ADDITIVE HERSTELLUNG GROSSFORMATIGER BAUTEILE DURCH EINSATZ UNIVERSELLER INDUSTRIEROBOTIK

Using Universal Industrial Robots to Manufacture Large Parts Additively

Dr.-Ing . Uwe Klaeger
Dipl.-Ing. Torsten Felsch

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF

Erfurt, 22. Juni 2017

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

ÜBERSICHT

Overview

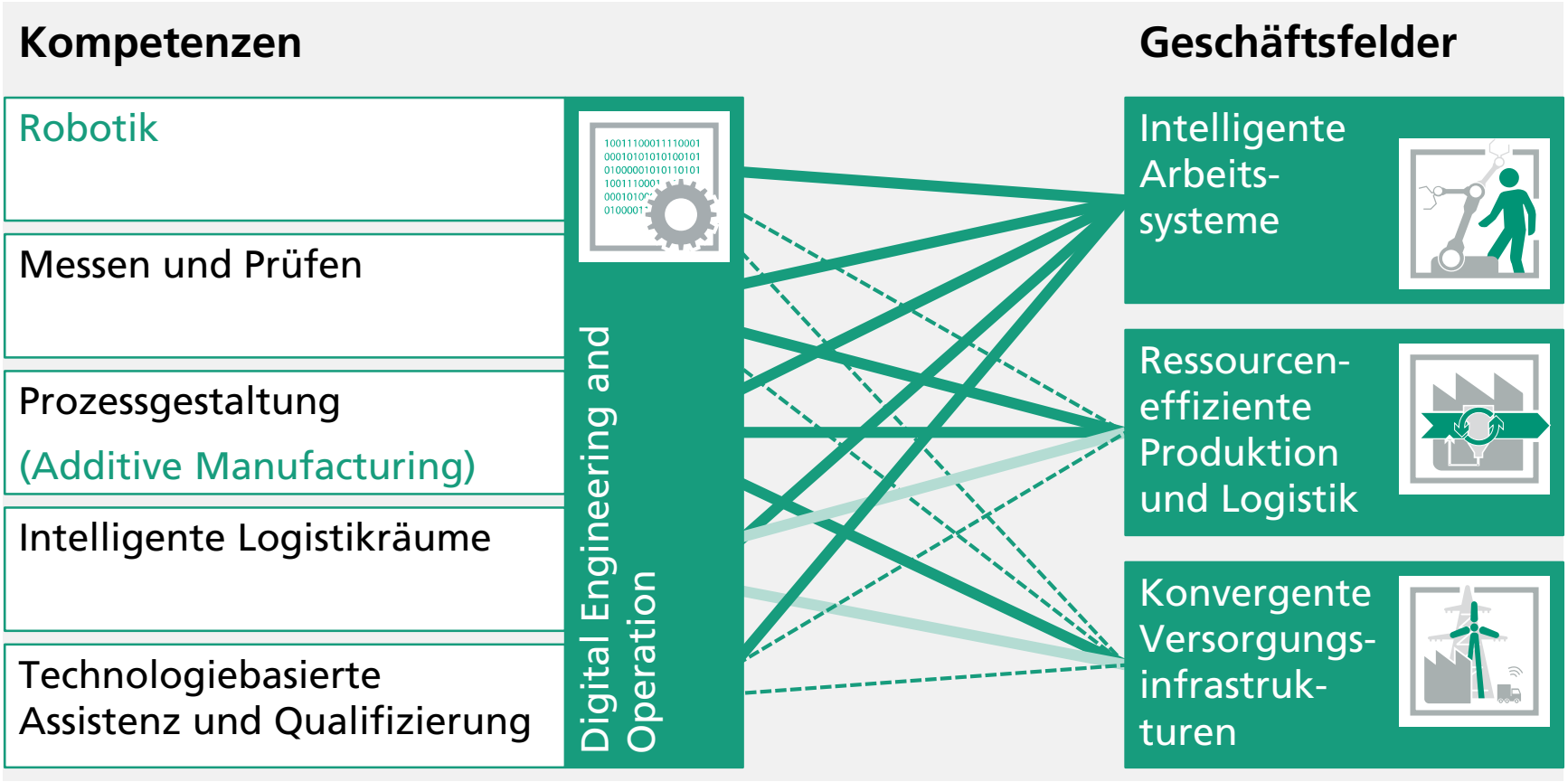
1. Das Fraunhofer IFF als Technologiepartner
2. Stand der Technik und aktuelle Aktivitäten bei der Fertigung großformatiger Bauteile
3. 3D-High Performance: Neues Fertigungskonzept zur generativen Herstellung großvolumiger Bauteile aus wahlfreien Kunststoffen
4. Macro Layer Deposition (MLD): Hybrides Fertigungskonzept für Großbauteile durch Kombination von Additive Manufacturing und Roboterfräsen
5. Ausblick – Weiterer Forschungsbedarf

