

# Industriearbeitskreis Light Alliance

*4./5. Light-Manufacturing & Light-Factory*



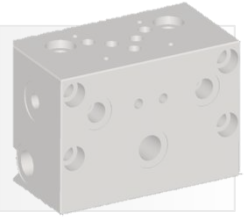
**Light Alliance**

# In 5 Schritten zum Light-Produkt



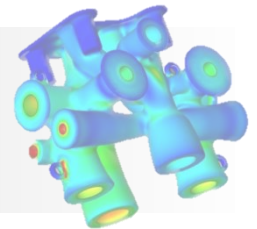
## Step 1 Light-Functionality

- Hinterfragung und Optimierung des bisherigen Funktionsumfangs
- Erweiterung des Funktionsspektrums
- Funktionsintegration



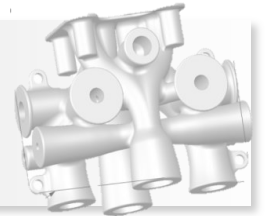
## Step 2 Light-Design

- Umsetzung und Bewertung mehrerer Bauteilkonzepte
- Minimierung des Bauteilgewichts und Sicherstellung aller Funktionalitäten



## Step 3 Light-Prototyping

- Prototypenfertigung
- Überprüfung von Haptik und Handling
- Finalisierung des Designs



## Step 4 Light-Manufacturing

- CAD Fertigungszeichnungen
- CAM Anbindung
- Gestaltung Fertigungsprozess
- Fertigung von Realbauteilen



## Step 5 Light-Factory

- Benchmark
- Herstellungsverfahren
- Maschinen
- lasertechnische Aspekte
- Werkstofffragen
- Herstellkosten





**Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit**  
Prozesse in der künftigen Serienfertigung

**Light-Manufacturing & Light-Factory:**  
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

**Finale Demonstratoren**



## **Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit** Prozesse in der künftigen Serienfertigung

### **Light-Manufacturing & Light-Factory:** Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

### **Finale Demonstratoren**

# Qualität, Kosten, Zeit in der künftigen Serienfertigung



*Datenvorbereitung  
Fertigungsvorbereitung  
Material*

*Durchführung SLM*

*Trennen von Plattform,  
Supports, Wärme-  
behandlung, Finish*

## Kosten

Ziel

- Vollautomatisierte Baujob-Vorbereitung

- Deutlich höhere Produktivität
- Senkung Anlagen- und Materialkosten

- Automatisiertes Handling entlang der Prozesskette

Ansätze

- Automatisierte Schnittstelle CAD/CAM
- Standardsupports

- Neue Anlagenkonzepte & Belichtungsstrategie
- Optimierung der Pulverherstellung

- Roboterhandling
- Tooling-Points für Nachbearbeitung
- Supportentfernen durch Laser

## Zeit

Ziel

- Automatisierte PPS bzw. Baujobplanung

- Vermeidung von Rüstzeit & Stillstand
- Maximale Anlagenverfügbarkeit

- Optimale Dimensionierung der Kapazitäten in der Prozesskette

Ansätze

- Bisherige Ansätze der konventionellen Fertigung adaptieren

- Automatisierung von Material- und Platten
- Technische Stabilität der Anlage
- MTTR

- Engpassplanung

## Qualität

Ziel

- Vorbeugende Designprüfung
- Geschlossene Materialkreisläufe

- Live-Überwachung und Prozesssteuerung
- Adaptive Prozessparameter

- Optimale Auswahl von Nachbehandlungen
- Entfall von Prüfungen bzw. Stichproben

Ansätze

- Geometrieprüfung
- Kontinuierliche Materialüberwachung

- Schmelzbadüberwachung
- Resonanzprüfung per Ultraschall

- Prozessintegrierte Bauteilprüfung ( $\mu$ -CT, Ultraschall)

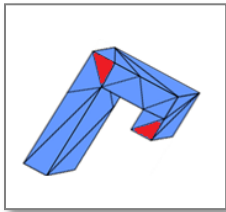
# Automatisierung der Datenvorbereitung aktuelles Hauptziel

## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft

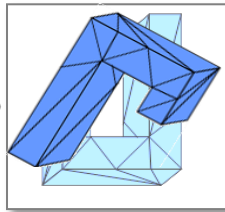


- **Automatisierte Ausrichtung** der Bauteilgeometrie und Anordnung auf der Bauplattform
- **Automatisierte Erstellung von Supportstrukturen** unter Berücksichtigung der spezifischen Bauteilmerkmale

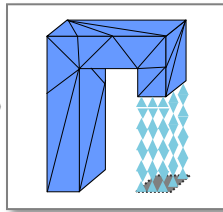
## Status Quo und Lösungsansätze



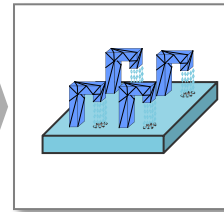
Import Fix



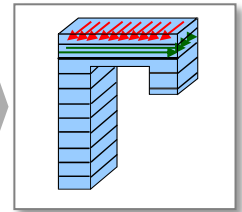
Orientierung



Supports

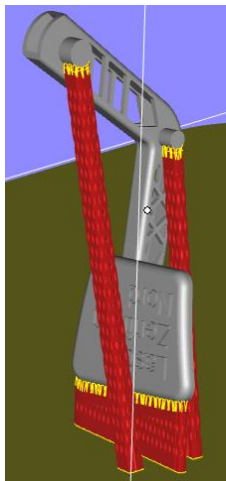


Positionierung



Slicing und hatching

- Aufwendige, meist **manuelle Prozessschritte** in der Datenvorbereitung
- Bei Serienfertigung identischer Geometrien nur einmal durchzuführen – bei Geometrieänderung, z.B. mass customization, mit sehr **hohen Kosten durch Ingenieurkapazitäten** verbunden



## Softwarelösungen zur Automatisierung einer Datenvorbereitung aktuell in Entwicklung (in Dentalindustrie vorhanden)

- Automatisierte Ausrichtung des Bauteils für minimalen Supportbedarf für alle notwendigen Geometriemerkmale
- Erstellung von Standard-Supportstrukturen auch für komplexe Strukturen, die durch den Ingenieur nicht manuell erstellt, sondern nur zu prüfen sind
- Funktionalitäten zur automatisierten Reparatur der STL-Daten und Erstellung der Schichtinformationen sowie Prozessparameter sind bereits vorhanden

# Höhere Produktivität und geringere Materialkosten zu erwarten

Kosten  
Zeit

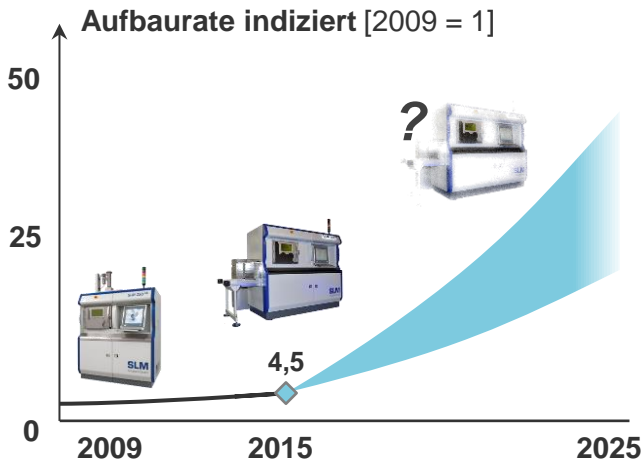


## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft

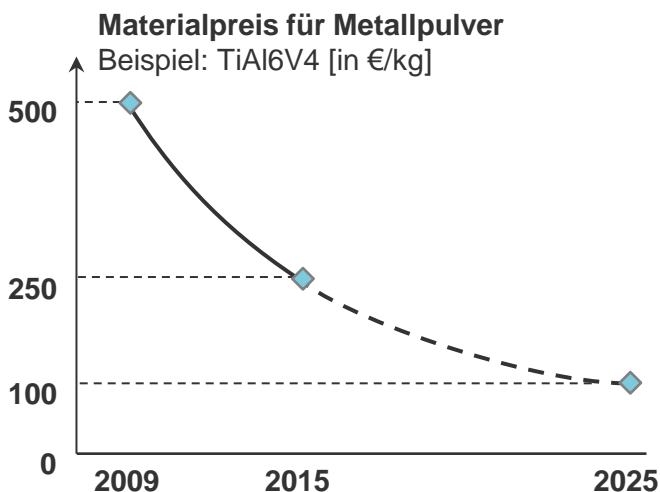


- Eine deutlich höhere Anlagenproduktivität ist für eine kostenseitige Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Fertigung notwendig
- Geringere Pulverkosten und breiteres Materialspektrum vereinfacht Substitution konventioneller Verfahren

## Status Quo und Lösungsansätze



- Produktivität konnte in den letzten Jahren bereits um über **400%** gesteigert werden
- Haupttreiber sind **Vergrößerung der Bauräume** mit Mehrfach-Lasersystemen sowie technische Innovationen wie z.B. neue **Belichtungsstrategien**
- Bei anhaltender Entwicklungsgeschwindigkeit sind weitere **Produktivitätssteigerungen von Faktor 10-20 bis 2025 zu erwarten**



- **Materialpreise in der Vergangenheit bereits deutlich gesunken**, hauptsächlich durch Marktliberalisierung
- **Weitere Kostensenkung durch optimierte Herstellungsprozesse** und Steigerung der Pulverausbeute
- Zielkosten von **100€/kg für TiAl6V4 bis 2025 möglich**
- Gleichzeitig **Erweiterung des Materialspektrums** durch steigenden Bedarf und neue Player im Markt

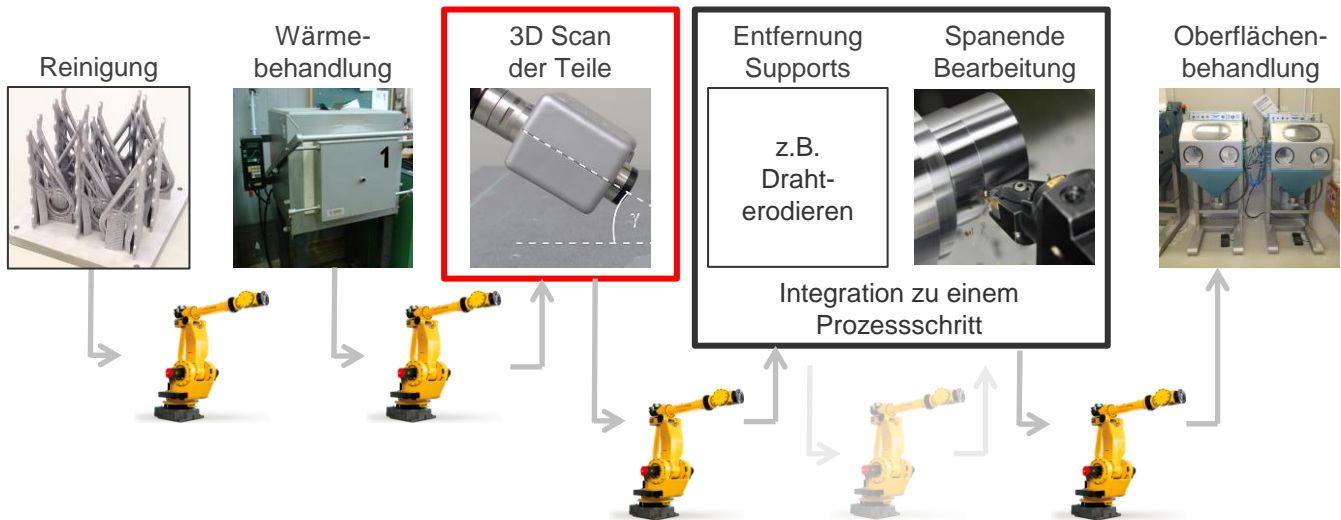
# Integrierte Nachbearbeitungsprozesse ersetzen manuelle Schritte

## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft



- **Vollständige Automatisierung der Nachbearbeitungsprozesse**
- **Vermeidung von manuellem Eingriff** durch Roboterhandling, Tooling-Points und Laser- oder CNC-Nachbearbeitung

## Status Quo und Lösungsansätze



- **Zugänglichkeit für Roboter herstellen** für automatisiertes Handling (Re-design der SLM-Maschinen notwendig, ggf. Modularisierung angrenzender Systeme)
- **Erkennung des Werkstückes** einschließlich Lage und Orientierung für automatisierte Nachbearbeitung
- Zukünftig **neue Technologien zur Nachbearbeitung** möglich, z.B. Integration von Laserabtragen und CNC-Fräsen in hybride Maschinen
- **Mitarbeiter ausschließlich für Service und Support entlang der Prozesskette zuständig** (mehrere Anlagen durch einen Mitarbeiter zu betreuen)
- **Zentrale Pulveraufbereitung** und -lagerung



# Vor dem ersten Baujob wird präventiv das Design geprüft... (1/2)

## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft



- **First Time Right:** fehlerfreies Bauteil bereits aus dem ersten Baujob
- **Vorbeugende Designprüfung** durch vorbereitende Prozesssimulation, um **fertigungsgerechte Bauteilgestaltung** abzusichern

## Status Quo und Lösungsansätze

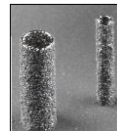
### Eingangsgrößen

- Aktuelles Bauteil-design
- Relevante Lastfälle
- Werkstoff- und Verfahrensauswahl (z.B. SLM, SLS)

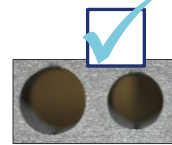
### Vorbeugende Designprüfung (ausgewählte Kriterien)



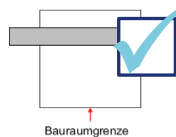
Minimale  
Wandstärken



Durchmesser



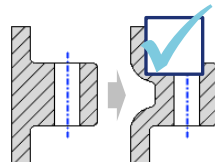
Maßhaltigkeit



Maximaler  
Bauraum



Support-  
strukturen



Materialanhäufungen



Fertigungsaufmaß

### Resultat

- Erfolgreiche Fertigung des ersten Bauteils
- Erste 3D-Druck-Potenziale im Design umgesetzt

# ...während die Qualität des Werkstoffs kontinuierlich überwacht wird (2/2)

## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft



- Minimieren von Prozessfehlern, die aus Werkstoffmängeln resultieren

## Status Quo und Lösungsansätze

- Rechtzeitiger Austausch des Pulvers
- Einhaltung möglichst geschlossener Pulverkreisläufe, um Verunreinigungen zu vermeiden
- Ermittlung der spezifischen Lebensdauern je Pulverwerkstoff

### Pulveranalyse am Beispiel Ti-6Al-4V

#### Methoden zur Prüfung von Fließverhalten und -Fähigkeit (VDI 3405 Blatt 2)

##### Durchlaufzeit DIN EN ISO 4490

- Aufwand: gering
- Reproduzierbarkeit: gering
- Beurteilung der Fließfähigkeit

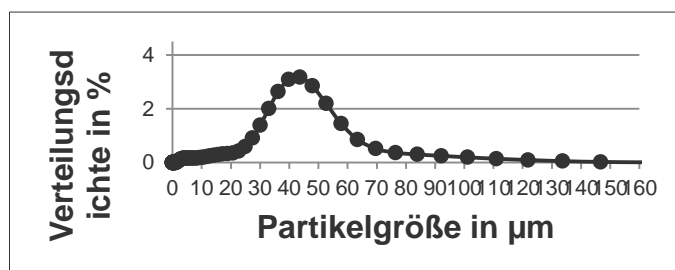
##### Böschungswinkel

- Aufwand: mittel
- Reproduzierbarkeit: geräteabhängig
- Beurteilung des Fließverhaltens

