersten Fräsmaschinenpatent)

Geschichte der additiven Fertigung

1981

Grundlagen für die additive Fertigung mittels lichtempfindlicher Kunststoffharze wurden entwickelt

1984

Charles W. Hull gründet 3D Systems Corp. und patentiert sein auf Stereolithographie basierendes System

1988

Scott Crump entwickelt den Fused Deposition Modeling (FDM) Prozess und gründet Stratasys

1995

Fraunhofer Institut in Deutschland entwickelt den Selective Laser Melting (SLM, neue Bezeichnung Laser Beam Melting – LBM) Prozess und Hans Langer gründet EOS

2012

Gründung von Lithoz, lithographie-basierter Keramik 3D-Druck wird kommerzialisiert

Nachteile:

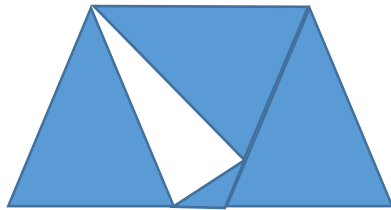
- Information **nur** über die äußere Oberfläche und Gestalt (keine innere Struktur, Farben oder Materialeigenschaften)
- Datenformat kann nur sehr **schwer nachträglich verändert** werden (Dreiecke an der Oberfläche)
- Die STL Datei erreicht meist eine **enorme Größe**, da die Eckpunkte der Dreiecke mehrfach hinterlegt werden
- Keine direkte Umsetzung von gekrümmten Formelementen

STL Format – Typische Fehler bei Konvertierung



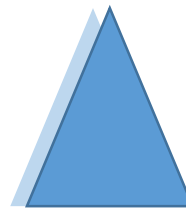
FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Lücken zwischen den Dreiecken



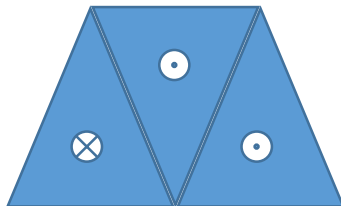
Dreiecke fehlen (Loch im Oberflächenmodell)

Doppelte Dreiecke



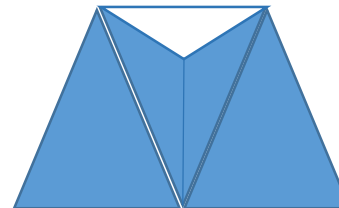
Dreiecke überlagern sich

Falsche Orientierung



Flächennormale falsch orientiert

Falten



Dreiecke ragen aus Oberfläche hervor

**Beispiel für ein ins STL
Format konvertiertes
Bauteil**

Schicht (engl.: Layer)



FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

In der additiven Fertigung ist jedes **Volumen aus einzelnen Schichten** aufgebaut, diese werden direkt aus den CAD Daten generiert. Die **Schichtdicke** hängt vom Verfahren und den gewählten Parametern ab. Um den **Treppeneffekt** zu minimieren wird die Schichtdicke reduziert auf Kosten der Bauzeit.

**Treppeneffekt, typisch für
additiv gefertigte Bauteile**

Schichtweiser Aufbau (engl.: Layer-by-Layer Approach)



Der schichtweise Aufbau bzw. das **Aneinanderfügen von einzelnen Schichten** ist die grundlegende Methodik zur Herstellung von realen Bauteilen in der additiven Fertigung. Die Schichtdicke kann zwischen 100 nm (2-Photonen Lithographie) bis hin zur FDM Variante für den Häuserbau mit 2-4 cm variieren. Weiters ist auch die **Verbindung einzelner Schichten verfahrensabhängig**, typischerweise wird dies über chemische Aushärtereaktionen oder eine Schmelzphase erreicht.

Stützstruktur (engl.: Support)



FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Eine Stützstruktur in der additiven Fertigung erfüllt verschiedene **prozessrelevante Aufgaben** wie z.B. Wärmetransport, Positionierung des Bauteils, Aufnahme von thermisch induzierten Spannungen, etc.

Die **Art und Ausprägung** der Stützstruktur bzw. dessen Material ist **verfahrensabhängig**. Die Entfernung geschieht manuelle, thermische, chemische oder spanende Bearbeitung.