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF als Technologiepartner

Vernetzte Kompetenzen für drei Geschäftsfelder



© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

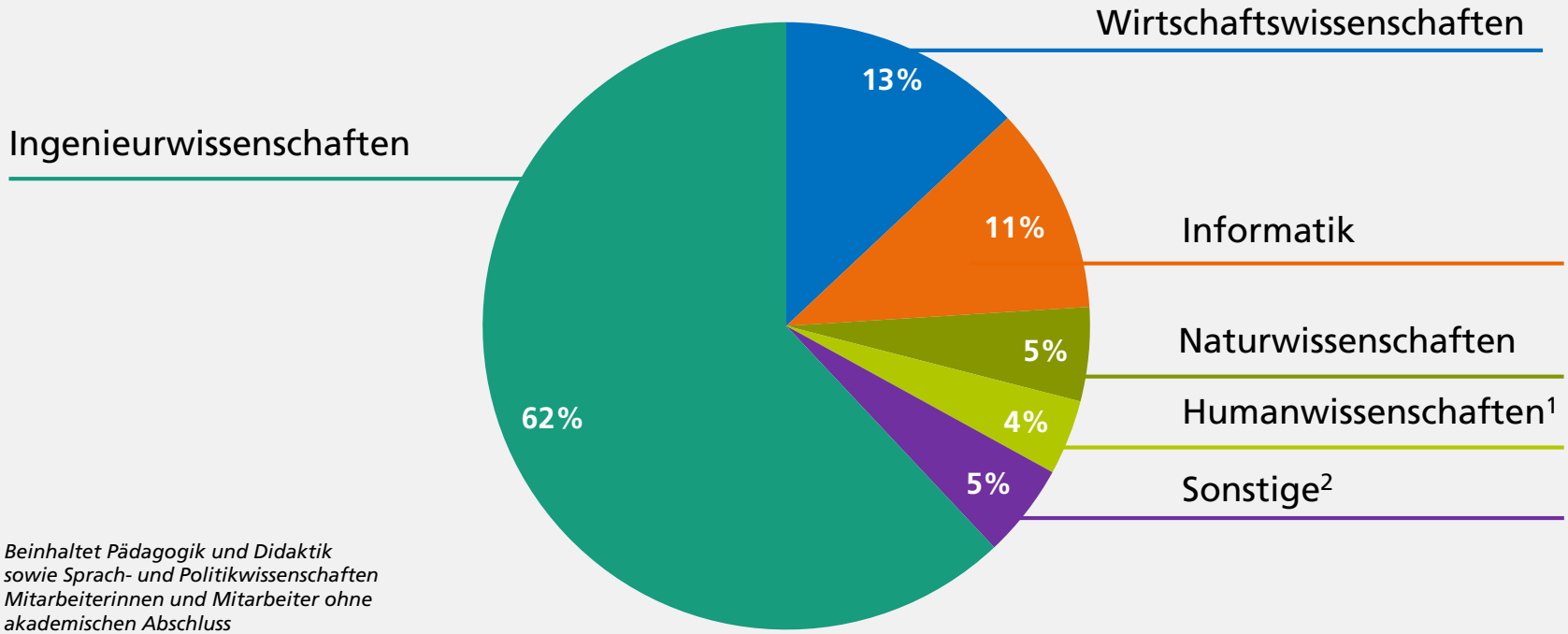
Fraunhofer IFF

Fraunhofer IFF: Interdisziplinär aufgestellt

Hauptgebäude
am Uni-Campus

Virtual Development
and Training Centre im
Wissenschaftshafen

Mitarbeiter aus verschiedensten Fachrichtungen



1 Beinhaltet Pädagogik und Didaktik sowie Sprach- und Politikwissenschaften
2 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ohne akademischen Abschluss

Stand Mai 2017

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Stand der Technik (1)