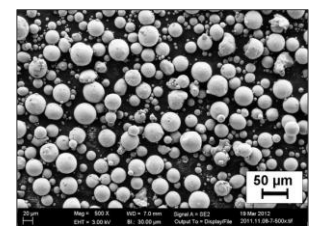
##### Fließfähigkeit ASTM B 213-03

- Aufwand: k.A.
- Reproduzierbarkeit: k.A.
- Beurteilung der Fließfähigkeit

#### Partikelgrößenverteilung



#### Partikelform



# ► Globale und lokale Überwachungsmechanismen sichern den Prozess ab

Qualität



## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft



- **Frühzeitiger Abbruch** fehlerhafter Baujobs durch Live-Überwachung und Prozesssteuerung
- **Zukünftig: Anpassung von Prozessparametern**, um Fehler im Prozess zu heilen

## ► Status Quo und Lösungsansätze

### Überwachungsbereich

#### Globale Überwachung

Systeme, welche den gesamten Bauraum überwachen

- Pulverbett
  - Pulverauftrag
  - Temperatur
- Atmosphäre

#### Lokale Überwachung

Systeme, welche die Wechselwirkungszone überwachen

- Prozessemissionen
  - Prozessleuchten
  - IR-Strahlung
- Schmelzbaddimensionen

### Handlungsoptionen

#### Status Quo

- Aufnahme von Referenzverläufen pro Bauteil
- Abgleich mit Referenzverläufen während des Prozesses
- Aufzeichnung von QS-Protokollen oder Abbruch bei Abweichungen von Referenzen



#### Zukunft (Forschung)

- Fehlererkennung/  
Mustererkennung (ohne Referenzen, d.h. beim ersten Baujob eines Produktes)
- Korrektur von Prozessparametern im laufenden Prozess

# Verbesserung der Bauteileigenschaften durch Nachbehandlung

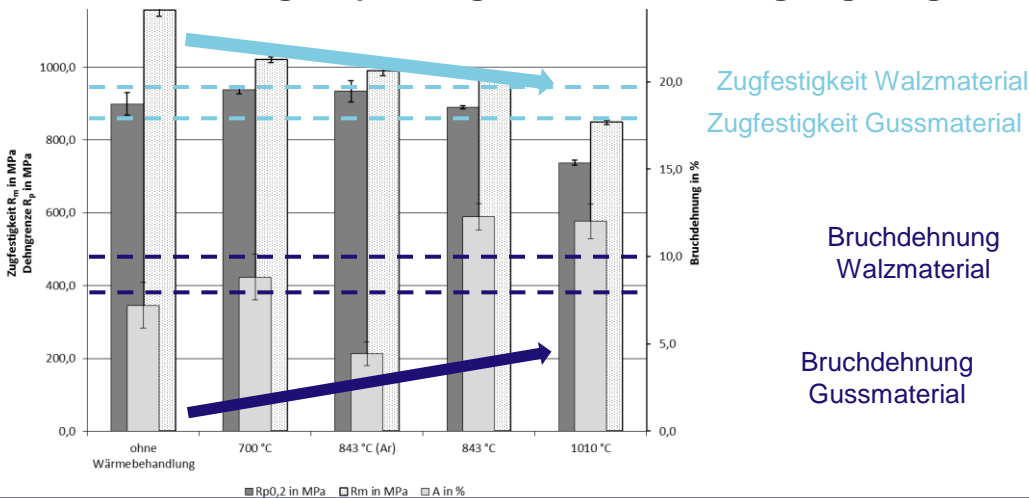
## Ziel für die Serienfertigung der Zukunft



- Optimale Bauteileigenschaften durch **Auswahl der richtigen Nachbehandlungsprozesse** und Parameter
- Entfall von Prüfungen bzw. **Stichproben** durch Prozessintegration

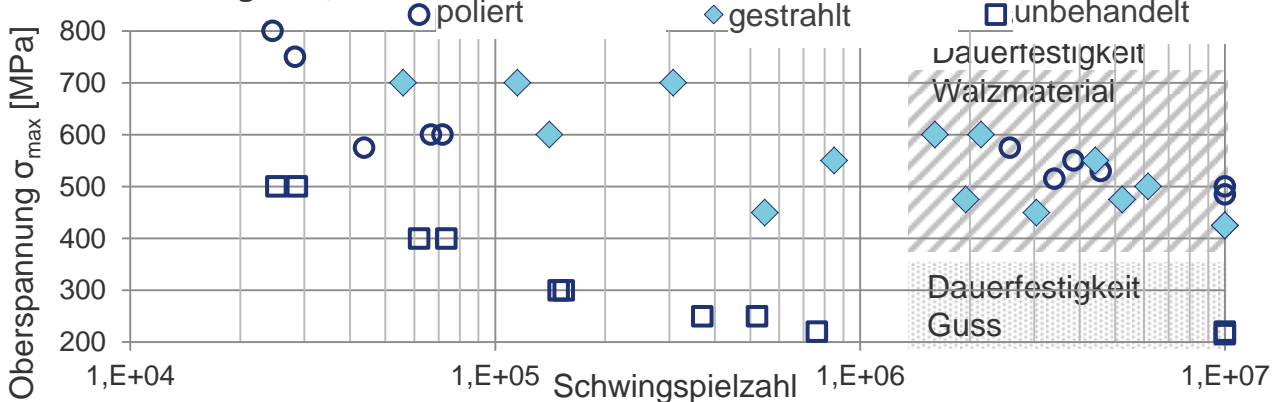
## Status Quo und Lösungsansätze (Beispiel Ti-6Al-4V)

### Wärmebehandlung: Anpassung von Bruchdehnung/Zugfestigkeit



### Nachbearbeitung: Höhere Schwingfestigkeit durch Polieren

Aufbaurichtung: 90°, R= 0.1





Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit  
Prozesse in der künftigen Serienfertigung

## Light-Manufacturing & Light-Factory:

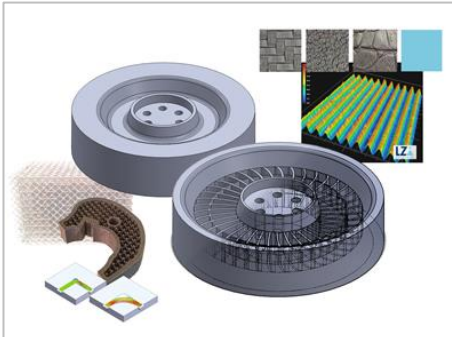
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

Finale Demonstratoren

# ► Fortschritt der Demonstratoren

## 1 Multifunktions-3D-Druck



### Prägewalze

Nach der Finalisierung des fertigungsgerechten Designs und der Auswahl geeigneter Fertigungsbedingungen/-parameter erfolgte die Herstellung des Demonstrators. Weiterhin wurde die gefertigte Prägewalze endbearbeitet.

### Workshop-Schwerpunkt

Es wurden die der laseradditiven Fertigung nachgelagerten und zur Fertigstellung des Demonstrators notwendigen Prozessschritte betrachtet. Damit verbunden erfolgte eine Analyse des Zeit- und Kostenaufwandes sowie die Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte.

## 2 Hybrider 3D-Druck



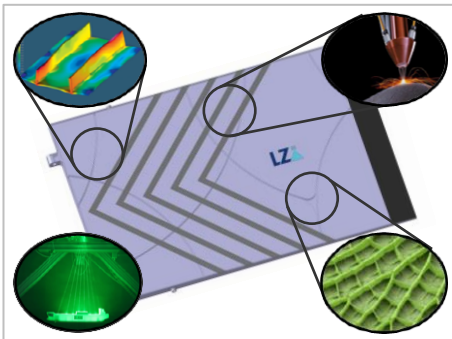
### Hybrider Querlenker

Die Demonstratoren zeigen im Prototypenstatus für die kombinierten LAM und CFK Prozesse, welche Herausforderungen sich für die Fertigung bis zur Serienreife ergeben

### Workshop-Schwerpunkt

Anhand des Prototyps sollen Herausforderungen ausgearbeitet und Lösungskonzepte analysiert werden. Die Prozessschritte werden dazu einzeln analysiert, optimiert und hinsichtlich Gefahrenpotentialen und passenden QS- Maßnahmen betrachtet .

## 3 3D-Blechleichtbau



### Laderampe

Auf Basis der Ergebnisse der Prozesserprobung in Workshop 3 wurde die Konstruktion der Laderampe final überarbeitet und fertigungsgerecht gestaltet. Weiterhin wurden Schnittstellen zur Lasteinleitung und Lagerung final ausgelegt und LAM-gerecht auskonstruiert.

### Workshop-Schwerpunkt

Im Workshop wurden die beteiligten Fertigungsprozesse betrachtet und detailliert hinsichtlich der Kriterien Zeit, Kosten sowie Qualitätssicherungsmaßnahmen analysiert.

# Ziele und Vorgehen der Workshops

## 1 Multifunktions-3D-Druck

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Ziele des Workshops</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Übersicht aller zur Fertigung des Demonstrators notwendigen Prozessschritte</li> <li>■ Betrachtung der laseradditiven Fertigung unter den Aspekten Qualität, Kosten und Zeit am Beispiel der Prägewalze</li> <li>■ Ermittlung von Optimierungspotential hinsichtlich der genannten Aspekte</li> </ul>  |
| <b>Vorgehensweise</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vorstellung des Demonstrators und Zusammenfassung der bisher in den Workshops betrachteten Fertigungsschritte</li> <li>■ Praktische Einheit: Vorführung der Prozesse zur Nachbereitung und Nacharbeit laseradditiv gefertigter Bauteile, Abschätzung des Zeit- und Kostenaufwandes sowie Ermittlung qualitätsrelevanter Aspekte durch die Workshopteilnehmer, Diskussion der Ergebnisse</li> </ul> |

## 2 Hybrider 3D-Druck

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Ziele des Workshops</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Optimierter Fertigungsprozess des 3D-Hybrid Querlenkers</li> <li>■ Serienreife Ausarbeitung der LAM-CFK- Prozesse</li> </ul>  |
| <b>Vorgehensweise</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Analyse des hybriden Fertigungsprozess</li> <li>■ Identifikation von Fehlerpotentialen und QS – Maßnahmen</li> <li>■ Optimierungspotential des LAM Prozess</li> </ul> |

## 3 3D-Blechleichtbau

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Ziele des Workshops</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eine Vollständige Übersicht aller Fertigungsprozesse und –kosten der Leichtbaugruppe</li> <li>■ Vergleich zur konventionellen Bauweise</li> <li>■ Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Fertigung</li> </ul>   |
| <b>Vorgehensweise</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Beteiligte Fertigungsprozesse mit den Teilnehmern des Workshops in detaillierte Arbeitsschritte untergliedern</li> <li>■ Alle Arbeitsschritte mit Aufwände (Zeit, Material) versehen und die daraus resultierenden Kosten ermitteln</li> <li>■ Für jeden Prozessschritt QS-Maßnahmen aufzeigen und bewerten</li> </ul> |



**Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit**  
 Prozesse in der künftigen Serienfertigung

**Light-Manufacturing & Light-Factory:**  
 Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

**Finale Demonstratoren**



# Multifunktions-3D-Druck



## Die Prozesskette der laseradditiven Fertigung

Die Prozesskette der laseradditiven Fertigung von Bauteilen lässt sich in drei Bereiche unterteilen: *Datenvorbereitung* (rot), *Fertigungsvorbereitung* (gelb), *Fertigungsprozess* (blau) und *Nachbereitung* sowie *Bauteilendbearbeitung* (grün). Eine nachgelagerte Bauteilprüfung kann zur Absicherung der Qualität des Endprodukts (weiß) zusätzlich durchgeführt werden.



Die Prozessschritte *Datenvorbereitung* und *laseradditive Fertigung* wurden bereits im dritten Workshop detailliert betrachtet. Die Kenntnisse zu den Prozessschritten, die dem Fertigungsprozess folgen, wurden den Workshopteilnehmern im Rahmen des vierten Workshops zu den übergeordneten Themen Light Manufacturing und Light Factory in einer praktischen Einheit vermittelt. Darüber hinaus erfolgte eine Aufwandsabschätzung (Kosten, Zeit) sowie die Betrachtung der Qualität für die gesamte Prozesskette der laseradditiven Fertigung am Beispiel der Prägewalze.



# Multifunktions-3D-Druck

## Zeitliche und finanzielle Aufwände in der laseradditiven Fertigung

Die Hauptkostentreiber in der laseradditiven Fertigung sind die Maschinen-, Material- und Personalkosten.

### Maschine



Investition zwischen  
 500 – 1.500 t€

### Material



Preis pro kg Pulver  
 zwischen  
 30 – 500 €

### Personal



Datenvorbereitung,  
 Maschine rüsten,  
 Nachbearbeitung...

$$K_{\text{Baujob}} = K_{\text{Maschine}} + K_{\text{Material}} + K_{\text{Personal}}$$

Die Maschinenkosten ergeben sich aus dem Produkt des Maschinenstundensatzes und der Fertigungsdauer. Die Fertigungsdauer setzt sich dabei aus der Belichtungs- und der Beschichtungszeit zusammen. Diese Prozesszeiten sind vom verwendeten Maschinentyp und dem eingesetzten Werkstoff und damit von den anlagen- und materialspezifischen Belichtungsparametern abhängig. Die Kosten für das im Prozess anfallende Verbrauchsmaterial ist bei den vereinfacht durchgeführten Betrachtungen zur Prägewalze im Maschinenstundensatz inkludiert.

$$K_{\text{Maschine}} = K_{\text{Maschinenstd.satz}} * t_{\text{Prozess}}$$



- abhängig vom Bauteilvolumen und der Volumenaufbaurrate
- TiAl6V4: 20 cm³/h
  - AlSi12: 40 cm³/h
  - 1.4404: 16 cm³/h

- abhängig von der Bauteilhöhe und der Beschichtungsgeschwindigkeit
- ungefähr 8-12 s zum Pulverauftrag einer Schicht

# Multifunktions-3D-Druck

## Zeitliche und finanzielle Aufwände in der laseradditiven Fertigung

Die Personalkosten, insbesondere zur Vorbereitung der Fertigungsdaten und zur Nachbearbeitung der Bauteile, können erheblich variieren. Dabei ist der Haupteinflussfaktor die Verwendung von zahlreichen und/oder komplizierten Supportstrukturen für nicht fertigungsgerecht gestaltete Bauteile. Bei den Materialkosten muss beachtet werden, dass neben der Bauteilmasse auch die Masse der Supportstrukturen und ein Pulverschwindfaktor berechnet werden müssen.


$$K_{Personal} = K_{Per,h} * t_{Vorbereitung}$$

$$K_{Material} = K_{Mat,kg} * m_{Bauteile}$$

Zeit für die Vorbereitung der Fertigungsanlage variiert erheblich, abhängig von Baujob zwischen 2 h und 8 h



- TiAl6V4 [K<sub>Mat</sub>/Ti]: 250 €/kg
- AlSi12 [K<sub>Mat</sub>/Al]: 60 €/kg
- 1.4404 [K<sub>Mat</sub>/St]: 100 €/kg



Wird das vorgestellte Kostenmodell auf die im Workshop entwickelte Prägewalze übertragen, ergeben sich für deren Fertigung die auf der nachfolgenden Seite zusammengefassten Kosten. Die Kostenabschätzung erfolgt dabei für zwei unterschiedliche Werkstoffe, die Aluminiumlegierung AlSi12 und den Stahlwerkstoff 1.4404). Es werden fiktive Stundensätze verwendet. Als Kalkulationsgrundlage wird eine Laserstrahlschmelzanlage mit einer Laserstrahlquelle und typischen Belichtungsparametern herangezogen. Der Vergleich zu einer konventionell hergestellten Prägewalze dieser Art ist nicht gegeben, da sich dieses Produkt ausschließlich laseradditiv fertigen lässt.