Stützstruktur erfüllt auch die Aufgabe der Wärmeleitung

Faustregel:
Ab 45° Überhang
muss Stützstruktur
angebracht werden

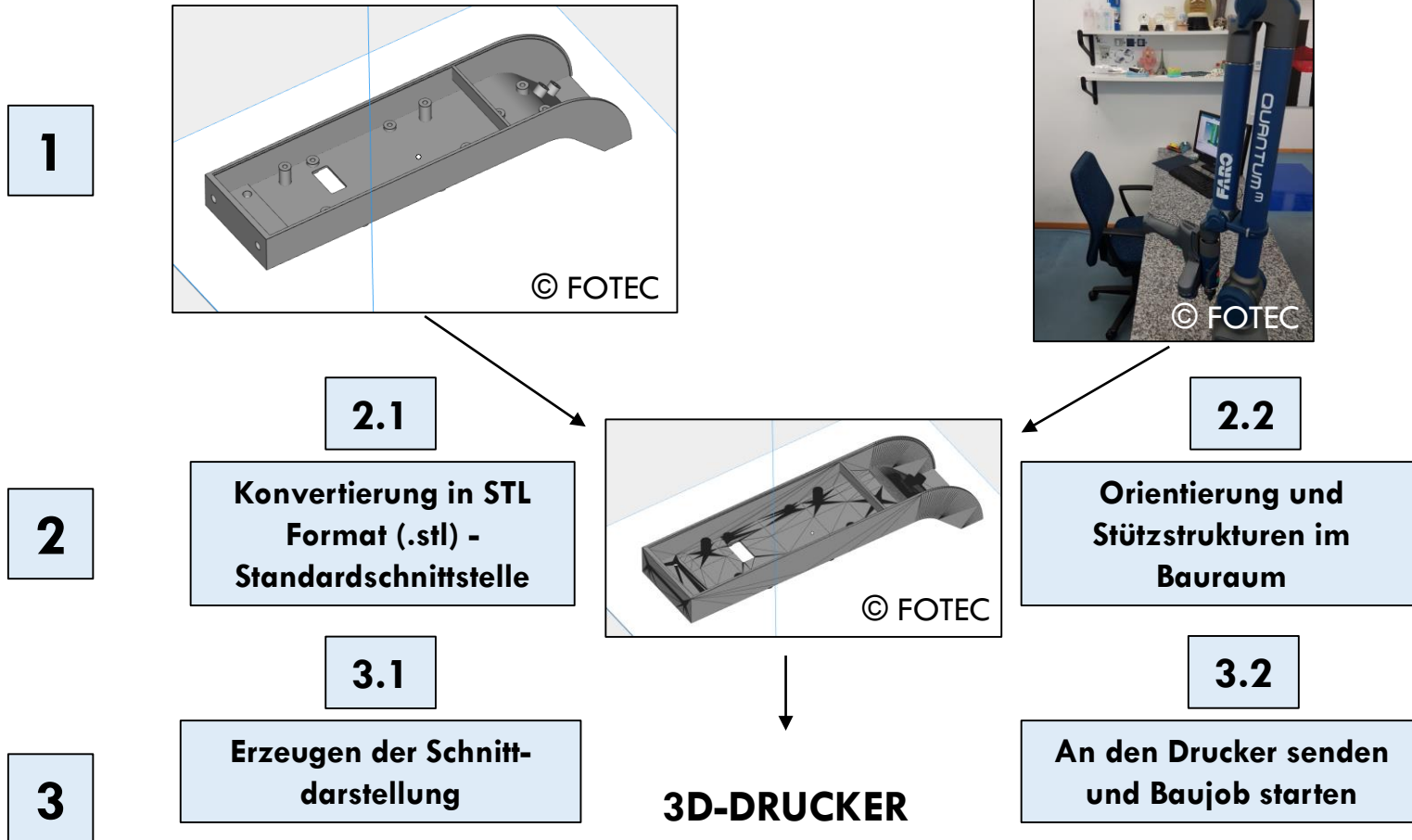
Prozessvorbereitung (engl.: Pre-processing)



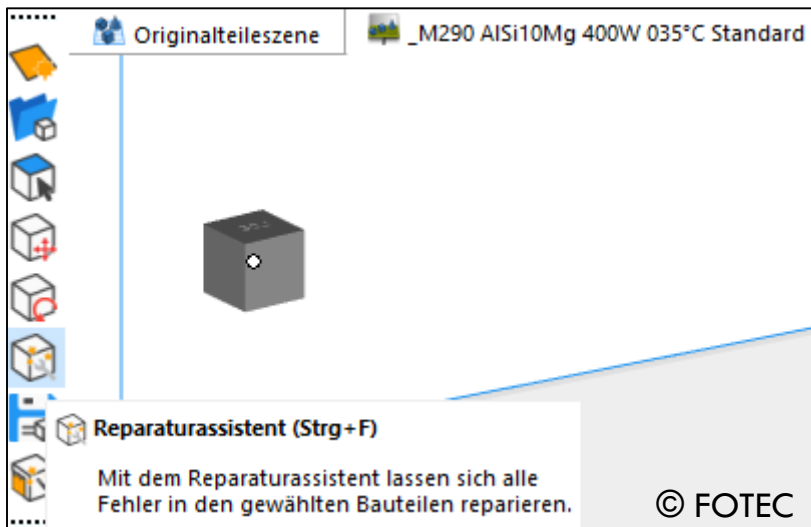
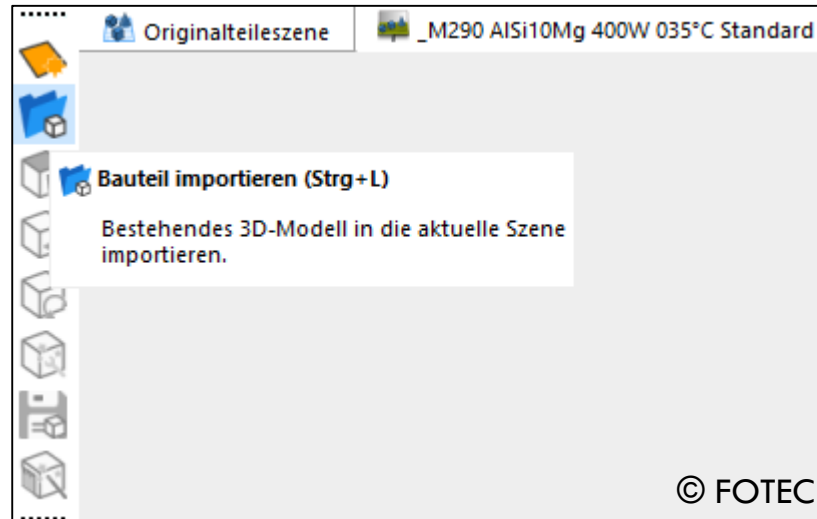
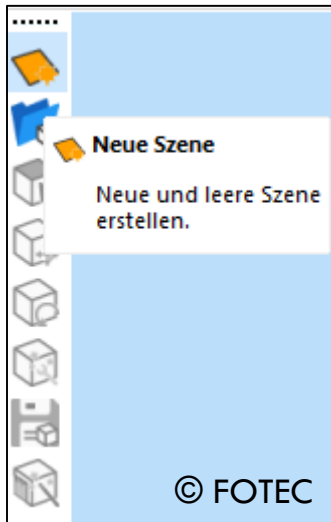
FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Option 1: CAD Software