- **Gießereimodellbau:** Gießereimodelle, Kernkästen, große verlorene Formen/Negativmodelle
- **Werkzeug- und Formenbau:** Schäum- und Vakuum-formwerkzeuge, Werkzeuge für Blechumformung
- **Designmodellbau:** Datenkontrollmodelle, Messaufnahmen
- **Faserverbundfertigung:** Laminiermodelle für Schienenfahrzeuge, Rotorblätter u. ä.
- **Kunst- und Architekturmodelle**

Gegenwärtige Problemstellungen:

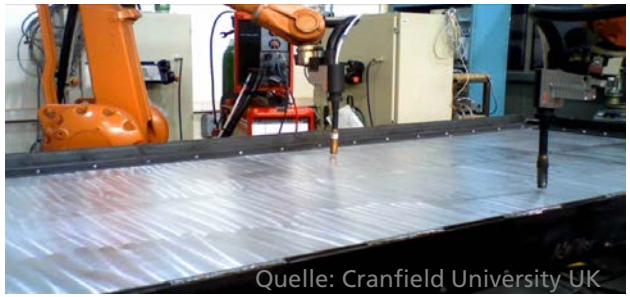
- Herstellung von Bauteilabmessungen > 1.000 mm
- Hoher manueller Aufwand und/oder limitierte Bauräume bei CNC-Maschinen
- 90% der Kosten entstehen bei Formherstellung

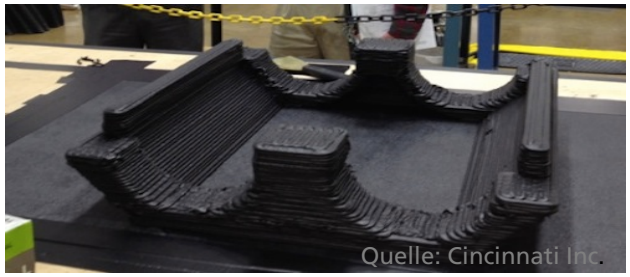
© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Stand der Technik (2)


Quelle: Cranfield University UK


Quelle: Cincinnati Inc.

Quelle: Voxeljet

Konventionelle Additive Manufacturing-Systeme

- Geringe Schichtdicken dadurch geringe Aufbauraten
- Beschränkte Bauteilgrößen durch eng begrenzte Prozessbedingungen (z. B. Prozesskammer)

Bestehende alternative Lösungen

- Laserauftragsverfahren (WAAM, Cranfield University), Schichten bis 4 mm, Bauteile 2.000x1.000x1.000mm³
- Dickschicht-FDM-Prozess (BAAM-CI), Bauteilgröße 6.000 x 2.300 x 1.800 mm³, sehr große Stufung
- Dickschichtprozess für Sandformen (Voxeljet); Schichtdicke 0,4 mm, Baugrößen bis 4.000x2.000x1.000 mm³
  - Eingeschränkte Oberflächengüte
  - Schichtaufbau erfolgt nur in eine Richtung → Anisotropes Eigenschaftsprofil der Bauteile
  - Sehr kostenintensiv (bis zu 1.400.000 US$)

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Generativer Bauteilaufbau mit Industrieroboter und Verarbeitung wahlfreier Kunststoffe

Quelle: Projekt HP3D

Automatische Herstellung von Großbauteilen mit 6-Achs-Industrieroboter

- Schichtweiser Materialauftrag durch Kombination eines speziellen Granulatextruders (Nadelverschlussdüse) mit einem flexiblen Knickarm-Roboter
- Wahlfreie standardisierte Granulate (ABS, PMMA, PP, PC, PC/ABS, PLA)
- Große Schichtdicken und hohe Aufbauraten von bis zu 5 kg/Std.
- Beheizte Arbeitsplattform und permanente Online-Temperaturmessung
- Echte 3D-Teile ohne Anisotropie durch sechs-achsige Bewegung der Bauplattform

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Systemkomponenten der Anlage