### Kalkulationsgrundlage

**Werkstoff:**  
 AlSi12, 1.4404

**Materialkosten:**  
 AlSi12 (60€/kg), 1.4404 (100€/kg)

**Schichtstärke:**  
 AlSi12 (50 µm), 1.4404 (30µm)

**Bauraum:** 250 mm<sup>3</sup>

**Anzahl Laser:** 1

**Laserleistung:** 200 W

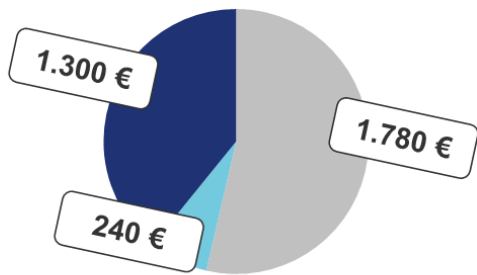
# Multifunktions-3D-Druck

## Zeitliche und finanzielle Aufwände in der laseradditiven Fertigung

Aufwände	AlSi12	1.4404
<b>Fertigungsdauer</b>	<b>48 h</b>	<b>103 h</b>
Beschichtungszeit	12 h	12 h
Belichtungszeit	36 h	91 h
<b>Masse des Bauteils</b>	<b>4 kg</b>	<b>12 kg</b>
<b>Personeller Aufwand</b>	<b>9,5 h</b>	
Datenvorbereitung	2 h	
Rüsten der Maschine	1 h	
Auspacken, Aufbereitung des Pulvers	2 h	
Entfernung von Supports, Endbearbeitung	1,5 h	
Bauteilprüfung	3 h	

Ausgehend von den aufgelisteten materiellen und zeitlichen Aufwänden ergeben sich die in den Diagrammen dargestellten Kostenstrukturen. Demnach ist eine Fertigung der Walze in Stahl im Vergleich zu der Herstellung als Aluminium nahezu doppelt so teuer. Dies begründet sich zum einen aus dem niedrigeren Materialpreis von Aluminium und der durch die Materialdichte bedingten geringe Bauteilmasse. Zum anderen wird bei der Verarbeitung von Aluminium aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Materials eine höhere Aufbaurrate erzielt. Es wird auch deutlich, dass bei der Verarbeitung von Stahl ein großes Potenzial zur Kostenreduzierung durch die Verwendung verbesserter Belichtungsparameter vorhanden ist. So können größere Schichtdicken und Multilasersysteme zu einer signifikanten Bauzeitreduzierung und damit zu einer Kostensenkung führen.

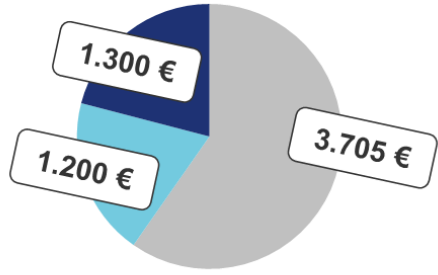
**AlSi12 (50 µm)**



■ Maschine ■ Material ■ Personal

Σ 3.320 €

**1.4404 (30 µm)**



■ Maschine ■ Material ■ Personal

Σ 6.205 €



# Multifunktions-3D-Druck

## Qualität und Qualitätssicherung in der laseradditiven Fertigung

Um die Qualität des Endprodukts sicherzustellen, ist es notwendig die gesamte Prozesskette zu betrachten. Die Qualitätssicherung in der laseradditiven Fertigung erfolgt auf drei Betrachtungsebenen: vor, im und nach dem Prozess (PRE-, IN- und POST-Process).



Zur PRE-Process Qualitätssicherung werden alle Maßnahmen gezählt, welche die Qualität der Fertigungsdaten (Auflösung der STL-Bauteilmodelle, Supportgestaltung, Designrichtlinien, ...) und des verwendeten Pulverwerkstoffs (Lagerung, Pulversiebung, regelmäßige Prüfung der Partikelgrößenverteilung, ...) sicherstellen sollen. Bei der IN-Process Qualitätssicherung erfolgt die Überwachung des Fertigungsprozesses global entsprechend des Bauprinzips in jeder Schicht (Überwachung des Pulveraufzugs und ggf. Korrektur des Zustellfaktors, Überwachung der Laserleistung,...) und/ oder lokal in der Wechselwirkungszone. Darüber hinaus wird die Prozessatmosphäre im Bauraum und im gesamten Umluftfiltersystem überwacht. Die POST-Process Qualitätssicherung befasst sich mit der Prüfung der gefertigten Bauteile (Überprüfung der Bauteilgeometrie, Messung der Oberflächenrauigkeit, ...).

Im Workshop erhielten die Teilnehmer einen detaillierten Einblick in die dem Fertigungsprozess nachgelagerten Prozessschritte (Auspacken und Pulveraufbereitung, Supportentfernung und Endbearbeitung, Bauteilprüfung). Diese Prozesse wurden den Teilnehmern unter realen Fertigungsbedingungen in einer praktischen Workshopseinheit demonstriert.

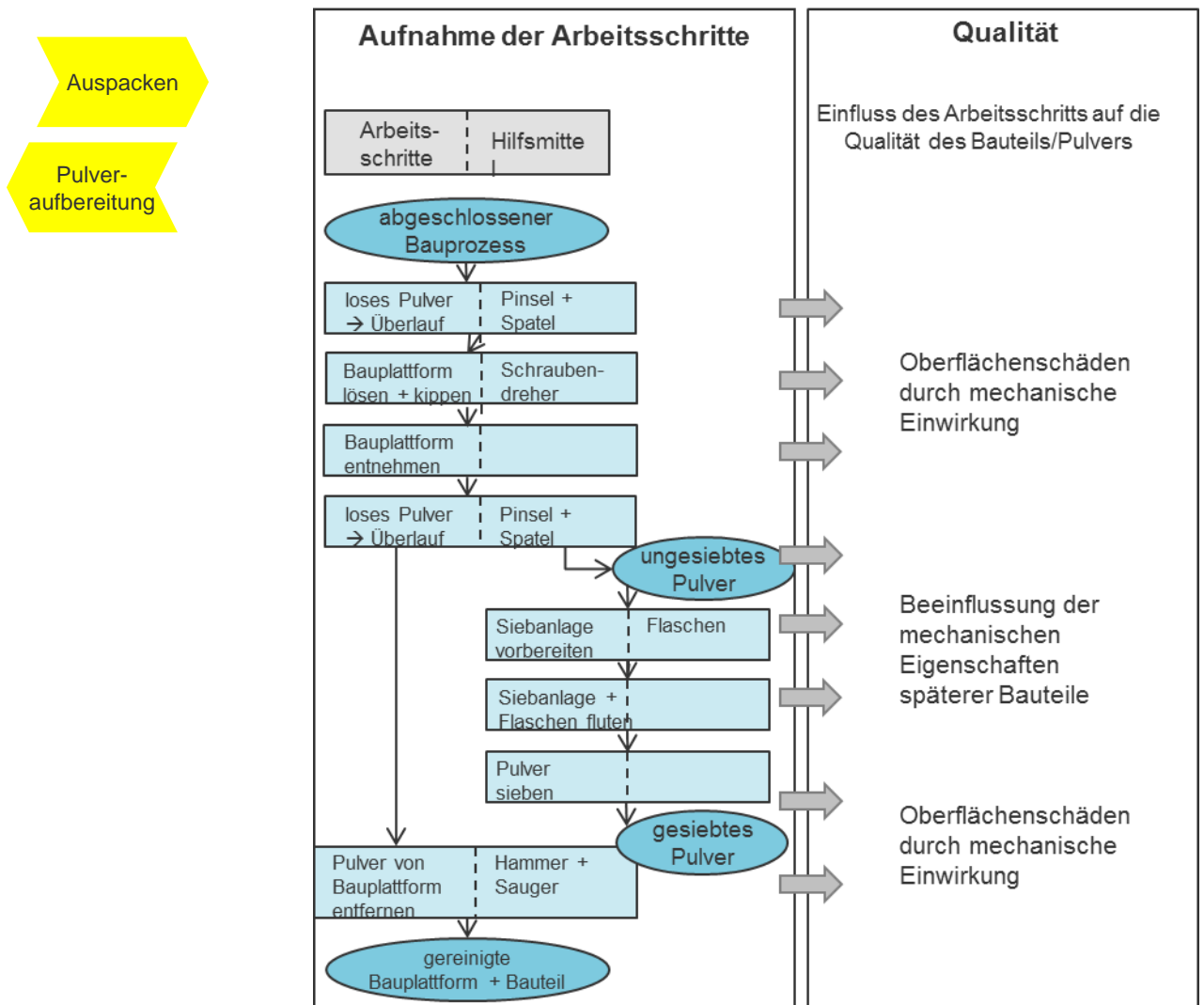


# Multifunktions-3D-Druck

## Qualität und Qualitätssicherung in der laseradditiven Fertigung

Die Workshopteilnehmer sollten die Arbeitsschritte und qualitätsrelevanten Einflussfaktoren dokumentieren. Die aus der anschließenden Diskussion abgeleiteten Inhalte dieser Prozessanalyse sind in den folgenden Übersichten dargestellt.

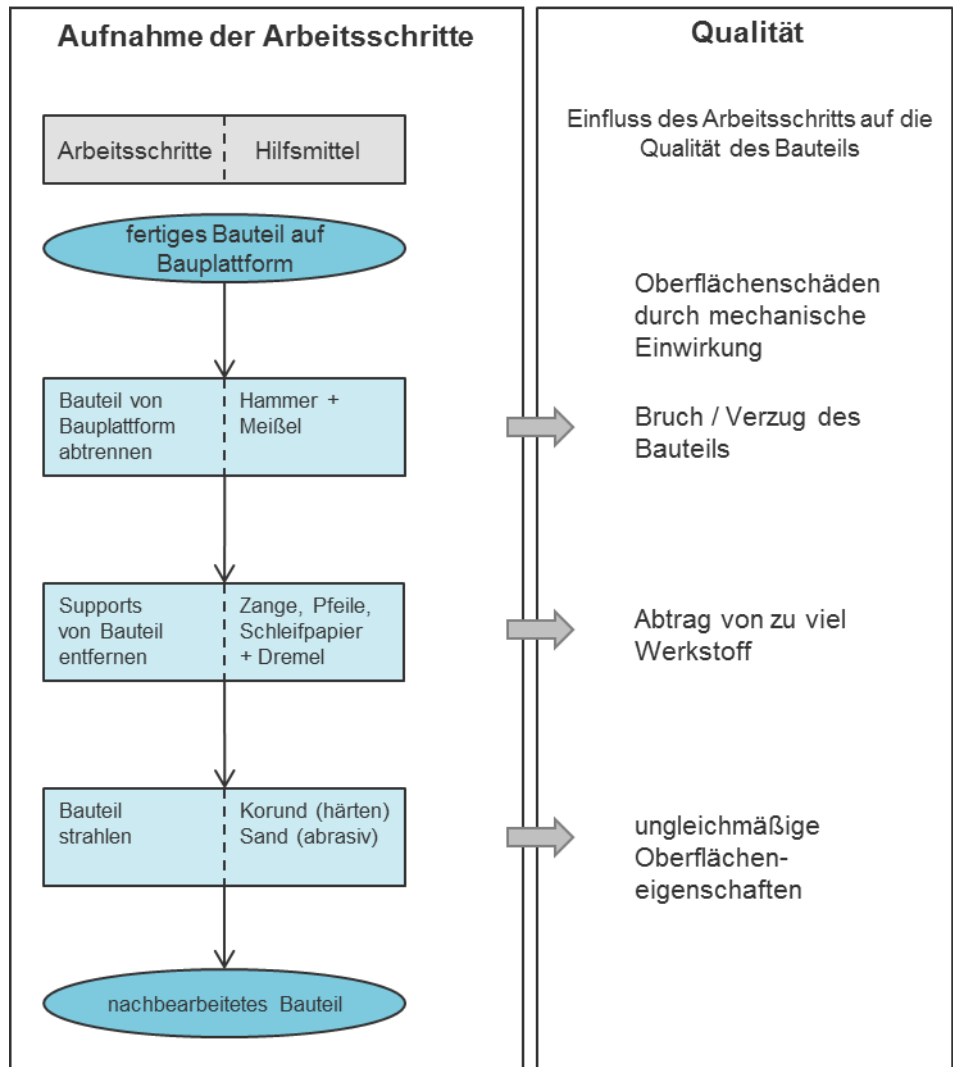
Es wird deutlich, dass der überwiegende Teil der Arbeiten manuell ausgeführt wird. Das eingesetzte Personal hat somit einen erheblichen Einfluss auf die Bauteilqualität.



# Multifunktions-3D-Druck

## Qualität und Qualitätssicherung in der laseradditiven Fertigung

Dieser Einfluss ergibt sich zum einen aus der Nacharbeit der Teile durch das manuelle mechanische Einwirken von Werkzeugen und Hilfsmitteln auf die Bauteiloberfläche. Zum anderen ist der Umgang mit dem bereits gebrauchtem Pulverwerkstoff entscheidend für die Verarbeitbarkeit des Pulvers im folgenden Fertigungsprozess sowie für die Materialeigenschaften nachfolgend gefertigter Bauteile.

