SUPER TOOLER

Integrierte FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle zur effizienten Herstellung grossformatiger Formwerkzeuge für die Composite-Verarbeitung

FOREL

FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM FÜR RESOURCENEFFIZIENTE LEICHTBAUSTRUKTUREN DER ELEKTROMOBILITÄT

Konsortium

COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden
Leichtbau Systemtechnologien Korropol GmbH
robot-machining GmbH

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gefördert (Förderkennzeichen 02P14A010 – 02P14A013) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor / bei den Autoren.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Niels Modler, Christian Vogel, Dr.-Ing. Michael Stegelmann, Martin Pohl
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), TU Dresden

Sammy Techritz, Tobias Kastner
Leichtbau- Systemtechnologien Korropol GmbH (LSK)

Bernd Lukas, Alfred Kaser
Robot Machining GmbH (RM)

Gernot Schaffler
COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH (Collin)

INHALTSVERZEICHNIS

1 KURZDARSTELLUNG 1

2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DAS PROJEKT 4
2.1 Voraussetzungen 4
2.2 Stand der Technik 5
2.3 Zielstellung 10
2.4 Projektverlauf 12

3 PROJEKTERGEBNISSE 14
3.1 Technologische Grundlagen zur Prozessentwicklung 14
3.2 Vorauswahl und Charakterisierung von Vorzugswerkstoffen 16
3.2.1 Thermogravimetrische Analyse 17
3.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie 18
3.2.3 Rheometrie 19
3.3 Modellentwicklung zur Vorhersage des transienten Abkühlverhaltens 20
3.4 Entwicklung und Realisierung der Basiskomponenten der Roboterzelle 24
3.4.1 Anlagenkonzepte zum effizienten Aufbau der FDM-Strukturen anhand von Bewegungsstudien 24
3.4.2 Einbindung einer Rotationsachse in der Roboterzelle 26
3.4.3 Entwicklung von Einrichtungen zur Handhabung der LPU 30
3.5 Entwicklung der Light-Plastification-Unit (LPU) 32
3.5.1 Voruntersuchungen und Auslegung der Extrusionsleistung 32
3.5.2 Entwicklung angepasster Extruderspezifikationen für die Rezyklatverarbeitung 34
3.5.3 Entwicklung einer Materialförderstrecke mit integriertem Trocknungssystem 37
3.5.4 LPU-Entwicklung für einen automatischen, intermittierenden Betrieb 38
3.6 Systeme zur Bewegungs- und Prozesssteuerung 43
3.6.1 Integration einer *SuperTooler*-Prozesssteuerung im Softwaresystem *PowerMill* 46
3.6.2 Entwicklung und Erprobung der Steuerungs- und Regelkonzepte 48
3.7 Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems 53
3.7.1 Aufbau der FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle 53
3.7.2 Iterative Parameterabstimmung innerhalb des Additiv-Prozesses 54
3.7.3 Subtraktive Bearbeitung des Additiv-Rohteils 57
3.8 *SuperTooler*-Technologiedemonstrator 60
3.8.1 Motivation 60
3.8.2 Herstellung anforderungsgerechter Funktionsträger 61

3.8.3 Additive Spannschablone für FKV-Bauteile 66

4 VERWERTUNGSPLAN 68
4.1 Wirtschaftliche Verwertungsperspektive 68
4.2 Wissenschaftlich technologische Verwertungsperspektive 69
4.3 Bekanntgewordener Fortschritt an anderen Stellen 71

5 ZUSAMMENARBEIT UND AUSSENDARSTELLUNG 72
5.1 *FOREL*-Koordinationsprojekt: Zusammenarbeit und Unterstützung 72
5.2 Außendarstellung 73

6 QUELLEN 74

1 KURZDARSTELLUNG

Vor dem Hintergrund der weltweiten Ressourcenverknappung zählt der Leichtbau mit seiner inhärenten Material- und Energieeffizienz branchenübergreifend zu den Schlüsseltechnologien[1] bei der Entwicklung moderner Hightech-Produkte mit hoher Nachhaltigkeit und Wertschöpfung. Hierbei zeichnet sich derzeit ein tiefgreifendes Umdenken ab – weg von den klassischen Werkstoffen und Technologien hin zu maßgeschneiderten Hybridverbunden und effizient kombinierten Fertigungsprozessen. Besondere Vorteile bietet hier die noch junge, aber stark aufstrebende Werkstoffgruppe der faserverstärkten Verbundwerkstoffe (engl.: Composites). Hierbei werden – aufgrund der niedrigeren Dichten – im Vergleich zu den konventionellen Werkstoffen höhere spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten erreicht. Darüber hinaus lässt sich die anisotrope Faserstruktur – ähnlich wie bei den Vorbildern in der Natur – für die Belastungs- und Kraftflussrichtungen maßschneidern, so dass das Material sparsam eingesetzt und äußerst effizient ausgenutzt wird.

Die Herstellung von Faserkunststoffverbund-Bauteilen in Kleinserien bzw. Einzelstückproduktion bedingt spezifisch angepasste Werkzeugsysteme. Hier bieten Kunststoff-Werkzeuge ein besonderes Einsatzpotential, wobei die Herstellung großformatiger Composite-Strukturen (>1 x 1 x 1 m³ Kantenlänge) – etwa für Schienenfahrzeuge, Schiffe, Windenergieanlagen oder im Maschinenbau – bislang nur durch den Einsatz von GFK(glasfaserverstärkter Kunststoff)-Werkzeugen kostengünstig zu realisieren ist. Die Herstellung derartiger GFK-Werkzeuge erfordern die Fertigung und den Einsatz eines sog. Master-Models, das bislang vorrangig aus Polyurethan(PUR)-Hartschaumblöcken zusammengesetzt, verklebt und auf Basis von 3D-CAD-Datensätzen überfräst wird. Die Fertigung der Grundstruktur dieser Master-Modelle geschieht demnach bislang überwiegend in aufwendiger Handarbeit ohne den Einsatz automatisierter Anlagentechnik. Die Modellkosten für diesen Master übersteigen bislang die eigentlichen Herstellkosten der GFK-Werkzeugschale um ein Vielfaches

[1] Siehe auch die „Hightech-Strategie für Deutschland“ der Bundesregierung.

(ca. 5:1), obwohl die geforderten – vergleichsweise groben – Toleranzen sogar den Einsatz kostengünstiger Roboterfrässysteme in den Fertigungszellen erlauben.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen wurde in dem Vorhaben „*SuperTooler*" eine Hybridfertigungszelle entwickelt, die es erstmals ermöglicht, mit nur einem Robotersystem additiv und subtraktiv großvolumige Werkzeuge zu fertigen. Aufbauend auf einer vorhandenen 7-Achs-Roboter-Fräszelle wurden dafür eine weitere Achse und eine Light Plastification Unit (LPU) im Gesamtsystem integriert, die von dem Robotersystem aufgenommen und angetrieben werden kann. Mit der LPU können flexibel thermoplastische Kunststoffe und insbesondere wiederaufbereitete Rezyklate verarbeitet werden und ermöglichen so die Abbildung eines geschlossenen Werkstoffkreislaufs. Die Anlagentechnik wurde dabei so ausgelegt, dass Austragsleistungen von etwa 15 kg/h bei Verarbeitungstemperaturen von maximal 300 °C erreicht werden können. Basis der Anlage bildet dabei ein KUKA Industrieroboter KR-500 mit einer Betriebslastgrenze von 500 kg, der sowohl die additive als auch subtraktive Fertigungseinheit in der Gesamtanlage führt. Die Werkzeugwechselsysteme zur Integration der LPU wurden dabei kompatibel mit der Hybrid-Fertigungsanlage ausgelegt, sodass geringe Wechsel- und Anlaufzeiten von weniger als fünf Minuten erreichbar sind.

Um einen durchgehenden Workflow bei der Handhabung der hybriden Fertigungszelle zu erreichen, wurde ein anlagenkompatibles Softwaresystem für diesen unikalen Fertigungsprozess konfektioniert, wobei der Fokus insbesondere auf der kompatiblen Integration der additiven Prozess- und Anlagenparameter zur adaptiven Steuerungssystematik des Softwaresystems lag.

Unter Berücksichtigung der deutlich reduzierten Rohstoffkosten, etwa durch den Einsatz von Polyamid6(PA6)-Rezyklat, konnten die Werkzeugkosten mittels der Hybridfertigungszelle deutlich reduziert werden. Das Forschungsprojekt legt damit die Grundlage für eine ganz neue Klasse von Fertigungszellen bzw. Fertigungsanlagen, die eine Verknüpfung der additiven und subtraktiven Fertigung für mittlere (> 0,5 x 0,5 x 1 m³) und große (> 2 x 2 x 3 m³) Strukturen ermöglicht. Die Projektergebnisse strahlen schon jetzt auf angrenzende Branchen wie die Gießereitechnik (Urmodelle), den allg. Maschinenbau (Maschinenbetten, Tragsysteme), die Luft- und Raumfahrt (Montage- und Kleblehren, Transportgestelle) und auch die Architektur (Fassadenverkleidungen, Inneneinrichtungen) aus.

Begleitend zu der Entwicklung der Hybridfertigungszelle wurde deren Einsatzpotential für die Elektromobilität untersucht. Durch die Integration des *SuperTooler*-Vorhabens in das „Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität" (*FOREL*) fand demnach eine begleitende Bewertung des Fertigungsprozesses und der Anlagentechnik hinsichtlich eines Einsatzes in der Elektromobilität statt.

Anhand eines Realisierungsbeispiels zur Entwicklung hochintegrativer Hightech-Spannschablonen für FKV-Bauteile konnten so die entwickelten Methoden und Anlagenkomponenten in einem Brückenprojekt im Themenfeld „Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient" validiert werden. Demnach bietet die additive Fertigung generell ein großes Potential für die künftige Werkzeugentwicklung für Fahrzeugstrukturen und dabei insbesondere auch für die Reparatur bzw. den Ersatz von beschädigten Einzelkomponenten. Weiterhin bestand innerhalb von *FOREL* die Verbindung zum *ReLei*-Vorhaben, in dem unter anderem Kohlenstofffasern und Thermoplastwerkstoffe rezykliert, analysiert und eingesetzt und anschließend in der Hybridzelle verarbeitet wurden. Im Hinblick auf die EU-Altauto-Richtlinie, welche ab 2015 eine Wiederverwertung oder Wiederverwendung von mindestens 95 % des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr vorschreibt[2], erlangen Wiederverarbeitungstechnologien von den in Fahrzeugen eingesetzten und schließlich rezyklierten Werkstoffen außerordentliche Relevanz.

[2] Richtlinie2000/53/EG. (2000). Richtlinie des Europäischen Parlaments und Rates über Altfahrzeuge

2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DAS PROJEKT

2.1 Voraussetzungen

Im Zuge des weltweit starken Bevölkerungswachstums und der damit verbundenen massiven Nachfrage nach wertvollen Ressourcen – insbesondere in den BRIC-Staaten – wird es zunehmend schwerer fallen, in Deutschland als Hochtechnologie- und Hochlohnland mit seinen vergleichsweise geringen natürlichen Bodenschätzen, die Arbeitsplätze zu sichern und den damit einhergehenden Wohlstand zu halten. Neben der Pflege einer exzellenten Wissenschafts- und Forschungskultur kommt somit insbesondere einer strategischen Rohstoffpolitik und der nachhaltigen Ressourcenschonung durch geschlossene Werkstoffkreisläufe eine herausgehobene Bedeutung zu. Als vorrangige deutsche Entwicklungsziele müssen somit die kontinuierliche Steigerung der Ressourceneffizienz aktueller Produkte und Prozesse sowie die Einrichtung neuartiger Wertschöpfungsketten für innovative Zukunftsprodukte im Vordergrund stehen.

Um die Spitzenposition Deutschlands als Leitmarkt sowie Leitanbieter auf diesem Gebiet weiter auszubauen, bietet die Elektromobilität als ein Schlüssel zur klimafreundlichen Umgestaltung der mobilen Gesellschaft enormes Potential. Ein Forschungsschwerpunkt der Elektromobilität liegt auf der Fahrzeugstruktur in neuartiger Hybridbauweise. Hierbei vollzieht sich derzeit – neben einer Optimierung der verwendeten Werkstoffe, Bauweisen und Fertigungsverfahren – ein tiefgreifender Wandel hin zu neuartigen Werkstofftechnologien und erweiterten Kombinationsverfahren. Dabei stellt der vermehrte Einsatz von Verbundwerkstoffen und intrinsischen Hybridstrukturen für die Automobilhersteller eine besondere Herausforderung dar. Somit fällt vor allem dem Leichtbau mit seiner inhärenter Material- und Energieeffizienz eine Schlüsselfunktion über den gesamten Produktlebenszyklus zu (vgl. hierzu Hightech-Strategie des Bundes). Zudem werden mit steigender Variantenvielfalt und sinkenden Losgrößen zunehmend höhere Anforderungen an die Flexibilität und Effektivität von Produktionssystemen gestellt. Jedoch stehen gerade im Bereich der Faserkunststoffverbunde (FKV) dem aktuellen Nachfrageboom unzureichend entwickelte Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien entgegen. Gerade bei großvolumigen FKV-Strukturen ist der Aufwand bei der Werkzeugfertigung für die Bauteilherstellung enorm hoch, so dass sich ein großer Bedarf an Automatisierung bei der Werkzeugfertigung ergibt.

Für eine derartige automatisierte Werkzeugfertigung muss zunächst ein geeignetes Anlagen- und Bearbeitungskonzept entwickelt werden. Dabei bietet sich insbesondere der kombinierte Einsatz von additiver und subtraktiver Fertigung in einem Anlagensystem an. Die Bestandteile für eine derartige Anlagentechnik sind eine kontinuierliche Werkstoffzuführung und -aufbereitung, ein angepasstes Handlingsystem, eine automatisierte Nachbearbeitung sowie ein zusammenhängendes Steuerungssystem.

Vor diesem Hintergrund haben sich namhafte Verbundpartner zusammengefunden, einen neuartigen Technologieansatz zur effizienten Herstellung großformatiger Formwerkzeuge für die FKV-Verarbeitung mit geschlossenem Werkstoffkreislauf zu entwickeln und gleichzeitig neuartige Wertschöpfungsketten zu etablieren.

2.2 Stand der Technik

Additive Fertigung im Werkzeug- und Formenbau

Bei der klassischen Herstellung von Bauteilen aus FKV werden die dafür benötigten Halbzeuge (trockene oder vorimprägnierte Gewebe, Gelege, …) in eine Form eingelegt, welche die äußere Gestalt des späteren Faserverbundbauteils vorgibt. Derartige Formen werden üblicherweise durch CNC-Fräsen oder Handarbeit aus verschiedensten Materialien (Ureol, Holz, GFK, Metall) hergestellt. In Abhängigkeit des verwendeten Formenmaterials und den zu Grunde liegenden Prozessparametern (Temperatur, Druck) liegt die Anzahl der herstellbaren Bauteile pro Form etwa zwischen 1 und 1.000. Da innerhalb einer Kleinserienfertigung zum einen meist mehrere Formen erforderlich sind und zum anderen jede Produktänderung eine Änderung der Form erfordert, stellt der Formenbau einen erheblichen Zeit- und Kostenpunkt im Fertigungsprozess eines FKV-Bauteils dar [1].

Neben den genannten, klassischen Varianten des Formenbaus stellen insbesondere die additiven Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM) eine neue und effiziente Möglichkeit dar, um hochkomplexe Geometrien mit nahezu beliebigen Freiheitsgraden herzustellen. Dabei existiert eine Vielzahl unterschiedlicher additiver Verfahren, denen als Prozessprinzip der automatisierte, schichtweise Aufbau eines Modells aus CAD-Daten zu

Grunde liegt [2, 3]. Als Materialien stehen vor allem Metalle, Keramiken und thermoplastische Kunststoffe zur Verfügung. Das Einsatzpotential von additiv gefertigten Formen im FDM-Verfahren zur direkten Werkzeugherstellung von Composite-Strukturen wurde in [4] anhand von Grundsatzversuchen und an exemplarischen FKV-Bauteilen untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass eine wirtschaftlichere und zeitsparendere Herstellung von FKV-Bauteilen als bei Verwendung konventioneller Varianten des Formenbaus realisierbar ist. Derzeit werden von einigen Dienstleistern zur FKV-Verarbeitung bereits additiv gefertigte, metallische Formen (z.B. für Spritzguss oder Pressen [4]) als auch Ablageformen aus Kunststoff angeboten (Abbildung 1). Auch die additive Herstellung von Ersatzteilen, z.B. im Bereich der Luft- und Raumfahrt [5] oder im Turbinenbau aus hochtemperaturbeständigen Metalllegierungen beginnt sich durchzusetzen [6].

Jedoch ist der Einsatz von derzeit erhältlichen FDM-Anlagen (Abbildung 1) für den geplanten Verwendungszweck eher ungenügend, da sich diese im Allgemeinen durch einen kleinen Arbeitsraum, eine geringe Auftragsgeschwindigkeit und eine für viele Einsatzzwecke ungenügende Oberflächenqualität auszeichnen [7]. So verfügt die derzeit größte kommerziell erhältliche FDM-Anlage über einen, für die angestrebte Anwendung jedoch unzureichenden, Bauraum von 914,4 x 609,6 x 914,4 mm [8].

Aus diesen Gründen beschränkt sich die Verwendung der FDM-Verfahren bisher auf die Herstellung kleiner Formen mit anschließender Nachbearbeitung. Um vorhandene Restriktionen zu überwinden und den industriellen Anforderungen gerecht zu werden, bietet sich die Kombination von AM mit leistungsfähigen Industrierobotern an. Eine solche Entwicklung erfordert neben der Erweiterung bestehender Roboterbearbeitungsanlagen um eine Materialaustragseinheit vor allem auch deren software- und regelungstechnische Systemintegration.

Die Kombination einer additiven Austragseinheit mit einem Industrieroboter wurde bereits von Designern und Künstlern, u.a. am Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) in [9] durchgeführt, wenngleich keine technische Anwendung in den Projekten fokussiert wurde. Die Vorteile durch die Technologiekombination werden hierbei vor Allem in der nahezu unbegrenzten Möglichkeit zur Bildung komplex geformter Konturen im Raum ohne Stützkonstruktion gesehen. Dabei wird zumeist eine durch Temperatur schnellhärtende Paste verwendet.

Die Vorteile der Technologiekombination von additiver Austragseinheit und Industrieroboter wurden auch in dem Projekt *RoboGen* des Fraunhofer IFF genutzt. Dabei wurde eine Austragseinheit für 2K-Epoxidharzpaste an einen Industrieroboter montiert und zum Aufbau einer Form aus 3D-CAD-Daten verwendet [10]. Das Verfahren wurde neben dem additiven Fertigungsschritt um einen nachgelagerten spanenden Schritt zur Oberflächennachbearbeitung erweitert. Somit zeichnet es sich vor allem durch seinen großen Arbeitsraum und den Wegfall zahlreicher kosten-, zeit- und materialintensiver Zwischenschritte, die beim klassischen Formenbau anfallen, aus. Jedoch lässt sich das Verfahren aufgrund langer Aushärtezeiten, begrenztem Austragsvolumen sowie nachgelagerten Oberflächenbehandlungen und dem Einsatz teurer Materialien noch nicht wirtschaftlich in die Industrie überführen.

Die Kombination der additiven und subtraktiven Fertigung in einer Hybridbearbeitungszelle ist ein zentraler Bestandteil des beantragten Forschungsprojekts. Bisher sind derartige Hybridkonzepte lediglich für Werkzeugmaschinen entwickelt worden, wobei die spanende Bearbeitung mit dem Laserauftragsschweißen kombiniert wurde [11, 12]. Dabei wird durch die flexiblen Kombinationsmöglichkeiten der Fertigungsprozesse in einer Maschine eine deutlich effizientere Anlagennutzung erreicht. Jedoch ist das Laserauftragsschweißen bisher nur für metallische Bauteile geeignet und weist zudem eine geringe Baurate von 3,5 kg/h auf, die für eine wirtschaftliche Fertigung von Kleinserien noch gesteigert werden muss [13]. Vergleichbare Konzepte, die eine robotergestütze Hybridmaschine für die Fertigung von großvolumigen, thermoplastischen Formwerkzeugen beschreiben, sind derzeit nicht bekannt.

Die genannten Projekte lassen erste Anstrengungen und Fortschritte auf dem Gebiet der robotergeführten additiven Fertigung erkennen. Als nachteilig weisen sich bei den bestehenden Lösungsansätzen jedoch vor Allem die kleinen Austragsmengen sowie die fehlende Integration in bestehende Bearbeitungsanlagen aus. Die Kombination einer Roboterfräsanlage mit einem wirtschaftlich sinnvollen und attraktiven Schmelzextruder für mittel- und großserienfähige Austragsmengen sowie Bauteilgrößen steht daher noch aus. Die Erweiterung einer derartigen, kombinierten Bearbeitungsanlage um einen Recyclingprozess der additiv gefertigten Bauteile bzw. Formen ist bisher nicht Gegenstand von Untersuchungen gewesen.

Abbildung 1: Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze (links); marktübliche FDM-Anlage (rechts)

Extrusionsanlagentechnik

In der Extrusiontechnik wird grundlegend zwischen Ein- und Zweischneckenextrudern unterschieden, die je nach zu verarbeitendem Kunststoff und Anwendungsbereich in einer Vielzahl von Ausführungen auf dem Markt verfügbar sind. Die wesentlichen Bestandteile eines Extruders sind Granulatzuführung, Antrieb, Steuerung, Zylinder, Schnecke, Werkzeug und die Peripherie. Dabei zeichnen sich Extruder dadurch aus, dass sie im stationären Betrieb kontinuierlich mit definierten Austragsmengen das Extrudat austragen. Die wesentlichen Anwendungsfelder der Extrusion sind prinzipiell aufgeteilt in die Produktfertigung von z.B. Rohren, Profilen oder Folien und in die Kunststoffaufbereitung zur Anpassung der Kunststoffmischungen [14].