Quelle: Projekt HP3D

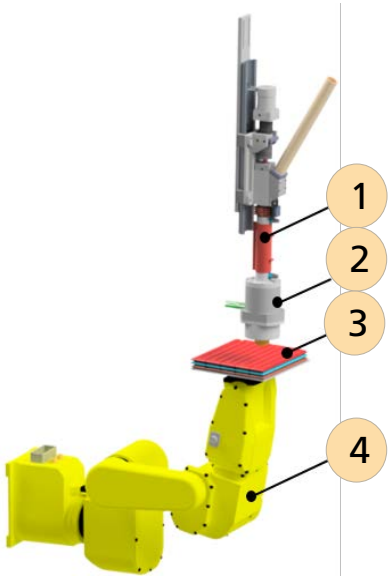
- Gelenkarmroboter für den Bauteilaufbau und das Bauteilhandling (1)
- Roboter für die Bearbeitung und Platzierung der Inserts (2)
- Grundrahmen (Portal) für die Aufnahme der Extruder-Einheiten (3)
- drei Extruder-Einheiten mit Nadelverschlussdüse
- Scansystem für die Temperaturmessung (Bauteiloberfläche, Massetemperatur) und Geometriedatenerfassung (4)
- Steuerungseinheit für die Gesamtanlage mit Kollisionserkennung (5)
- Entwicklungsbegleitendes Simulationswerkzeug »VINCENT«

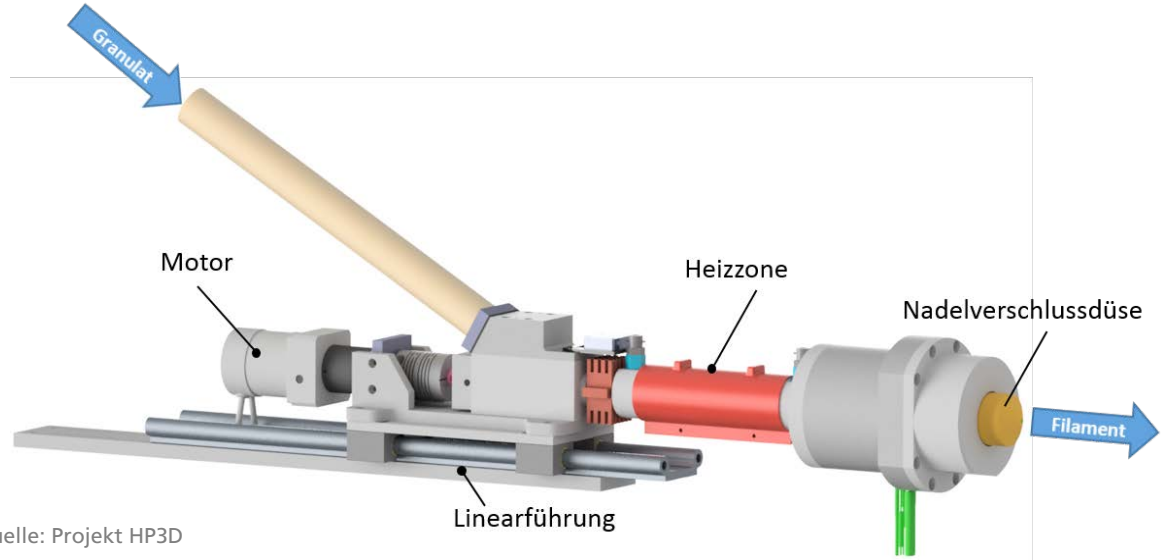
© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Extrudereinheit mit Nadelverschlussdüse





Quelle: Projekt HP3D

- Flexible und materialabhängige Systemanpassung durch modularen Aufbau
- Drei separat angesteuerte Extrudereinheiten (1)
- Nadelverschlussdüse (2) zur Vermeidung unkontrollierter Fadenbildung
- Beheizbare Bauplattform (3) für Vorheiztemperaturen von 50-100°C
- 6-achsiger Gelenkarmroboter (4) interagiert über Steuerung mit den Extrudern

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Entwicklung und Modifikation von Kunststoffgranulaten