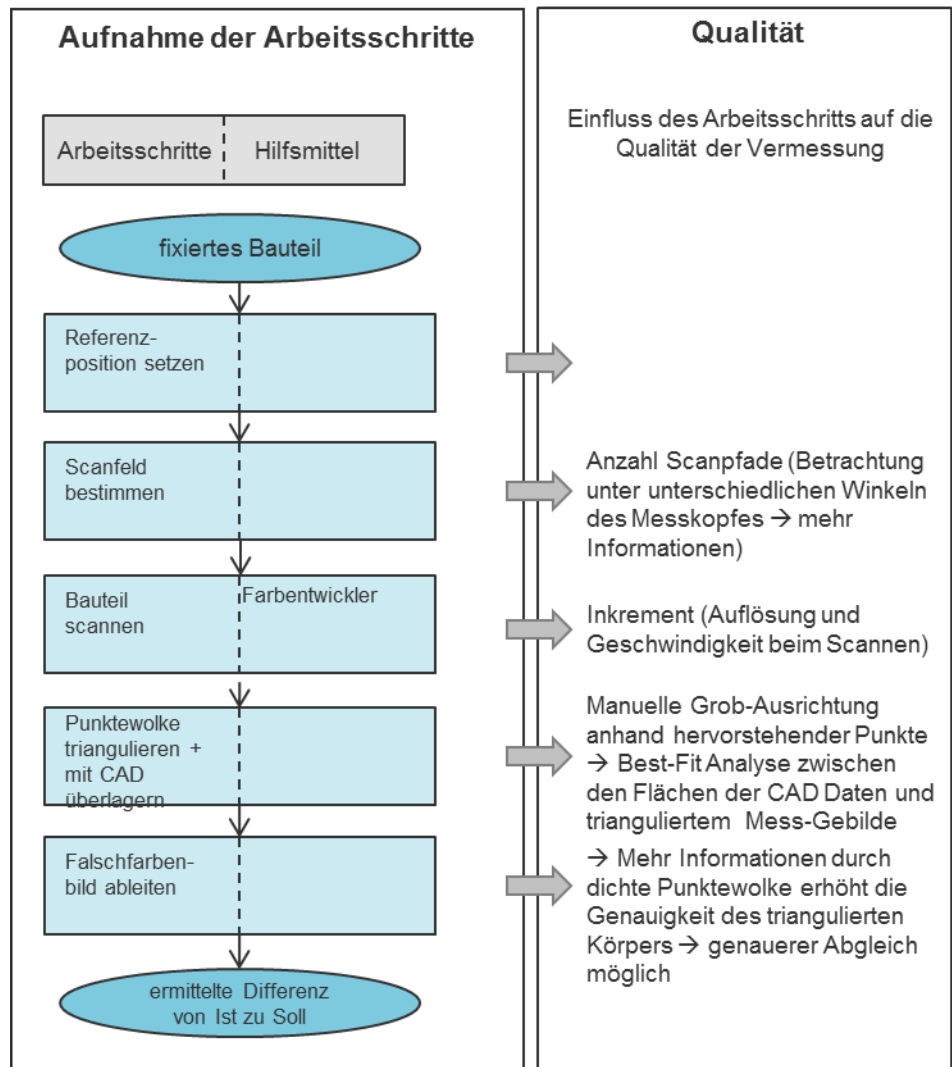


# Multifunktions-3D-Druck

## Qualität und Qualitätssicherung in der laseradditiven Fertigung

Ein sinnvolle Methode zur Qualitätssicherung laseradditiv gefertigter Bauteile ist die Überprüfung der Bauteilgeometrie, da prozessbedingter Verzug oder unsachgemäße Nacharbeit zu geometrischen Abweichungen führen können. Am LZN erfolgt die Überprüfung der Geometrie mittels eines optischen 3D-Laserscan-Systems, welches mit Hilfe einer Portalmeßmaschine geführt wird. Um Messungen in einem zeitlich sinnvollem und damit kostengünstigen Rahmen durchführen zu können, ist, unter gleichzeitiger Berücksichtigung maximaler und qualitativer hochwertiger Aussagekraft, eine Reduzierung der Messung auf qualitätsrelevante Bereiche anzustreben.

Bauteil-  
prüfung

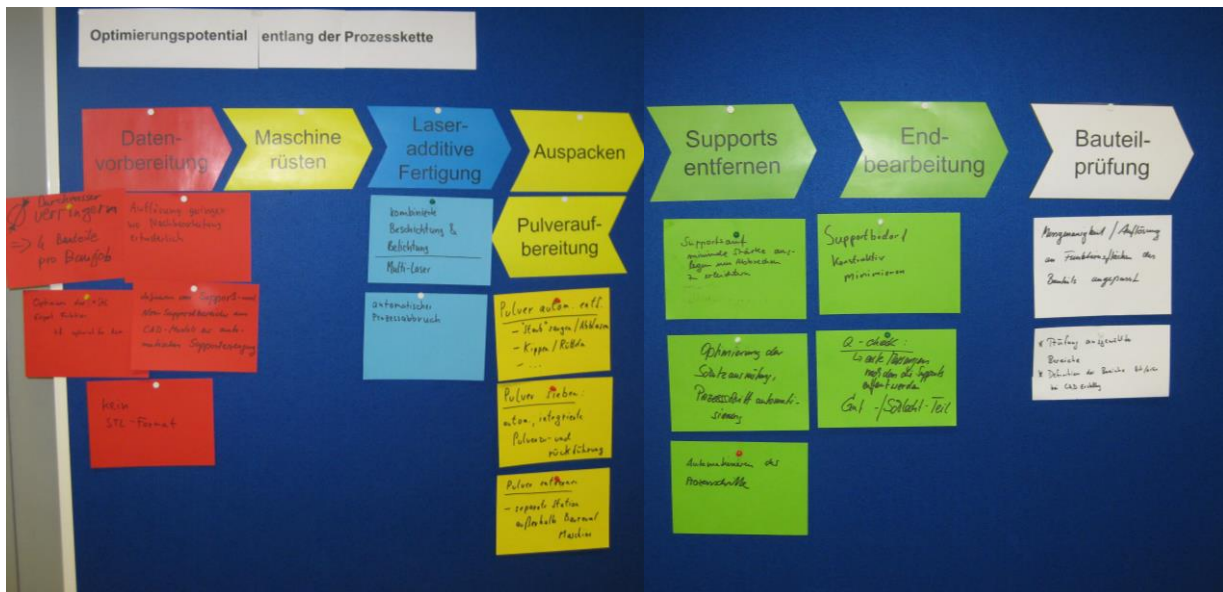




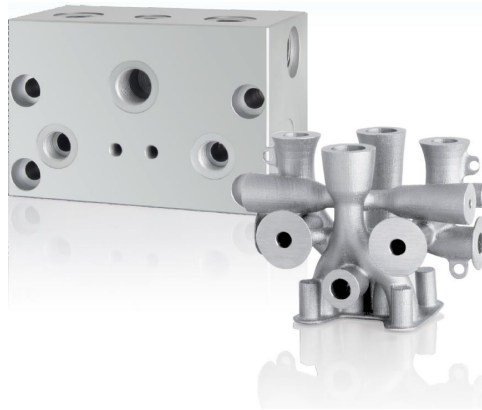
# Multifunktions-3D-Druck

## Optimierungspotential entlang der Prozesskette

Nach der Betrachtung der gesamten Prozesskette sowie deren zugeordneten zeitlichen und finanziellen Aufwänden wurde zusammen mit den Workshopteilnehmern das Optimierungspotential der einzelnen Prozessschritte diskutiert. Dies geschah insbesondere vor dem Hintergrund einer Serienfertigung und den damit verbundenen qualitativen Ansprüchen. Folgende Punkte wurden dabei herausgearbeitet:



- Abschaffen des STL-Formats
- Schaffung einheitlicher Datenstandards und Schnittstellen zwischen CAD- und Datenvorbereitungs- sowie Maschinensoftware
- Automatische Support-Erzeugung
- Reduzierung der Fertigungszeit (durch z.B. simultanes Belichten und Beschichten)
- Automatisieren der gesamten Prozesskette (Baujob auspacken, Pulverrückführung, Supportentfernung)
- Erhöhung der Sicherheit für das Personal, Vermeidung von Pulverkontakt (geschlossener Pulverkreislauf, Auspackstation für Baujobs)
- Reduzierung und Optimierung von Supportstrukturen zur Minimierung des Aufwandes bei der Nachbearbeitung (z.B. fertigungsgerechtes Design)
- Optimierung der Methoden zur Bauteilprüfung zur schnelleren und gezielteren Qualitätssicherung



**Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit**  
 Prozesse in der künftigen Serienfertigung

**Light-Manufacturing & Light-Factory:**  
 Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

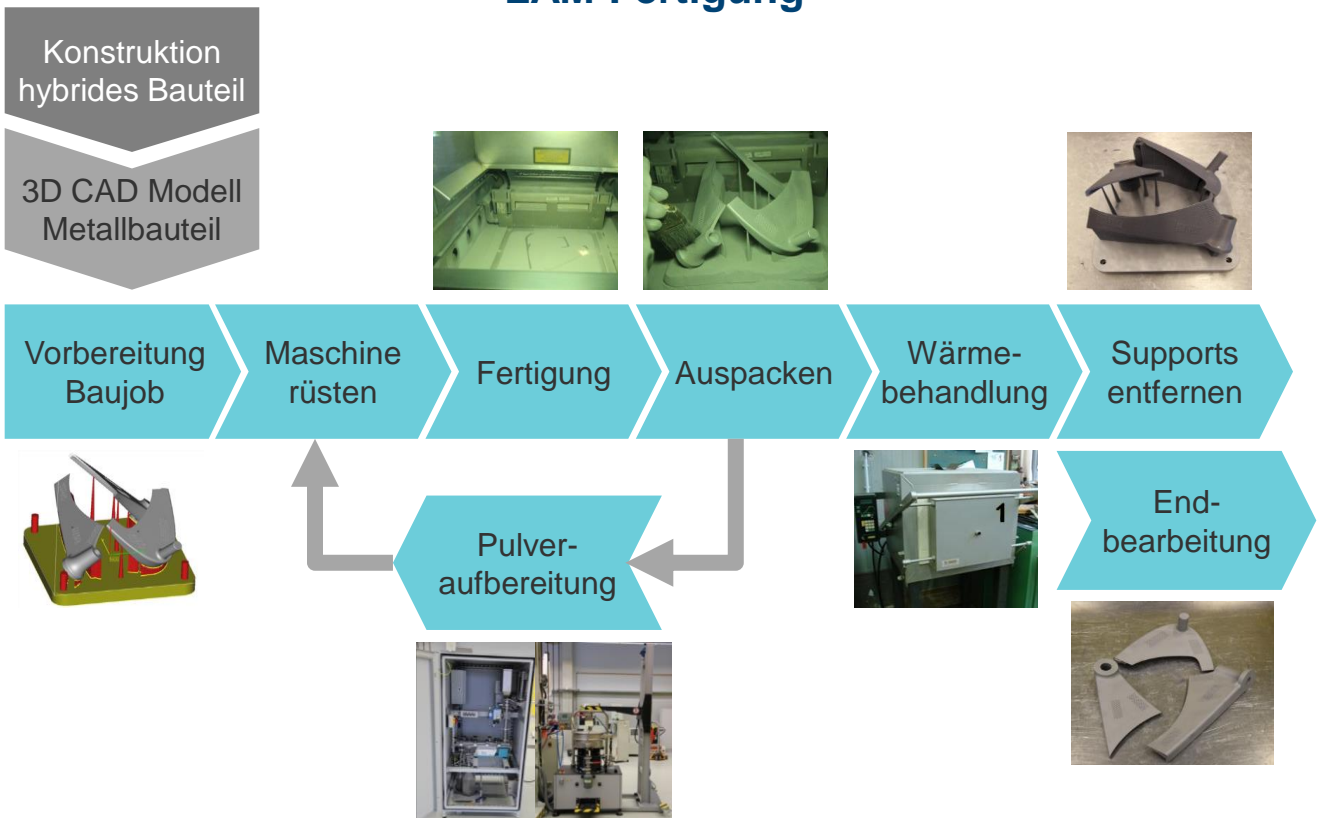
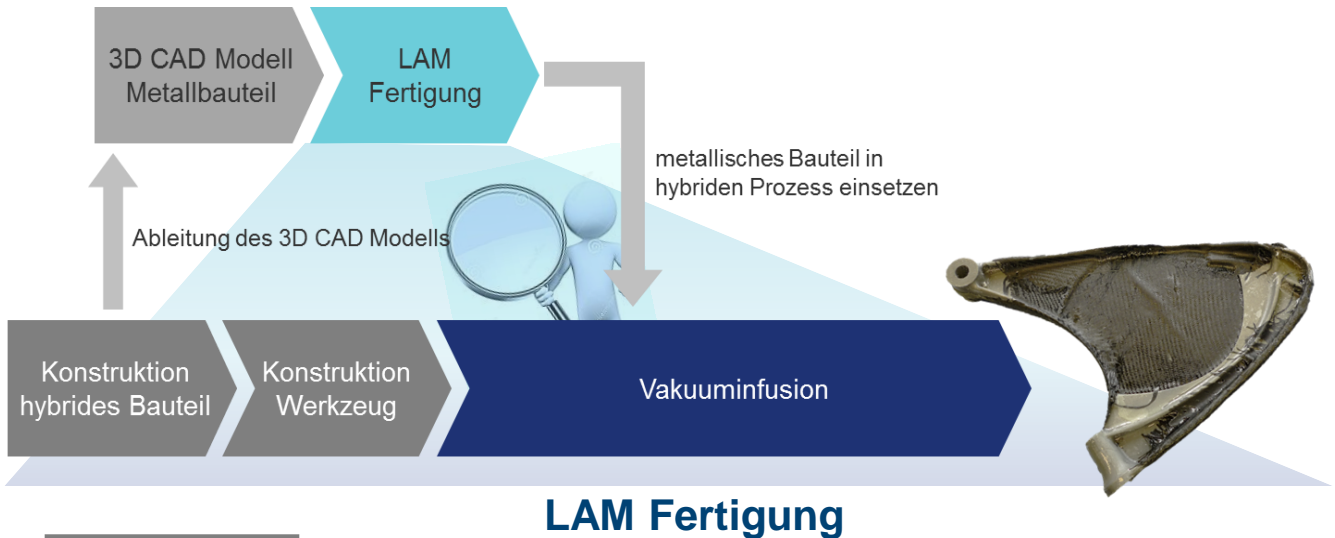
- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

**Finale Demonstratoren**

# Hybrider 3D-Druck – Workshopinhalte

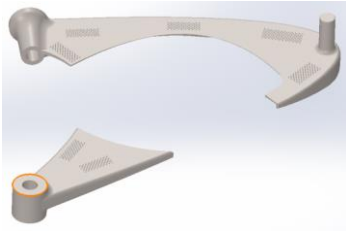
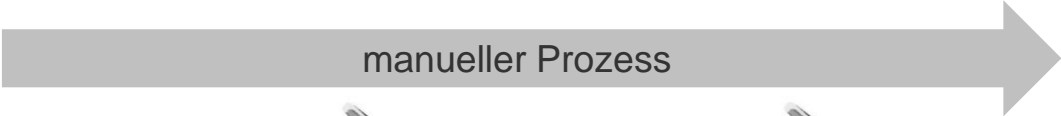
- Analyse des hybriden Fertigungsprozess
- Identifikation von Fehlerpotentialen und QS – Maßnahmen
- Optimierungspotential des LAM Prozess

**Ziel: Gestaltung eines optimierten Fertigungsprozesses für die Serienfertigung von hybriden 3D-Druck Bauteilen**

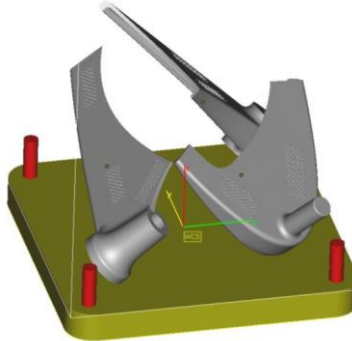


# ► Hybrider 3D-Druck – LAM Fertigung

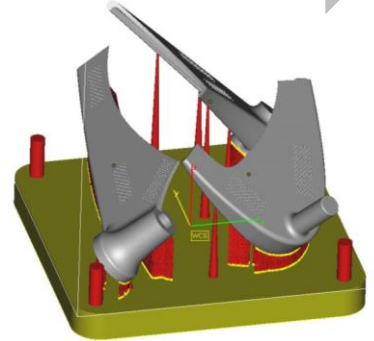
## Vorbereitung Baujob



- Definition der Schubflächen
- Faseranbindung durch Pin-Strukturen

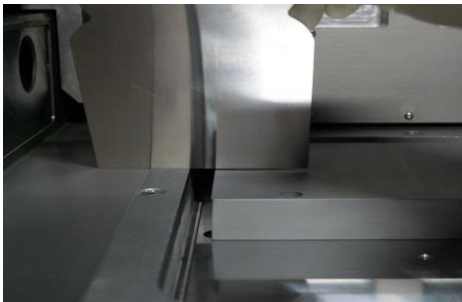
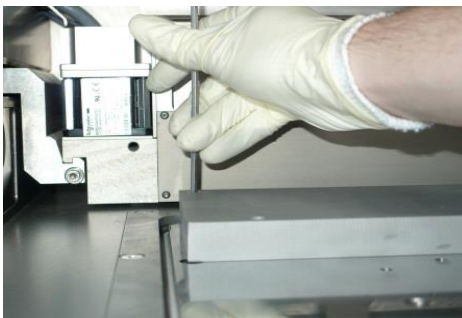