Kleinbauende Extruder, die potentiell für einen mobilen Einsatz geeignet sind, besitzen für die effiziente additive Fertigung großformatiger Werkzeugformen eine zu geringe Antriebsleistung. Aktuelle Entwicklungen zeigen schon Möglichkeiten auf, die Austragsleistung stark zu erhöhen [15]. Die Antriebseinheiten von Extrudern arbeiten in den Standardausführungen in der Regel mit kleinen Übersetzungsverhältnissen, da der Antrieb direkt hinter der Schnecke positioniert ist und das Drehmoment direkt auf die Schnecke übertragen wird [14].

Entwicklung bedarfsgerechter additiver und subtraktiver Robotersysteme

Die Verwendung von kosten- und energieeffizienten Industrierobotern als Produktionshelfer in automatisierten Produktionsketten ist seit Jahren ansteigend [15]. Dabei umfassen die Einsatzgebiete der Roboter mittlerweile weit mehr als die bis vor wenigen Jahren üblichen

Handlingaufgaben und leichte Tätigkeiten (Montage, Lackieren, Kleben) [16]. Ein herausragender Vorteil der Industrieroboter ist, neben der Kosten- und Energieeffizienz, außerdem eine hohe Flexibilität. Die Adaptation unterschiedlichster Endeffektoren in Kombination mit einer Vielzahl an Freiheitsgraden – moderne Robotersysteme verfügen über bis zu 8 Achsen – eröffnet eine große Bandbreite an industriellen Prozessen, die mittels Industrierobotern kundenspezifisch und individuell ausgeführt werden können. Beispielsweise wurde der Einsatz von Industrierobotern für die subtraktive (spanende) Bearbeitung, wie bspw. Fräsen und Bohren, in den letzten Jahren kontinuierlich vorangetrieben. Im Gegensatz dazu steht die additive Fertigung mittels Industrierobotern noch ganz am Anfang der industriellen Tauglichkeit. Bisherige, von Industrierobotern geführte, additive Fertigungseinheiten finden sich an wenigen Stellen [9, 17]. Bei der Realisierung einer hybriden roboterbasierten Fertigungsanlage für industrielle Anwendungen wie im Projekt *SuperTooler* fokussiert – welche eine unterbrechungsfreie additive und subtraktive Fertigung mittels eines Industrieroboters erlaubt – wird technologisches Neuland betreten.

Die Erweiterung des Einsatzspektrums der Roboter für industrielle Anwendungen ist stets mit Maßnahmen zur Anpassung der Konstruktion und der Steuer- und Regelkreise der Roboter zur Erzielung der hohen Industrieanforderungen bei zugleich akzeptabler Bearbeitungseffizienz verbunden. Insbesondere bei hochpräzisen Fertigungsprozessen wirkt sich die geringe Gesamtsteifigkeit der Roboter [18] in Verbindung mit der herstellerübergreifend geringen Positioniergenauigkeit [19] nachteilig aus. Für die spanende Bearbeitung werden bspw. hohe Anforderungen hinsichtlich Wiederhol- und Positioniergenauigkeit zur Erreichung einer hohen Oberflächenqualität und exakter Absolutabmaße gefordert.

Die Realisierung bedarfsgerechter Robotersysteme wird daher seitens der Forschung und Industrie stetig vorangetrieben. Der verstärkte Fokus lag dabei in den letzten Jahren im Bereich der metallbasierten additiven Fertigung. Das Softwaretool *POWERMILL* ROBOT der Firma *Autodesk* – führender Anbieter von Computer-Aided-Design- (CAD-)Software – erlaubt die Erstellung von spanenden Bearbeitungsszenarien auf Basis von CAD-Daten und deren direkte Ausgabe in die Roboter Steuerungs-Sprache für eine Vielzahl von Robotertypen [22]. Damit können die aufwändigen Programme zur Steuerung der Roboterbewegungen zeitsparend und vollautomatisiert generiert und angepasst werden. Aufgrund der

prinzipbedingten Unterschiede der subtraktiven und additiven Fertigung können die kommerziell erhältlichen Computer-Aided-Manufacturing- (CAM-)Programme bisher nur sehr eingeschränkt für die additive Fertigungsplanung herangezogen werden.

In aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden zur Realisierung bedarfsgerechter Roboterbearbeitungssysteme unterschiedliche Ansätze gewählt, um die Systeme für die industrielle spanende Bearbeitung zu qualifizieren. Die Maßnahmen reichen von rein regelungstechnischen Verfahren [19] über zusätzliche adaptronische Systeme [21, 24] bis hin zu einer Kombination beider Ansätze [23].

Aufgrund der Neuheit der im Projekt *SuperTooler* fokussierten hybriden roboterbasierten Fertigungsanlage liegen keine vergleichbaren Vorarbeiten vor, sodass im Projekt erstmalig Lösungen für bedarfsgerechte Robotersysteme dieser Art erarbeitet werden. Das Ziel ist die Abstimmung der Betriebsstrategie und Anlagensteuerung der Hybridmaschine zur optimalen Erschließung des Einsparpotenzials. Der Schwerpunkt im Projekt liegt dabei auf der Ergreifung von steuerungstechnischen sowie konstruktiven Maßnahmen zur Realisierung der robotergeführten additiven Fertigung. Dies wird unterstützt durch die Verwendung neuartiger CAM-Softwaretools die den Besonderheiten der additiven Fertigung hinsichtlich Bahnplanung und Vorschubgeschwindigkeiten Rechnung tragen.

2.3 Zielstellung

Basierend auf dem Bedarf einer automatisierten Werkzeugfertigung für die Herstellung von großformatigen FKV-Bauteilen soll in diesem Forschungsprojekt ein geeignetes Anlagen- und Bearbeitungskonzept entwickelt und prototypisch umgesetzt werden. Dabei ist es das Ziel die Entwicklung und prototypische Realisierung einer vollintegrierten roboterbasierten Hybridfertigungszelle, welche es erstmals ermöglicht, unterbrechungsfrei, dreidimensional additiv und subtraktiv mit nur einem Industrieroboter zu arbeiten. Hierfür sind, aufbauend auf einer 7-Achs-Roboter-Fräszelle, selbst adaptierende Steuerungs- und Regelungskonzepte, modifizierte Antriebe und Werkzeugaufnahmen für die direkte Kopplung einer autark additiv arbeitenden Light Plastification Unit (LPU) als Fused-Deposition-Modeling- (FDM)-

Anlage innerhalb des Projektes zu entwickeln (Abbildung 2). Dabei wird besonderes Augenmerk auf die intelligente Integration und Steuerung der LPU, sowie die Ausführung der automatisiert zu koppelnden mechanischen, elektrischen und pneumatischen Schnittstellen gelegt. Dazu muss zudem eine für die additive Fertigung kompatible Steuerungssystematik auf Basis der subtraktiven Bearbeitungssoftware erarbeitet und in die hybride Fertigungszelle integriert werden.

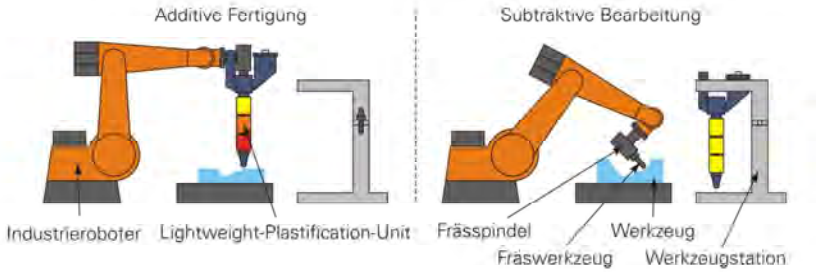


Abbildung 2: Prozessschema der FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle

Gegenüber bisherigen Anlagenentwicklungen soll sich die Anlage dadurch auszeichnen, dass möglichst Rezyklate in einfacher Aufbereitungsform (Granulate) als Ausgangsmaterial einsetzbar sind. Somit können die Werkstoffkosten signifikant reduziert und im Sinne der Ressourcenschonung erhebliches Einsparpotential erschlossen werden. Hierdurch entsteht zudem die Möglichkeit eines geschlossenen Stoffkreislaufs in der FDM-Fertigung im industriellen Maßstab. Unter Berücksichtigung der deutlich reduzierten Rohstoffkosten durch den Einsatz von Recycling-Werkstoffen sollen die Werkzeugkosten mittels der Hybridfertigungszelle um min. 80 % reduziert werden.

Das Forschungsprojekt legt damit die Grundlage für eine neue Klasse von Fertigungszellen bzw. Fertigungsanlagen, die eine additive und subtraktive Fertigung für mittlere (> 0,5 x 0,5 x 1 m³) und große (> 2 x 2 x 3 m³) Strukturen direkt verknüpft. Anhand eines Realisierungsbeispiels „3D-gedruckte, hochintegrative Hightech-Spannschablonen für CFK-Bauteile“ werden die entwickelten Methoden und Anlagenkomponenten des Verbundprojektes in einem Brückenprojekt im Themenfeld „Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient“ validiert. Die besondere Situation der kooperativen

Projektgestaltung erlaubt hierbei den Rückgriff auf den Projekt-Demonstrator aus dem Projekt *CFK-Complete*, wodurch eine repräsentative Situation gegeben ist und die Potentiale der entwickelten Hybridfertigungszelle zur Herstellung modularer Werkzeuge für Faserverbundbauteile mit Funktion einer Endbearbeitungsschablone aufzeigt.

2.4 Projektverlauf

Um das komplexe Ziel zu erreichen, werden in einem übergreifenden Lösungsansatz integrative Schnittstellen auf Steuerungs- und Fertigungsebene entwickelt und umgesetzt. Wesentliche Bestandteile sind dabei die Entwicklung der LPU, deren reale Integration in die bestehende Anlagentechnik, sowie die Entwicklung und Anpassung der Steuerung und Software zur gemeinsamen Ansteuerung der additiven und subtraktiven Einheit. Der Prozess kann dabei durch folgende Vorgehensweise dargestellt werden:

- Für die Aufbereitung des thermoplastischen Rezyklates zu einem zähviskosen Plastifikat wird Granulat in einer Dosierstation bereitgestellt und entsprechend den Vorgaben der LPU zudosiert und in ihr aufgeschmolzen, homogenisiert und ausgetragen.
- Das homogene Plastifikat wird in einer speziell zu entwickelnden FDM-Düse übergeben, die entsprechend der Bahnbewegung in Schichtstärke und Ablagebreite variiert werden kann. Hierfür sind geeignete Steuerungssysteme zu entwickeln und in das Anlagensystem mittels definierter Schnittstellen zu implementieren.
- Der Austrag erfolgt mittels eines mehrachsigen Bewegungssystems, wobei die Verfahrbewegung der LPU im Hinblick auf eine sichere, staufreie Granulatzuführung zu minimieren ist. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, das Robotersystem (6-Achsen) mit einer gesteuerten Spindel (7. Achse) für den Spanwerkzeug- und Schneckenantrieb und einem zusätzlichen Drehtisch (8. Achse; > 1500 mm Ø) zu erweitern.
- Nach dem Druckprozess wird die LPU in eine Werkzeugstation gehangen und automatisiert abgekoppelt. Nach der vollautomatischen Fräsbearbeitung kann die LPU wieder automatisiert mechanisch, elektrisch und hydraulisch angekoppelt werden, woraufhin ein neuer Produktionsprozess startet.

- Die Generierung der Druck- und Fräsdaten erfolgt in einem durchgängigen Workflow, wofür im Vorhaben ein neues Softwaresystem für die hybride Fertigungszelle entwickelt und erweitert werden muss.

Die wesentlichen verfahrenstechnischen Komponenten der geplanten Integrierten FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle stellt die 7-Achsen-Roboterfräsanlage dar. Hierfür kann innerhalb des Projektes auf die am Institut für Leichtbau- und Kunststofftechnik der TU Dresden (ILK) vorhandene 7-Achs-Roboterfräszelle (7. Achse ist jedoch eine Linearachse) zurückgegriffen werden. Es steht somit bereits zu Beginn der Forschungsarbeiten der „kostenintensive" Teil der Prozesstechnik einsatzbereit zur Verfügung.

Folgende Schritte sind zur Entwicklung und Integration der Anlagentechnik im *SuperTooler*-Vorhaben basierend auf der vorhandenen Fertigungszelle geplant:

- Erweiterung der Fertigungszelle mit einem Drehtisch (in der Demonstrationsanlage angelegt als 8. Achse) und vollumfängliche Modifizierung
- Entwicklung der LPU, bestehend aus Werkstoffzuführung, Plastifizieraggregat, Werkzeugdüse, Temperiereinheit, Leistungsmedienzuführung sowie dem Übersetzungsgetriebe
- Kupplungssystem mit der Möglichkeit zur Aufnahme der LPU sowie der subtraktiven Einheit an den Industrieroboter
- Angepasste Werkzeugstation zur Ablage der nicht benötigten Fertigungseinheit inkl. Steuerungs- und Leistungsmedienschnittstellen
- Entwicklung der Steuerungstechnik der Einzelkomponenten und deren Integration in ein Gesamtsystem

3 PROJEKTERGEBNISSE

3.1 Technologische Grundlagen zur Prozessentwicklung

Mit dem Ziel zur Entwicklung einer hybriden, robotergeführten Additiv-Subtraktiv-Fertigungsanlage starteten die Arbeiten innerhalb des Konsortiums mit der gemeinsamen Erstellung eines Lastenheftes. So wurden die Anforderungen an das gesamte Fertigungssystem erarbeitet, wobei übergeordnet die folgenden Randbedingungen bei der Konzeptionierung betrachtet wurden:

- Auszutragende Rezyklat-Werkstoffe,
- Bauteilvolumen und Austragsleistung,
- Integrierbarkeit in Roboterzelle,
- Benötigte Anlagenperipherie,
- Software- und Steuerungsschnittstellen.

Darauf basierend wurden räumliche Randbedingungen der Anlage definiert, um benötigte Peripherieelemente (Schaltschränke für die Steuer- und Regelungstechnik, Handhabungsstationen, Rezyklat-Förderaggregat, Materiallagerung und –vorbehandlung, etc.) effizient im Gesamtsystem integrieren zu können. Basierend auf den definierten Anforderungen ergaben sich verschiedene Konzepte zur Positionierung der Anlagenbestandteile des *SuperToolers* wie Roboter, LPU, Drehtisch, Versorgung der Leistungsmedien, Werkzeugstation, Materialzuführung, Zwischenspeicher und weiteren Kleinaggregaten. Abbildung 3 zeigt hierzu das finale Konzept, bei dem die Peripherieelemente außerhalb des *SuperTooler*-Arbeitsbereiches stehen und die Prozessierung mittels Granulat und wechselbarer LPU erfolgt.

Neben der im Projekt verfolgten Variante, die LPU als wechselbares Werkzeugsystem an den Roboterarm zu befestigen, wurden auch weitere Optionen zur Positionierung der LPU innerhalb der Fertigungszelle in Kombination mit verschiedenen Halbzeugformen betrachtet und anhand von definierten Kriterien bewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 dargestellt. So zeigte sich insbesondere auch das Konzept zur Verwendung eines strangförmigen Halb-

zeuges als mögliche Variante, konnte sich jedoch aufgrund des komplexeren Transportaufwandes zur LPU hinsichtlich der steuerungstechnischen Systemanbindung nicht durchsetzen.

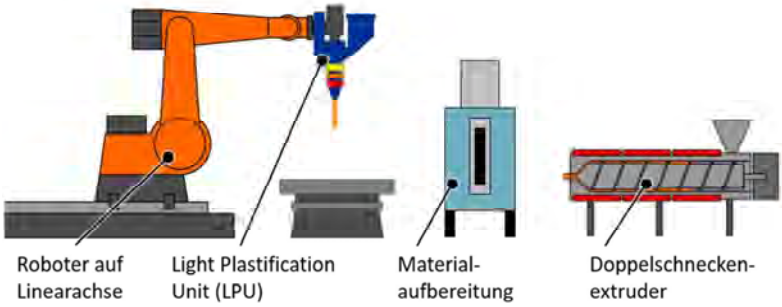


Abbildung 3: Schematische Konzeptdarstellung zur Positionierung der Anlagenbestandteile außerhalb des Arbeitsbereiches der *SuperTooler*-Anlage

Die Abschätzung des benötigten Arbeitsraumes für den hybriden Fertigungsprozess erfolgte dabei vor allem auf Grundlage einer FDM- und fräsgerechten Fertigung. Ausgehend von klassischen FDM-Strategien wurden bei der dafür durchgeführten Konzeptentwicklung insbesondere die mit der hohen Austragsleistung einhergehenden prozesstechnischen und werkstofflichen Herausforderungen wie Verzug und Abkühlverhalten berücksichtigt. Dementsprechend wurde der Arbeitsraum so ausgelegt, dass genügend Platz für An- und Abfahrbahnbereiche für die jeweiligen Einzelschichten besteht. Durch diese zusätzlichen Bahnbereiche können zudem mögliche Austrags-Diskontinuitäten beim Anfahren der LPU kompensiert werden, wodurch eine gleichbleibend hohe Bahnqualität im tatsächlichen Bauteilbereich gewährleistet werden kann. Je nach Bauteilgröße kann die LPU nach dem Drucken einer Einzelschicht zudem in einen „Stand-By"-Bereich des Arbeitsbereiches geführt werden oder parallel ein weiteres Bauteil erstellen, um das Abkühlen der vorher gedruckten jeweiligen Einzelschichten auf die optimale Anbindungstemperatur zu ermöglichen.

Tabelle 1: Auszug aus der Bewertungsmatrix der konzeptionierten Anlagenvarianten

Wichtung		A1-heiß	A2-kalt	B1-heiß	B2-kalt	C1	D1-heiß	D2-kalt
	Technologie							
1	Skalierbarkeit Gesamtkonzept	2	3	2	3	1	2	3
4	Aufwand für Strang/Schmelzeführung	2	4	2	4	3	2	4
2	Temperierkomplexität	2	3	2	3	4	2	3
2	Aufwand für Strang/Schmelzeförderung (Antrieb)	2	3	2	3	3	2	3
2	Anlagenkomplexität/Komponentenzahl	2	2	2	2	3	2	2
3	Kupplungsaufwand	3	3	3	3	1	3	3
1	Anlagenplanung (LSK-Umgebung)	3	3	3	3	3	3	3
5	Gewicht am Roboter	4	4	4	4	1	3	3
4	Größe am Roboter	5	5	5	5	2	4	4
3	Qualität des Kunststoff-"Halbzeugs" (Schmelze/Strang)	3	3	3	3	3	3	3
3	Austragsleistung Massestrom	4	4	4	4	2	4	4
4	Technologierisiko	2	3	2	3	4	2	3
3	Anbindungsaufwand	3	2	3	2	4	3	2
	Steuerung							
2	Schnittstellenentwicklung	3	3	3	3	2	3	3
2	Anzahl anzusteuernder Elemente	3	3	3	3	4	3	3
	Budget							
1	Abdeckbarkeit mit Projektbudget	3	4	3	4	3	3	4
2	Kalkulierbarkeit	3	4	3	4	3	3	4
4	**Summe Technologie**	112	126	112	126	103	103	117
2	**Summe Steuerung**	12	12	12	12	12	12	12
3	**Summe Budget**	9	12	9	12	9	9	12
	Summe	**490**	**552**	**490**	**552**	**454**	**454**	**516**

3.2 Vorauswahl und Charakterisierung von Vorzugswerkstoffen

Als wesentliche Voraussetzung bei der großvolumigen additiven Fertigung und zur Gewährleistung der erforderlichen struktur- und thermomechanischen Eignung der mit dem hybriden Fertigungssystem herzustellenden Thermoplaststrukturen sind geeignete Werkstoffe auszuwählen. Bei der Recherche und anschließenden Selektion wurden sowohl die prozessspezifischen als auch die wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen innerhalb des Gesamtsystems berücksichtigt. Derartige Aspekte waren unter anderem die Eignung für den Formenbau, Verfügbarkeit, Preis, Verarbeitbarkeit im FDM-Verfahren sowie thermische und mechanische Eigenschaften. Neben Standardmaterialien für die additive Fertigung wie PP, PLA und ABS wurden unter anderem auch rezykliertes Polyamid 6 mit dreißig- und vierzigprozentiger Kohlenstofffaserverstärkung (PA6/CF30 und PA6/CF40) zur Eignung identifiziert und untersucht. So wurde neben der generellen Prozesseignung auch die Rieselfähigkeit der untersuchten Materialien bestimmt, um sicherstellen zu können, dass

während des additiven Fertigungsschrittes stets Material zur Plastifizierung an der LPU bereitsteht. Die dabei bestimmten, relativ großen Korngrößenverteilungen der rezyklierten Materialien und das daraus resultierende jeweilige Rieselverhalten war Grundlage bei der Auslegung der Zuführaggregate und der entsprechenden Verarbeitungskomponenten (Abbildung 4).

Abbildung 4: Makroskopische Korngrößenverteilung eines rezyklierten PA6/CF30

Zur Ermittlung halbzeugspezifischer Erweichungstemperaturen der zu untersuchenden Kunststoffe wurden die Thermogravimetrische Analyse (TGA) und die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) herangezogen. Mittels der Dynamischen Differenzkalorimetrie, englisch Differential Scanning Calorimetry (DSC), können sowohl Glasübergangstemperatur als auch Schmelztemperatur der Kunststoffe bestimmt werden. Durch die Thermogravimetrische Analyse (TGA) lässt sich eine Aussage bezüglich der thermischen Einsatzgrenzen und der thermischen Zersetzung der Kunststoffe treffen. Anhand von rheologischen Untersuchungen ist eine Aussage zur Viskosität und somit zum Fließverhalten der Kunststoffe möglich. Unter Verwendung von TGA, DSC und Rheometrie ließ sich somit ein klar definiertes Prozessfenster für die Verarbeitung der zu untersuchenden Kunststoffe eingrenzen.