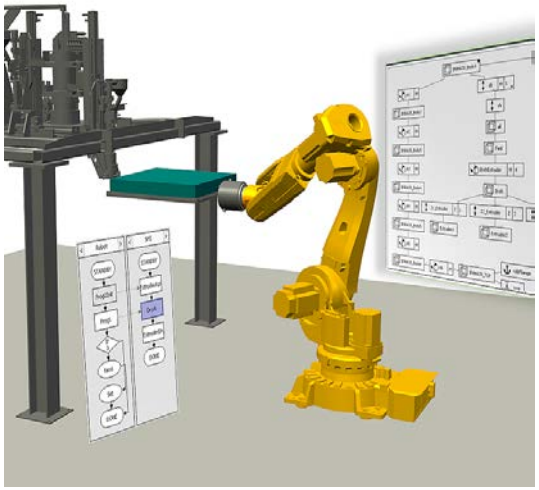
- Erzielung Prozessfähigkeit durch konstanten Materialfluss (in Extrusionslinie) und Reduktion des Wärmekoeffizienten über großen Temperaturbereich
- Untersuchung der Bindungsqualitäten zwischen den Polymerschichten → anfangs Probleme mit Lufteinschlüssen in den Schichten (Parameteroptimierung)
- Versuche zur Optimierung der Zwischenlagentemperaturen beim Bauteilaufbau (z. B. beste Ergebnisse für ABS bei 180°C)
- Versuche mit Hart-Weich-Kombinationen → Spannungsrissbildung

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

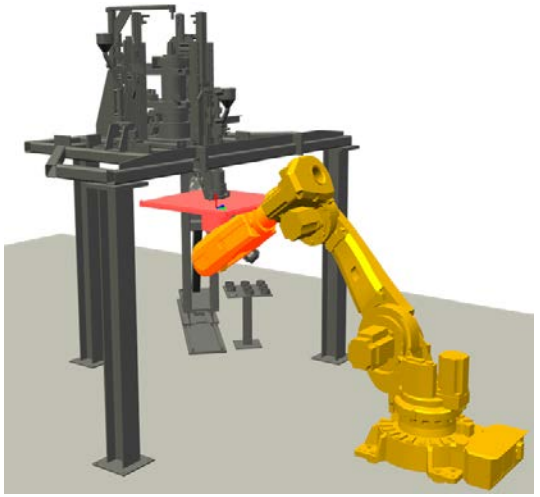
GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Entwicklungsbegleitende Simulation



Bahnplanung und Robotersimulation mit »VINCENT«



- Darstellung des vollständigen Roboter-Bewegungspfades mit Richtungsangabe
  - Schichtaufbau, Anfahrtsbewegungen, Meid-Bewegungen
- Visualisierung der Maschine (Grafisches Erzeugen der kinematischen Struktur)
  - Darstellung aller Achspositionen
- Verkürzung von Entwicklungs- und Inbetriebnahmezeiten
  - Geometrischer und funktionaler Test vor (!) Beginn der Fertigung
- Erkennung von Kollisionen durch Bewegungsraum-Analyse
  - Eigenkollisionen der Maschine, Werkstückkollisionen, Sicherheitsraum

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Fertigung großformatiger Bauteile
Weiterer Forschungsbedarf

Quelle: 3D-Schilling

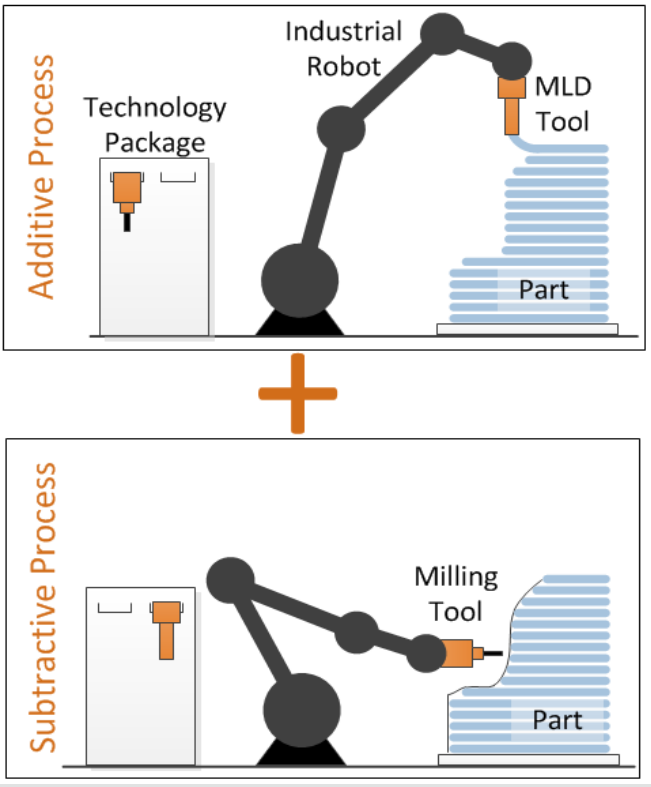
- Erweiterung der Materialpalette um wasserlösliche Polyvinylalkohole (PVA)
- Echtes Multimaterial-System durch Einsatz von drei Extrudereinheiten:
  - Bauteile mit örtlich definierten Leitfähigkeiten (Leitbahnen)
  - Gradierte Bauteileigenschaften (Kombination von harten und weichen Materialkomponenten)
  - Bauteile mit definierter Glas- oder Kohlefaserverteilung (Festigkeitsoptimierung)
- Integration zusätzlicher Roboterfunktionen (z. B. für Teilemontage und Einbetten von Inserts/ Funktionselementen)
- Optimierung der Roboterbahnplanung und Verfahrwege