- Reparieren der CAD-Daten
- Positionierung der Bauteile



- Anbringung von Gittersupports
- Anbringung von konischen Supports

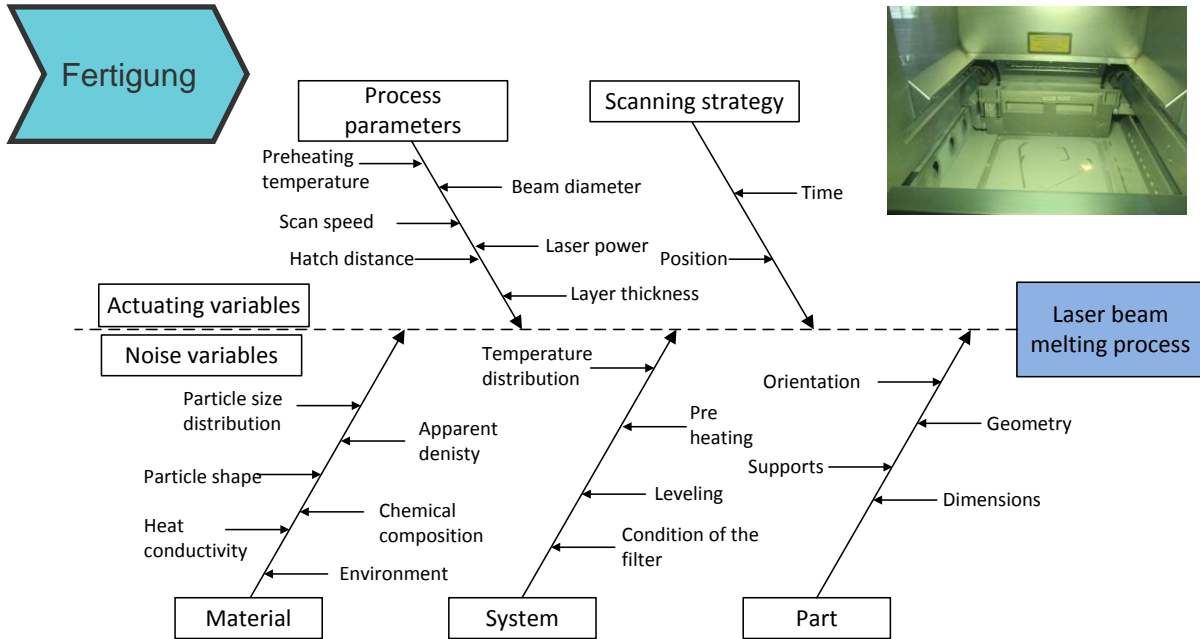
## Maschine rüsten



- Beschichter und Bauraum reinigen
- Laserschutzglas reinigen
- Bauplattform einbauen
- Maschine beschicken
- Maschine schließen und mit Inertgas fluten

# Hybrider 3D-Druck – LAM Fertigung

## Prozessschritt



## Auspacken



■ manuelle Entfernung des Pulvers



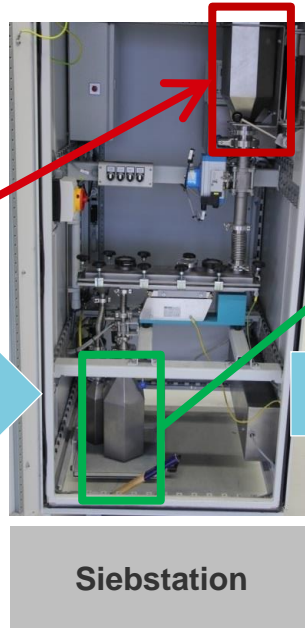
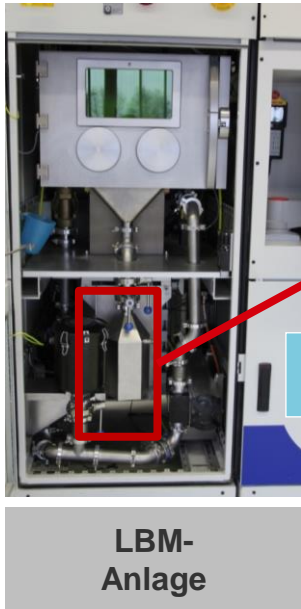
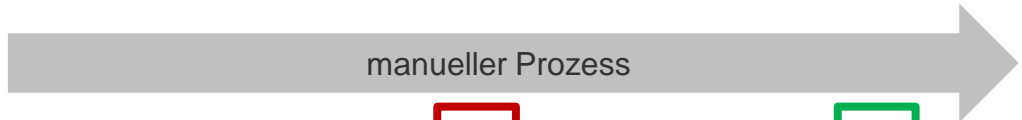
■ Pulverabführung durch Überlauf



# Hybrider 3D-Druck – LAM Fertigung

## Prozessschritt

### Pulver-aufbereitung



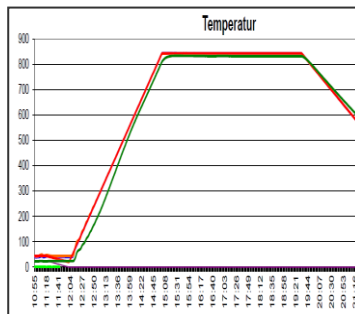
### Wärme-behandlung

#### Auswahl Ofen



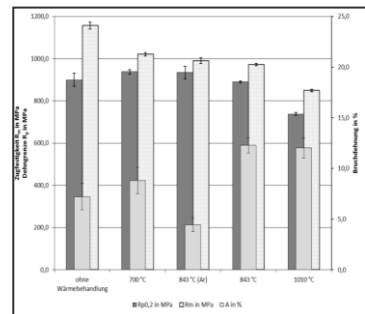
- Wärmebehandlung im Vakuum
- Abkühlen unter Argon

#### Def. Wärmezyklus



- Art des Glühens (Spannungsarmglühen)
- Def. der Abkühlgeschwindigkeit

#### Eigenschaften des Materials



- Einstellen der Materialeigenschaften

# Hybrider 3D-Druck – LAM Fertigung

## Prozessschritt

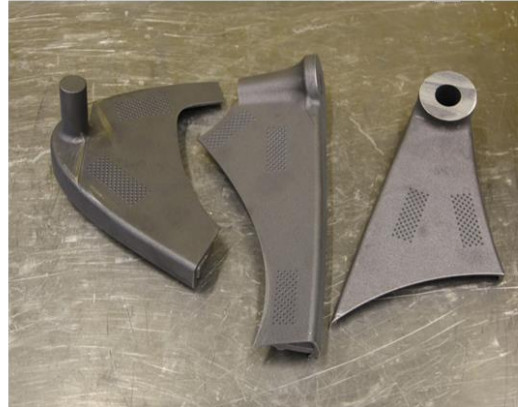
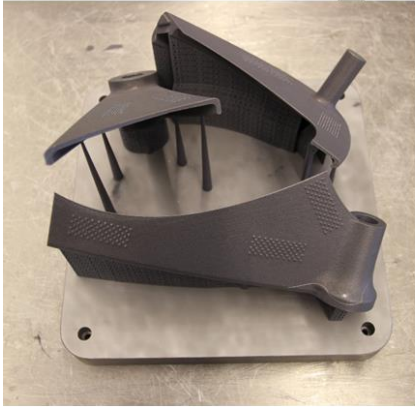
Supports entfernen

Endbearbeitung

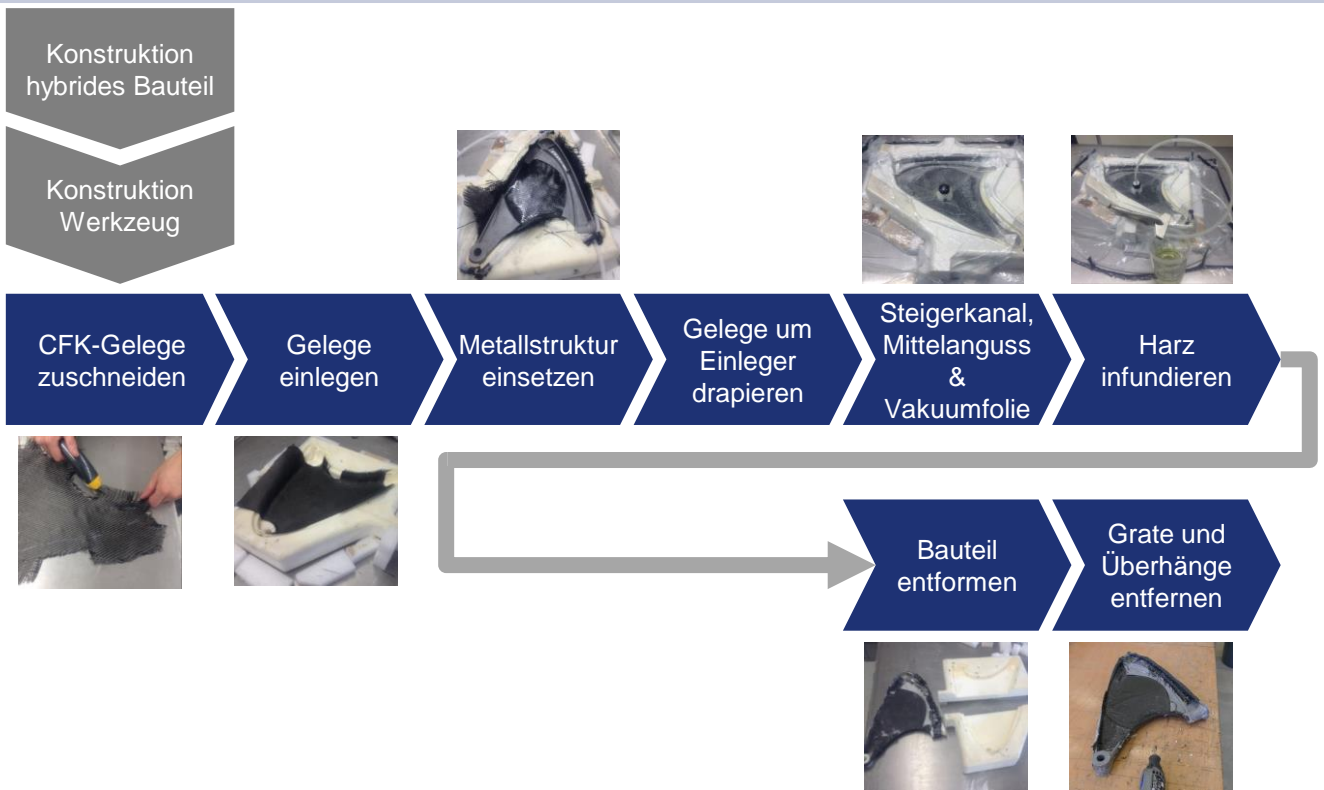
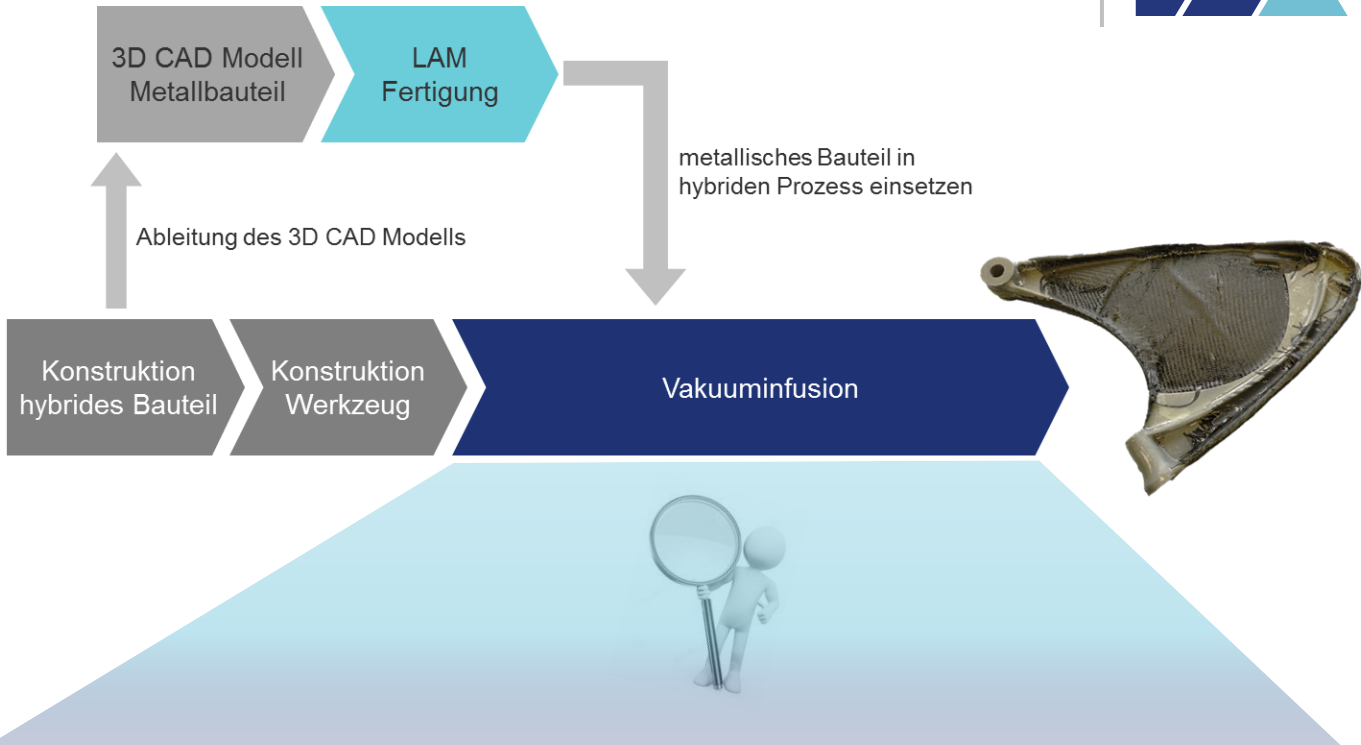


manuelle  
Supportentfernung

abrasives  
Strahlen



# Hybrider 3D-Druck – Vakuuminfusion

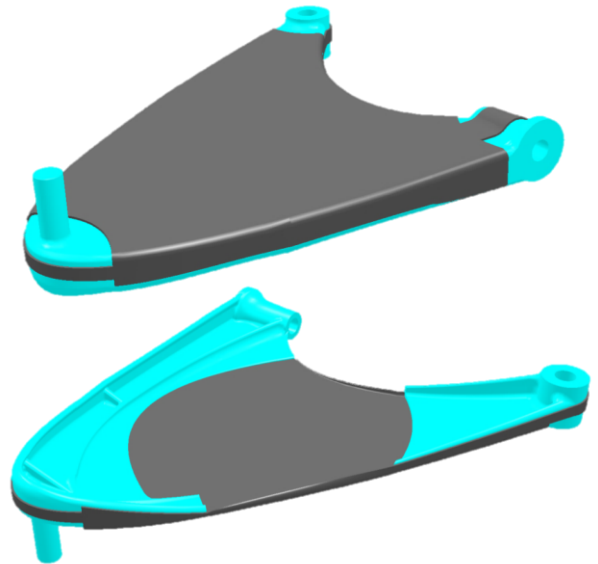
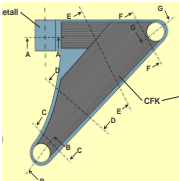