Option 2: 3D Scanner



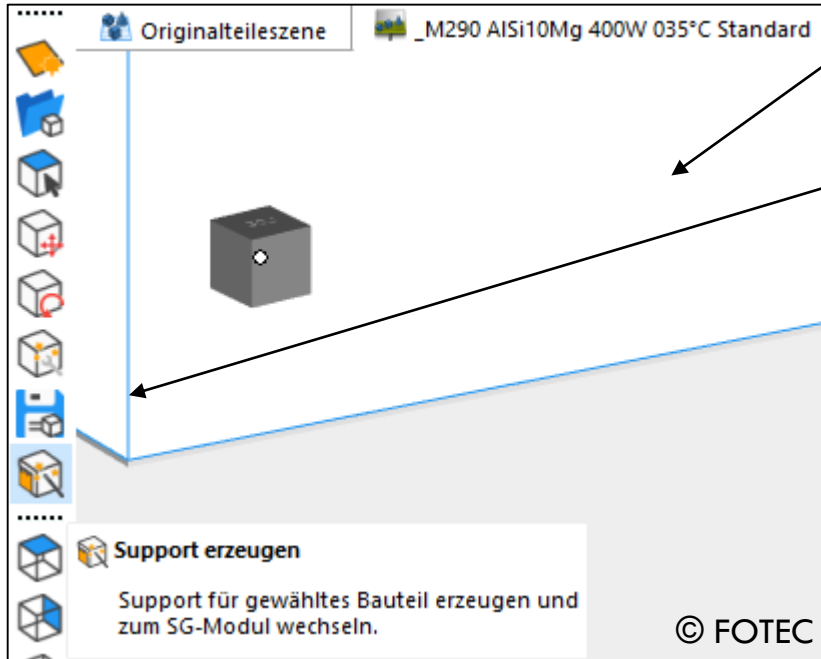
Prozessvorbereitung (engl.: Pre-processing)



Die *3D Print Suite* von Materialise Magics verfügt über eine **herstellerspezifische Symbolleiste**, die schrittweise durchlaufen wird vom Wählen des Druckers bis zur Generierung der Stützstrukturen.

Geladene Bauteile können verschoben, gedreht, repariert und kopiert werden.

Prozessvorbereitung (engl.: Pre-processing)

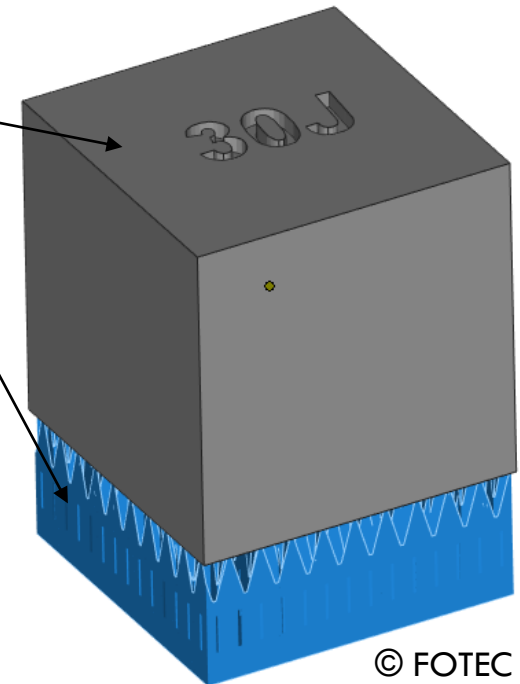


Bauplatzform (weiß)

Max. Bauvolumen (blaue Linien)

Bauteil (Testwürfel)

Stützstruktur



Die Stützstrukturen werden automatisch generiert und können im Support-Editor (SG-Modul) beliebig geändert und angepasst werden.

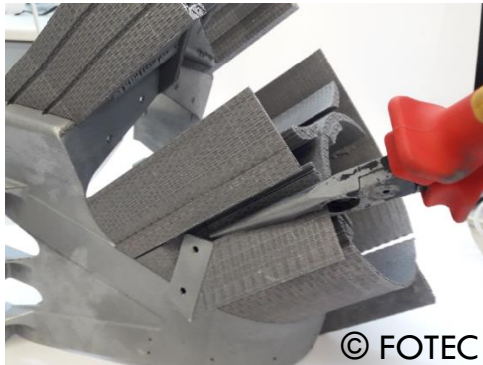
Sollbruchstellen an der Kontur, ein wabenförmiger Aufbau und die seitlicher Perforation dienen der leichteren Entfernung nach dem Druckvorgang.

© FOTEC

Nacharbeit – Metall (engl.: Post-processing)

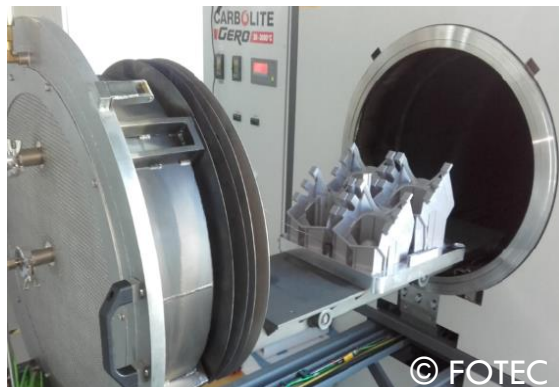
Entfernen der Stützstrukturen

Manuelle Entfernung (Zange, Dremel, etc.)
Automatische Entfernung (Elektro-chem. Ätzen)



Wärmebehandlung

AlSi10Mg: 300°C, 2h, norm. Atmosphäre
Ti6Al4V: 800°C, 4h, Argon



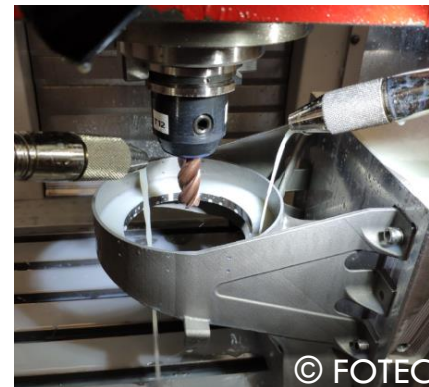
Rezyklieren des Restmaterials

Ultraschall-Sieb (Maschenweite 63 µm)



Bearbeitung von Funktionsflächen

Subtraktive Bearbeitung
Typisches Aufmaß von 500 µm



Nacharbeit – Kunststoff (engl.: Post-processing)

Entfernen der Stützstrukturen

Manuelle Entfernung (Zange, Spachtel)

Automatische Entfernung (Erhitzen oder wasserlöslich)

Nachhärtung im UV Ofen

speziell für Stereolithographie erforderlich

Rezyklieren des Restmaterials

- Überschüssiges, flüssiges Photopolymer wird ohne zusätzliche Behandlung wiederverwendet (SL)
- Extrudiertes Kunststoff-filament kann nicht wiederverwendet werden (FDM)

Bearbeitung von Oberflächen

- Abschleifen und lackieren
- Einkleben von Gewindeeinsätzen, etc.