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Hybrides Fertigungskonzept



Automatische Herstellung großformatiger Bauteile mit moderner Industrierobotik

- Kombination von Additive Manufacturing und Knickarmroboter als zweistufiger Prozess

  - Schritt 1: Schichtweiser Materialauftrag
  - Schritt 2: Nachbearbeitung durch Roboterfräsen

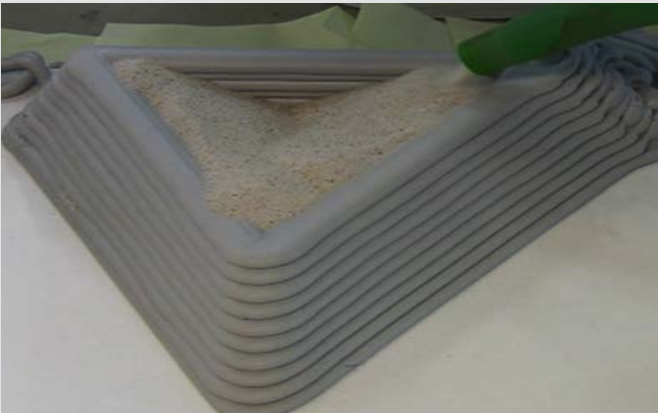
- Technologie für die schnelle und effiziente Herstellung von großen endkonturnahmen Bauteilen:
- Roboter generieren komplexe großvolumige Modelle durch schichtweisen Auftrag von härtbaren Formmassen oder Schäumen und anschließendem Fräsen der Bauteilkontur

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 1: Additive Manufacturing
Verwendete Werkstoffe & Materialzuführung



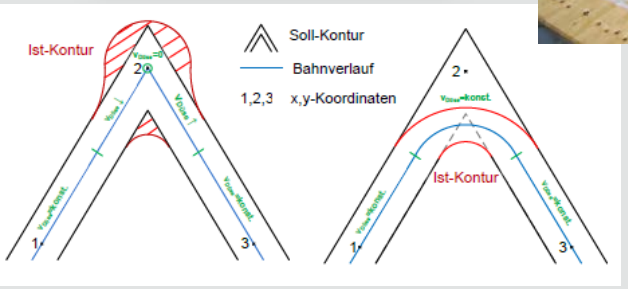
- Duroplastische Materialien
  - Polymerwerkstoffe mit irreversibler Aushärtung
  - 2-Komponenten-Werkstoffe (chemische Aushärtung)
  - Hochviskose und pastöse Materialien
  - Verwendung der Materialien sowohl für Modell- als auch Werkzeug- und Formenbau
  - Geeignet zum Laminieren und Nachbearbeitung durch Fräsen
  - Topfzeiten: ca. 20 min
  - Aushärtezeiten: ca. 20 min
- Flexible Schläuche vom Mischaggregat zur Düse am Roboter TCP durch dynamischen statischen Mischer

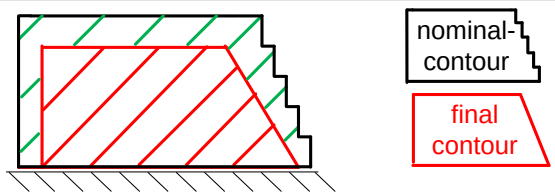
© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 1: Additive Manufacturing
Konstruktive Restriktionen