3.2.1 Thermogravimetrische Analyse

Die Untersuchung orientierte sich an der Norm DIN ISO EN 11358- 1. Während der Messung befand sich die Probe auf einer Waagschale in einem geschlossenen Ofen unter definierter Atmosphäre und wurde unter konstanter Heizrate von 10 K aufgeheizt. Das permanent durch den Ofen strömende Spülgas bestimmt die Art der Zersetzung, wobei in diesem Fall ein inertes Spülgas (Stickstoff) gewählt wurde, um oxidative Zersetzungen zu

vermeiden. Die bespielhafte Messkurve für PLA in Abbildung 5 lässt erkennen, dass erste Degradationserscheinungen und somit ein Masseabfall des Kunststoffes bei 239,4 °C auftreten. Bei 443,8 °C ist der Kunststoff vollständig degradiert. Die obere Temperaturgrenze für das Verarbeitungsfenster des untersuchten PLA wurde somit bei 235 °C festgesetzt.

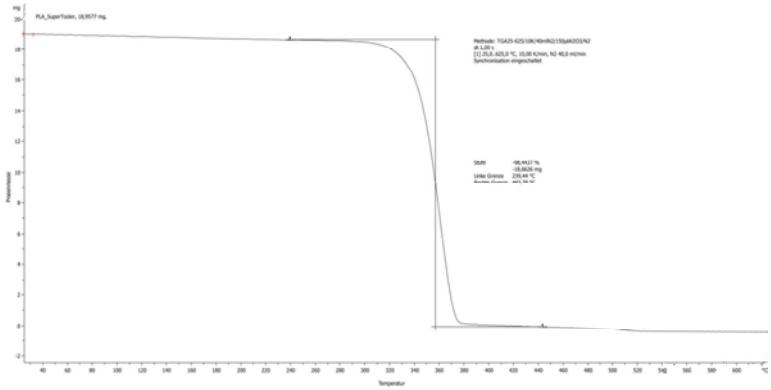


Abbildung 5: Beispielhaftes Ergebnis der TGA für ein untersuchtes PLA

3.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie

Die DSC-Versuche erfolgten nach DIN EN ISO 11357-1. Vor Versuchsbeginn wurde der Kunststoff nach den Herstellervorgaben bei 60 °C für 8 h vorgetrocknet. Zu Beginn des Versuchs wurde die Messzelle auf Einsatztemperatur vortemperiert und der Spülgasstrom (Stickstoff) eingestellt. Dieser ist nötig, um ein Abbau der Probe infolge von Oxidation oder Hydrolyse bei der Prüfung zu vermeiden. Anschließend erfolgte das Abwiegen des zu füllenden Tiegels und das Einsetzen des Proben- und Referenztiegels. Nach dem Einstellen des Messprogramms wurde die Messung gestartet. Dabei erfolgte immer abwechselnd ein zweimaliges Aufheizen und Abkühlen der Tiegel. Aus der beispielhaften DSC-Messkurve für ein untersuchtes PLA in Abbildung 6 lässt sich im ersten Absinken der Kurve die Glasübergangstemperatur für den untersuchten Kunststoff bei ca. 61,9 °C ableiten. Ein anschließend untypischer Anstieg der Kurve zu einem Peak von 114,5 °C indiziert das

Vorhandensein eines Zuschlagstoffes im PLA, der bei dieser Temperatur reagiert. Daraufhin ist das Absinken der Kurve zu einem Peak von 151 °C zu erkennen, bei dem der Kunststoff vollständig aufgeschmolzen ist. Die untere Temperaturgrenze für das Verarbeitungsfenster des untersuchten PLA wurde somit bei 160 °C festgesetzt.

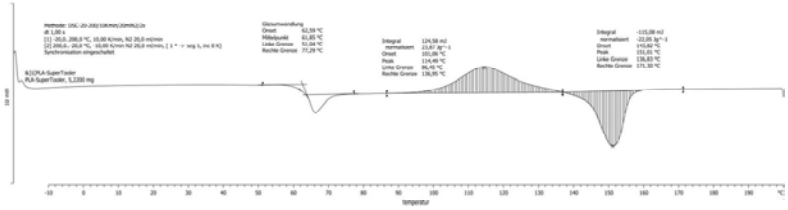


Abbildung 6: Beispielhaftes Ergebnis der DSC für ein untersuchtes PLA

3.2.3 Rheometrie

Zur Ermittlung des Fließverhaltens der zu untersuchenden Kunststoffe wurde ein Scherrheometer verwendet. Bei der Messung wird die Probe zwischen dem oszillierenden und dem ruhenden Teil des Messaufbaus geschert. Aus der Geometrie der Messanordnung und der Geschwindigkeit des bewegten Teiles ergibt sich die Schergeschwindigkeit. Das zur Aufrechterhaltung der Bewegung notwendige Drehmoment wird gemessen, woraus sich anschließend die Schubspannung und die Viskosität ermitteln lassen. Die in Abbildung 7 dargestellte Messkurve stellt beispielhaft das temperaturabhängige Fließverhalten eines untersuchten PLA dar. Dabei zeigt sich, dass die Viskosität des Kunststoffes nach Erreichen der Glasübergangstemperatur mit steigender Temperatur stark abfällt. Zwischen 220 °C und 230 °C ist die Viskosität des PLA am geringsten und ermöglicht so eine optimale Verarbeitung im Schmelzschichtverfahren (FDM). Um eventuelle thermo-oxidative Degradationserscheinungen zu vermeiden, gleichzeitig die Viskosität für eine optimale Verarbeitbarkeit aber ausreichend niedrig zu halten, wurde die Prozesstemperatur des untersuchten PLA für die Verarbeitung im Schmelzschichtverfahren auf 220 °C festgelegt.

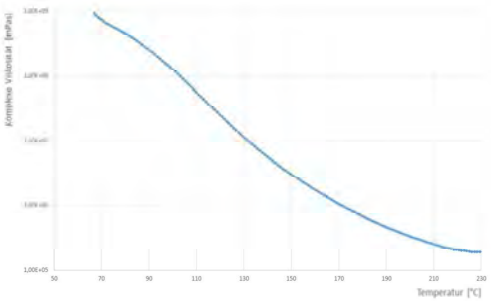


Abbildung 7: Beispielhafte Ergebnisse der Rheometrie für ein untersuchtes PLA

3.3 Modellentwicklung zur Vorhersage des transienten Abkühlverhaltens

Darüber hinaus wurden auf Basis der ermittelten Werkstoffdaten mehrere Abkühlszenarien für verschiedene Querschnittsgeometrien und Ablagestrategien erstellt. Unter der Annahme eines sowohl maximalen als auch minimalen Bauteilvolumens wurde dafür zunächst jeweils ein additiver und subtraktiver Fertigungsprozess wirtschaftlich bewertet. Aus diesen Bewertungen konnten für den hybriden Fertigungsprozess notwendige Druckleistungen bzw. Extrusionsgeschwindigkeiten abgeleitet werden (Abbildung 8).

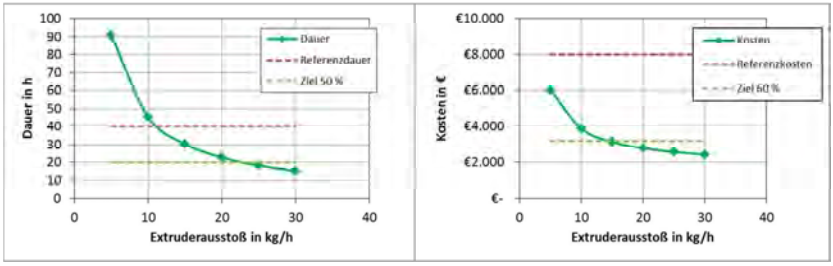


Abbildung 8: Ableitung der Produktionsdauer und der Kosten für verschiedene Durchsätze

Die Erarbeitung eines robusten und kosteneffizienten Bauprozesses zur Herstellung großformatiger Formwerkzeuge erfordert ein vertieftes Verständnis der Verfahrenstechnologie. Basierend auf den ermittelten Extrusionsgeschwindigkeiten, Druckparametern und den thermischen Werkstoffkennwerten wurde eine erweiterte Prozessmodellierung erarbeitet, welche die Basis zur Ableitung einer werkstoff- und anlagengerechten Bearbeitungsstrategie ermöglicht. Dazu wurde ein umfangreiches Berechnungstool entwickelt, welches für verschiedene Werkstoffe, Düsengeometrien, Druckparameter und Prozesstemperaturen das entsprechende Abkühlprofil des jeweils gedruckten Stranges berechnet (Abbildung 9). Mithilfe des entwickelten Berechnungstools war es somit möglich, einen idealen Düsendurchmesser für das jeweilige zu verarbeitende Material zu identifizieren bei gleichzeitiger Abhängigkeit der Druckdauer für eine Einzelschicht und der daraus resultierenden minimalen und maximalen Abkühlzeit. Je nach Bauteilgröße ergibt sich somit auch eine entsprechend andere Strangbreite, die wiederum ausschlaggebend für den folgenden subtraktiven Bearbeitungsprozess ist. Dementsprechend ist auch eine angepasste Druckstrategie zu wählen (etwa durch eine doppelte Außenkontur), um ausreichend Material und Steifigkeit für die Rohteilbearbeitung bereitstellen zu können.

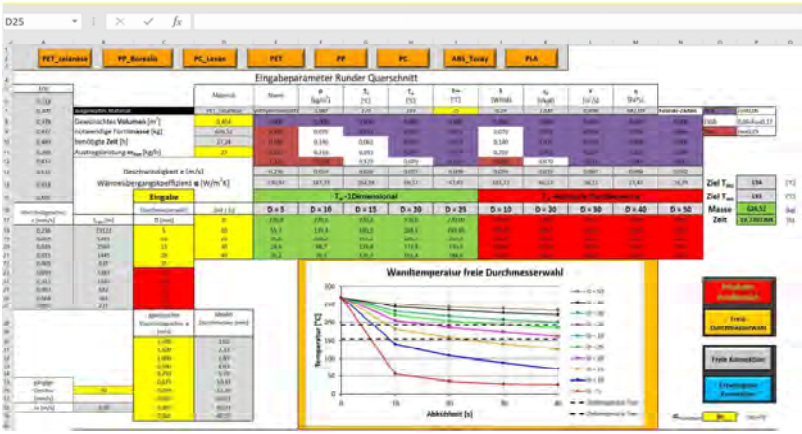


Abbildung 9: Ausschnitt aus dem entwickelten Berechnungstool zum Abkühlverhalten thermoplastischer Kunststoffschmelzen bei der großvolumigen additiven Fertigung

Das Programm ermöglicht es zwischen verschiedenen Formen des Abkühlverhaltens zu differenzieren. Dazu lassen sich mehrere adiabate Ränder hinzufügen, welche die Ablage auf das Druckbett oder auf bereits extrudierte Druckstränge simulieren. Abbildung 10 (links) zeigt ein Beispiel für einen idealen Abkühlverlauf von verschiedenen Durchmessern bei einem gewählten runden Strangquerschnitt für PET. In der Abbildung 10 (rechts) ist das Ergebnis der gleichen Simulation gezeigt, jedoch wurde hier das Abkühlverhalten durch die Begrenzung eines adiabaten Randes behindert. Dadurch ist der Zieltemperaturkorridor erst nach einem längeren Abkühlzeitraum erreicht. Mithilfe der ermittelten thermischen Materialeigenschaften konnte so ein optimales Prozessfenster festgelegt werden.

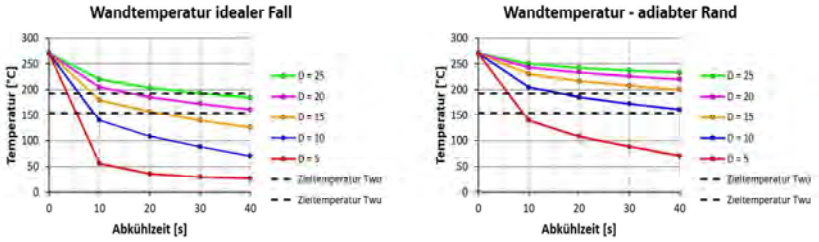


Abbildung 10: Beispielhafte Berechnung der Wandtemperaturen von einem gedruckten Strang aus PET für den idealen Fall und den Fall adiabater Rand

Um die untere Temperaturgrenze noch genauer abschätzen zu können und zur Überprüfung des erarbeiteten Abkühlmodells wurden entsprechende Bindenahtfestigkeiten unter Verwendung von angepassten Spritzgussversuchen ermittelt. Bei diesen Untersuchungen wurden mit den jeweiligen Materialien zunächst halbe Zugprüfkörper hergestellt. Die nur halbgefüllten Kavitäten wurden dann in einem nachgelagerten Anspritzversuch bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen und ohne Verwendung von Nachdruck in der Mitte der Kavität angespritzt, sodass eine Bindenaht gezielt erzeugt werden konnte, die das Anbindungsverhalten von zwei übereinander gedruckten Strängen simuliert. Anschließend wurden die Zugprüfkörper getestet und ausgewertet. Die ermittelten Ergebnisse zeigten, dass bei höherer Werkzeugtemperatur die Anbindungsqualität schnell ansteigt (Abbildung 11). In Kombination mit dem entwickelten Berechnungstool zur Bestimmung des Abkühlverhal-

tens konnte so ein genaues Prozessfenster hinsichtlich Druckgeschwindigkeit und Austragsleistung bestimmt werden, in dem der bereits abgelegte Kunststoffstrang während des „Überdruckens“ genau die richtige Temperatur hat, um eine möglichst hohe Haftfestigkeit mit dem darüber abgelegten Strang zu erreichen.

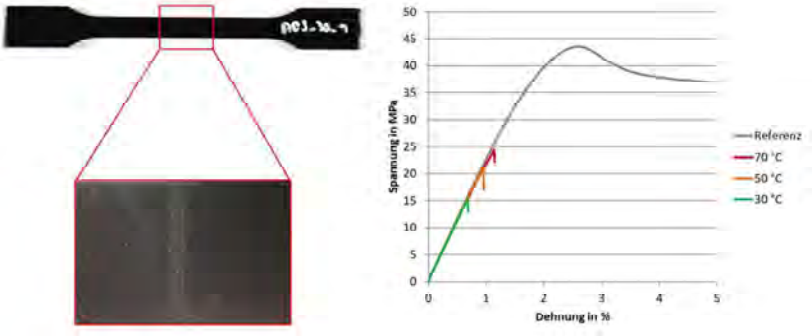


Abbildung 11: Versuche zur Anbindung bei verschiedenen Ausgangstemperaturen (links: Prüfkörper und Anbindungsposition; rechts: Spannungs-Dehnungs-Kurve aus Zugprüfung)

Zur Validierung der zuvor erarbeiteten Werkstoff- und Prozessmodelle wurden Laborversuche mit Hilfe eines skalierten additiven Austragsversuchs vorgenommen. Dafür erfolgte die Kopplung einer filamentbasierten Aufschmelzeinheit an einen Handlingsroboter (Abbildung 12), mit der anschließend die zuvor hergestellten Kunststofffilamente als einzelne Kunststoffbahnen abgelegt und mit einem Thermografie-Kamerasystem analysiert und ausgewertet wurden. Dabei zeigte sich, dass das reale Abkühlverhalten der abgelegten Einzelstränge sehr gut mit dem berechneten Verhalten übereinstimmt, sowohl für den einzeln abgelegten Strang als auch für eine gesamte Schicht aus mehreren Einzelsträngen.

Nach erfolgreicher Entwicklung und Validierung der Prozess- und Werkstoffmodelle zur Beschreibung des transienten Abkühlverhaltens wurden die Ergebnisse in einem Lastenheft zusammengefasst. Dieses diente als Basis für die weiteren Entwicklungen hinsichtlich der Erarbeitung räumlicher Randbedingungen der Gesamtanlage und der Entwicklung eines kombinierten Steuerungs- und Regelungssystems auf Basis eines adaptierten CAD/CAM-Softwaresystems.

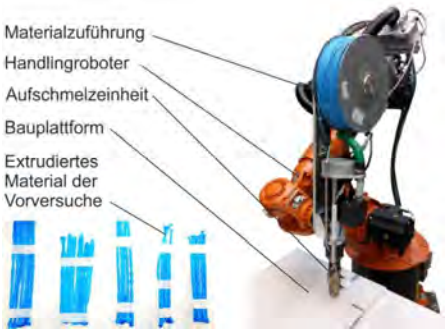


Abbildung 12: Handlingroboter mit gekoppelter Aufschmelzeinheit für Laborversuche

3.4 Entwicklung und Realisierung der Basiskomponenten der Roboterzelle

3.4.1 Anlagenkonzepte zum effizienten Aufbau der FDM-Strukturen anhand von Bewegungsstudien

Das in Kapitel 3.1 definierte Grundkonzept zur Positionierung der Anlagenkomponenten im Gesamtsystem wurde nach der Konzeptphase auf dessen Machbarkeit hinsichtlich der realen geometrischen Grundbedingungen der bestehenden Anlagenkomponenten untersucht.

Die Bewertung ergab, dass sich die Variante einer LPU sowohl aus technologischer als auch aus ökonomischer Betrachtungsweise als effizienteste Lösung darstellt. Ausschlaggebend waren hierbei die technischen bzw. steuertechnischen Kriterien der Materialzuführung. Die hohen Materialdurchsätze erfordern einen kontinuierlichen Druckprozess, der das Absetzen zwischen Druckbahnen nur mit einer Degradierung der Druckqualität ermöglichen würde. Die kontinuierliche Druckbahn erlaubt somit die Kompensation der Trägheit des direkten Extrusionsprozesses. Ein zweiter Aspekt war der Materialtransport zur LPU. Die „On-Side"-Varianten zeigten einen signifikanten Nachteil beim Transport der Schmelze vom

Extruder zur LPU, da die definierten Austragsmengen bei dem abzubildenden Bearbeitungsraum (Abbildung 13) sehr große Durchmesser des temperierten und mit Hochdruck belasteten Schmelzeschlauches erfordern würden. Die Starrheit und das Gewicht des notwendigen Schmelzeschlauches würden zudem die Beweglichkeit des Roboters signifikat beeinträchtigen. Weiterhin ist die Aufrechterhaltung der Schmelze-Temperatur über lange Förderstrecken energetisch in höchstem Maße ineffizient. Die Materialversorgung des Extruders in der gewählten „Hop-On"-Variante wurde daher über ein Vakuumfördergerät realisiert, dessen Schlauchzuführung hoch flexibel ist. Die Verwendung des Vakuumschlauches ermöglichte somit eine deutliche Steigerung der Bauraumvariabilität der *SuperTooler*-Anlage, wobei die Schlauchlänge als limitierender Faktor für den Einsatz der LPU an anderen Handlingsystemen ausgeschlossen werden konnte.

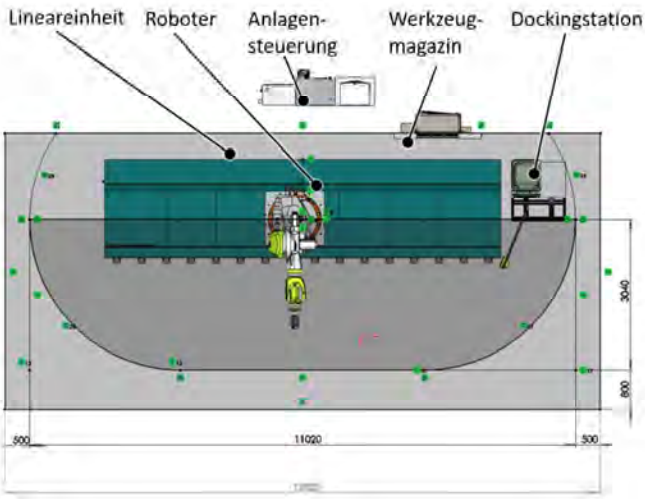


Abbildung 13: Bestimmung des Bearbeitungsraums der *SuperTooler*-Gesamtanlage

Die wesentlichste verfahrenstechnische Komponente der geplanten integrierten FDM-Fräs-Hybridfertigungszelle stellte die vorhandene 7-Achs-Roboterfräsanlage dar. Aufbauend auf

den in der vorangegangenen Grundkonzeptphase erstellten Anforderungen erfolgte in einem ersten Schritt die Definition des Bearbeitungsraumes der FDM-Fertigungszelle. Dazu wurden CAD-Bewegungsstudien unter Berücksichtigung der durch die Zusatzkomponenten (Extruder, Spindel, Schlauchzuführung, Docking Station, Drehtisch) definierten prozesstechnischen und geometrischen Randbedingungen durchgeführt.

Die Basis der Bauraumbestimmung bildeten die technischen Daten des 6-Achsroboters *KUKA KR500 MT3* mit einer Reichweite von 2825 mm. Der Roboter ist auf einer hochpräzisen Linear-Verfahreinheit positioniert, sodass sein Bearbeitungsraum in Richtung der x-Achse um ca. 8000 mm vergrößert wird. Abbildung 13 zeigt den in der x-y-Ebene bestehenden Arbeitsraum der *SuperTooler*-Anlage. In Kombination mit der am Roboterkopfflansch befestigten Frässpindel ergibt sich somit ein theoretisch möglicher Arbeitsraum von ca. 8 m x 2 m x 2 m.

3.4.2 Einbindung einer Rotationsachse in der Roboterzelle

Als zusätzliche Bearbeitungsachse wurde die konstruktive Erweiterung und vollumfängliche Modifizierung der Bearbeitungszelle mit einem Drehtisch als 8. Achse realisiert. Zunächst wurde der Drehtisch entsprechend den Randbedingungen der Bearbeitungszelle ausgelegt. Die zusätzliche rotatorische Arbeitsachse bietet besonders im Hinblick auf den subtraktiven Bearbeitungsschritt signifikante Vorteile. Durch die drehende Positionierung des Bauteils im Arbeitsraum ist es möglich, Hinterschnitte und für die Frässpindel schwer erreichbare Oberflächen ohne Umspannaufwand zu bearbeiten.

Die Randbedingungen beziehen sich dabei auf Aspekte wie Antrieb, Ansteuerung, Bauraum sowie Aufspannfläche.

Antrieb

Um ein synchrones Ansteuern der Achsen zu gewährleisten, war eine direkte Integration der Drehachse in die von KUKA bereitgestellte SPS (Speicher Programmierbare Steuerung) notwendig. Die Kommunikation der Komponenten wurde über integrierte deterministische Soft-SPS umgesetzt. Das IO-System zur Steuerung der digitalen und analogen Ausgänge sowie der externen Achsen wurde über KUKA ProConOS verwaltet, welches

über den CNC Kernel mit der KUKA KRC verknüpft ist. Für die Integration externer Kinematiken standen 6 Anschlusspunkte zur Verfügung, wobei der Drehtisch für die Kontrolle der Achse über die Soft-SPS zudem über eine MCFB-Funktionalität (Motion Control Function Blocks) verfügte.