# Hybrider 3D-Druck – Vakuuminfusion

## Prozessschritt

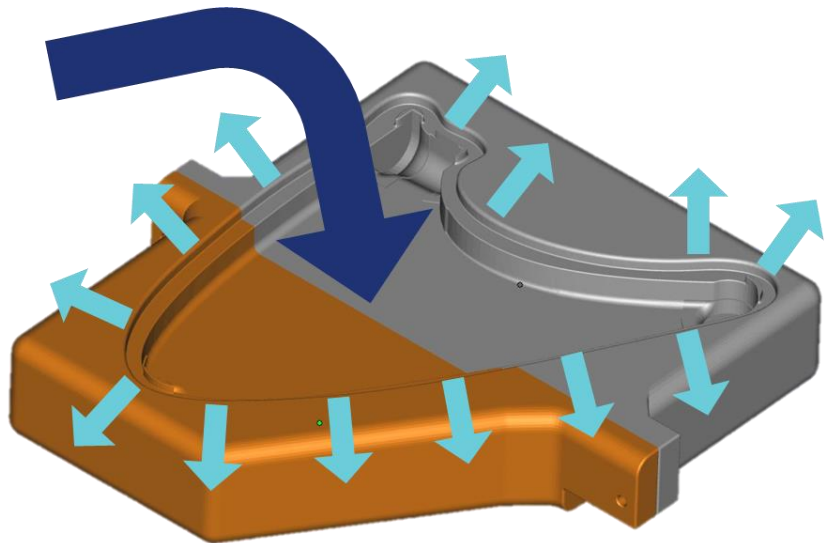
Konstruktion  
hybrides Bauteil



Konstruktion  
Werkzeug

↑ Harz Infusion durch  
Mittlanguss

↑ Vakuumzeugung über  
eingelegeten Steigerkanal



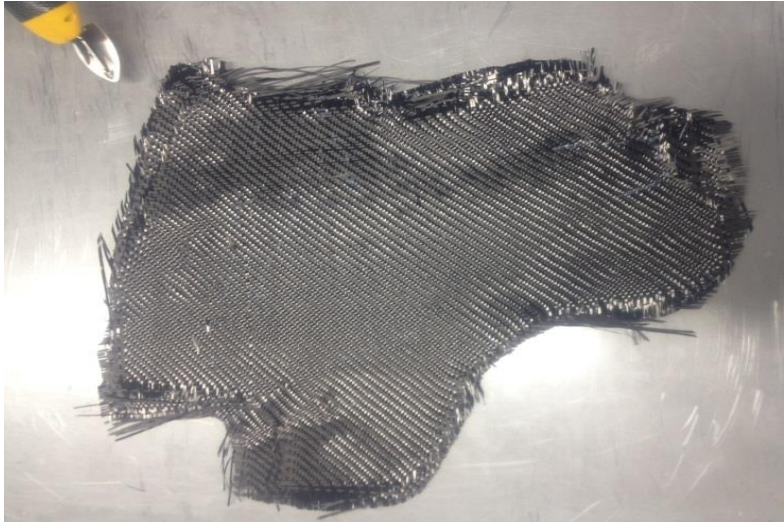
- Zweiteiliges Werkzeug zum einfachen Entformen
- Eingelegeter Steigerkanal und Mittlanguss zur gleichmäßigen Harzinfusion
- Bauteilformgebung durch Werkzeug

# ► Hybrider 3D-Druck – Vakuuminfusion

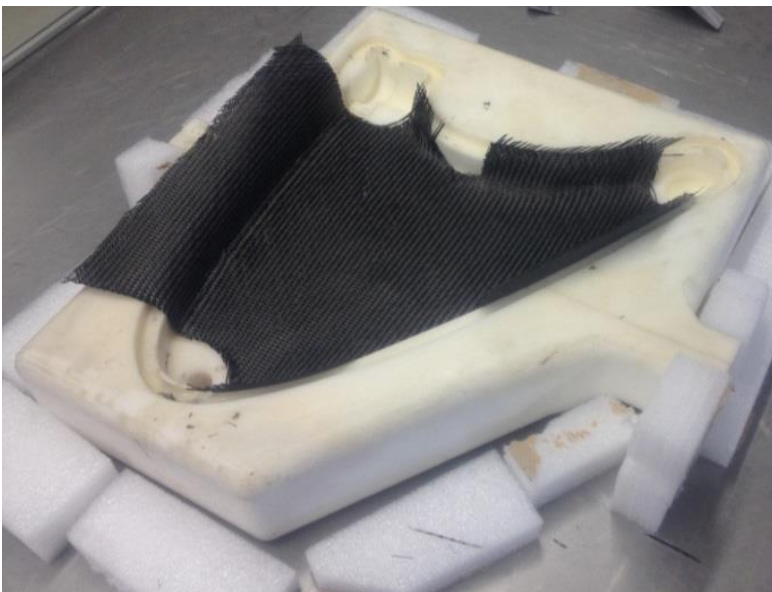
## Prozessschritt

### CFK-Gelege zuschneiden

- Manueller Schneidprozess mit Scherschneiden
- Schnitt mehreren Lagen in einem Prozessschritt
- Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Gelegekontur



### Gelege einlegen



- Manuelles Drapieren der Gelege
- Vermeidung von Falten und Ondulation
- Beachtung der Faserausrichtung

# Hybrider 3D-Druck – Vakuuminfusion

## Prozessschritt

**Metallstruktur einsetzen**

- Eindrücken der Metallstrukturen in das Gelege
- Formschluss von Pinstruktur und Laminat



**Gelege um Einleger drapieren**



- Gelege um Metallstruktur drapiert
- Abreißgewebe zum Trennen von überschüssigem Harz und Vakuumfolie vom Bauteil
- Fließhilfe zur verbesserten Harzinfusion

# Vakuuminfusion

## Prozessschritt

Steigerkanal,  
Mittelanguss  
&  
Vakuumfolie

- Zuschchnitt und Auslage der Vakuumfolie
- Abdichtung der Vakuumfolie zur Werkzeugform bzw. Werkstück
- Positionierung der Vakuumfolie während des Evakuierens

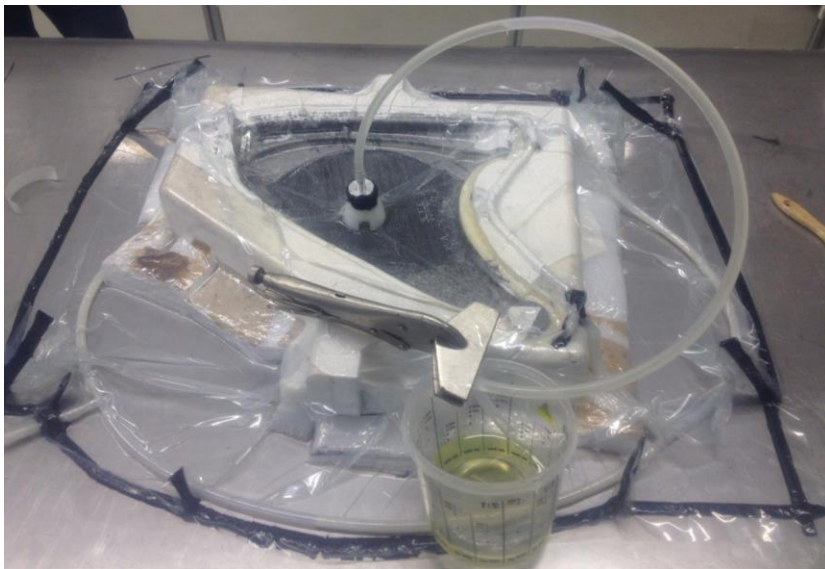


Vakuu



Harz  
infundieren

- Anstich des Mittelangusses
- Infusion des Harzes bis zur vollständigen Füllung der Form
- Aufrechterhaltung des Vakuums bis zum Aushärten des Harzes

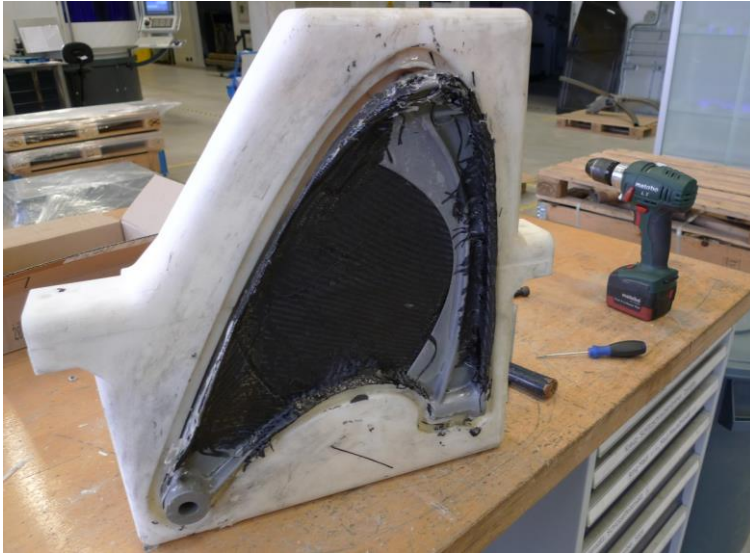


# ► Hybrider 3D-Druck – Vakuuminfusion

## Prozessschritt

### Bauteil entformen

- Öffnen der Vakuumfolie und der Werkzeugform
- Trennen von überschüssigem Harz mittels Abreißgewebe
- Aushebeln des hybriden Bauteils aus der Werkzeugform

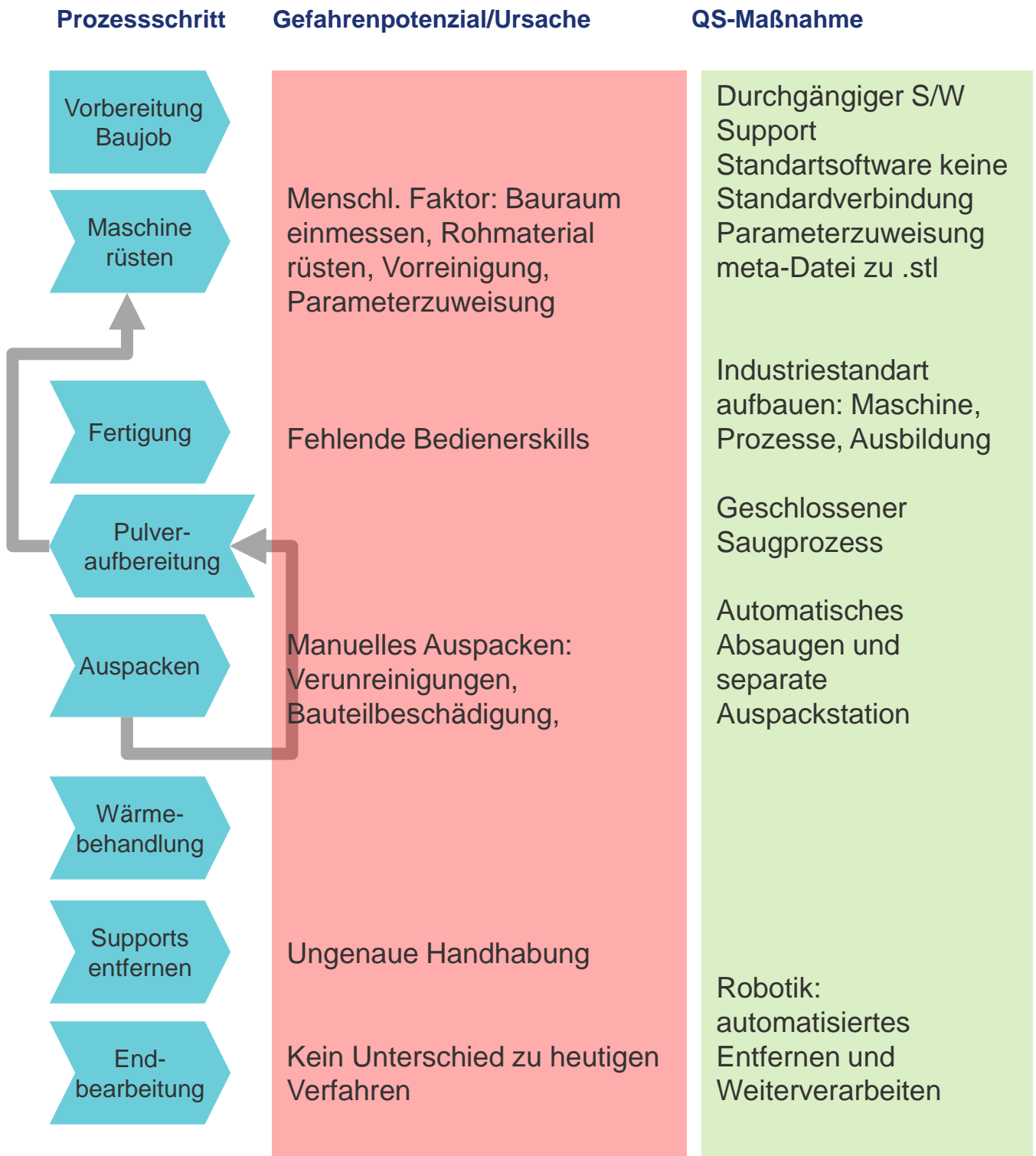


### Grate und Überhänge entfernen

- Manuelle Nachbearbeitung
- Trennen überstehender Faserenden
- Fräsen der CFK-Kontur
- Entfernen von überschüssigem Harz