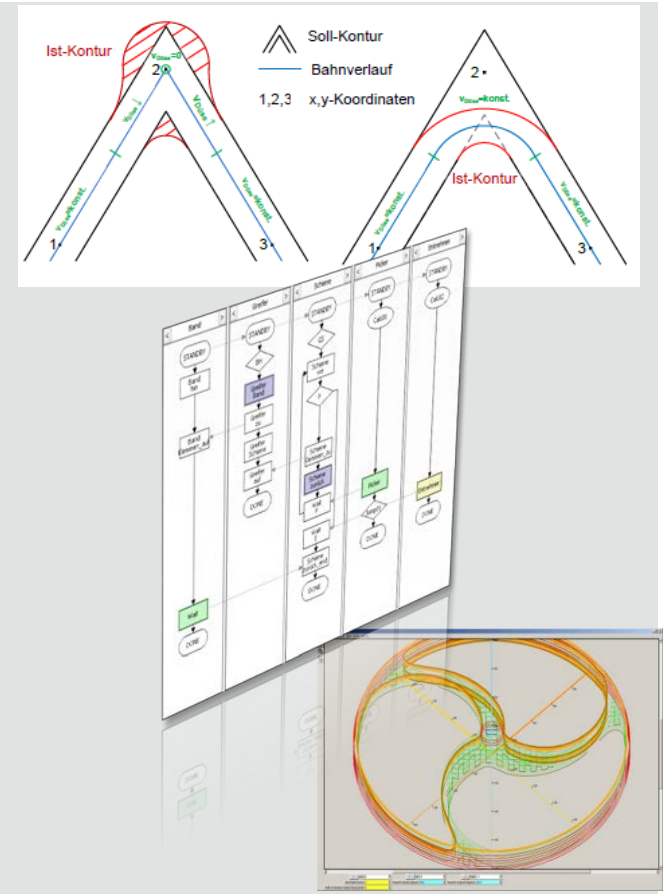
- Minimale Wandstärke: ca. 5-10 mm
- Bauhöhe = f (Aushärtungszeit)
- Hinterschneidungen: nur für Bereiche ohne Nachbearbeitung
- Automatische Anordnung von Formtrennlinien nur schwer möglich
- Zusätzliche Bearbeitungszugaben (Aufmaß) → Offsets für die Nachbearbeitung notwendig (Konturäquidistanten)
- Keine rechteckigen Stranggeometrien herstellbar (abgerundete Ecken)

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 1: Additive Manufacturing
Automatische Bahnplanung



- Entwicklungsbegleitende Simulation mit Softwaretool »VINCENT« → Automatische Bahnplanung und Robotersimulation
- Datenübernahme aus 3D-CAD-Modellen → STL-File → G-Code → Roboter-Code
- Prozessvisualisierung und Erreichbarkeitsprüfung aller Bahnen sowie Kollisionskontrolle in Echtzeit (Optimierung von Arbeitsraum und Verfahrwegen)
- Sicherheitsräume werden beim Schichtaufbau automatisch generiert (Sicherheitsregeln verhindern Kollisionen)
- Virtuelle und reale Inbetriebnahme (Virtuelle und reale Maschine laufen parallel, Hardware-in-the-Loop-Test)

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 1: Additive Manufacturing
Demonstration: Steuerrad

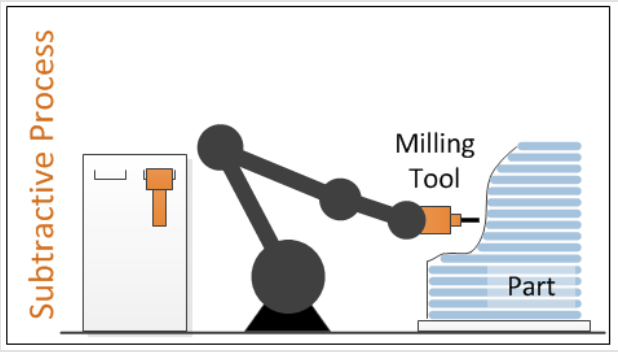
- Additiver Materialauftragsprozess mittels Roboter geführtem Misch- und Dosierwerkzeug
- Hohe Aufbauraten und hohe Schichtdicken bis 20 mm

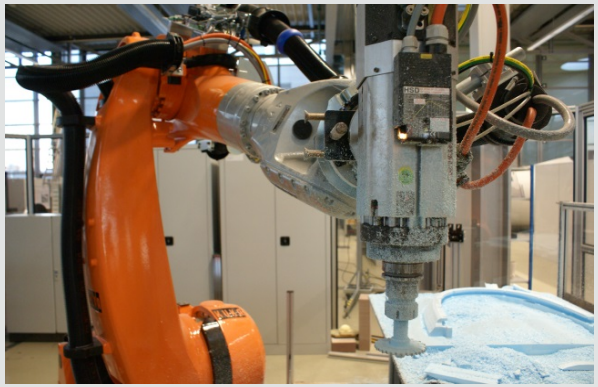
© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 2: Nachbearbeitung/Finishing
Roboterfräsen