Größe und Gewicht

Aufgrund der Dimensionen der zur Verfügung stehenden Fertigungshalle und der Reichweite des Roboters erwies sich die Rotation von Bauteilen der Größe des maximal zur Verfügung stehenden Bauraums als nicht praktikabel. Für die Darstellung der Flexibilität und autonomen Bauteilbearbeitung wurde die Bauteilgröße für diese Fertigungsschritte auf 1 m x 1 m x 1 m begrenzt. Ausgehend von den definierten Dimensionen und einem gefüllten Quader mit der Dichte der evaluierten Materialien wurde eine maximale Masse von 1280 kg angenommen.

Für die definierten Randbedingungen wurde der Schwerlastdrehtisch *Weiss CR1300* (Abbildung 14) an der Stirnseite der Linearachse integriert. Für die Fixierung des Druckbetts und der zu befräsenden Bauteile wurde eine Nutensteinplatte mit den Maßen 1500 mm x 1500 mm auf der Drehplattform fixiert.

Abbildung 14: Schwerlastdrehtisch Weiss CR 1300

Die Implementierung der software- und steuerungstechnischen Schnittstellen an die vorhandene Steuerung der Bearbeitungszelle erfolgte über die Einbindung in die Projektdateien *config.dat* und *machine.dat*. Der Drehtisch wurde als externe Base-Kinematik mit der

Definition einer Zusatzmaschine (MACHINE_DEF) in der Projektdatei *config.dat* mit den Koordinaten des vermessenen Fußpunkts hinterlegt (Abbildung 15).

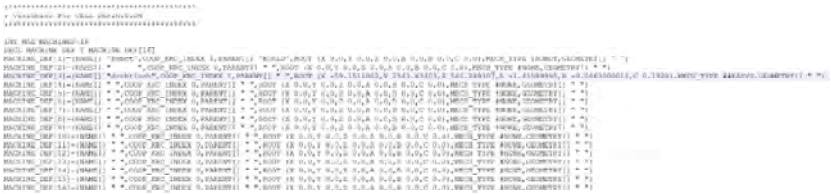


Abbildung 15: Ausschnitt Config.dat Definition einer Zusatzmaschine (MACHINE_DEF) zur Integration des Drehtisches

Die Implementierung erfolgte als Synchronachse, wodurch eine mathematische Kopplung zwischen den Koordinatensystemen (Abbildung 16) des Roboters (#ROBWORLD, #ROB-ROOT) sowie den dynamischen Zusatzkinematiken, bestehend aus Lineareinheit (#ER-SYS) und Drehtisch (#EASYS), erzeugt wurde.

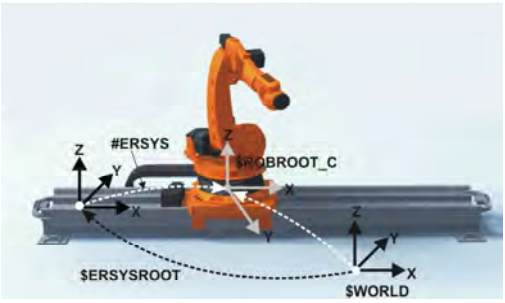


Abbildung 16: KUKA Roboter Koordinatensysteme zur Integration externer Kinematik [24]

Bei einer mathematischen Kopplung berechnet der Roboter seine Bewegungsbahn in Bezug auf die Position der Kinematik. Bewegt sich die Kinematik, folgt ihr der Roboter mit dem TCP (Tool Center Point), so dass die Position des TCP bezogen auf die bewegliche Basis der Kinematik gleichbleibt. Die mathematische Kopplung muss für BASE-Kinematik aktiviert

werden. Bei BASE-Kinematik ist eine mathematische Kopplung im TOOL- oder BASE-Koordinatensystem aktiv. Eine ROBROOT-Kinematik ist automatisch mathematisch gekoppelt. Diese kann nicht deaktiviert werden. Bei ROBROOT-Kinematiken ist die mathematische Kopplung im TOOL-, BASE- oder WORLD-Koordinatensystem aktiv.

Bei der additiven und subtraktiven Fertigung von rotationssymmetrischen Bauteilen ist es vorteilhaft, wenn das Bauteil durchgängig um die z-Achse rotiert und der Roboter lediglich zum Werkstück relative Ausgleichbewegungen in der x-y-Ebene übernimmt. Der Achstyp wurde dazu in der *machine.dat* als synchrone und endlos drehende Achse definiert. Die Beschreibung der Einbindung der Zusatzkinematiken in den Postprozessor der CAMSoftware erfolgt separat in Kapitel 3.6.2.

Für eine effizientere Ausnutzung des Bearbeitungsraumes hinsichtlich umspannungsfreier Additiv- und Subtraktivbearbeitung wurde die Integration der Drehachse in das Fundament des Hallenbodens vorgesehen. Abbildung 17 zeigt die schematische Darstellung des modular konzipierten Drehtisches mit variierbarer Aufspannfläche. Die auf dem Hallenbodenniveau ausgerichtete Grundplatte erleichtert die Bestückung des Tisches und verbessert damit die Handlingeigenschaften an der Gesamtanlage.

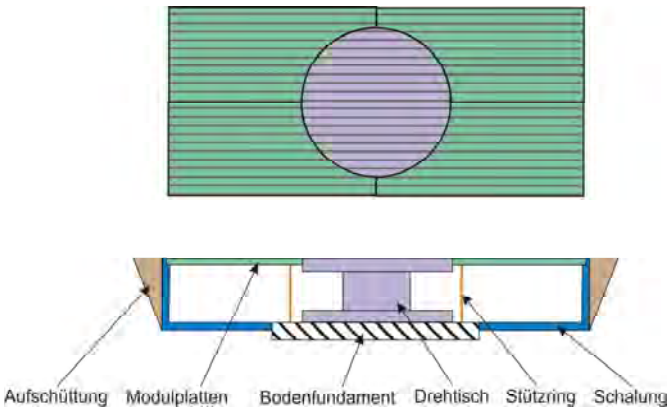


Abbildung 17: Schematische Darstellung zur Integration der Drehachse in das Hallenbodenfundament

3.4.3 Entwicklung von Einrichtungen zur Handhabung der LPU

Für einen durchgängigen Workflow mit automatischem Wechsel zwischen additivem und subtraktivem Bearbeitungsprozess wurden entsprechende Handhabungseinrichtungen für die jeweiligen Bearbeitungswerkzeuge konzipiert und konstruiert. Diese sehen vor, dass die LPU nach dem additiven Bearbeitungsprozess in eine fixierte Dockingstation abgelegt wird. Die Kopplung der LPU zum Roboter wurde über ein pneumatisch/mechanisches Nullpunktspannsystem (Abbildung 18) realisiert, wobei die Zuführung der notwendigen Medienleitungen (Granulat, Strom, Druckluft und Sensorik) mit einem Balancer realisiert wurde.

Mit dem Nullpunktspannsystem konnte zudem die automatisierte Integration im Gesamtsystem sichergestellt werden, da so eine steuerungstechnische Verknüpfung insbesondere zur Medientrennung und bereits bestehenden Sicherheitsabfragen gewährleistet wurde.

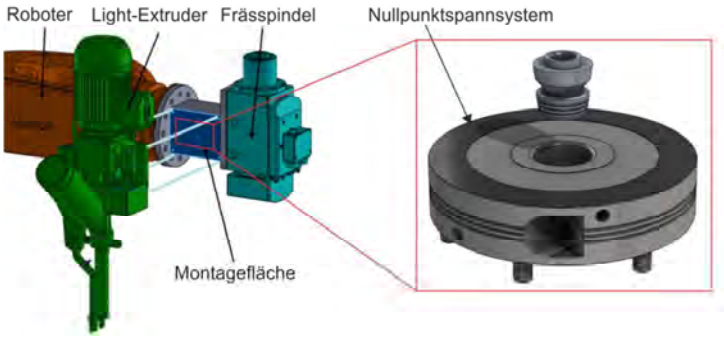


Abbildung 18: Nullpunktspannsystem zur Koppelung von Light-Extruder an Roboter

Auf dieser Basis und zur Realisierung eines unterbrechungsfreien hybriden Fertigungsprozesses wurde eine Dockingstation entwickelt, die in Anlehnung an ein Werkzeugwechselreservoir bei der subtraktiven Fertigung auf der einen Seite als Wechselsystem für die LPU dient, zusätzlich dazu auch die Steuereinheit der LPU, das Materialreservoir und die Medienführung zum Roboter vereint (Abbildung 19). Zur sicheren Ablage wurden digitale Signalgeber in Kopplung und Dockingstation integriert.

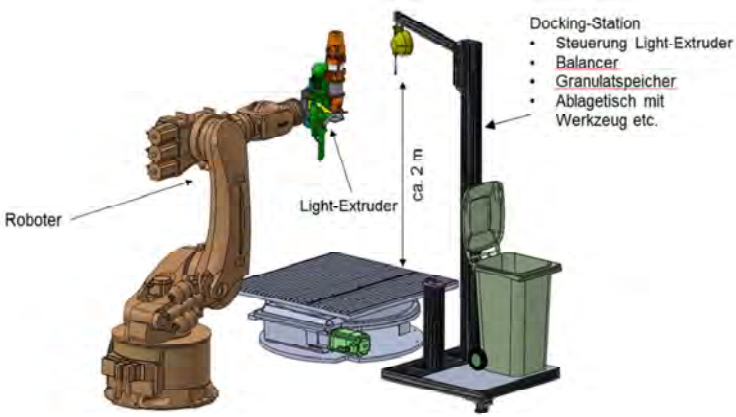


Abbildung 19: Schematische Darstellung zur Anordnung der Dockingstation in der Fertigungszelle

Die Masse der gefüllten Materialbehälter dient parallel als Gegengewicht zu dem zutragenden Schlauchpaket und sichert zusätzlich gegen das Kippen der Dockingstation im mobilen Betrieb. Ein gleichbleibender Füllstand der Materialbehälter wird durch eine sensorisch gesteuerte Beschickung gewährleistet. Die gewählte Koppellösung ermöglicht somit eine steife Anbindung für schnelle Bewegungen der LPU ohne Aufschwingerscheinungen sowie eine präzise Arretierung mit sehr hoher Wiederholgenauigkeit. Die für den subtraktiven Bearbeitungsprozess benötigte Frässpindel bleibt aufgrund zahlreicher fester Medienzuführungen auch während des additiven Bearbeitungsprozesses werkzeuglos am Roboter gekoppelt.

Für die Auslegung der Länge und des Gewichtes der Medienleitungen wurde ein geometrisches Berechnungsmodel (Abbildung 20) entworfen. Es ermöglicht die Auslegung der Schlauchpakete für unterschiedliche Arbeitsraumkonzepte. Damit ist die entwickelte LPU auch mit geringem Aufwand an andere Handlingsysteme anpassbar, wie zum Beispiel in Betrieb mit seitlichem Drehtisch oder unter Ausnutzung der gesamten Linearachse.

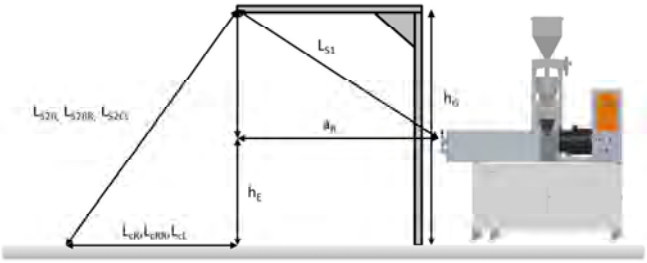


Abbildung 20: Berechnungsmodell zur Bestimmung der Längenverhältnisse der Kabelzuführung

Auf Basis der erfolgten Implementierung der Handhabungs- und Einzelkomponenten des Bearbeitungssystems im Steuerungssystem der hybriden Fertigungszelle, erfolgte die Generierung von Algorithmen zur übergeordneten Steuerung der An- und Abkopplung der Einzelmodule im Gesamtsystem. Die entsprechenden Algorithmen wurden nach der geometrischen Einmessung in der Robotersoftware eingebunden und können so als einfacher Modulbaustein bei der Bahnplanung verwendet werden.

3.5 Entwicklung der Light-Plastification-Unit (LPU)

3.5.1 Voruntersuchungen und Auslegung der Extrusionsleistung

Extruder zeichnen sich dadurch aus, dass sie im stationären Betrieb kontinuierlich mit definierten Austragsmengen das Extrudat plastifizieren, homogenisieren und austragen. Jedoch besitzen kleinbauende Extruder, die potentiell für einen mobilen Einsatz geeignet sind, für die effiziente additive Fertigung großformatiger Werkzeugformen eine zu geringe Antriebsleistung. Die Antriebseinheiten von Extrudern arbeiten in den Standardausführungen in der Regel mit kleinen Übersetzungsverhältnissen, da der Antrieb direkt hinter der Schnecke positioniert ist und der Drehmoment direkt auf die Schnecke übertragen wird.

Um die im Lastenheft definierte Austragsmenge von min. 20 kg/h an rezykliertem Material zu erreichen, wurde als Grundlage der Entwicklung ein Doppelschneckenextruder gewählt (Abbildung 21) und hinsichtlich der materialausstoßspezifischen Komponenten angepasst. So wurde in einem ersten Schritt die Drehzahl erhöht und eine dadurch bedingte Getriebeverstärkung durchgeführt, da die Ausgangskonfiguration des Extruders zunächst nur eine Austragsleistung von 15 kg/h für rezykliertes Low Density Polyethylen (LDPE) ergab.

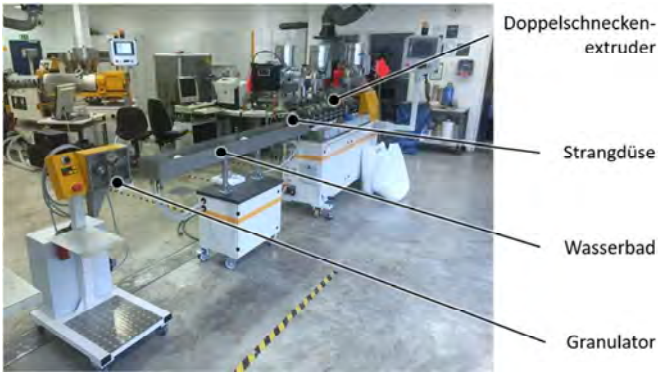


Abbildung 21: Versuchsstand zur Extruderentwicklung mit Doppelschneckenextruder und Granulierstrecke

Als Resultat konnte eine Austragsleistung von ca. 29 kg/h aufgezeichnet werden (Abbildung 22). Um die Effizienz und somit die Austragsleistung der Extrusionseinheit weiter zu steigern, wurde in der zweiten Entwicklungsstufe eine konstruktive Anpassung der Einzugsgeometrie verändert, womit die Austragsleistung auf ca. 60 kg/h gesteigert werden konnte (Abbildung 22). Durch diese enorme Steigerung der Austragsleistung war es zudem möglich, einen für die geplanten Austragsleistungen und den entsprechenden Materialverbrauch ausreichend großen Materialpuffer im Gesamtsystem zur Verfügung stellen zu können, ohne dass es zu einer Unterbrechung des additiven Fertigungsprozesses kam. Basierend auf den erarbeiteten Werkstoff- und Prozessmodelle der verwendeten Rezyklate war es zudem möglich, einen automatischen und intermittierenden Betrieb mit den weiteren Aggregaten einzusteuern.

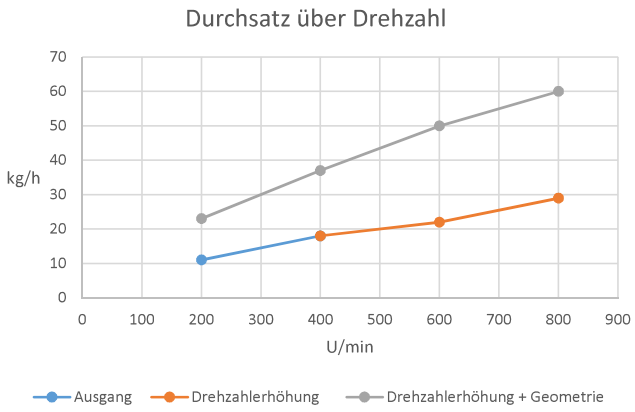


Abbildung 22: Diagramm Steigerung der Austragsleistung der Extrusionseinheit

3.5.2 Entwicklung angepasster Extruderspezifikationen für die Rezyklatverarbeitung

Ein primäres Ziel des Projektes war es, flexibel thermoplastische Kunststoffe und insbesondere wiederaufbereitete Rezyklate verarbeiten zu können, um einen geschlossenen Werkstoffkreislauf abzubilden.

Bereits in der Konzeptphase zeigte sich, dass die Verarbeitung von Recyklaten direkt in der LPU nicht praktikabel ist. Für die Verarbeitung von Recyklaten werden aufgrund der unregelmäßigen Beschaffenheit der rezyklierten Flakes (siehe Abbildung 4) daher Doppelschneckenextruder benötigt, da diese Extrusionssysteme prozessinhärent ein deutlich besseres Einzugsverhalten aufweisen und zudem eine optimale Homogenisierung bei gleichzeitig kurzer Schneckenlänge ermöglichen. Für die vollständige Funktionsfähigkeit einer Doppelschnecke muss jedoch eine horizontale Lagerung der Schneckenachsen gewährleistet werden. Die horizontale Ausrichtung kann bei den dynamischen Druckbewegungen nur unzureichend gesichert werden und würde somit die prozessspezifischen Bewegungsstrategien signifikant einschränken.

Um den Einsatz von Recyklaten in der hybriden Fertigungszelle zu ermöglichen und damit den geschlossenen Werkstoffkreislauf zu generieren, wurde daher eine Granuliereinheit dem Druckprozess vorgeschalten (Abbildung 23).

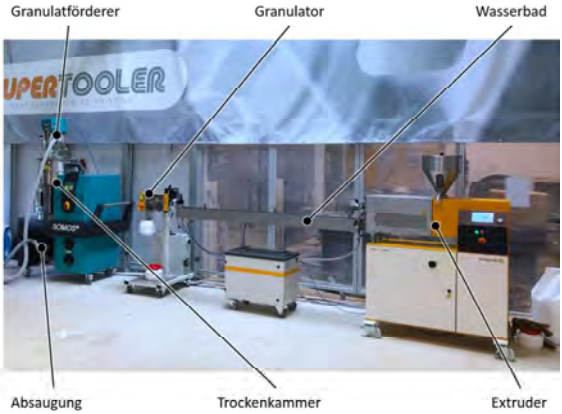


Abbildung 23: Prozesstrecke Materialaufbereitung der hybriden Fertigungszelle *SuperTooler*

Ein weiterer Vorteil der gewählten Konfiguration war die Möglichkeit, zusätzliche Additive für die Einstellung der gewünschten Materialeigenschaften für einen optimalen Fertigungsprozess beimengen zu können. So konnte zur Reduktion der thermisch induzierten Eigenspannungen im Additiv-Bauteil und während des Druckprozesses der Kurzfasermengenanteil im Compound kurzfristig angepasst werden.

Zur Herstellung des Compounds werden nach der Plastifizierung die durch die Düsenbohrungen (Abbildung 24) der beheizten Strangdüse austretenden Schmelzestränge in ein horizontal und vertikal verstellbares Wasserbad (Abbildung 24) geleitet. Die Kühlung der Stränge erfolgt durch einen laminar strömenden Wasserfilm und durch manuell justierbare Sprühdüsen.

Abbildung 24: Austragsdüse des Granulatextruders (links) und Wasserbad mit Führungsrollen (rechts)

Die Stränge werden im Wasserbad soweit abgekühlt, dass sie im anschließenden Granulator nicht verformt werden. Sie besitzen aber noch ausreichend Eigenwärme, um die spätere Trocknung bzw. eine optionale Kristallisation wirkungsvoll zu unterstützen.

Anschließend wird das erstarrte Extrudat mittels des eingesetzten Granulators (Abbildung 25) in einstellbare Granulatlängen von 0,5 mm bis 5 mm für die Verarbeitung in der Additiv-Einheit zertrennt.

Abbildung 25: Strang-Granulator zur Herstellung verschiedener Granulatlängen

3.5.3 Entwicklung einer Materialförderstrecke mit integriertem Trocknungssystem

Während der ersten Untersuchungen zur Erprobung des additiven Fertigungsprozesses hat sich gezeigt, dass ein Großteil der konventionellen thermoplastischen Kunststoffe, die zur additiven Verarbeitung auf der Anlage verwendet werden können, ein stark hygroskopisches Materialverhalten zeigt. Dieses Materialverhalten wird durch das Einbringen von Füllstoffen (z.B. Glasfasern) zur Vermeidung von Schwindungserscheinungen noch verstärkt. Ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt führt beim Extrusionsvorgang zum Verdampfen der Flüssigkeitsanteile und damit zur Blasenbildung im Bauteil (siehe Abbildung 26).

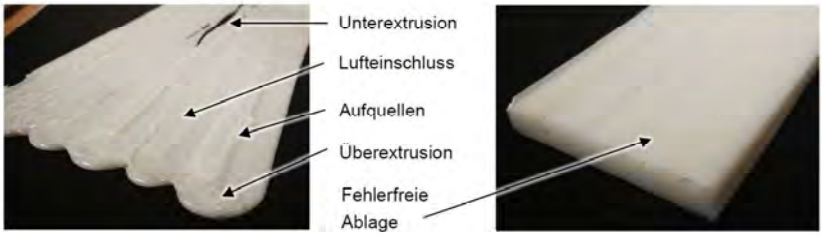


Abbildung 26: Additiv gefertigte ABS-Struktur mit nicht getrocknetem (links) und getrocknetem (rechts) Ausgangsmaterial

Für ein optimales Druckergebnis und eine gleichbleibende Bauteilqualität ist ein vorgeschalteter Trocknungsprozess deshalb unumgänglich. Vor dem Hintergrund der im *SuperTooler*-Projekt angestrebten Austragsleistung von 20 kg/h wurde daher ein Granulat-trockner (Abbildung 27) mit einer Kapazität von 100 l und einer Trockenluftmenge von ca. 40 m³/h sowohl hardwareseitig als auch steuerungstechnisch in die Dockingstation integriert. So ist die Umsetzung eines werkstoffgerechten und durchgehenden Workflows vom Granulat über einen Zwischenspeicher bis hin zur additiv/subtraktiv gefertigten Werkzeugstruktur möglich.