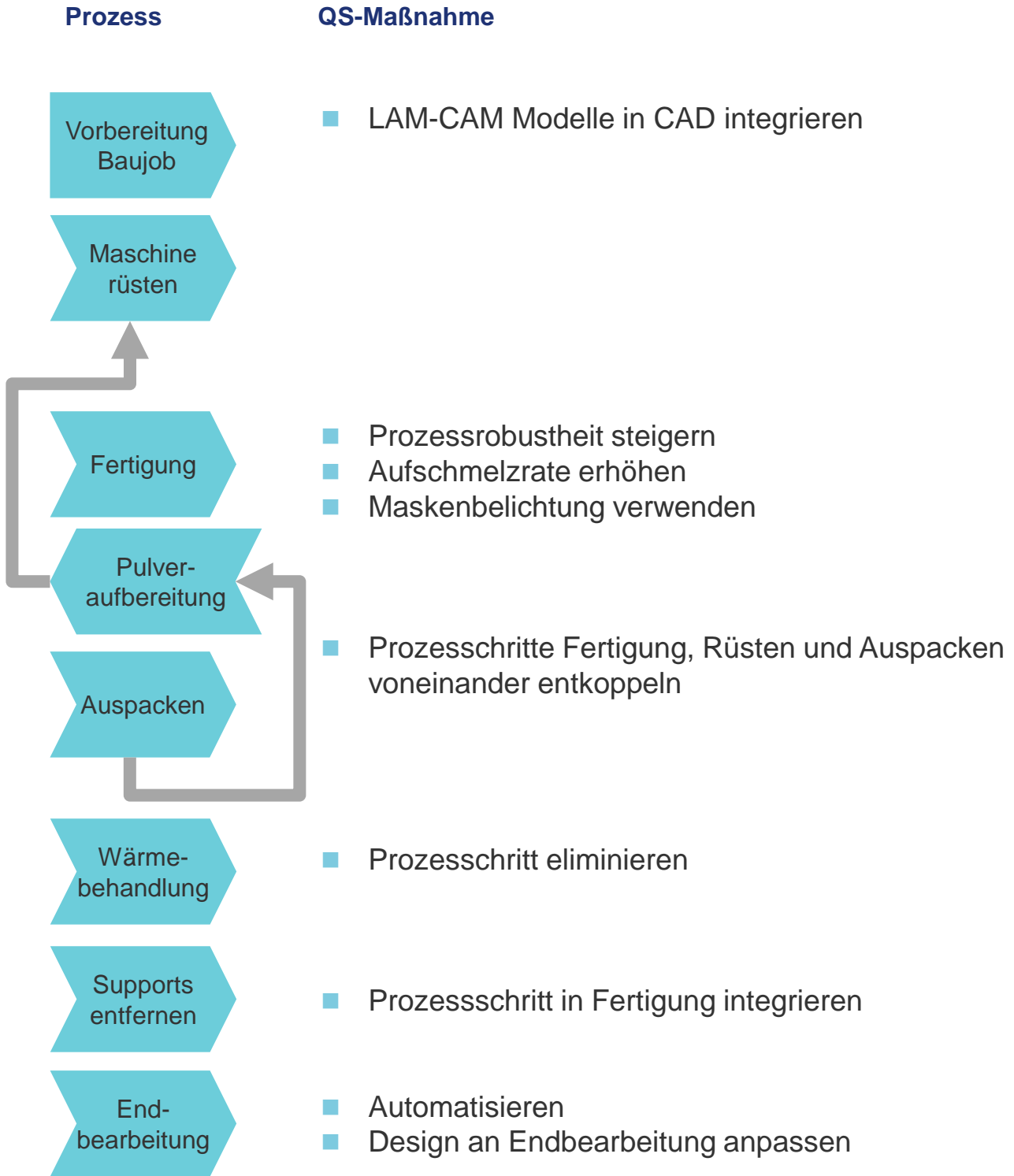
# Hybrider 3D-Druck – Fehlerpotentiale und Lösungsansätze (LAM Fertigung)



# Hybrider 3D-Druck – Fehlerpotentiale und Lösungsansätze (Vakuuminfusion)

Prozessschritt	Gefahrenpotenzial/Ursache	QS-Maßnahme	
Konstruktion hybrides Bauteil	Bei Konstruktion Schnittstellen zur Entformung berücksichtigen		
Konstruktion Werkzeug			
CFK-Gelege zuschneiden	Gewebeverzug und Ausfransen der Schnittkanten		
Gelege einlegen	Ausfransen und inhomogener Übergang am Rand		Faserrichtung beachten Schieben und Beulen des Geleges verhindern
Metallstruktur einsetzen			
Gelege um Einleger drapieren	Undichte Folie zieht Gasblasen ins Laminat		Position/ Lage optisch Vermessen
Steigerkanal, Mittelanguss & Vakuumfolie	Harzansammlungen bei ungünstiger Bauteilgeometrie		
Harz infundieren			
Bauteil entformen	Delamination		Messung Faservolumenanteil
Grate und Überhänge entfernen			

# Hybrider 3D-Druck – Optimierung der Prozesse

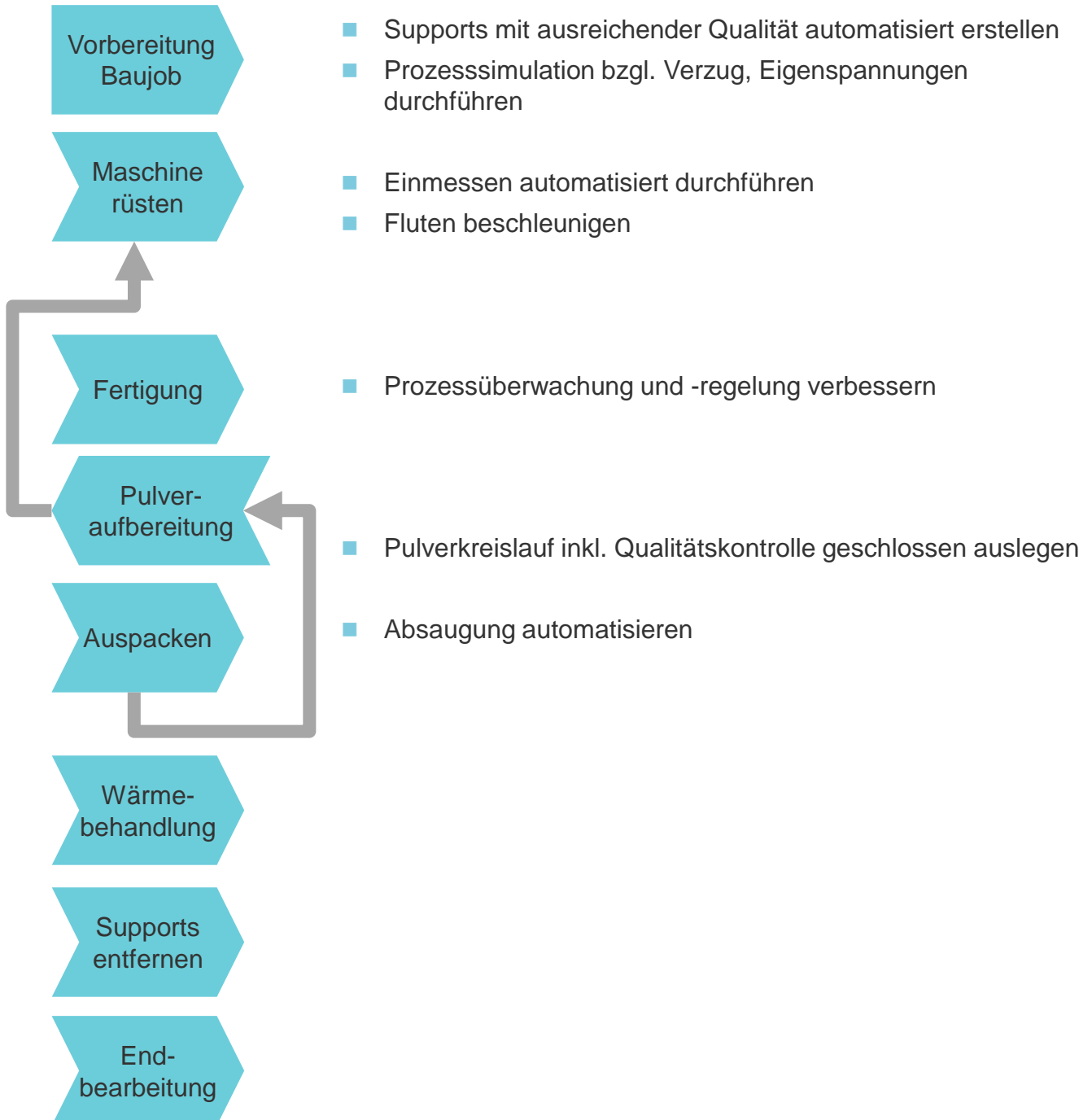




# Hybrider 3D-Druck – QS der LAM Prozesskette

## Prozess

## QS-Maßnahme





**Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit**  
 Prozesse in der künftigen Serienfertigung

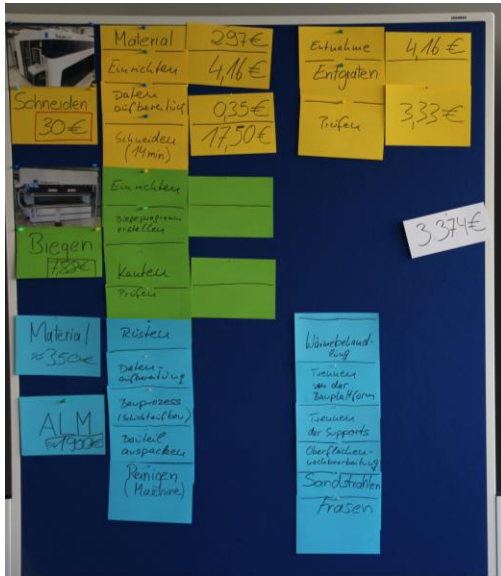
**Light-Manufacturing & Light-Factory:**  
 Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

- Multifunktions-3D-Druck
- Hybrider 3D-Druck
- 3D-Blechleichtbau

**Finale Demonstratoren**

# 3D-Blechleichtbau Aufstellen der Prozesskette

## Detailierung der Prozesskette und Zuordnung von Aufwänden



	Aufwand	Einzelkosten	1 Teil	100 Teile	1000 Teile	
Programm erstellen	30min	33,00 €	33,00 €	0,33 €	0,04 €	
	20min	41,6 €	41,6 €	0,42 €	0,04 €	
Materialkosten	12 kg	207,00 €	207,00 €	2,07 €	0,21 €	
	Basissückung der Anlage	4,16 €	4,16 €	0,04 €	0,00 €	
	Schneiden	17,50 €	17,50 €	0,18 €	0,02 €	
	Schweißnaht entnehmen	5 min	4,16 €	4,16 €	0,04 €	0,00 €
	Bauteil prüfen	1 min	0,83 €	0,83 €	0,01 €	0,00 €
Ergebnis	3 min	2,50 €	2,50 €	0,02 €	0,00 €	
		<b>76,00 €</b>	<b>76,00 €</b>	<b>0,76 €</b>	<b>0,08 €</b>	

	Aufwand	Einzelkosten	1 Teil	100 Teile	1000 Teile	
Programm erstellen	30min	33,00 €	33,00 €	0,33 €	0,04 €	
	20min	41,6 €	41,6 €	0,42 €	0,04 €	
Bauteile bereitstellen	2 min	1,66 €	1,66 €	0,02 €	0,00 €	
	Biegen	2 min	4,00 €	4,00 €	0,04 €	0,00 €
	Bauteil prüfen/evakuierbare Klimakammer	1 min	1,16 €	1,16 €	0,01 €	0,00 €
		<b>100,00 €</b>	<b>100,00 €</b>	<b>1,00 €</b>	<b>0,04 €</b>	

	Aufwand	Einzelkosten	1 Teil	100 Teile	1000 Teile	
Schweißnahtentfernen/Biegen	20h	1.000,00 €	1.000,00 €	10,00 €	1,00 €	
	30h	2.000,00 €	2.000,00 €	20,00 €	2,00 €	
Vorbereitungsbau	30h	975,00 €	975,00 €	9,75 €	0,98 €	
	20min	33,00 €	33,00 €	0,33 €	0,03 €	
Bauteile bereitstellen	2 min	1,66 €	1,66 €	0,02 €	0,00 €	
	Vorhalten der Bauteile per Hand	20min	23,95 €	23,95 €	0,24 €	0,02 €
	Maschine bestücken	15min	43,75 €	43,75 €	0,44 €	0,04 €
	Schweißen	30min	63,50 €	63,50 €	0,64 €	0,06 €
	Umposicionieren des Bauteils	10min	37,50 €	37,50 €	0,38 €	0,04 €
Bauteil prüfen & Entnehmen	5 min	8,33 €	8,33 €	0,08 €	0,01 €	
		<b>3.400,00 €</b>	<b>3.400,00 €</b>	<b>34,00 €</b>	<b>3,40 €</b>	

	Aufwand	Einzelkosten	1 Teil	100 Teile	1000 Teile
Programm erstellen	30min	33,00 €	33,00 €	0,33 €	0,04 €
	20min	41,6 €	41,6 €	0,42 €	0,04 €
Material	2,3 kg	230,00 €	230,00 €	2,30 €	0,23 €
	Maschine bestücken	5 min	14,50 €	14,50 €	0,15 €
Pulverschweißnaht	2,5h	312,50 €	312,50 €	3,13 €	0,31 €
	Bauteil prüfen	5 min	4,16 €	4,16 €	0,04 €
		<b>580,00 €</b>	<b>580,00 €</b>	<b>5,80 €</b>	<b>0,58 €</b>

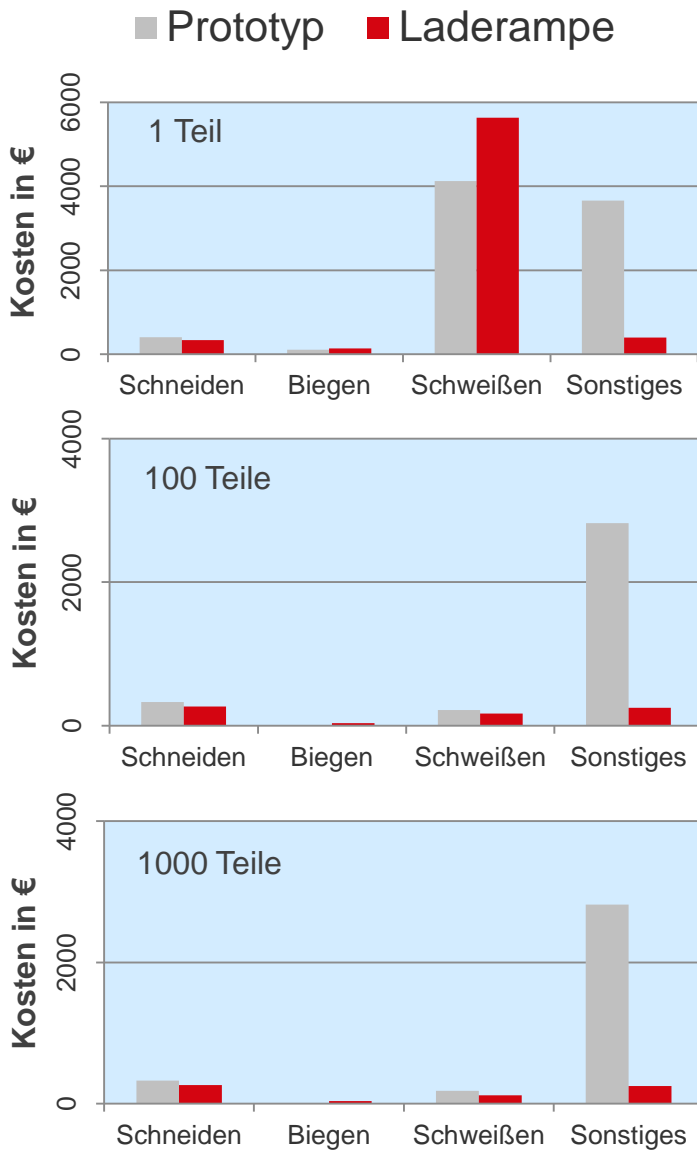
	Aufwand	Einzelkosten	1 Teil	100 Teile	1000 Teile
Programm erstellen	30min	33,00 €	33,00 €	0,33 €	0,04 €
	20min	41,6 €	41,6 €	0,42 €	0,04 €
Lasernoppen	5 min	10,41 €	10,41 €	0,10 €	0,01 €
	5 min	10,41 €	10,41 €	0,10 €	0,01 €
		<b>24,00 €</b>	<b>24,00 €</b>	<b>0,24 €</b>	<b>0,02 €</b>

Zur Kostenermittlung wurden die einzelnen Prozesse zur Herstellung der Ladebordwand gemeinsam mit den Workshopteilnehmern detailliert aufgelistet und in einzelne Arbeitsschritte untergliedert. Beim Biegen sind dies z.B. die Programmerstellung sowie das Rüsten der Maschine als fixe Aufwände, die auf die gesamte Stückzahl umgelegt werden müssen. Das Bauteilhandling, das Biegen und die Bauteilprüfung sind variable Arbeitsschritte, die bei jedem Einzelteil anfallen. Den einzelnen Arbeitsschritten wurden dann zunächst Aufwände (Zeit & Material) zugewiesen und über die Materialkosten, den Maschinenstundensatz und den Personalkosten die zugehörigen Fertigungskosten ermittelt. Die folgende Tabelle zeigt die Übersicht der Kosten.

gesamte Fertigungskosten				
	1 Teil	100 Teile	1000 Teile	
Laserschneiden	402,82 €	326,92 €	326,23 €	
Biegen	111,83 €	7,88 €	6,94 €	
Laserschweißen	4.122,07 €	216,52 €	181,02 €	
Lasernoppen	35,41 €	10,66 €	10,44 €	
Alternativ: Laser-Pulver-Auftragschweißen	(861,24€)	(564,24€)	(561,54€)	
<b>Gesamt</b>	<b>4.672,13 €</b>	<b>561,98 €</b>	<b>524,61 €</b>	

# 3D-Blechleichtbau Stückzahl Szenarien und Kostentreiber

## Anteilige Prozesskosten in Abhängigkeit der Stückzahl



### Stückzahl 1

- Schweißkosten überwiegen zunächst aufgrund von hohen Einmalkosten für Vorrichtungsbau und Programmierung. Dies gilt sowohl für die alte als auch die neue Bauweise.