- Verschiedene Frässtrategien in Abhängigkeit des verwendeten Materials
- Einsetzbar für einstufige, mehrstufige und Reparaturprozesse
- Integrierte Staubabsaugung und/ oder Späneabfuhr
- Spezielle Fräs-Hardware (Spindel, Kühlung, Werkzeugwechsler) für den Einsatz eines Roboter-geführten Werkzeuges
- CAM-Softwaremodul für den Einsatz mit Industrierobotern
  - Verwendung von ISO-G-Code der CAM-Software
  - Umwandlung von NC- in Robotercode

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Macro Layer Deposition (MLD)
Schritt 2: Nachbearbeitung/Finishing
Roboterfräsen Demonstration: Steuerrad

- Einsatz des Roboters als CNC-Maschine
- Präzise Fräsbahnen und hohe Genauigkeit der Werkstück-Endkontur

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

MLD - Prozesseigenschaften und Kundennutzen
Derzeitiger Leistungsumfang

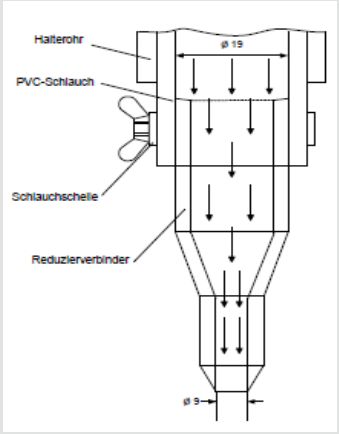
- Große Bauteile von 1m³ bis ~10m³ (5mx1,5mx1,5m)
- Minimierung des Materialeinsatzes durch genaue Dosierung
- Direkte Herstellung von großen und geometrisch komplexen Bauteilen aus 3D-CAD-Daten ohne aufwändige Zwischenschritte
- Ideal für Kleinserien und bei hoher Teileflexibilität (Losgröße 1)
- Kostenreduzierung durch Verwendung von Füllmaterial (z. B. Sand, Granulate)
- Fügen von Teilmodellen zu Großbauteilen
- Integration von Funktionselementen (z. B. Sensoren, Dehnmess-Streifen) durch den Roboter
- Durchführung von Messaufgaben

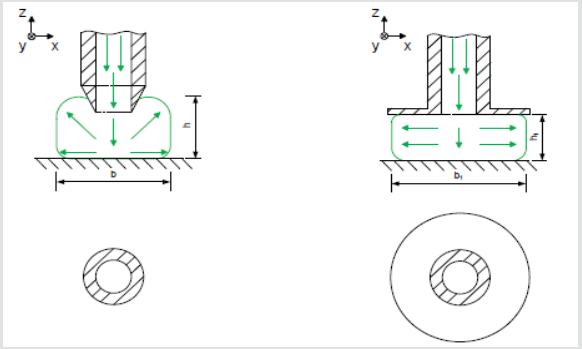
© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Ausblick
Weiterer Forschungsbedarf





- Optimierung der Misch- und Dosiertechnik
- Erweiterung der Materialpalette um physikalisch aushärtende Formstoffe
- Weitere Optimierung der Aushärtezeiten durch Additive/Zusätze
- Erhöhung der Bauteilabmessungen auf 5.000 x 3.000 x 2.000 mm³
- Ausweitung des Anwendungsspektrums auf den Betonbau (Formen für Groß-Schalungselemente)
- Parallelisierung des Fertigungsprozesses durch mehrere Arbeitsstationen: 3D-Auftrag, Aushärtung, Fräsen, Fügen/Kleben Einzelteile

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer IFF

Ihr Technologiepartner für angewandte Forschung in Sachsen-Anhalt

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Telefon: +49 391 4090-0

ideen@iff.fraunhofer.de
www.iff.fraunhofer.de

Virtual Development and Training Centre des Fraunhofer IFF Magdeburg

Joseph-von-Fraunhofer-Straße 1
39106 Magdeburg

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2017
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schenk

Fraunhofer IFF