3D-DRUCK LABOR FÜHRUNG

Typische Werkstoffe in der additiven Fertigung



FOTEC
Forschungsunternehmen
-der FH Wiener Neustadt-

Thermoplaste: Kunststoffe, die sich in einem bestimmten Temperaturbereich thermoplastisch verformen lassen und dieser Vorgang reversibel bzw. beliebig oft wiederholbar ist ohne einer thermischen Schädigung des Materials.

Photopolymere: Polymer, dass seine Eigenschaften ändert, wenn es mit Licht aus dem UV-VIS Bereich des elektromagnetischen Spektrums bestrahlt wird. Es handelt sich um eine strukturelle Änderungen, wie z.B. die photochemische Härtung des Materials durch Vernetzung (radikalische Polymerisation).

Techn. Keramik: Keramik ist von großer Bedeutung als Schneidwerkstoff in der zerspanenden Fertigung und für Hochtemperaturanwendungen. Meist werden weiße, leicht transparente Oxidkeramiken (z.B. Al_2O_3) verwendet. Es gibt keine direkte additive Verarbeitung, es ist ein 2-stufiger Prozess (über eine Polymerbinderphase) notwendig.

Metalle: Für Laser- und Elektronenstrahl basierte 3D-Drucksysteme sind gut schweißbare Metalllegierungen notwendig, andere Verfahren verarbeiten bspw. hochschmelzende Metalle mittels Sintervorgang im Post-Processing.

Zustand der Materialien bei Anlieferung

Pulver (Technologien: LBM, SLS)

- sphärische Form
- hohe Fließfähigkeit
- mittlerer Durchmesser ca. 30-40 μm
- Anteil an Grobpartikeln für Lagerstabilität
- Anteil an Feinpartikeln für hohe Schüttdichte

Filament (Technologie: FDM)

- 1 kg Material pro Rolle sind üblich
- Filamentdicke 1,75 mm oder 2,85 mm
- Offene oder gekapselte Rollen

Zustand der Materialien bei Anlieferung

Flüssigkeit (Technologien: PJP, SL)

- Mittlere Viskosität
- Lagerung in lichtgeschützten Gebinden
- Gefüllt (mit Füllstoffen wie Keramikpulver) und ungefüllte (reines Photopolymer) Varianten

Formsand (Technologie: BJP)

- Handelsüblicher Quarzsand
- Typische Größenfraktion für Gussformen (ca. 140 μm)
- Phenolharz Binder wird separat geliefert



Marktanteile der einzelnen Materialgruppen

- Marktgröße für additive Materialien lag 2019 bei 1,63 Mrd. EUR (lt. Wohlers Report 2020)
- Kunststoffe bilden mit 80,6 % den überwiegenden Anteil der weltweit verkauften und additiv verarbeiteten Materialien
- Exponentielle Steigerung des Marktvolumens in den letzten Jahren

Materialkosten (nur Richtwerte)



Metalle	Preis pro kg
Ti6Al4V (LBM)	XY €
AlSi10Mg (LBM)	XY €
1.2709 (Werkzeugstahl, LBM)	XY €
1.4540 (Edelstahl, LBM)	XY €

Kunststoffe	Preis pro kg
PA12 (SLS)	XY €
R11 (SL)	XY €
VeroBlue (PJP)	XY €

Keramik	Preis pro kg
LithaLox 350D (DLP-SL)	XY €



IMPLEMENTIERUNG VON ADDITIVER FERTIGUNG

Die Inhalte dieses Abschnitts wurden zum Teil aus folgender Literatur entnommen:

Titel:

Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung

Autoren:

Christoph Klahn und Mirko Meboldt

Verlag:

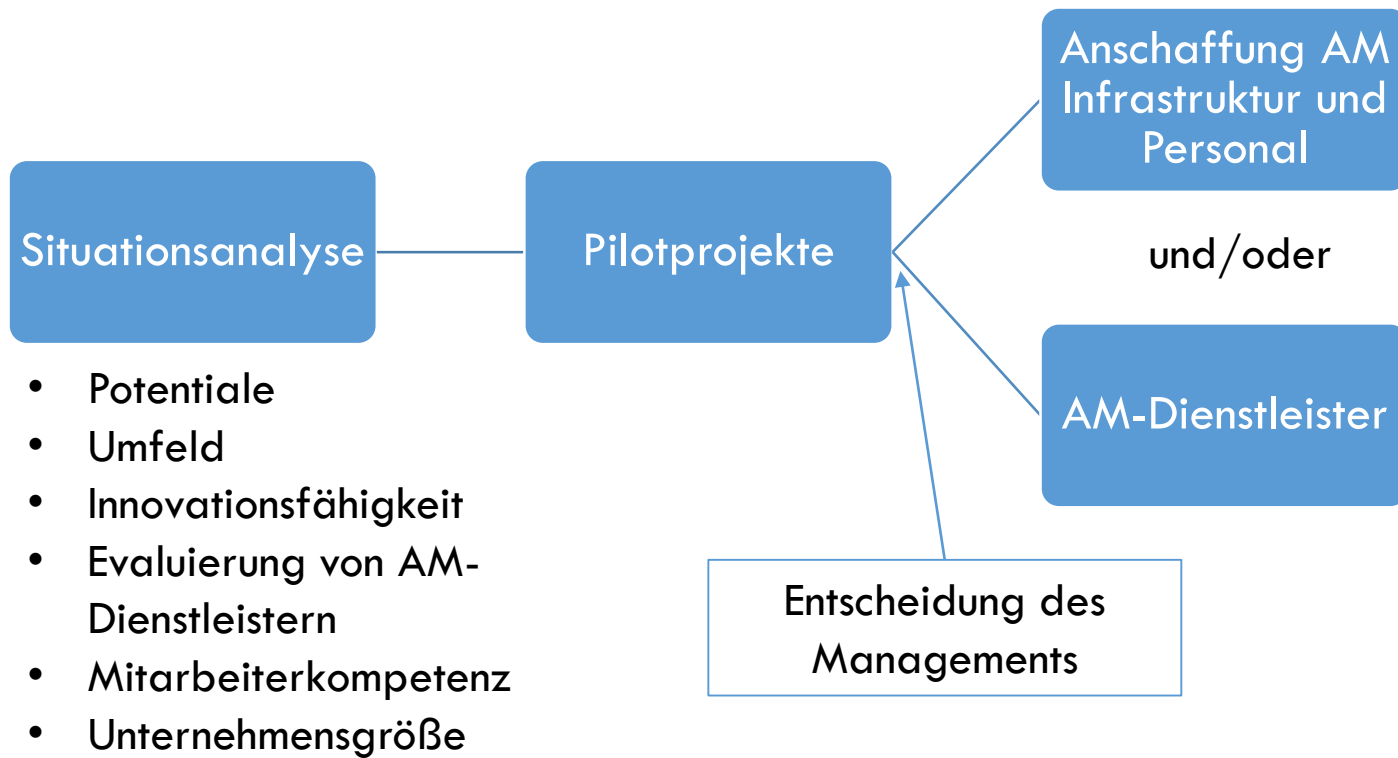
Vogel Business Media GmbH & Co. KG
Würzburg (DE)