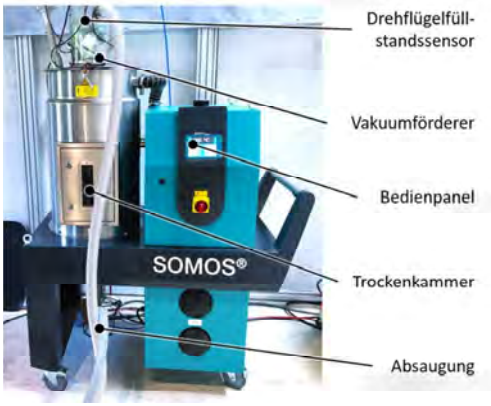


Abbildung 27: Granulattrockner SOMOS RDM 40/100 mit automatischer Vakuumbeschickung für intermittierenden Betrieb

3.5.4 LPU-Entwicklung für einen automatischen, intermittierenden Betrieb

Die Light Plastifikation Unit (LPU) bildet das zentrale Element der Druckkonfiguration innerhalb der hybriden Fertigungszelle. Für den Druckbetrieb wird die Einheit (bestehend aus Extruder, Vakuumförderer, Heizdüse und Basisgestell) automatisiert von der Dockingstation entnommen (Abbildung 28). Dazu wurde eine entsprechende Routine mit der in der KUKA-Steuerung implementierten Programmiersprache KRL erarbeitet. Um mögliche Anlagenschäden durch Fehlbedienung zu vermeiden, wurden zudem mehrere Sicherheitsabfragen in der Aufnahme- und Ablageroutine hinterlegt. So kann beispielsweise der Subtraktivprozess erst gestartet werden, wenn die Verriegelung des Nullpunktspannsystems in der Dockingstation die LPU als „fest“ signalisiert.

Das Grundelement der LPU und somit die Verbindung zum Roboter bildet das Basisgestell. Es besteht aus zwei durch Form- und Kraftschluss miteinander fixierten Stahlplatten und einem Versteifungswinkel. An der Bodenplatte ist der Spannbolzen als Gegenstück zur Aufnahme des Nullpunktspannsystems der Dockingstation integriert, wohingegen sich an der Stirnplatte das Nullpunktspannsystem zur Aufnahme am Roboterflansch befindet. Um eine

präzise Positionierung der Aufnahme- und Ablageroutine und eine dauerhafte Fixierung zu gewährleisten, wurden beide Kopplungspunkte mit einer Verdrehsicherung ausgestattet.

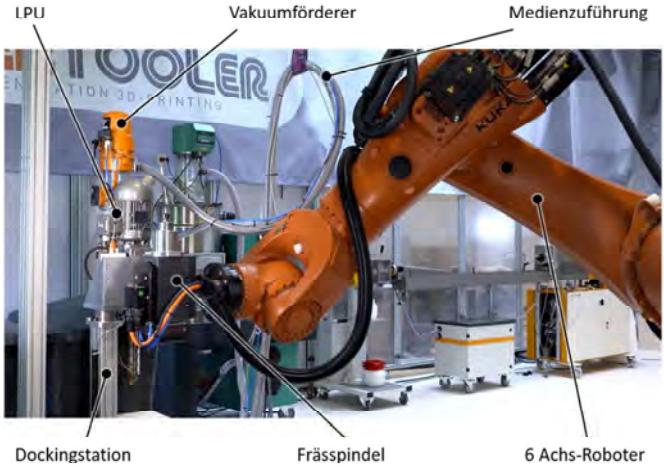


Abbildung 28: Aufnahme der LPU durch KUKA KR500 beim Wechsel zur Druckkonfiguration innerhalb der Roboterzelle

Die LPU ist fest mit dem Basisgestell verschraubt und setzt sich aus einem Drehstrommotor, einem Untersetzungsgetriebe, einer Schnecke, Mantelheizelementen, einer beheizten Druckdüse und entsprechenden Steuerungselementen zusammen. Der Drehstrommotor wird über eine in die SPS integrierte Steuerschaltung mit einer Frequenz von 0 Hz – 80 Hz betrieben. Um Schäden an der Schnecke durch unzureichend plastifiziertes Granulat zu vermeiden, wurde in der Schaltung eine Sicherheitsabfrage der Temperatur integriert und bewirkt, dass bevor die vorgegebene Extrusionstemperatur nicht erreicht ist, sich der Extruder damit weder programmgesteuert noch manuell Einschalten lässt.

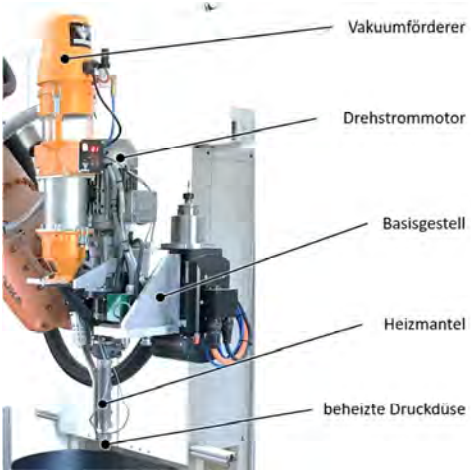


Abbildung 29: Aufbau der Light Plastification Unit (LPU) am Roboter

Um die LPU in ihrer kurzen Ausführung optimal temperieren zu können, wurde ein angepasstes Heizsystem entwickelt, welches eine kontinuierliche Homogenisierung und Förderung des Kunststoffs ermöglicht. Zur Erreichung einer präzisen und definierten Drucktemperatur wurde an der modularen Druckdüse (Abbildung 30) eine leistungsstarke Düsenheizung integriert. Die Düse besitzt eine separat regelnde Temperatursteuerung und erlaubt so die punktgenaue Anpassung der Drucktemperatur an das jeweilige Extrudat, wodurch eine gleichbleibende Druckqualität sichergestellt werden konnte.

Die Materialzufuhr zur LPU erfolgte mit Hilfe eines kompakten Vakuumförderers (siehe Abbildung 29), der über einen abgewinkelten Materialeinzug direkt mit dem Extruder verbunden wurde. Die Regelung der Materialzufuhrmenge erfolgt dabei über die Abfrage eines im Materialreservoir integrierten Füllstandsensor, wodurch eine kontinuierliche Materialzufuhr für den unterbrechungsfreien Druckbetrieb gewährleistet werden konnte. Zusätzlich wurde im Antrieb des Vakuumförderers eine automatische Druckluft-Drehflügelabreinigung des Patronenvliesfilters für einen staubfreien Materialtransport integriert. Damit lassen sich die Wartungsintervalle im kontinuierlichen Druckbetrieb und die Standfestigkeit der LPU signifikant erhöhen.

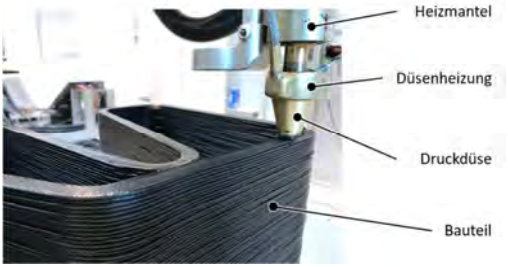
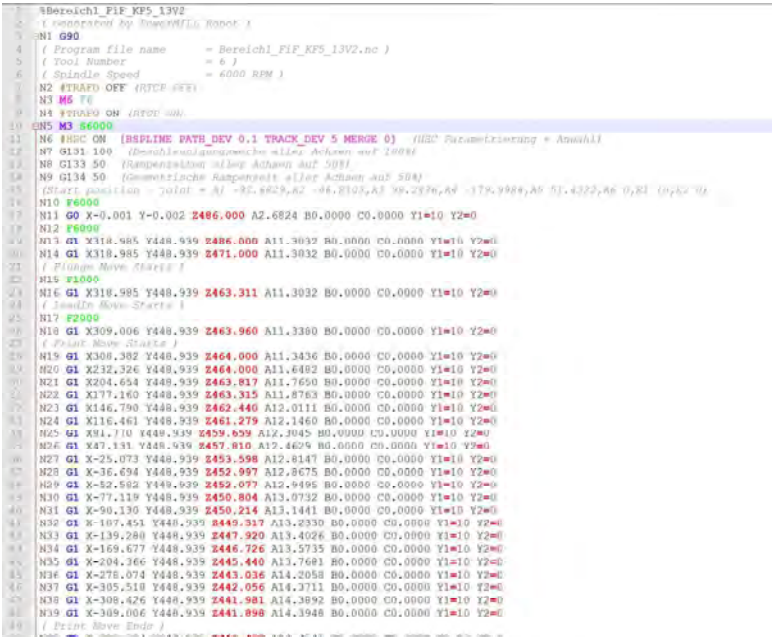


Abbildung 30: Modulare Druckdüse mit integrierter Düsenheizung und Temperaturmessfühler

Die Ansteuerung der LPU über das G-Code oder auch NC-Code basierende Druckprogramm wurde mit Hilfe standardisierter Maschinen-Befehle umgesetzt. Dies erwies sich als vorteilhaft, da so bei der Kompilierung von Druck- und Fräsprogrammen nicht zwischen unterschiedlicher Programmiersyntax gewechselt werden musste und der KUKA CNC-Kernel zur Transformation und Ansteuerung verwendet werden konnte. Dabei wird der Befehl „M3“ (Abbildung 31) für den Start des Elektromotors der Spindel verwendet. Die Drehzahl und dazu äquivalent die Austragsleistung des Extruders wird über den Befehl S gesteuert. Für die Subtraktive Fertigung gibt der Befehl „S“ die Drehzahl der Spindel vor. Für die Steuerung der LPU wurde die SPS so modifiziert, dass diese durch den Befehl „S“ mit einem Wertebereich von 0 – 80 Hz die Anregungsfrequenz des Drehstrommotors vorgibt. Für den Wechsel zur subtraktiven Bearbeitung wird die Modifikation der Übersetzung durch einen Wahlschalter rückgängig gemacht.



```
%Bereich1_F1F_KF5_13V2
( Generated by TopoCAM(c) Konst )
N1 G90
( Program file name       = Bereich1_F1F_KF5_13V2.nc )
( Tool Number             = 6 )
( Spindle Speed           = 6000 RPM )
N2 #TRAFO OFF (RTCP aus)
N3 M6 T6
N4 #TRAFO ON (RTCP an)
N5 M3 S6000
N6 #BRC ON  (BSPLINE PATH_DEV 0.1 TRACK_DEV 5 MERGE 0)  (BRC Parametrierung + Anwahl)
N7 G131 100  (Beschleunigungswerte aller Achsen auf 100%)
N8 G133 50  (Rampenzeiten aller Achsen auf 50%)
N9 G134 50  (Geometrische Rampenzeit aller Achsen auf 50%)
(Start position - joint = A1 -82.6829,A2 -86.8103,A3 99.2934,A4 -179.9984,A5 51.4322,A6 0,E1 0,E2 0)
N10 F6000
N11 G0 X-0.001 Y-0.002 Z486.000 A2.6824 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N12 F6000
N13 G1 X310.985 Y448.939 Z486.000 A11.3032 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N14 G1 X310.985 Y448.939 Z471.000 A11.3032 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
( Plunge Move Starts )
N15 F1000
N16 G1 X310.985 Y448.939 Z463.311 A11.3032 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
( Inside Move Starts )
N17 F2000
N18 G1 X309.006 Y448.939 Z463.960 A11.3380 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
( Print Move Starts )
N19 G1 X308.382 Y448.939 Z464.000 A11.3436 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N20 G1 X232.326 Y448.939 Z464.000 A11.6482 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N21 G1 X204.654 Y448.939 Z463.817 A11.7650 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N22 G1 X177.160 Y448.939 Z463.315 A11.8763 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N23 G1 X146.790 Y448.939 Z462.440 A12.0111 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N24 G1 X116.461 Y448.939 Z461.279 A12.1460 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N25 G1 X91.170 Y448.939 Z459.939 A12.2645 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N26 G1 X47.131 Y448.939 Z457.810 A12.4629 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N27 G1 X-25.073 Y448.939 Z453.598 A12.8147 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N28 G1 X-36.694 Y448.939 Z452.997 A12.8675 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N29 G1 X-52.582 Y449.939 Z452.077 A12.9495 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N30 G1 X-77.119 Y448.939 Z450.804 A13.0732 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N31 G1 X-90.130 Y448.939 Z450.214 A13.1441 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N32 G1 X-107.451 Y448.939 Z449.317 A13.2330 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N33 G1 X-139.280 Y448.939 Z447.920 A13.4026 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N34 G1 X-169.677 Y448.939 Z446.726 A13.5735 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N35 G1 X-204.366 Y448.939 Z445.440 A13.7601 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N36 G1 X-276.074 Y448.939 Z443.036 A14.2058 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N37 G1 X-305.518 Y448.939 Z442.056 A14.3711 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N38 G1 X-308.426 Y448.939 Z441.981 A14.3892 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
N39 G1 X-309.006 Y448.939 Z441.898 A14.3948 B0.0000 C0.0000 Y1=10 Y2=0
( Print Move Ends )
```

Abbildung 31: Auszug aus dem Maschinensteuerungscode für additive Fertigung

Das Gesamtgewicht der LPU war eine dominante Randbedingung im Entwicklungsprozess. Eine möglichst geringe Masse der Einheit erlaubt den Einsatz höherer Prozessgeschwindigkeiten und Beschleunigungen. Zudem steigert das niedrige Gesamtgewicht die Variabilität der Verwendung der LPU, da die LPU so auch an kleineren Handlingeinheiten eingesetzt werden kann. Die Masse der LPU wurde mit ca. 78 kg bestimmt.

3.6 Systeme zur Bewegungs- und Prozesssteuerung

Zur Herstellung von Werkzeugen mit dem neuen Fertigungssystem war die Entwicklung von Systemen zur Bewegungs- und Prozesssteuerung erforderlich, die anhand von 3D-CAD Daten in einem kontinuierlichen Workflow sowohl für additive als auch subtraktive Werkzeugbahnen verwendet werden kann. Als Basis für die software- und steuerungstechnische Abstimmung zwischen Roboter, LPU und Peripheriesystemen erfolgte daher zunächst die Analyse von bestehenden Steuer- und Regelungskonzepten auf Basis der bisher durchgeführten simulativen und experimentellen Untersuchungen.

Konventionelle Industrieroboter sind nicht in der Lage G-Code zu verarbeiten. Prinzipiell besteht aber die Möglichkeit, über einen entsprechenden Postprozessor die Daten der in der CAM-Software erzeugten Bewegungsbahnen in die KRL (KUKA Robot Language) zu transformieren und diese abzufahren. Moderne NC-Frässtrategien von Freiformflächen sind jedoch sehr hoch aufgelöst und besitzen somit eine Vielzahl von Einzelpunkten, an denen der Roboter entlangfahren soll. Die konventionelle Robotersteuerung kann zur Bahnplanung jedoch nur eine sehr begrenzte Anzahl an Punkten vorausplanen, was zu ungewollten Geschwindigkeitsreduzierungen führt. Die Verwendung der KUKA.CNC ermöglicht es hingegen bis zu 120 Punkte voraus zu planen und damit eine nahezu gleichbleibende Bahngeschwindigkeit zu garantieren. Durch die Verwendung des NC-Steuerungskerns auf der Robotersteuerung können NC-Programme direkt, d. h. ohne vorherige Umwandlung in KRL-Programme verarbeitet und mit dem Roboter gefahren werden. Dabei kommuniziert die Robotersteuerung mit der Technologiesteuerung über einen Feldbus. In Abbildung 32 ist das Kommunikationschema aufgezeigt und beschreibt, wie das KUKA.CNC-Technologiepaket in die KUKA KRC Steuerung implementiert worden ist. Die KRC (KUKA Robot Controller) ist dabei das Basiselement zur Robotersteuerung und steuert somit die Roboterachsen direkt an. Die Eingangsdaten werden in der KRC verarbeitet und in die einzelnen Achsbewegungen transformiert. Die NC-Daten, welche im CNC-Kernel verarbeitet werden, gelangen über die EMI-Schnittstelle (External Motion Interface) zur KRC Steuerung und werden in Roboterbewegungen übersetzt. Die EMI-Schnittstelle übernimmt dabei die Rolle des Interpreters und ermöglicht die direkte Robotersteuerung über G-Code. Das PROCONOS System ist eine integrierte deterministische Soft-SPS und bildet die Schnittstelle zwischen dem CNC-Kernel, der CNC-HMI und dem Feldbussystem der Ein- und Ausgänge.

Die CNC-HMI (Human-Machine Interface) beschreibt die Bedienoberfläche zur Steuerung der CNC Funktionen. So wurden über die digitalen und analogen Ein- und Ausgänge unter anderem der Extruder, die Frässpindel sowie eingehende sensorische Signale zur Verarbeitung an die PROCONOS Soft-SPS weitergeleitet.

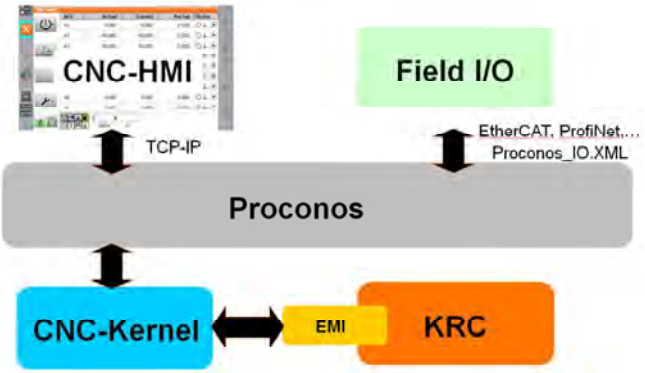


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Kommunikationsschemas von KUKA.CNC [25]

Zur Umsetzung und Darstellung des Gesamtprozesses sowie zur Validierung der Einzelsysteme wurde eine Gesamtprozesskette (Abbildung 33) des hybriden Fertigungsprozesses entwickelt, die sich in vier Hauptschritte unterteilen lässt. Als erster Prozessschritt ist hier die Kombination aus anforderungsgerechter Granulierung des Rezyklats und der prozessgerechten Materialaufbereitung zu nennen. Der zweite Prozessschritt wird durch die Prozesssimulation definiert. Basierend auf der CAM-Software wird ein Maschinencode generiert, auf dem die additive Fertigung und die subtraktive Bearbeitung in der Roboterzelle basieren, die jeweils einen weiteren Prozessschritt innerhalb der Gesamtprozesskette ausmachen.

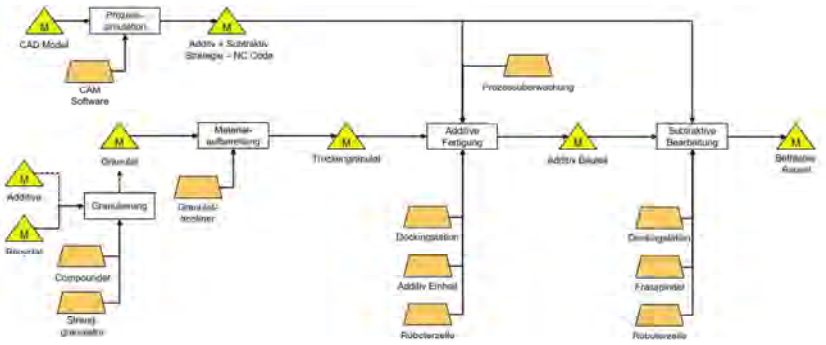


Abbildung 33: *SuperTooler*-Gesamtprozesskette

Aufbauend auf die erarbeitete Prozesskette des hybriden Fertigungsprozesses wurde ein Anforderungskatalog erstellt, welcher zur Spezifizierung der erforderlichen additiven und subtraktiven Grundfunktionalitäten und Anforderungen an das CAD/CAM-System zur Generierung des hybriden Roboter-Bewegungs-Programmes diente.

Tabelle 2: Auswahl der wesentlichen Anforderungen an das CAD/CAM-System hinsichtlich additiver und subtraktiver Grundfunktionalitäten aus dem Anforderungskatalog

Anforderungen Subtraktiv	Anforderungen Additiv
Eigenständige 2,3 und 3+2-Achsen-Bearbeitung	Incremental real time slicing
Language Translator: KUKA	Druckweg + Layer Previewer
Verarbeitung von IGES, STEP, STL und VDA-Drahtmodell + Flächen- und Solid-Importschnittstelle	Einstellung der Schichtdicke
NC - Bearbeitungsfunktionalität	Automatische Erzeugung der Stützstruktur
Roboter Simulation und Kollisionserkennung	Stärke der Außenhülle
Offset Geometrie Erzeugung	Minimale Druckzeit pro Schicht
Erkennen und Kontrollieren von Singularitäten und Achsgrenzen	Fülldichte der Stützstruktur

Integriert Roboter mit bis zu sechs Achsen und zwei externen Achsen wie Rundtische und/oder Lineareinheiten	Einstellung Druckgeschwindigkeit, Geschwindigkeit Leefahrten
Erstellung von Roboterprogrammen	Einstellung Druckdüsengröße

Auf Basis des erarbeiteten Anforderungskatalogs wurde eine Recherche zu industriell verfügbaren CAD/CAM-Systemen durchgeführt, wobei verschiedene Systemhersteller identifiziert und kontaktiert wurden, deren Softwaresysteme für den geplanten Einsatz als Basis verwendet werden konnten. Anschließend wurde eine Vor-Ort-Evaluation durchgeführt, um zum einen den Entwicklungsstand bereits bestehender Subtraktiv-Funktionen als auch die Möglichkeiten zur Integration spezifischer Entwicklungsanforderungen des *SuperTooler*-Projektes zu prüfen. Die dabei zur Bewertung verwendeten Hauptkriterien sind nachfolgend aufgeführt und unterteilten sich zusätzlich in jeweils fünf bis zwölf Unterkriterien, wobei zudem spezifische Ausschlusskriterien definiert wurden:

- Anschaffung,
- Support,
- Bedienbarkeit,
- Programmierbarkeit,
- Simulation.