### Stückzahl 100

- Die Schweißkosten reduzieren sich im Verhältnis zu den anderen Prozessschritten, da die Fixkosten auf eine große Stückzahl umgelegt werden.

### Stückzahl 1000

- hohe sonstige Kosten durch langsamen Pulverauftragschweißprozess zur Erstellung des Rutschschutzes

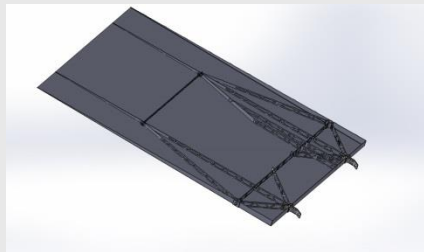
**Kostentreiber bei geringen Stückzahlen sind die einmaligen Vorrichtungs- und Programmierkosten für das Laserstrahlschweißen und Laser-Pulver-Auftragschweißen**

**Bei hohen Stückzahlen wird der optionale Pulverauftragschweißprozess Kostentreiber. Hier ist das alternative und signifikant schnellere Lasernoppen zu bevorzugen**

### Vergleich und Bewertung der Leichtbau-Ladebordwand

Zur Bewertung der Workshopergebnisse wird die entwickelte Leichtbau-Ladebordwand mit der konventionellen Bauweise gegenübergestellt und in den Kriterien Kosten, Funktion und Gewicht verglichen. Hierbei ist zu beachten, dass die neu entwickelte Ladebordwand für einen spezifischen Lastfall mit drei Punktlasten topologieoptimiert wurde, während die konventionelle Ladebordwand verschiedene Lastfälle aufnehmen muss.

### Gesamtvergleich



**Light-Alliance-Prototyp**



**herkömmliche Ladebordwand**

	Gesamt	ohne LAM und LPA	
<b>Preis 1 Teil</b>	8290 €	4670 €	6500 €
<b>Preis 100 Teile</b>	3370 €	560 €	720 €
<b>Preis 1000 Teile</b>	3330 €	520 €	660 €
<b>Gewicht</b>		89 kg	223 kg


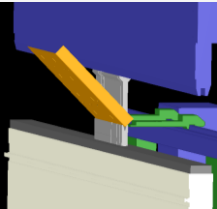
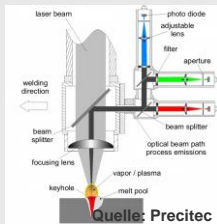
▶ deutliche Gewichtsreduktion gegenüber bisheriger Bauweise

▶ Kosten für LAM und LPA sind ausschlaggebend für Gesamtkosten

# 3D-Blechleichtbau Qualitätssicherungsmethoden

## Qualitätssicherungsmethoden entlang der gesamten Prozesskette

Zur Gewährleistung eines fehlerfreien Endproduktes muss entlang der gesamten Prozesskette der Laserbordwandherstellung, von der Konstruktion bis zum fertigen Produkt, die Qualität gesichert werden. Im Workshop wurden dafür detailliert die zur Verfügung stehenden Methoden und auch Sensoren vorgestellt. Im Folgenden werden für die wichtigsten Fertigungsprozesse beispielhaft QS-Methoden dargestellt.

Prozessschritt	QS-Maßnahmen
Schneiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erkennung der Schutzglasverschmutzung (z. B. Linsenbruchsensor)</li> <li>Überwachung der Einstechprozesse (Einstechsensor)</li> <li>Schneidprozessüberwachung (reflektierte Prozess- und Laserstrahlung, Plasmabildung, Schnittabriss)</li> </ul>  <p>Quelle: Precitec</p>
Biegen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biegesimulation</li> <li>Winkelkontrollsensor</li> </ul> 
Schweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bauteil- und Bauteillagekontrolle, Nahtfolgesensoren</li> <li>Leistungsmessung, Schmelzpoolüberwachung, Einschweißtiefenmessung</li> <li>Naht- und Nahtgeometriekontrolle (Oberflächenvermessung, Ultraschall, Röntgen)</li> </ul>  <p>Quelle: Precitec</p>

## ► Nächste Schritte



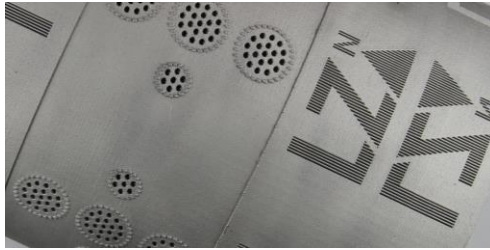
**Themenschwerpunkt: Qualität, Kosten, Zeit**  
Prozesse in der künftigen Serienfertigung

**Light-Manufacturing & Light-Factory:**  
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

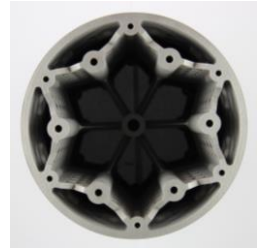
## **Finale Demonstratoren**

# Multifunktions-3D-Druck Finaler Demonstrator

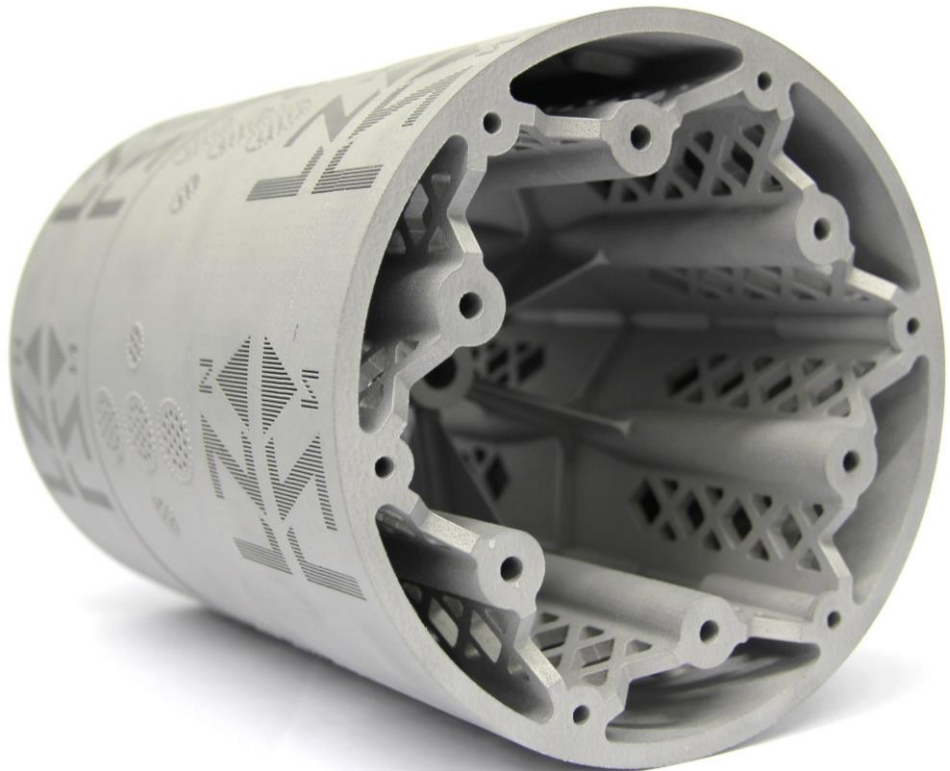
Funktionale  
Integration



Last-  
optimierte  
Struktur



Fertigungs-  
gerechtes  
Design

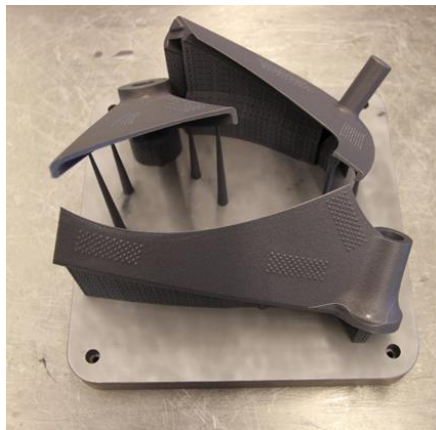
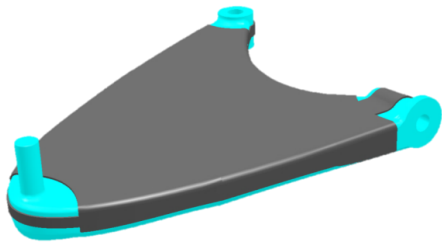


## Zusammenfassung

- Multifunktionale Prägewalze zur gleichzeitigen Prägung und Farbaufbringung mit integriertem Druckluftsystem
- Geringes Gewicht durch lastoptimierte Grundstruktur
- Innenliegende Kanalstrukturen und Hohlräume zum Transport von Fluiden
- Minimierung der Nacharbeit durch fertigungsgerechtes Design
- Ausschließliche Fertigung der Prägewalze mittels laseradditiver Fertigung



# Hybrider 3D-Druck Finaler Demonstrator



Hybrides  
 Design

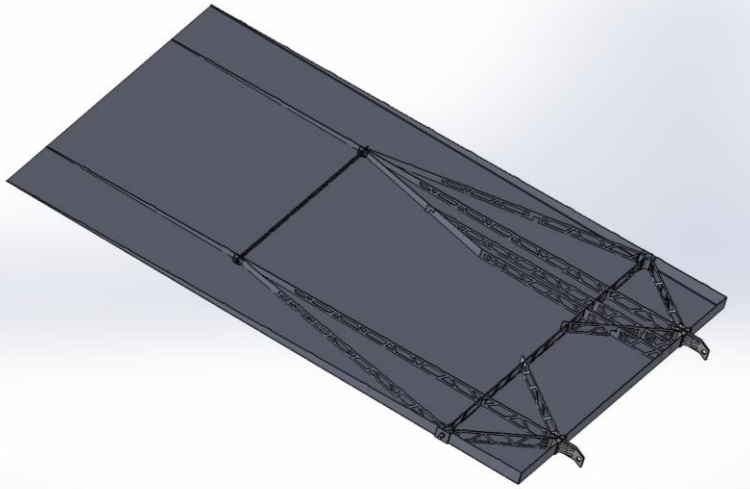
Gesteigerte  
 Festigkeit  
 des  
 Interfaces

Optimiertes  
 Bauteil-  
 gewicht

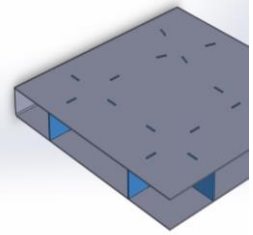
## Zusammenfassung

- Geringes Gewicht durch Verwendung von Leichtbau-Werkstoffen, strukturoptimierten metallischen Bauteilen
- Integrierte Pin-Strukturen zur Steigerung der Festigkeit der hybriden Werkstoffanbindung
- Hohe spezifische Festigkeit durch Verwendung des CFK-Werkstoffes
- Externe Interfaces durch konventionelle, metallische Schnittstellen realisierbar
- Verkürzung der Time-to-Market (Zeitbedarf für Entwicklung und Prototypenbau) durch additive gefertigten Werkzeugform für VA-RTM-Prozessschritt

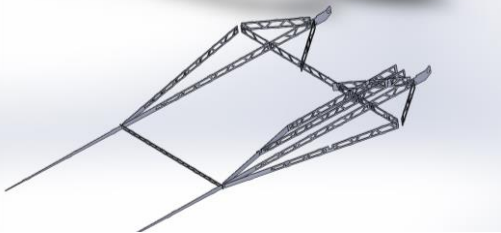
## 3D-Blechleichtbau Finaler Demonstrator



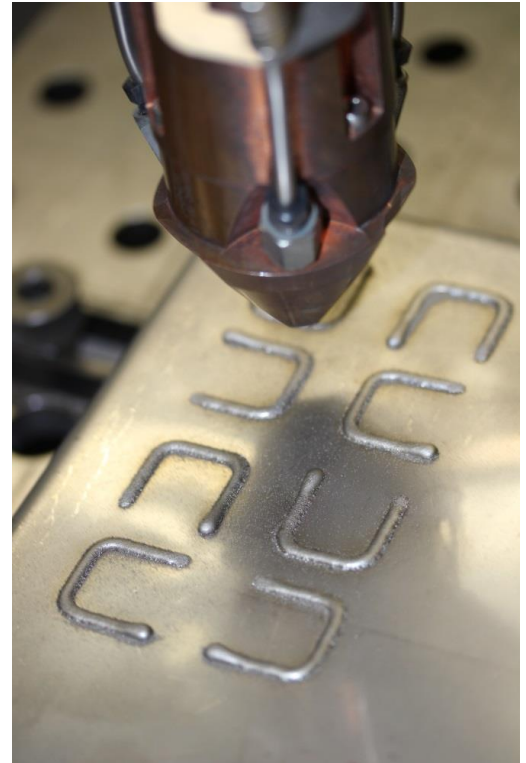
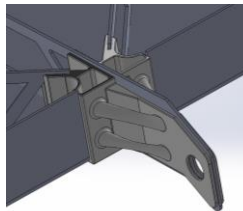
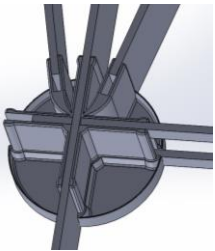
Blech-  
Sandwich-  
bauweise



Last-  
optimierte  
Versteifung



LAM-  
Lastein-  
leitungs- &  
Lagerpunkte



### Zusammenfassung

- Design einer topologieoptimierten, lastangepassten und fertigungsgerechten Leichtbaustruktur am Beispiel einer Ladbordwand
- Integration von Zusatzfunktionen (Rutschschutz, Korrosionsschutz, etc.)
- ca. 50 % Gewichtseinsparung gegenüber einer konventionellen Ladbordwand
- Reduktion der Fertigungskosten um ca. 20 % bei Stückzahl 1000
- Eignung der Fertigungsmethoden nachgewiesen

**LZN Laser Zentrum Nord GmbH**

Am Schleusengraben 14

D-21029 Hamburg

Web: [www.lzn-hamburg.de](http://www.lzn-hamburg.de)

E-Mail: [info@lzn-hamburg.de](mailto:info@lzn-hamburg.de)

Tel: +49 40 484010-500

Fax: +49 40 484010-999



**Light Alliance**