ISBN:

978-3-8343-3395-7

Implementierung von additiver Fertigung

Ablauf der Entscheidungsfindung



Situationsanalyse

Die Situationsanalyse verschafft ein **Bild der aktuellen Situation des Unternehmens** und kann mögliche zukünftige Entwicklungen und Trends identifizieren, die additive Fertigungsmethoden bedienen können.

Innovation

Beim interventionsfähigen System kann und **muss das Unternehmen aktiv Maßnahmen** für die Implementierung der AM **ergreifen** und das fragliche Produkt wie auch die zugehörigen Prozesse anpassen. Analysiert werden interne Prozessabläufe und vom Unternehmen entwickelte Produkte.

Essentiell ist die Frage wie gut es einem Unternehmen gelingt neues Wissen umzusetzen, sprich wie **innovationsfähig** es ist.

Situationsanalyse

Unternehmensgröße

Die **Größe des Unternehmens** spielt eine entscheidende Rolle, denn sie beeinflusst unmittelbar die Zeit, die notwendig ist, um neues Wissen ausreichend intern zu kommunizieren und zu verinnerlichen. Kleinere Unternehmen können diese Schritte üblicherweise schneller umsetzen und sind infolgedessen auch schneller in der Einbindung.

3D-Druck (AM) Dienstleister

Ein besonderer Faktor ist die örtliche Verfügbarkeit von **AM-Dienstleistern** und eine gute Zusammenarbeit mit diesen. Der Fremdbezug ist die einfachste Möglichkeit, Zugang zu AM-Technologien zu erhalten, da sie Investitionen in eigenes AM Equipment überflüssig zu machen.

Als erster Schritt empfiehlt es sich hier, dass wenigstens ein Mitarbeiter im Einkauf das notwendige Basiswissen über additive Fertigung erwirbt. Da der reibungslose Informationsaustausch zwischen Unternehmen und AM Dienstleister elementar ist.

Situationsanalyse

Die Umstellung auf additive Fertigungsverfahren erfordert eine neue Planung von Produktion und Qualitätskontrollmechanismen, und zwar unabhängig davon, ob sie in Eigenproduktion oder Fremdbezug zum Einsatz kommen.

Umfeld

Das Umfeld auf der anderen Seite bezeichnet Faktoren, die zwar Auswirkungen auf das Unternehmen haben können, sich aber außerhalb seiner direkten Kontrolle befinden. Diese Faktoren können zum Beispiel technische Fortschritte in den additiven Fertigungstechnologien, Material oder die Kooperation mit AM Dienstleistern sein, aber auch im weiteren Sinne Zulieferer, Kunden, Wettbewerber oder aktuelle Markttrends.

Situationsanalyse

Die **Bereitschaft zum Experimentieren** ist ein entscheidender Faktor für die erfolgreiche Einbindung von additiven Verfahren. Angesichts der fehlenden Standardisierung dieser Prozesse muss das Unternehmen bereit sein, eigene Tests durchzuführen, um produktionsfähige Lösungen zu erreichen.

Kein Plug & Play

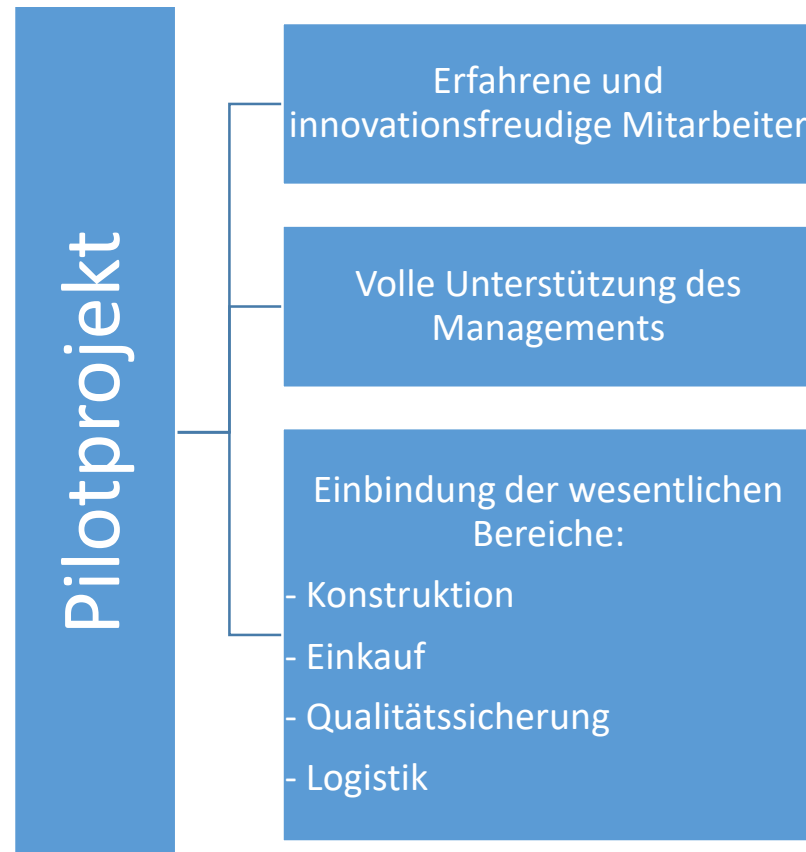
Der aktuelle Stand der Prozesse erlaubt keine intuitive Handhabung der additiven Fertigung aufbauend auf dem Wissen aus der konventionellen Fertigung.