3.6.1 Integration einer *SuperTooler*-Prozesssteuerung im Softwaresystem *PowerMill*

Basierend auf den Bewertungsergebnissen der Softwareevaluation wurde innerhalb des Konsortiums ein umfangreiches Lastenheft zur detaillierten Beschreibung der spezifischen Anforderungen an das CAD/CAM-System erarbeitet und diente als Grundlage für die bevorstehende Softwareentwicklung für die hybride Fertigungszelle. Unter Berücksichtigung der im Lastenheft gestellten Anforderungen und der erarbeiteten Bewertungskriterien wurde das Softwaresystem *PowerMill* mit der Erweiterung *PowerMill* Additive der Firma *Autodesk* (ehemals Delcam) für die Verwendung in der hybriden Fertigungszelle ausgewählt.

Für die Realisierung eines durchgängigen Workflows vom 3D-CAD-Modell bis hin zum fertigen Bauteil war es erforderlich, dass die CAM-Software den vollständigen Steuerungscode der Gesamtanlage ausgibt. Dementsprechend wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, bei der das mit dem zuvor im Additiv-Modul erstellte Druckmodell an das Subtraktiv-Modul übergeben wird und dort ohne Zwischenkonvertierung direkt als Rohteil verwendet werden kann (Abbildung 34). Der in Abbildung 34 visualisierte Druckkörper (hellgrün) wird im Anschluss an die additive Simulation an den subtraktiven Programmteil zur Bearbeitung der Funktionsflächen (zum Beispiel formfallende Flächen) übergeben und die subtraktiven Werkzeugwege partiell hinzugefügt. Die Generierung der Additiv-Strategie wird mit dem in der Software integrierten Additive-Modul umgesetzt, welches durch die implementierten Bahnerzeugungs-Algorithmen der Slicingsoftware Netfabb spezifische Strategien zum Aufbau komplexer Volumenmodelle bereitstellt, die für die *SuperTooler*-Anlage entsprechend angepasst wurden.

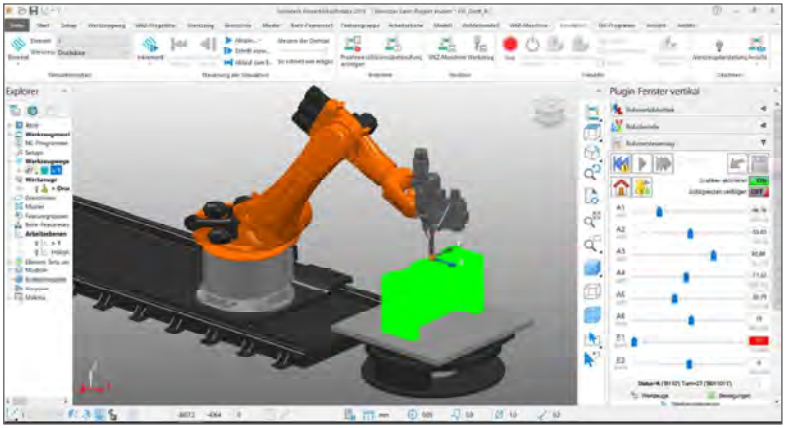


Abbildung 34: Darstellung der Programmoberfläche bei der Simulation des additiven Fertigungsprozesses mittels *Autodesk POWERMILL*

Durch die Entwicklung einer *SuperTooler*-spezifischen Bedienoberfläche bei der Additiv-Werkzeugwegerstellung war es zudem möglich, prozessangepasste Steuer- und Regelkonzepte für die Echtzeitsteuerung der LPU zu erarbeiten. Für die programmgesteuerte Kommunikation mit der LPU lassen sich an beliebigen Bahnpunkten entsprechende

Prozessparameter hinzufügen. Durch die dabei einfach realisierbare Integration von spezifischen Maschinen- und Prozessparametern in den Werkzeugweg (Abbildung 35) konnte die Erzeugung variabler Schweißraupendicken ermöglicht werden, um additive Fertigungscharakteristika und roboterspezifische Bewegungsmuster berücksichtigen zu können.

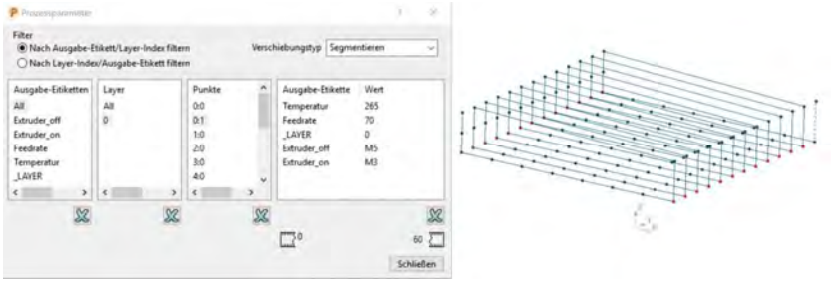


Abbildung 35: Prozessparametersteuerung mittels additivem Werkzeugwegeditor in der CAM-Software PowerMill

3.6.2 Entwicklung und Erprobung der Steuerungs- und Regelkonzepte

Aufbauend auf die entwickelten softwarebasierten Modelle und der Bedienoberfläche zur FDM-Prozessteuerung innerhalb der *Autodesk*-Software *PowerMill* und *PowerMill*-Additive wurde der Einsatz der komplexen CAD/CAM-Software erprobt. Im Fokus der Arbeiten stand dabei die Überprüfung der Einhaltung der geforderten Anforderungen wie Austragsleistung, Spurbreite und –überlappung etc. durch die softwaretechnisch vorgegebenen Sollwerte für die acht Roboterachsen. So wurde der Postprozessor auf das Anlagenmodel und die jeweiligen Bearbeitungswerkzeuge iterativ umgeschrieben, um die Ansteuerung der zusätzlich integrierten Aktoren (LPU, Frässpindel) zu ermöglichen und die Bauraumrestriktionen des geänderten Maschinenmodells einzuhalten.

Der für den Druck- und Fräsprozess benötigte NC-Code (oder auch G-Code) wird über einen fünfstufigen Prozess erzeugt (Abbildung 36). Mittels der in *PowerMill* implementierten Strategien wird für den jeweilig begonnenen Fertigungsschritt (Druck, Schruppen, Schlichten) ein individueller Werkzeugweg erstellt. Anschließend wird ein Maschinenmodell, welches die anlagenspezifischen Bewegungs- und Bauraumrestriktionen enthält als

MTD-Datei erzeugt. Innerhalb des Maschinenmodells werden die CAD-Daten und die dazugehörigen Werkzeugwege so ausgerichtet, dass die Erreichbarkeit durch den Roboter gegeben ist. Daran anschließend wird der Werkzeugweg mit den Randbedingungen des Maschinenmodells simuliert und damit auf Kollisionen, Erreichbarkeit und roboterspezifische Singularitäten überprüft. Mittels des Postprozessors werden die Bewegungsdaten der Simulation in das anlagenspezifische NC-Programm übersetzt

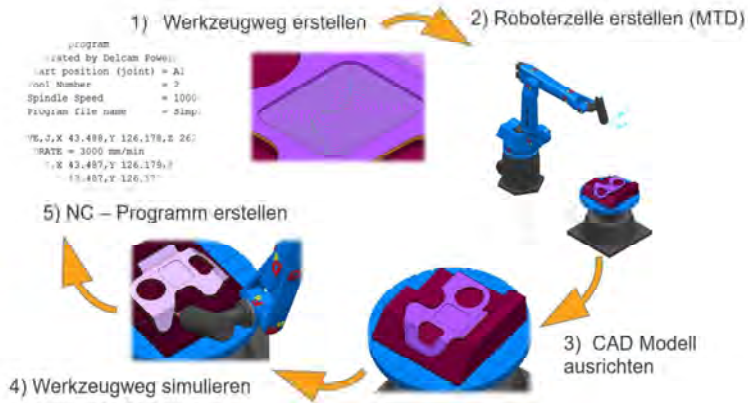


Abbildung 36: Schematische Darstellung bei der Erzeugung von NC-Programmen für die hybride Fertigungszelle

Der Postprozessor wird als PRIPOST-Datei erstellt und ist für jeden Roboterhersteller und Anlagenkonfiguration explizit anzupassen. Im Projekt *SuperTooler* wurden vier Postprozessoren erzeugt, mit denen alle Bearbeitungsschritte des hybriden Fertigungsprozesses für verschiedene Bauteilgrößen abgedeckt werden konnten:

- Additive Fertigung mit Verwendung der Dreheinheit,
- Additive Fertigung ohne Verwendung der Dreheinheit und Nutzung der gesamten Linearachse,
- Subtraktive Fertigung mit Verwendung der Dreheinheit,

- Subtraktive Fertigung ohne Verwendung der Dreheinheit und Nutzung der gesamten Linearachse.

Grundlegend definiert der Postprozessor äquivalent zu der Maschinen-Konfigurationsdatei wesentliche kinematische Vorgaben wie Achsenanzahl, Geometrie, Achsgrenzen und Achsprioritäten. Der Ausschnitt eines erstellten Postprozessors ist in Abbildung 36 dargestellt. Des Weiteren wurden benutzerspezifische Parameter für das Setup der Anlage bzw. den Fertigungsprozess für die NC-Code Erzeugung integriert. So besteht für die *SuperTooler*-Anlage die Möglichkeit, Austragsleistungen, Bahngenauigkeiten, Beschleunigungen und Koordinatensysteme für den Druckprozess zu wählen. Für den Fräsprozess besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Fräswerkzeugnummer und die Absaugvorrichtung einzuschalten.

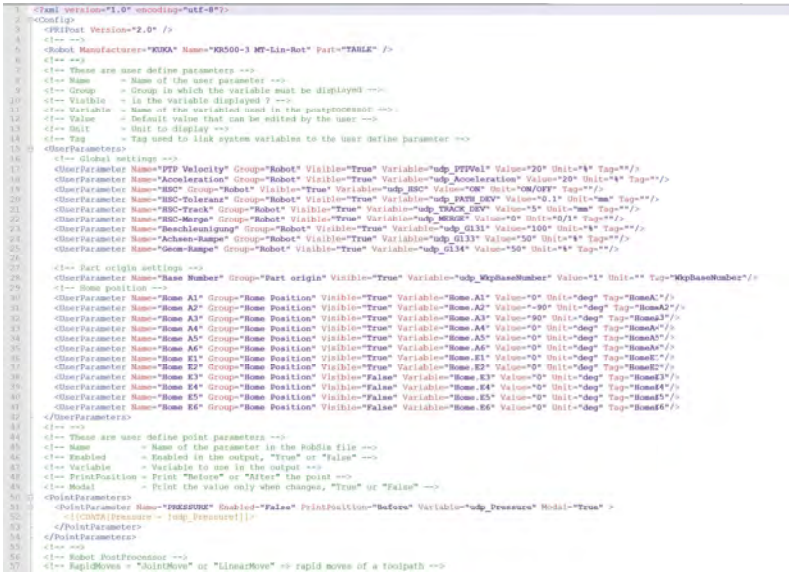


Abbildung 37: Ausschnitt aus dem entwickelten Postprozessor zur additiven Fertigung mit Verwendung des Drehtischs

Eine essentielle Aufgabe bei der Erstellung des Postprozessors war die Integrationen von Ausgabe-Syntax der Punkt-Prozessparameter. Die integrierten Befehle steuern, an welchen Punkten des Werkzeugwegs die jeweiligen Aktoren geschaltet werden. So wird beispielsweise die LPU nur am Beginn von Bahnen aktiviert, die im Werkzeugweg als Druckbahnen definiert sind. Die Steuerung wurde, wie in Kapitel 3.6.1 beschrieben, über die Integration der Befehle „M3“ und „M5“ und der dazugehörigen Antriebsfrequenz des Drehstrommotors umgesetzt. Äquivalent wurde auch die Frässpindel über die Befehle „M3“ und „M5“ und die Spindeldrehzahl gesteuert.

Eine Besonderheit bei der Ausgabe für das installierte KUKA.CNC System war es, die Ausgabedatei mittels des Postprozessors zu erzeugen. Dafür wurden zwei Dateien in die KUKA KRL Sprache transformiert, welche zur Grundkonfiguration und dem Aufruf der KUKA.CNC-HMI dienen. An einer definierten Übergabeposition wurde anschließend die dritte Datei (NC-Code) aufgerufen und ausgeführt. Nach Ablauf des Programms wurde wieder an die KRL-Datei übergeben.

Basierend auf den angepassten Postprozessoren konnten die entwickelten Steuer- und Regelkreise durch Einstellung der freien Parameter innerhalb des Softwaresystems beliebig an den hybriden Fertigungsprozess angepasst werden. So ließ sich insbesondere das in den entwickelten Material- und Prozessmodellen bestimmte Abkühlverhalten, die Viskosität und die Trägheit der schmelzflüssigen Thermoplastrezyklate beim additiven Fertigungsschritt und der entsprechenden Werkzeugwegplanung berücksichtigen. Mithilfe angepasster Bahnstrategien war es zudem möglich, die Bewegungen während der additiven Fertigung den jeweiligen Bauteilanforderungen anzupassen. Entsprechend ist bei der Erstellung von Stützstrukturen und Bauteilkonturen, die direkte Verbindung zur Bauplattform besitzen, eine relativ hohe Vorschubgeschwindigkeit bei gleichbleibendem Materialaustrag möglich. Zur Erstellung von weiteren Horizontalschichten ohne direkten Kontakt zur Bauplattform wurde ein Verfahren entwickelt, dass das Absinken der abgelegten Schichten verhindert. Vor der Herstellung dieser Schichten wird der Additiv-Prozess angehalten und die bereits gedruckte Struktur wird mit reinem Granulat befüllt. Anschließend wird der Additiv-Prozess wieder gestartet und die gefüllten Bereiche werden überdruckt (Abbildung 38).

Durch die prozessspezifische Anpassung des Postprozessors sowie des Maschinenmodells lässt sich eine ganzheitliche Simulation der auf 8 Achsen basierenden Roboterkinematik durchführen. Die Arbeiten in diesem Projekt haben gezeigt, dass die Simulationen der Roboterkinematik sowohl im Additiv- als auch im Subtraktivprozess zwingend erforderlich sind, um roboterspezifische Singularitäten und Kollisionen zwischen den Anlagenkomponenten und den Bauteilstrukturen zu vermeiden.

Abbildung 38: Vorgehen bei der additiven Fertigung horizontaler Zwischenschichten: Druck der konturgebenden Stützstruktur (links), Auffüllen der Zwischenräume und Überdrucken (mitte) und Detailansicht des Überdruckens (rechts)

Nach erfolgreicher Evaluierung der technologischen und prozesstechnischen Potenziale der hybriden Bearbeitungsanlage standen erste Auslegungsrichtlinien und umfangreiches Prozesswissen zur Verfügung, um die Ableitung von Fertigungsstrategien und entsprechenden Steuerprogrammen für die Entwicklung und Umsetzung einer geeigneten Demonstratorstruktur zu ermöglichen. Dabei handelte es sich um eine hochintegrative Hightech-Spannschablone zur frästechnischen Nachbearbeitung von CFK-Bauteilen, deren Entwicklung in einem Brückenprojekt zwischen *CFKComplete* und *SuperTooler* innerhalb des Förderrahmens erfolgte und in Kapitel 0 näher beschrieben wird.

3.7 Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems

3.7.1 Aufbau der FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle

Der Aufbau der gesamten Bearbeitungszelle erforderte im ersten Schritt die Zusammenführung und Verkettung aller hardware- und softwaretechnischen Anlagenkomponenten. Anschließend wurde die zur Steuerung der Gesamtanlage einschließlich der Handlingseinheiten, Werkstoffzuführung und Temperiersysteme erarbeitete Software eingerichtet. Abbildung 39 zeigt den Aufbau der Gesamtanlage. Die Basis der FDM-Fräs-Hybridfertigungszelle bildet ein Industrieroboter KUKA KR 500, welcher auf einer Lineareinheit gelagert ist. Die Lineareinheit dient als 7. Achse und ermöglicht dem Roboter einen Arbeitsraum von ca. 8 m x 2 m x 2 m. Zur besseren Positionierung von Druck- und Fräsobjekten ist ein Schwerlastdrehtisch *Weiss CR1300* als 8. Achse hinzugefügt worden. Die Prozessstrecke zur Materialaufbereitung bestehend aus Extruder, Granulator, Granulatfördereinheit und einer Inline-Materialtrocknung ermöglicht die kontinuierliche Bereitstellung von Druckmaterial aus Recyclat und die Verwendung spezifisch angepasster Materialien. Die Additiv-Konfiguration der Anlage setzt sich aus den Komponenten Dockingstation, LPU und Granulatfördereinheit zusammen. Zusätzlich dazu wird die Subtraktiv-Konfiguration der Anlage durch die statisch am Roboter fixierte Frässpindel, das Werkzeugmagazin und die Frässpanabsaugung definiert. Eine programmierte Prozessroutine ermöglicht die Aufnahme und Ablage der LPU über ein pneumatisches Schnellkupplungssystem und erlaubt somit einen automatisierten Wechsel zwischen den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 39: Gesamtaufbau der hybriden Fertigungsanlage *SuperTooler*

3.7.2 Iterative Parameterabstimmung innerhalb des Additiv-Prozesses

Für die Einrichtung des Additiv-Prozess wird die Additiv-Einheit verdrehsicher mit dem Roboter gekoppelt (Abbildung 40). Die Zuführung der Medien erfolgt durch ein nicht trennbares Kabelbündel, welches über einen mit Balancer kombinierten Galgenarm geführt wird. Die Additiv Einheit setzt sich aus der LPU, einem Zyklongranulatförderer und einer separat temperierbaren Schmelzdüse zur gezielten Temperatursteuerung des Extrudats zusammen.

Abbildung 40: Additiv-Konfiguration der hybriden Fertigungszelle *SuperTooler*

Ein wichtiger Bestandteil des Vorhabens war die Verwendung von Rezyklatwerkstoffen als Druckmaterial für die Formwerkzeuge. Um einen stabilen additiven Fertigungsschritt zu erzielen, wurde die Gesamtanlage unter Verwendung der eingesetzten Rezyklatwerkstoffe eingefahren. So wurde zur Evaluierung geeigneter Druckparameter eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die durch den hohen Materialaustrag induzierte Wärmeenergie zu starkem Bauteilverzug führt. Der Effekt konnte jedoch durch die Erhöhung des Füllstoffgehalts (z.B. CF-Fasern) signifikant reduziert werden. Weiterhin wurde zur Reduzierung fertigungsbedingter Schwindungserscheinungen der abgelegten Thermoplastschmelze ein Heiztisch konzipiert und in die Anlage integriert. Zudem zeigte sich, dass für die Generierung konstanter Druckbahnbreiten eine Anpassung der achsspezifischen Rampenzeitgewichtung in der Robotersteuerung zur Reduzierung steuerungsbedingter Geschwindigkeitsvariationen notwendig war.

Bereits die Berechnung zum transienten Abkühlverhalten der Druckmaterialien ergaben, dass nur in einem engen Prozessfenster die ausgetragene Druckraupe nicht zu schmelzflüssig ist, sodass diese unter ihrem Eigengewicht kollabiert und parallel eine ausreichende Basistemperatur zur Schichtanbindung bietet. Zur Verifizierung des Temperaturfensters wurden die Druckprozesse mittels infrarotbasierender Prozessüberwachung aufgenommen (Abbildung 41). Für ein gutes Ergebnis der Anhaftung der Einzelschichten hat sich eine optimale Zeit beim Abfahren einer Einzelschicht von circa 60 s gezeigt (für PA6/CF30).

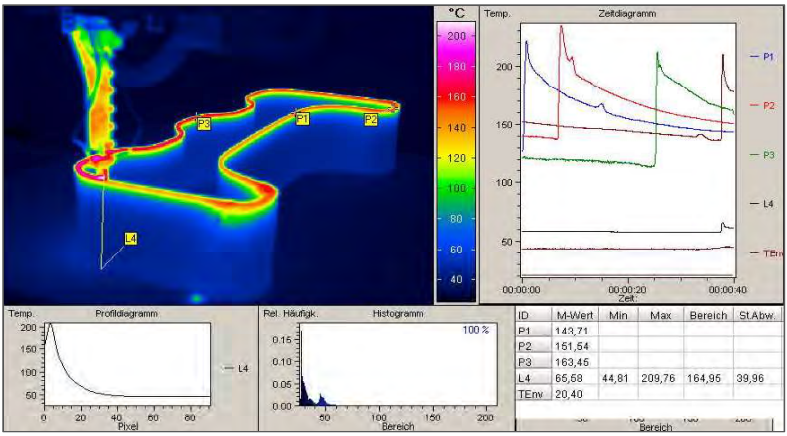


Abbildung 41: Ausschnitt aus der thermographischen Prozessüberwachung bei der additiven Fertigung und Überwachung repräsentativer Roboterbahnpunkte

Die iterative Abstimmung der Prozessparameter hat zudem gezeigt, dass die Druckqualität stark abhängig von der Materialvorbereitung und der Materialart ist. Als signifikanteste Stellgröße erwies sich dabei der Feuchtegehalt des Granulats, wobei auch Umgebungseinflüsse und komplexe Bauteilgeometrien zu starken Schwankungen der Druckqualität führen können. Insbesondere enge Radien und schnelle Richtungswechsel führen häufig zu einer Überextrusion, was bereits in der Konstruktion der Druckbauteile berücksichtigt werden sollte.