CAD System

Abschließend sei hier erwähnt, dass moderne CAD-Systeme, die eine AM-fähige Bauteilgestaltung unterstützen, elementar für die Implementierung sind.

Pilotprojekte

- Pilotprojekte dienen dem Unternehmen als Lernwerkzeuge
- Beherrschbare Komplexität
- Kommerziell verfügbare Technologien und Materialien basieren
- Maximaler Lerneffekt und vergleichsweise schnelle Ergebnisse erhöhen die Motivation und Akzeptanz im Unternehmen
- Zeitspanne üblicherweise bei 6 bis 8 Monaten



Einbindung der Mitarbeiter bei der Implementierung von AM

Der Einstieg in neue Technologien ist immer mit Hürden verbunden, dabei ist der Faktor Mensch nicht zu unterschätzen. Für Innovationen, die auf der additiven Fertigung beruhen, müssen bestehende Konstruktionen und Wertschöpfungsketten grundlegend infrage gestellt und neu gedacht werden.

Promotoren:

Mitarbeiter, die der AM-Technologie im Kontext des Unternehmens ein hohes Wertschöpfungspotential zuordnen. Promotoren gehören zum Kernteam in Pilotprojekten.

Skeptiker:

Mitarbeiter, die zwar offen für Veränderung sind, jedoch technologische Vorbehalte haben und vom Wertschöpfungspotential nicht überzeugt sind.

Einbindung der Mitarbeiter bei der Implementierung von AM

Bremser:

Mitarbeiter, die das wirtschaftliche und technologische Potential positiv bewerten, jedoch persönliche Vorbehalte gegenüber der AM Technologie haben. Sie sind oft verunsichert, da ihnen das notwendige Wissen fehlt. Durch gezielte Schulungen können Bremser zu Promotoren gemacht werden.

Gegner:

Mitarbeiter, die additive Verfahren sowohl persönlich wie auch technologisch negativ bewerten. Diese Gruppe braucht Zeit um sich mit der Technologie vertraut zu machen. Nach erfolgreichen Pilotprojekten werden Gegner oft zu Skeptikern oder Bremsern.

Beschleunigung des Wissenstransfers durch ETM (Erfahrungs-Transfermodell)

Eine Voraussetzung für das Pilotprojekt-basierte Vorgehen ist die Fähigkeit des Unternehmens, **selbstständig die notwendigen Kenntnisse über AM aufzubauen und anzuwenden**. So kann etwa Konstrukteuren der Gebrauch von AM-Maschinen ermöglicht und die Mitarbeiter können ermutigt werden, an kurzzeitigen 3D-Druckprojekten teilzunehmen.

Alternativ dazu bietet es sich an auf externe Partner (Universitäten, Forschungseinrichtungen, etc.) zu setzen um Expertise aufzubauen.

Beschleunigung des Wissenstransfers durch ETM (Erfahrungs-Transfermodell)

Teil 1: Expertise in der Bauteilauswahl

Bevor die Teilnehmer im unternehmensinternen Produktportfolio nach einem für AM geeigneten Bauteil suchen können, müssen sie das **notwendige Basiswissen** besitzen. Dies sind zum Beispiel Informationen darüber, welche **Materialien** zur Verfügung stehen und welche **Bauteilgrößen** realisierbar sind. Der erste Schritt im ETM ist daher das Vermitteln dieses expliziten Wissens in Form von **Kick-off Workshops**.

Für die Bauteilauswahl relevant sind die **technische Durchführbarkeit**, die **Notwendigkeit von Post-Processing**, eine grobe **Abschätzung der Kosten** und eine **Bewertung möglicher Vorteile** für das Unternehmen oder den Kunden. Auswahlkriterien können anhand von Demonstratoren veranschaulicht werden.

Die **Dokumentation identifizierter Bauteile** kann über vorgefertigte Formulare erfolgen. Später werden die Bauteilvorschläge durch AM-Experten bewertet und Feedback an die Mitarbeiter ausgegeben um die eigene Arbeit evaluieren zu können.

Beschleunigung des Wissenstransfers durch ETM (Erfahrungs-Transfermodell)

Teil 2: Design Expertise

Für einen Ingenieur ist dieses Erfahrungswissen essentiell, um das volle Potential der additiven Fertigung auszuschöpfen und Kosten zu reduzieren.

Im Rahmen von Workshops werden **Gestaltungsprinzipien** und **Verfahrensmerkmale** erlernt. Beispiele aus der Industrie sind dabei sehr hilfreich.

Implizites Wissen wird durch eine gemeinsame **Konzeptentwicklung** eines potentiellen AM Bauteils generiert.

Verfahrensmerkmale in der additiven Fertigung

Schichtweiser Aufbau

Das zentrale Merkmal der additiven Fertigung ist der aufbauende Charakter der Herstellung. Die Fertigung der Bauteile erfolgt werkzeuglos und schichtweise durch selektive Materialzuführung und -verfestigung in Aufbaurichtung.

Treppenstufeneffekt

Bedingt durch den schichtweisen Aufbau ist ein so genannter Treppenstufeneffekt unvermeidbar, der 2D-Schichtinformation wird eine Schichtdicke zu gewiesen, der Effekt verstärkt sich direkt proportional zur Schichtdicke.

Daher wird versucht die Schichtdicke wirtschaftlich vertretbar niedrig zu halten (z.B. LBM Verfahren: 20-90 μm)

Verfahrensmerkmale in der additiven Fertigung

Werkstoffe

Es gibt bereits eine Vielzahl von Werkstoffen, die mittels additiver Fertigung prozessiert werden können. Die Spannweite reicht von Wachsen über Kunststoffe, bis hin zu Metallen und Keramiken. Das physikalische Prinzip der Schichterzeugung des jeweiligen Verfahrens ist dabei entscheidend.