Aufbauend auf den ersten Druckversuchen mit den Rezyklatwerkstoffen ABS/CF30 und PA6/CF30 wurden die bestehenden Temperiersysteme angepasst, um deren thermische Effekte auf die Gesamtfertigungszelle auf ein Minimum zu reduzieren. So wurden mithilfe thermischer Simulationen angepasste Düsensysteme konzipiert und entwickelt, die separat vom Extrusionsaggregat beheizt und angesteuert werden können. So wird der thermoplastische Kunststoff im Extrusionsaggregat bis kurz unter Schmelztemperatur erhitzt und erst im abschließenden Düsensystem über Schmelztemperatur erhitzt und ausgetragen. Die thermische Belastung auf den thermoplastischen Kunststoff wird somit auf ein Minimum begrenzt und verringert Degradationserscheinungen des Kunststoffes durch zu lange Standzeiten des Materials bei hohen Temperaturen im Extrusionsaggregat. Zudem konnte so die thermische Entkopplung von den restlichen Analgenkomponenten wie Handhabungseinrichtung und Roboter stark verbessert werden, wodurch die Verwendung zusätzlicher Isoliermaterialien entfiel.

Durch die erarbeiteten Prozessparameter und Anlagenkonfigurationen konnte während der additiven Fertigung eine sehr homogene Oberflächenstruktur erzeugt werden (Abbildung 42), die für die Verwendung als definierte Funktionsfläche jedoch einer subtraktiven Nachbearbeitung bedarf.

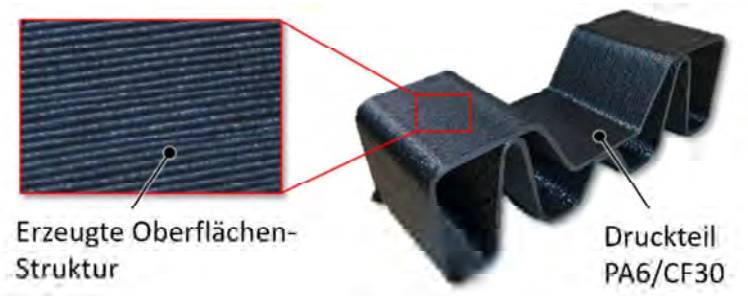


Abbildung 42: Additiver Modellformausschnitt hergestellt mit der hybriden Fertigungszelle

3.7.3 Subtraktive Bearbeitung des Additiv-Rohteils

Der Subtraktivprozess basiert auf der am Roboterflansch fixierten HSD Motorspindel ES789. Durch das zusätzlich installierte Werkzeugmagazin ist es möglich, automatisiert zwischen verschieden Fräsprozessen zu wechseln (Abbildung 43). Somit können mehrere Frässtrategien vom Schruppen bis zum Schlichten vollautomatisch abgearbeitet werden. Das Werkzeugmagazin hat eine Kapazität von 12 Stück Werkzeughalter des Typs HSK 63F. Die Fräsversuche zeigten insbesondere bei den verwendeten faserverstärkten Materialien aufgrund der guten Wärmeableitung eine gute Spanbarkeit ohne Staubentwicklung.

Abbildung 43: Subtraktiv-Konfiguration der hybriden Fertigungszelle *SuperTooler*

Durch die Bereitstellung der acht Achsen innerhalb des entwickelten Bearbeitungssystems ist zudem auch ein Konturschlichten mit Führungswinkel als Kontaktnormale möglich, was sich insbesondere bei der Herstellung von Werkzeugformen mit hohen Oberflächenanforderungen eignet. Die Erzeugung homogener Oberflächenstrukturen war somit auch an mehrfachgekrümmten Oberflächen möglich. Die Verwendung des Schwerlastdrehtisches ermöglichte eine flexible und genaue Positionierung der subtraktiv zu bearbeitenden Struktur, sodass sich der Umspannaufwand auf ein Minimum reduzieren ließ.

Für die Evaluierung geeigneter Fräsparameter wurde eine Parameterstudie durch iterative Anpassung des Vorschubs, der Spindeldrehzahl und des Fräswerkzeugs durchgeführt. Der

Fräsprozess wurde dabei in die Arbeitsgänge „Schruppen“ und „Schlichten“ gegliedert. Im Schruppprozess wird das überschüssige Materialvolumen mit möglichst hoher Drehzahl und Vorschub abgetragen, um die größtmögliche Materialmenge pro Zeiteinheit abzutragen. Dabei wurde das Material nur bis zu einem Offset von 0,5 mm bis 2 mm zur finalen Bauteilgeometrie abgetragen. Für diesen Arbeitsschritt werden Fräswerkzeuge mit großem Durchmesser (>20 mm) eingesetzt. Die generierte Oberfläche weißt nach diesem Bearbeitungsstand eine noch raue und für die Verwendung als Werkzeugform unzureichende Oberflächenbeschaffenheit auf.

Die Feinbearbeitung der Oberfläche wurde daher im Schlichtprozess umgesetzt, wobei das verbliebene Material bis zur finalen Oberflächengeometrie abgetragen wurde (Abbildung 44). Der Schlichtprozess wurde mit deutlich geringeren Vorschubgeschwindigkeiten und daraus resultierenden geringeren Prozesskräften durchgeführt, wodurch kleinere und präzisere Fräswerkzeuge verwendet werden konnten. Durch den Einsatz des mit Kohlenstofffasern gefüllten Materials war die Verwendung von speziell gehärteten HSS-Fräswerkzeugen (Hochleistungsschnellschnittstahl) erforderlich.

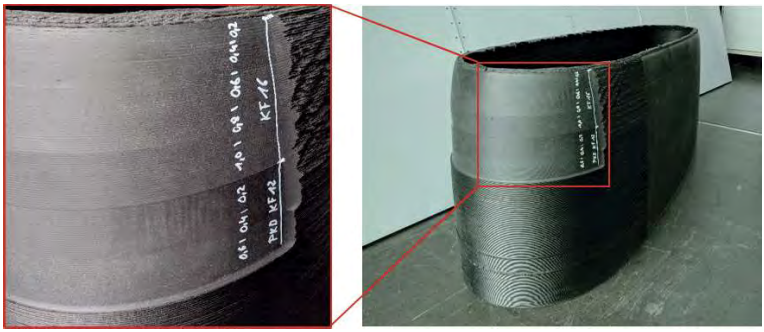


Abbildung 44: Geschlichtetes PA6/CF30 Druckteil (rechts) und dabei getestete Bahnabstände bei Verwendung eines 12 und 16 mm starken Kugelfräserwerkzeugs

Die generierte Oberflächenqualität ist signifikant von der Bauteilstruktur abhängig. Große flächige Strukturen ohne geometrische Versteifung neigen zu starkem Aufschwingen durch die induzierten Fräskräfte, wodurch die erzeugte Oberflächenqualität negativ beeinflusst

wird. Derartige Bauteile müssen für den Fräsprozess durch zusätzliche Spannelemente gestützt werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudien (Abbildung 44) haben gezeigt, dass für den Schlichtvorgang nur ein schmales Prozessfenster besteht (Tabelle 3). Hohe Vorschubgeschwindigkeiten bedingen ein starkes Aufschwingen des Werkstücks, wobei im Gegenzug ein zu geringer Vorschub in Kombination mit hohen Drehzahlen ein Aufschmelzen der Bauteiloberfläche hervorruft. Die gewonnenen Kennwerte sind ebenfalls stark von der Fräswerkzeuggeometrie und der Schneidenzahl abhängig, wobei für die Bearbeitung der verwendeten Rezyklate die idealen Bearbeitungswerkzeuge identifiziert werden konnten.

Tabelle 3: Verwendete Einstellungen für die Parameterstudien bei den subtraktiven Bearbeitungsschritten "Schruppen" und "Fräsen"

	Schruppen	Schlichten
Drehzahl [U/min]	8000	10000
Vorschub [mm/min]	7000	2000
Durchmesser Fräswerkzeug [mm]	10 - 30	2 - 6
Z-Zustellung [mm]	2 - 4	0,5

3.8 *SuperTooler*-Technologiedemonstrator

Zusätzlich zu den ursprünglichen Arbeitsinhalten des *SuperTooler*-Projektes kam es im Rahmen des Themenfeldes „Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient“ zu einer projektübergreifenden Zusammenarbeit der Forschungsvorhaben *CFKComplete* und *SuperTooler*. Dabei wurden mithilfe der hybriden Fertigungszellentechnologie des *SuperTooler* und des Knowhows von *CFKComplete* additiv gefertigte, hochintegrative Hightech-Spannschablonen für CFK-Bauteile entwickelt.

3.8.1 Motivation

Faserkunststoffverbunde finden aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften eine wachsende Verbreitung, jedoch ist die spanende Endbearbeitung dieser heterogenen Werkstoffe mit bestimmten Herausforderungen verbunden [26]. Zur Vermeidung negativer Effekte während der Endbearbeitung, insbesondere beim Besäumen, kommen unterschiedliche Spannsysteme zur Anwendung, die prinzipiell auf Grundlage der Geometrie des Werkstücks [27] und/oder den aus dem Zerspanprozess resultierenden maximalen Zerspankräften [28] ausgelegt und in der Regel als Negativabbild des CFK-Bauteils ausgeführt werden. Diese Spannschablonen werden aus dem Vollen, also aus einem großen Kunststoff- oder Metallblock gefräst, wobei sehr viel Material abgetragen werden muss. Dies geht mit einem hohen zeitlichen und anlagentechnischen Aufwand, hohen Kosten und somit auch einer schlechten Ressourceneffizienz einher. Zudem sind Funktionalitäten wie Vakuumfelder, Fräskanäle, oder Absaugungen durch die Spannschablone äußert aufwendig in der Herstellung, da dies eine komplexe, mehrseitige Bohr- und Fräsbearbeitung erfordert. Des Weiteren sind die massiven Spannschablonen sehr schwer und daher oft nur mit Flurförderfahrzeugen zu transportieren. Zudem ist die damit verbundene Lagerhaltung und Lagerlogistik entsprechend auszulegen, wodurch weitere Kosten entstehen.

Die Entwicklung alternativer Spannsysteme erfordert daher die Überwindung derzeit zur Verfügung stehender Fertigungsverfahren. Dies gelingt durch den kombinierten Einsatz additiver und subtraktiver Verfahren innerhalb einer Hybridfertigungszelle, wie sie im *SuperTooler*-Projekt entwickelt wurde.

Vor diesem Hintergrund wurde das vorhandene Know-How der Projektpartner IPA und ILK aus ihren spezifischen Forschungsvorhaben gebündelt und für die Entwicklung hochintegrativer Hightech-Spannschablonen als projektübergreifenden Technologiedemonstrator gezielt zusammengeführt.

3.8.2 Herstellung anforderungsgerechter Funktionsträger

Auf Basis bestehender Spannsysteme wurden zunächst die wesentlichsten Anforderungen (Tabelle 4) zusammengetragen und in einem Lastenheft zusammengefasst.

Tabelle 4: Bewertung verschiedener Spannsysteme hinsichtlich der Hauptanforderungen

	Spannsystem		
Funktionsanforderung	**Negativ-Spannsystem**	**Vakuum-Spannsystem**	**Form-spannsystem**
prozesssicheres Einlegen (Lage, Nullpunkt)	hohe Positionstreue beim Einlegen durch vollflächige Auflage	geringere Positionstreue durch weniger Auflagepunkte	mittlere Positionstreue durch viele Auflagepunkte
Fixieren des Bauteils	hohe Spannkräfte durch große unterdruckbeaufschlagte Spannflächen; schwingungsarmes Spannen durch vollflächige Bauteilauflage	niedrigere Spannkräfte durch kleinere unterdruckbeaufschlagte Spannflächen; höhere Schwingungsneigung durch weniger Abstützflächen	mittlere Spannkräfte durch Formbacken und Abstützen; mittlere Schwingungsneigung durch größere Abstützflächen aber fehlende Vakuumspannung
Integration von Zusatzfunktionen	Funktionsintegrationen möglich, aufwendig in der Herstellung	ohne integrierte Funktionen	ohne integrierte Funktionen

niedrige Herstellkosten und kurze Herstellzeiten	hoher zeitlicher und anlagentechnischer Aufwand; schlechte Ressourceneffizienz	zeit- und kostensparend, wiederverwendbar	zeit- und kostensparend, wiederverwendbar
niedrige Rüstzeiten	kurze Rüstzeiten	lange Rüstzeiten bei der ersten Einstellung	mittlere Rüstzeiten bei der ersten Einstellung
hohe Flexibilität	geringe Flexibilität aufgrund bauteilspezifischer Form	hohe Flexibilität aufgrund einfacher Anpassbarkeit	mittlere Bauteilflexibilität aufgrund begrenzter Anpassbarkeit

Zur Überprüfung der prozessbezogenen Machbarkeit wurden anschließend einfache Funktionsträger für die additiven Fertigungsuntersuchungen konzeptioniert und ausgelegt. Neben dem material- und strukturbedingten Schwindungsverhalten wurden unterschiedliche Aufbau- und Druckstrategien sowie Schichtdicken im Hinblick auf die für den Anwendungsfall der Spannmittel relevanten Eigenschaften Dichtigkeit, Steifigkeit und dynamisches Verhalten ermittelt. Zudem konnten mögliche Varianten zur Herstellung von Vakuumfeldern und Kanälen zur Absaugung von Spanmaterial (Abbildung 45) mit verschiedenen Druckmaterialien getestet werden.

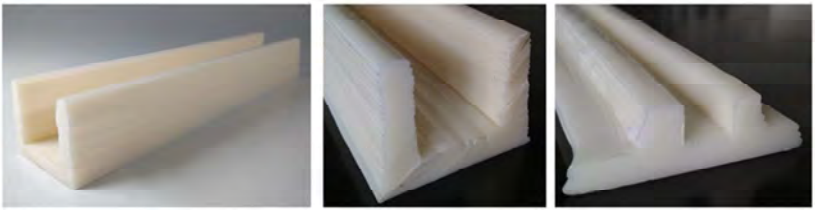


Abbildung 45: Additiv gefertigter ABS-Absaugkanal für die Untersuchung des Spanabtransports bei der frästechnischen Bearbeitung von FKV-Bauteilen (links) mit unbefräster (mitte) und befräster Oberfläche (rechts)

Dichtigkeit

Bei Vakuum-Spannschablonen sorgt der Unterdruck in einem evakuierten Volumen für die notwendigen Haltekräfte, um die Werkstücke bei der Bearbeitung sicher zu spannen. Um Fertigungsungenauigkeiten aufgrund der angreifenden Prozesskräfte zu vermeiden, muss der Unterdruck während der Bearbeitung konstant gehalten werden. Hierzu stellt die Dichtigkeit der Spannschablone eine entscheidende Voraussetzung dar [29].

Die Bewertung der Dichtigkeit der additiv gefertigten Funktionsträger wurde anhand eines Prüfstandes durchgeführt, der Platten im Format 150 mm x 150 mm in zwei unterschiedlichen Stärken zu 4 mm und 8 mm aufnehmen konnte und an den Vakuumtisch der Versuchsanlage HOMAG BMG611 des IPA angeschlossen war. Der Prüfstand wies eine rechteckige Kavität auf, in der der Unterdruck aufgebaut wurde. Die untersuchten Platten wurden hinsichtlich der beiden Werkstoffe mit jeweils drei unterschiedlichen Aufbaustrategien gefertigt. Dabei wurden Ablagerichtungen der Thermoplastschmelze in uni- (0°), bi- (0°/90°) und multidirektionaler (0°/45°/90°) Ausrichtung hergestellt und untersucht. Als Messgröße wurde die mittels des digitalen Druckmessgerätes TESTO 549I (Hersteller Testo SE & Co. KGaA) erfasste Druckdifferenz in Abhängigkeit der Zeit nach Abschalten der Vakuumpumpe als Maß für die Undichtigkeit bzw. Leckage herangezogen. Der angelegte Unterdruck betrug zu Messbeginn jeweils 0,81 bar. Die Auswertung der variierten Parameter (Abbildung 46) zeigt, dass nur die Größe der Platte und somit der Ansaugfläche einen maßgeblichen Effekt auf den Unterdruckabfall ausübt.

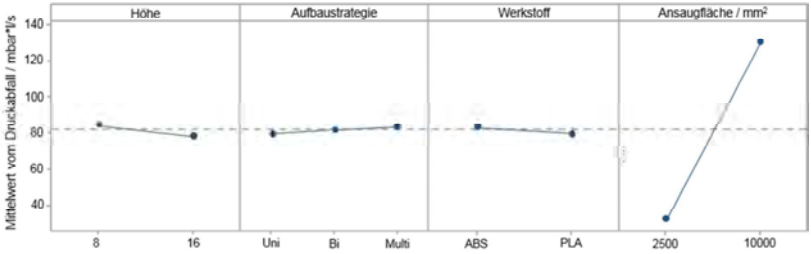


Abbildung 46: Experimentelle Untersuchung der Dichtigkeit beispielhaft für ABS und PLA (Fraunhofer IPA)

Hier ist die Leckage erwartungsgemäß annähernd proportional zur unterdruckbeaufschlagten Fläche. Für die Anwendung als Spannmittel konnten somit alle verwendeten Werkstoffe und deren Aufbau unter dem Aspekt der Dichtigkeit als geeignet eingestuft werden.

Steifigkeit

Die Zerspankräfte, die bei der Interaktion zwischen Werkstück und Werkzeug entstehen, werden über die Spannvorrichtung an das Maschinenbett weitergeleitet. Fertigungstoleranz und Oberflächengüte der Werkstücke sind folglich direkt von der Steifigkeit der Bauteile im Kraftfluss abhängig [30].

Vor diesem Hintergrund wurde die Steifigkeit der gedruckten Funktionsträger ebenfalls im oben genannten Prüfaufbau untersucht und bewertet. Hierzu wurde der Aufbau um eine Feinmessuhr zur Messung der Durchbiegung in der Plattenmitte bei Beaufschlagung mit Unterdruck erweitert. Um Nachgiebigkeitseffekte der eingelegten Dichtschnur zu minimieren, wurden die Platten an den Stützstellen zusätzlich mit Kniespannhebeln vorgespannt, sodass die Verschiebung der Platten ausschließlich auf Durchbiegung durch den Unterdruck zurückgeführt werden konnte. Die beispielhaften Resultate der Untersuchung für ABS und PLA (Abbildung 47) ergeben hinsichtlich einer möglichst geringen Durchbiegung eine Präferenz für die multiaxiale Aufbauweise sowie den Werkstoff PLA.

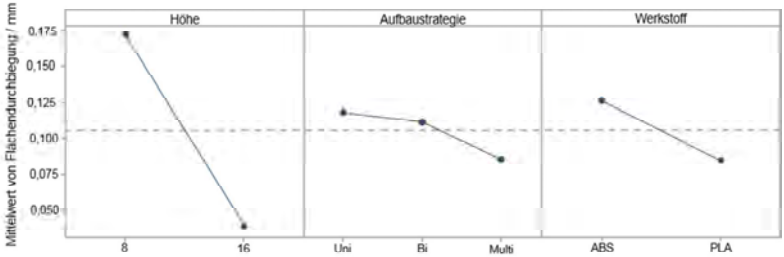


Abbildung 47: Experimentelle Untersuchung der Steifigkeit beispielhaft für ABS und PLA (Fraunhofer IPA)

Als Grund kann hier das höhere E-Modul von PLA gegenüber ABS genannt werden, was für alle untersuchten Materialien in 3-Punkt-Biegeversuchen ermittelt wurde. So wird die Durchbiegung zudem durch die Plattendicke über das steigende Flächenträgheitsmoment positiv beeinflusst. Um in eher höher belasteten Abschnitten einer Spannschablone eventuell auftretende Verformungen zu vermeiden, sollte die Bauweise entsprechend angepasst werden.

Dynamisches Verhalten

Bei der Bearbeitung von Werkstücken führen prozessbedingte Schwingungen neben einer schlechteren Oberflächenqualität zu höherem Werkzeugverschleiß sowie geringeren Fertigungsgenauigkeiten [31]. Um den Fräsprozess stabil und wirtschaftlich zu gestalten, ist eine schwingungsdämpfende Wirkung des Spannmittels auf den Prozess anzustreben.

In einem Versuchsaufbau wurde der Einfluss additiv gefertigter Spannmittel auf das dynamische Verhalten der Werkstücke untersucht. Dazu wurden als Versuchsträger quaderförmige Strukturen additiv gefertigt (siehe auch Abbildung 38), die im Inneren Hohlstrukturen aufwiesen, die optional mit Kunststoffgranulat als Dämpfungspartikel (DP) befüllt wurden. Auf der Decklage dieser Träger wurde eine Vakuumkammer additiv aufgebaut, die über eine Durchgangsbohrung das Spannen unidirektionaler CFK-Platten ermöglichte (Abbildung 48, rechts).

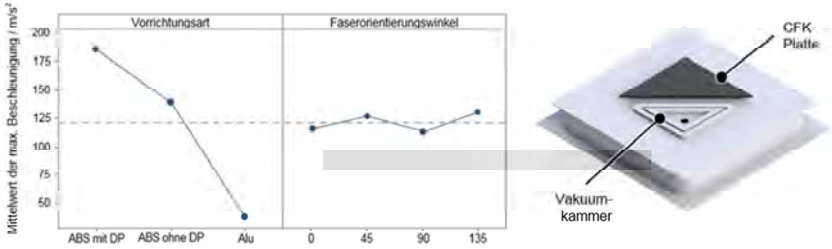


Abbildung 48: Experimentelle Untersuchung beispielhaft für ABS zum dynamischen Verhalten (links) und Darstellung des Versuchsträgers (rechts) (Fraunhofer IPA)

In anschließenden Zerspanversuchen wurden CFK-Platten auf den Versuchsträgern gespannt und die Kontur umlaufend gefräst. Als Referenz diente eine massive Vorrichtung aus Aluminium. Die Erfassung der durch die Prozesskräfte ausgelösten Schwingungen erfolgte über den wechselweise auf der Oberseite der Funktionsträger und der Werkstücke angebrachten Beschleunigungssensor, wobei der Mittelwert der maximalen Beschleunigung als Maß für das Schwingungsverhalten diente.

Die beispielhaften Ergebnisse für ABS (Bild 3, links) zeigten die höchsten mittleren Beschleunigungen für den additiv gefertigten Versuchsträger mit Dämpfungspartikeln, während der Referenzträger aus Aluminium die niedrigsten Beschleunigungswerte aufwies. Das als reines Schüttgut in die Hohlräume eingebrachte Granulat hat keine dämpfende Wirkung gezeigt. Die Ergebnisse verdeutlichen zudem den Zusammenhang von Zerspankräften und anisotropem Verhalten des CFK. Dementsprechend werden die dynamischen Einflüsse auf das Werkstück von der Größe des Fasertrennwinkels beeinflusst, was bei der Auslegung additiv gefertigter Spannmittel gezielt berücksichtigt werden kann.