Verfahrensmerkmale in der additiven Fertigung

Anisotropie

Die Anisotropie von Werkstoffen beschreibt die Richtungsabhängigkeit ihrer Eigenschaften. Die Lage der Schichten bezogen auf die Belastungsrichtung sind dabei entscheidend.

Vertikal („stehend“) hat meist schlechtere Werte als horizontal („liegend“).

Eigenspannungen und Verzug

Eigenspannungen sind werkstoff- und abmessungsabhängige mechanische Spannungen, die im Inneren eines Bauteils herrschen. Es stehen sich Bereiche von Zug- und Druckspannungen gegenüber. Es kommt zu einem Aufbiegen („Curl-Effekt“).

Verfahrensmerkmale in der additiven Fertigung

Supportstrukturen (Stützstrukturen / Hilfsgeometrien)

Die Stützstrukturen erfüllen in der additiven Fertigung mehrere Aufgaben, hauptsächlich sind sie notwendig um mechanische Stabilität, Wärmetransfer und Vermeidung von Verzug zu gewährleisten.

Restmaterial

Bei den meisten additiven Fertigungsverfahren wird das Rohmaterial (Pulver, Flüssigkeit) schichtweise im gesamten Bauraum aufgetragen und anschließend in den vorgesehenen Bereichen selektiv Werkstoffzusammenhalt erzeugt. Das nicht verfestigte Material wird als Restmaterial bezeichnet.

Je nach Technologie kann das Restmaterial zur Ganze wiederverwendet werden oder muss wie bei SLS (Selective Laser Sinterung für Kunststoffe) zu 50 % aufgefrischt werden.

Verfahrensmerkmale in der additiven Fertigung

Mögliche Auflösung

- Digitale Auflösung

Die digitale Auflösung wird bei der Erstellung des 3D-CAD Modells festgelegt, bspw. entspricht bei voxel-basierten Formaten die Auflösung der Kantenlänge eines Voxels.

- Physikalische Auflösung

Die physikalische Auflösung beschreibt die Grenzen der jeweils kleinstmöglich produzierbaren Geometrien. Diese sind wesentlich vom additiven Fertigungsprozess und der Anlagenpräzision abhängig.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Funktionsorientierte Gestaltung

Im Gegensatz zu subtraktiver Fertigung, die immer von einem bestehenden Halbzeug ausgeht, kann hier funktionsorientiert gestaltet werden.

Funktionsintegration

Die Generierung von Mehrwert durch die Integration von Funktionalität.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Frühzeitiges Festlegen der Bauteilorientierung

Die Festlegung der Bauteilorientierung um Bauraum der AM-Maschine – und damit auch die Festlegung der Aufbaurichtung – hat aufgrund der schichtweisen Fertigung und der ggf. notwendigen Stützstrukturen einen erheblichen Einfluss auf Qualität, Maßhaltigkeit, Material und Oberflächenbeschaffenheit sowie Kosten und Funktion. Das Vorgehen, die Bauteilorientierung erst nach dem CAD-Design festzulegen, ist für den Prototypenbau noch akzeptabel, da dort in der Regel das Bauteil nicht für additive Verfahren ausgelegt ist. In der additiven Fertigung ist dies nicht zielführend, da oft nach der Orientierung erneut eine Design-Iteration durchgeführt werden muss.

Zu achten ist bspw. auf:

- Notwendigkeit von Stützstrukturen
- Maßtoleranz
- Anisotropie
- Eigenspannungen und Verzug
- etc.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Materialminimalismus

Die Fertigungskosten setzen sich hauptsächlich aus Material und Bauzeit zusammen. Durch Einsparungen beim notwendigen Material können die Kosten optimiert werden. Hier setzt man häufig auf die software-gestützte Topologieoptimierung.

Vermeidung von Stützstrukturen

Die Notwendigkeit von Stützstrukturen ist verfahrensabhängig. Der erhöhte Materialbedarf, verlängerte Fertigungszeiten und die oft aufwendige Entfernung der Stützstrukturen nach dem Fertigungsprozess verursachen Kosten und Aufwand. Dies gilt es zu minimieren.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Vermeidung von Stützstrukturen

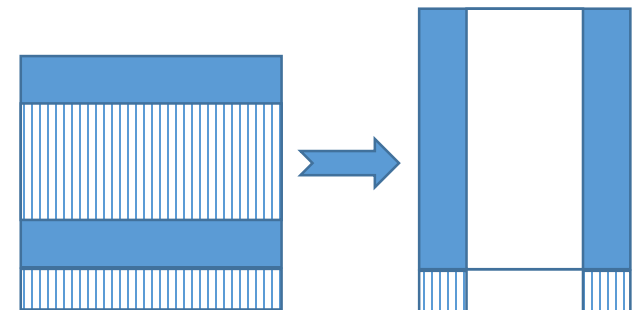
Zwei verschiedene Ansätze sind grundsätzlich möglich:

Re-Design des Bauteils

- Tropfenform von Bohrungen
- Schrägen (mind. 45°) an Überhängen

Bauteilorientierung

- Drehung des Bauteils in eine Position mit weniger Bedarf an Stützstrukturen



Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Vermeidung von Verzug

Ein durch **Eigenspannungen induzierter Verzug** reduziert die Maßhaltigkeit des Bauteils und kann zum Ausschuss oder hohem Nachbearbeitungsaufwand führen. In extremen Fällen **verursacht Verzug den Abbruch** des Baujobs. Um dies zu verhindern sollte der Konstrukteur einem Verzug möglichst bereits beim CAD Design entgegenwirken.

Eine Anpassung ist nur dann möglich, wenn die Funktion des Bauteils nicht oder in akzeptablem Ausmaß beeinflusst wird.

Der **sprunghafte Anstieg** von Flächen in Aufbaurichtung sollten vermieden werden.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Vermeidung von Verzug

Zwei verschiedene Ansätze sind grundsätzlich möglich:

Re-Design des Bauteils

- Schrägen (mind. 45°) für mehr Stabilität (bzw. weniger Stützmaterial)
- Gegenseitig stabilisierende Verstreben einbauen
- Dünnwandige Struktur von Vorteil

Pre-Deforming durch Simulation

- Verzug wird gemessen und das CAD-Modell entsprechend deformiert

<https://www.youtube.com/watch?v=zeuxWK1ICzg>

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Vermeidung von Verzug

Zwei verschiedene Ansätze sind grundsätzlich möglich:

Laserparameter und Belichtungsstrategie

- Verwendung von Schachbrettbelichtung („Chess“)
- Homogenere Temperaturverteilung bei großen Bauteilen

Massive Stützstrukturen und Wärmebehandlung

- Verstärkung der Stützstrukturen (Anker)
- Erhöhung der Temperatur und Dauer (Wärmebehandlung im Post-Processing)

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Integrierte Halbzeuge und Komponenten

Die Herstellung von komplexen Geometrien ist eine der Stärken der additiven Fertigung. Einfache Strukturen hingegen können schneller und vor allem kostengünstiger mit konventioneller Fertigung hergestellt werden. Es empfiehlt sich daher der Hybrid-Ansatz.

Konstruktiver Toleranzausgleich

Die Fertigungstoleranzen sind verfahrens- und materialabhängig und überschreiten meist die Spezifikationen von Passungen, was den Einsatz von konventioneller Nacharbeit notwendig macht. In bestimmten Fällen können bspw. Federelemente eingesetzt werden um Toleranzen auszugleichen.

Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien

Entfernung von Restmaterial ermöglichen

Es muss bei der Konstruktion stets darauf geachtet werden, dass Restmaterial (z.B. Metallpulver) aus Kanälen oder Hohlräumen nach dem Druck entfernt werden kann. Hierzu werden bspw. Hohlräume mit einem Loch versehen um Materialreste zu entfernen.

Nachbearbeitung sicherstellen

Durch den großen Gestaltungsspielraum sind Bauteile für die additive Fertigung oft deutlich komplexer als jene der konventionellen Fertigung. Die Komplexität erschwert jedoch die Nacharbeit, es fehlen in vielen Fällen parallele Flächen für Aufspannungen oder die Struktur des Bauteiles ist zu filigran für den Druck des Maschinenschraubstocks.

Gestaltungsrichtwerte

Gestaltungsrichtwerte dienen als Orientierungswerte für die Dimensionierungen und konkrete Ausgestaltung von Bauteilen für die additive Fertigung. Es sind geometrie-spezifische Kenngrößen, die von den jeweilig eingesetzten additiven Verfahren, Anlagen, Prozessparameter und Material abhängig sind.

Viele Kennwerte sind richtungsabhängig.

Wandstärke

Die Wandstärke ist vom Aspektverhältnis, Material und der physikalischen Auflösung abhängig.

- FDM Verfahren Material: ABS Plus $d_{xy} = 1,6 \text{ mm}$
- LBM Verfahren Material: 316L $d_{xy} = 0,4 \text{ mm}$

Gestaltungsrichtwerte

Freiwinkel

Der Freiwinkel α beschreibt jenen Überhangswinkel, der ohne Stützstrukturen aufgebaut werden kann.

- FDM Verfahren Material: ABS Plus $\alpha = 44,4^\circ$
- LBM Verfahren Material: Ti6Al4V $\alpha = 40,0^\circ$

Spaltbreite

Die minimale Spaltbreite bezieht sich in der Regel auf konstante, meist geradlinige Spaltgeometrien.

Problematisch dabei ist das Verkleben bzw.

Verschmelzen von Restmaterial im Spalt, dies mindert die Möglichkeiten zur vollständigen Entfernbarekeit.

- FDM Verfahren Material: ABS $bz = 0,4 \text{ mm}$
- LBM Verfahren Material: 316L $bz = 0,1 \text{ mm}$

Gestaltungsrichtwerte

Kanaldurchmesser

Wesentlich dabei ist der minimale Durchmesser, der vollständig von Restmaterial befreit, sowie der maximale Durchmesser, der noch ohne Stützstrukturen gebaut werden kann (Die Kanallänge muss ebenfalls berücksichtigt werden).

- FDM Verfahren Material: ABS dz (min) = 2,0 mm do (max) = 9,0 mm
- LBM Verfahren Material: 316L dz (min) = 0,7 mm do (max) = 7,0 mm

Gestaltungsrichtwerte

Überhang

Die maximale Überhangslänge, die ohne Stützstrukturen aufgebaut werden kann, ist nur bei Verfahren von Bedeutung, die eben solche Strukturen benötigen.

- FDM Verfahren Material: ABS Plus $l_{xy} = 2,0$ mm
- LBM Verfahren Material: 316L $l_{xy} = 1,6$ mm
- LBM Verfahren Material: Ti6Al4V $l_{xy} = 0,3$ mm

Materialkennwerte

Die für Auslegung und Dimensionierung benötigten Materialkennwerte, z.B. Zugfestigkeit (R_m) oder Streckgrenze ($R_p 0.2$), werden von Anlagenherstellern in Datenblättern bereitgestellt. Es empfiehlt sich jedoch eine firmeninterne Materialdatenbank zu erstellen, da es zu Abweichungen von den Werksangaben kommen kann.

Folgende Punkte sollen je Bauteil diskutiert werden:

1. Stützstruktur-Konzept
2. Funktionsintegration
3. Beurteilung der Verzugsproblematik
4. Wirtschaftliche Betrachtung (Einzelteil und Serienfertigung)
5. Alternative Fertigungsstrategie



PRAKTISCHE ÜBUNGEN IM 3D-DRUCK LABOR

Abschließende Diskussion und Feedback

Umfrage zu DIH-OST:

Dauer: ca. 5 min



DIHOST 936849

<https://fachhochschulestpoelten.limequery.org/936849?lang=de>

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Markus Hatzenbichler

Gruppenleiter

TEC Space – Advanced Manufacturing

Viktor Kaplan-Strasse 2 | 2700 Wiener Neustadt | Austria

+43 26 22 90 333 202

hatzenbichler@fotec.at

www.fotec.at