3.8.3 Additive Spannschablone für FKV-Bauteile

Auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse wurde in weiteren Arbeiten eine Spannschablone für ein komplexes 3D-Bauteil unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Aspekte der additiven Fertigung abgeleitet und hergestellt (Abbildung 49). Bei der Auslegung galt es, prozessrelevante Funktionalitäten wie Aussparungen zum Anlegen des Unterdrucks, eine umlaufende Nut zur Aufnahme der Dichtschnur und ein Offset als Materialzugabe für die abschließende spanende Bearbeitung der Auflagefläche des späteren Bauteils zu berücksichtigen. Durch die Vermeidung von Stützstrukturen und Materialanhäufungen konnten eine deutliche Reduktion des Materialeinsatzes und somit auch der Fertigungszeiten erreicht werden. Zudem ließ sich durch optimierte Druckbahnparameter der thermisch induzierte Verzug stark reduzieren.

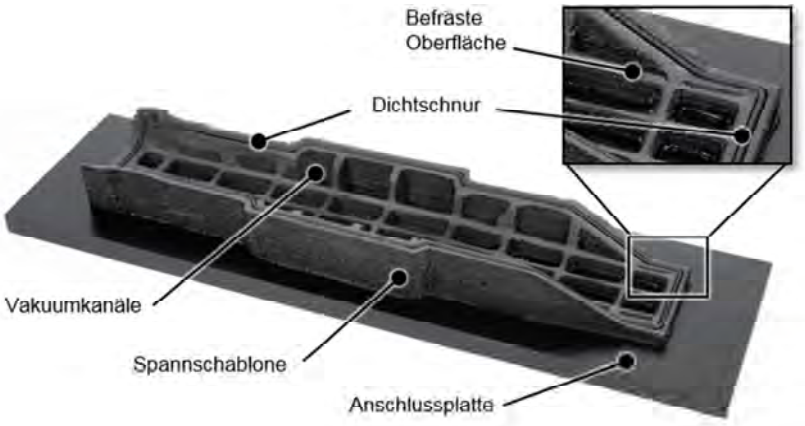


Abbildung 49: Hochintegrative PA6/CF30-Spannschablone nach additiver Fertigung

Schon jetzt lässt sich das Potenzial von additiv gefertigten Spannmitteln für die spanende Endbearbeitung von FKV-Bauteilen verdeutlichen. Weitere Untersuchungen zur generellen Prozesstauglichkeit additiv gefertigter Spannmittel für großflächige CFK-Bauteile, insbesondere mit Blick auf die besonderen Anforderungen schneller Taktzeiten im Automobilbereich, sind Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsarbeiten.

4 VERWERTUNGSPLAN

4.1 Wirtschaftliche Verwertungsperspektive

Im *SuperTooler*-Verbundprojekt konnte demonstriert werden, welches enorme Potential die Kombination der additiven und subtraktiven Verarbeitung in einer Hybridfertigungszelle besitzt. Insbesondere der Werkzeugformenbau kann von dieser Kombination entscheidend profitieren und die variablen Kosten und Herstellungszeiten signifikant reduzieren. So konnten Druckstrategien entwickelt werden, mit denen die Herstellung modularer Werkzeuge für Faserverbundbauteile möglich ist, welche direkt als Endbearbeitungsschablone weiterverwendet können. Ein zusätzliches Umspannen des Faserverbundbauteils ist somit nicht mehr nötig und erlaubt u.a. erhebliches Einsparpotential hinsichtlich auftretender Bearbeitungszeiten. Die zahlreich durchgeführten Werkstoffprüfungen haben zudem zu einer deutlichen Vertiefung des Werkstoff- und somit auch des Prozessverständnisses bei der großvolumigen additiven Fertigung geführt.

Darüber hinaus bietet sich die Anwendung derartiger Hybridfertigungszellen nicht nur im Formenbau an. Insbesondere im Bereich der Elektromobilität birgt die additive Fertigung, etwa im Bereich der Reparatur, enormes Potential, wie in der *FOREL*-Studie[3] hervorgehoben. Dabei ist die beim *SuperTooler*-Vorhaben großvolumige additive Fertigung als ein zukünftiger Einsatzbereich hervorzuheben.

Die im Verbundprojekt durchgeführte Umsetzung des hybriden Fertigungsprozesses in einem Roboter-Bearbeitungszentrum stellt für RM einen klaren Wettbewerbsvorteil dar, da sich diese Systeme durch hohe Austragsleistung und Ressourceneffizienz erstmals für industrielle Fertigungsprozessketten eignen. Basierend auf der Demonstratoranlage kann somit eine neue Produktreihe um hybride robotergeführte Fertigungsanlagen etabliert werden.

---

[3] *FOREL*-Studie – Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität

Es ist zu erwarten, dass neben dem hardwareseitigen Know-How auch Entwicklungsleistungen für kombiniert additiv/subtraktive Systeme angeboten werden können und die Erweiterung des Geschäftsfelds in andere Branchen ermöglicht, in denen eine hybride Fertigung Potenziale birgt.

Basierend auf den im Verbundvorhaben erarbeiteten Ergebnissen besteht für Collin die Möglichkeit, das erworbene Know-How hinsichtlich der großvolumigen additiven Fertigung und den dabei fokussierten Eigenschaften der LPU (u.a. hohe Austragsleistung, kompakte Bauform) in eine breite Anwendung sowohl als stationäre, mobile oder geführte Komponente zu überführen, was teilweise bereits aktiv umgesetzt wird. Zudem ist zu erwarten, dass die bei der Verarbeitung von Rezyklaten gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich der Anlagenkomponenten und der Prozesstechnologie in neue Produktreihen bzw. Entwicklungsdienstleistungen wirtschaftlich verwertet werden können.

Durch die im Rahmen des Vorhabens umgesetzte hybride Fertigungsanlage besteht für die LSK die Möglichkeit, neue Werkzeugsysteme mit hoher Flexibilität und Effizienz herzustellen und als neue Produktreihe anzubieten. Ein enormer Wettbewerbsvorteil besteht dabei vor allem in den geringen Kosten der Werkzeuge, resultierend aus der effizienten Herstellung komplexer Bauteilstrukturen mittels Rezyklaten sowie auf dem Verzicht bisher üblicher, kostenintensiver Master-Modelle.

Darüber hinaus ergeben sich auch für das ILK entsprechende Erfolgsaussichten, die teilweise bereits aktiv umgesetzt werden, so etwa bei der Initiierung neuer bilateraler Projekte auf Basis der Erkenntnisse zur großvolumigen additiven/subtraktiven Fertigung oder bei der Akquise neuer Projektpartner.

4.2 Wissenschaftlich technologische Verwertungsperspektive

Im *SuperTooler*-Konsortium können durch das vorhandene prozess- und funktionsbezogene Wissen entsprechende Synergien bestmöglich ausgenutzt und damit die Möglichkeit einer Überführung der F&E-Ergebnisse in die Hochleistungsanwendung maximiert werden. Der erreichte Entwicklungsstand bezüglich der Robotersteuerung für kombiniert additive/subtraktive Fertigungsverfahren lässt erwarten, dass durch die Zusammenarbeit über

das Vorhaben hinaus eine Verbesserung und Beschleunigung bei der Prozess- und somit Produktentwicklung hybrider Leichtbaustrukturen erreicht wird. Das hier erarbeitete Know-How kann für die zukünftige Entwicklung hybrider Bearbeitungszentren basierend auf bewegungsgeführten Maschinensystemen, bspw. Industrieroboter und Portalanlagen, überführt und von RM angewendet werden. Mit den erweiterten Softwarekomponenten im Robot-Plugin der *PowerMill*-Software sowie den erarbeiteten Steuerungsalgorithmen können neue Anwendungsfelder auch für kollaborative Robotersysteme erschlossen werden, was insbesondere bei der laborgerechten Generierung neuer Forschungsergebnisse zum Einsatz kommen soll und aktuell bereits am ILK umgesetzt wird. So konnten die erarbeiteten Steuerungsalgorithmen bereits in einen kollaborativen Roboterversuchsstand implementiert werden, der die Herstellung von sowohl unverstärkten als auch endlosfaserverstärkten Strukturen ermöglicht und aktuell zur Vorbereitung einer Projektskizze intensiv genutzt wird. Mit Fokus auf die großvolumige additive Fertigung bieten die erarbeiteten Ergebnisse für Collin eine ideale Basis hinsichtlich der Entwicklung zukünftiger Extrusionsanlagen mit weitaus höheren Austragsleistungen.

Nach dem erfolgreichen Projektabschluss wurden bislang die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen erster Herstellungsversuche von flächigen Bauteilen auf der Hybrid-Bearbeitungsanlage bei der LSK vorgenommen. Der LSK steht somit ein neues Anlagenkonzept zur Verfügung, das in bestehende Fertigungsprozessketten des Unternehmens integriert und bereits bei der Bauteilkonzeptionierung als möglicher Herstellungsprozess berücksichtigt wurde. Darauf aufbauend werden die erarbeiteten Ergebnisse als auch die innovative *SuperTooler*-Technologie als Basis einer effizienteren und flexibleren Fertigungsstrategie für Leichtbauanwendungen der Zukunft regelmäßig auf internationalen Messen und in nationalen Netzwerken sowie auf Tagungen und in Zeitschriften veröffentlicht. Denn der hohe Innovationsdruck, dem die deutschen Unternehmen auf dem Weltmarkt ausgesetzt sind, verlangt die Entwicklung hochinnovativer Produkte und effizienter, kombinierte Fertigungsprozesse. Ein wichtiger Schritt in dieser Richtung ist die Bereitstellung einer praxistauglichen, flexiblen und kostengünstigen Technologie für die Fertigung von großformatigen Kunststoffbauteilen, wie sie durch die *SuperTooler*-Technologie bereits erfolgreich umgesetzt werden konnte.

Hinsichtlich der universitären Verwertung werden die vielseitigen wissenschaftlichen Erkenntnisse genutzt, um die Ausbildung der Fachkräfte des universitären Lehrbetriebes voranzutreiben. Die Ergebnisse der prozesstechnischen und materialspezifischen Entwicklungsarbeiten fließen dabei direkt in die aktuellen Lehrinhalte zur additiven Fertigung ein. Zur Unterstützung der Projektbearbeitung wurden zudem zahlreiche Projekt- und Abschlussarbeiten am ILK betreut.

Im Bereich der Grundlagenforschung konnten bereits erste Transfer-Aktivitäten gestartet werden. So wurden im AiF-Projekt „Entwicklung einer sequentiellen Simulationsmethodik zur Analyse und Optimierung der Gestaltung additiver Bauteile unter Berücksichtigung prozess- und strukturbedingter Anisotropien im Strangablegeverfahren“ die im *SuperTooler*-Projekt erarbeiteten Prozessmodellierungen aufgegriffen und für den Einsatz in etablierten Softwareumgebungen für die Anwendung beim KMU angepasst.

4.3 Bekanntgewordener Fortschritt an anderen Stellen

Die Forschung und Entwicklung auf den Gebieten des Leichtbaus und der additiven Fertigung besitzen in ganz Deutschland bzw. weltweit eine hohe Dynamik. So werden zum Beispiel sowohl von der Automobil- als auch der Luftfahrtbranche regelmäßig neue Nachrichten zu Neuentwicklungen von Materialien, Prozessen und Bauteilen veröffentlicht. Im Bereich der technologischen Entwicklung vollintegrierter roboterbasierter FDM/Fräs-Hybridfertigungszellen wird jedoch kaum Aktivität verzeichnet. Im Fokus der sehr überschaubaren Aktivitäten steht dabei insbesondere die Befähigung von Portalanlagen zur additiven Fertigung von großvolumigen Bauteilen. Durch die Kombination mit subtraktiven Fertigungsverfahren zeigen sich auch dort vielversprechende Ansätze für künftige Anwendungen. Jedoch gestalten sich derartige Produktionsanlagen als sehr raum- und kostenintensiv, sowohl bei der Anschaffung als auch im Betrieb und sind daher für die Fertigung höherer Stückzahlszenarien ausgelegt. Der dahingehend deutlich abweichende Fokus des *SuperTooler*-Projekts zur Herstellung individueller Werkzeugformen für den Prototypen- und Modellbau lässt die erarbeiteten Entwicklungen daher aktuell noch immer als ein unikalen Alleinstellungsmerkmal erscheinen.

5 ZUSAMMENARBEIT UND AUSSENDARSTELLUNG

5.1 *FOREL*-Koordinationsprojekt: Zusammenarbeit und Unterstützung

Die Plattform *FOREL* als interdisziplinäre wissenschaftliche Forschungs-, Demonstrations- und Kommunikationsplattform auf nationaler Ebene am Standort Dresden bietet einen hervorragenden Rahmen für den projektübergreifenden wissenschaftlichen Austausch. Dieser wurde innerhalb des Konsortiums insbesondere in Form der *FOREL*-Kolloquien und -Akademien genutzt, welche sehr gute Gelegenheiten für fachliche Diskussionen, die Präsentation von Projektergebnissen und das Knüpfen neuer Kontakte boten. Intensiven Austausch gab es dabei in Bezug auf Recyclingstrategien für kurzfaserverstärkte Polyamid-6-Strukturen zu *ReLei* hinsichtlich der Durchführung von Untersuchungen zur Zerkleinerung und Wiederaufbereitung von PA6/CF30-Rezyklat.

Das Koordinationsprojekt unterstützte die Projektpartner vor allem in der Öffentlichkeitsarbeit und der Pflege der Internetseite, aber auch durch die Bereitstellung eines Austauschlaufwerkes und eines digitalen Raumes für die regelmäßigen Telefonkonferenzen.

Darüber hinaus profitierte das *ReLei*-Konsortium von den Erfahrungen in *FOREL* bezüglich Prozessanalyse und -visualisierung etwa mittels der Software *Detact*. Schlussendlich wurde im Rahmen des *FOREL*-Kolloquiums die Abschlusspräsentation gehalten und einem breiten Publikum präsentiert.

5.2 Außendarstellung

Datum	Partner	Titel	Wo	Was
07.10.2015	ILK	*SuperTooler* – Integrierte FDM/Fräs-Fertigungszelle zur effizienten Herstellung großformatiger Formwerkzeuge für die Composite-Verarbeitung	*FOREL*-Kolloquium 07.10.2015	Vortrag
26./27.01. 2016	LSK	MultiForm Werkzeugsystemplattform für Faserverbund-Mischbauweisen	Dresden	Vortrag/ Workshop
15.02. 2016	LSK	CCeV-Thementag "Ertüchtigung von Werkzeugmaschinen für die CFK Bearbeitung"	Fulda	Vortrag
24.04.2016	ILK, LSK	SKZ-Forum „Additive Serienfertigung“	Würzburg	Vortrag
27.10.2017	LSK	Qualität bei der Additiven Fertigung sicherstellen	Maschinenmarkt	Beitrag zu Zeitschriftenartikel
30.08.2018	ILK, LSK	*FOREL*-Kolloquium	Dresden	Poster
26.09.2018	ILK, LSK	Messe “Experience Additive Manufacturing”	Augsburg	Vortrag
25.10.2018	ILK, LSK	Travelling Conference	KC-Tech, Korea	Konferenzvortrag
29.11.2018	ILK, LSK	Entwicklung funktionsintegrierter 3D-gedruckter Spannmittel für dünnwandige CFK-Bauteile	8. IfW-Tagung Bearbeitung von Verbundwerkstoffen, Stuttgart	Vortrag
05.02.2019	LSK	„*SuperTooler* – Integrierte FDM/Fräs-Hybridfertigungszelle zur effizienten Herstellung großformatiger Formwerkzeuge für die Composite-Verarbeitung“	Messe Intec Sonderschau Additiv + Hybrid, Leipzig	Vortrag
27.06.2019	ILK, LSK	Projektschau ILK	Dresden	Poster, Video
21.08.2019	ILK, LSK	*FOREL*-Kolloquium	Dresden	Vortrag, Poster

6 QUELLEN

[1] M. Zichner: Formenbautechnologien für Prototypen und Kleinserien, CCeV-AG Werkzeug- und Formenbau – Forum „Werkzeug- und Formenbau für Faserverbundanwendungen“, EUROMOLD 2013

[2] A. Gebhardt: Generative Fertigungsverfahren, Hanser Fachbuch, 4. Auflage, 2013

[3] P. Fastermann: 3D-Drucken, Springer-Verlag, 2014

[4] R. Hornfeck: Rapid Shaping Prozess zur Herstellung von CFK-Bauteilen, Abschlussbericht, Sonderdruck Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg Nr.52

[5] Koreis, Rocke Robert: Three Dimensional Printing of Parts. United States Patent Application 20150064299 (2015).

[6] P. Trechow: Druck auf die Ersatzteillogistik, vdi-nachrichten, Nr. 38, 2014

[7] J. Gausemeier, M. Wall, S. Peter: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Exploring the Research Landscape, Universität Paderborn, Direct Manufacturing Research Centre, 2013

[8] Stratasys, Inc.: Produktdatenblatt Fortrus 900mcTM, Internet: http://www.stratasys.com/3dprinters/production-series/fortus-900mc, Abrufdatum: 05/2015

[9] P. Novikov, S. Jokic: Mataerial-Projekt, Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Internet: www.mataerial.com, Abrufdatum: 05/2015

[10] Fraunhofer IFF: Robotersystem zur generativen Fertigung grosser Bauteile; Produktblatt; 2012.

[11] DMG Mori USA: Gute Kombi – Laser und Fräser, FORM + Werkzeug 6/ 2013, pp 42 43, Carl Hanser Verlag, München

[12] C. Brecher, T. Breitbach, F. Hoffmann, A. Karlberger, D. Do-Khac, C.-J. Rosen: Hybrides Bearbeitungszentrum für den Werkzeug- und Formenbau, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98 (2008) H. 11/12, pp 893-898

[13] C. Brecher: Integrative Produktionstechnik für Hochlohntechnik, Springer Verlag, 1. Auflage, 2011

[14] A. Limper: Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion, Carl Hanser Verlag, 1. Auflage, 2012

[15] O. Kast, C. Bonten: Untersuchung eines schnelllaufenden Einschneckenextruders mit wendelgenuteter Plastifizierzone, Zeitschrift Kunststofftechnik, Wissenschaftlicher Arbeitskreis der Universitäts-Professoren der Kunststofftechnik, Februar 2015

[16] International Federation of Robotics: Globale Studie: Industrie-Roboter mit neuem Weltrekord, Pressemitteilung 03/2015, http://www.worldrobotics.org, Abrufdatum: 03/2015

[17] Fraunhofer IFF: Robotersystem zur generativen Fertigung grosser Bauteile; Produktblatt; 201218

[18] Abele, E.; Weigold, M.; Kulok, M.: Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Nr. 9, S. 666–671. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

[19] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen – Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Heidelberg: Springer-Verlag 2005

[20] Delcam GmbH: PowerMill Robot, Produktbroschüre, http://www.powermill.com/de/, Abrufdatum: 05/2015

[21] Puzik, A.: Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik, Stuttgart Universität, Diss., 2011

[22] Denkena, B.; Immel, J.; Schönherr, M.: Industrieroboter für spanende Bearbeitungen. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) Nr. 9, S. 617–622. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

[23] Kostka, P.; Höhne, R.; Holeczek, K.; Krahl, M.; Hufenbach, W.: Multidisziplinäre Entwicklung eines robotergeführten Schwingungskompensators, VDI-Konstruktion, Erscheinungsdatum 07/2015

[24] KSS 8.3 Konfiguration von Kinematiken V2.3; KUKA Roboter AG, 2014

[25] CS Workshop KUKA.CNC V2.; KUKA Roboter AG, 2017

[26] Moser, S.; Gauggel, C.: Die 10 wichtigsten Fakten zur CFK-Zerspanung. In: Produktion 14 (2017).

[27] Lin, Z.; Yabg, C.: An Expert System for Fixturing Design for Face Milling Using Modular Fixture. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 10 (1995), S. 379 – 388

[28] Mahmud, A.; Mayer, J.; Baron, L.: Determining the minimum clamping force by cutting force simulation in aerospace fuselage pocket machining. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 80 (2015), S. 1751 – 1758

[29] Ackermann, A.: Vorteile aus zwei Welten (2016). Internet: https://www.werkzeugformenbau.de/engineering-dienstleistung/prototypenbau/vorteile-aus-zwei-welten-157.html, Zugriff am 07.02.2019

[30] Perovic, B.: Bauarten spanender Werkzeugmaschinen. Steifigkeiten, Steuerungen und Bauformen. Renningen: expert-Verlag 2002

[31] Industrieanzeiger: Spannsystem gleicht Schwingungen aus. 2016, Internet: https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/spannsystem-gleicht-schwingungen-aus/, Zugriff am 06.02.2019

VERWENDETE KURZZEICHEN

Collin	COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH
ILK	Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden
LSK	Leichtbau- Systemtechnologien Korropol GmbH
RM	Robot Maching GmbH

www.plattform-FOREL.de

Kurzbeschreibung

Das Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität – **FOREL** wurde 2013 auf Initiative der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) als BMBF-Leuchtturmprojekt eingerichtet und ist eine offene und unabhängige Plattform zur Entwicklung von Hightech-Leichtbausystemlösungen in Multi-Material-Design für die Mobilität der Zukunft.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen von SUPERTOOLER eine vollintegrierte Additiv-/Subtraktiv-Hybridfertigungszelle entwickelt und prototypisch umgesetzt. Diese neuartige Fertigungszelle ermöglicht es erstmals, großformatige Formwerkzeuge für die Composite-Verarbeitung mit nur einem Robotersystem effizient und kostengünstig herzustellen. Das Forschungsprojekt legt damit die Grundlage für eine neue Klasse von Fertigungszellen bzw. Fertigungsanlagen, die eine additive und substraktive Fertigung für mittlere und große Strukturen direkt verknüpft.

Kontakt

Plattform FOREL:
Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden
Holbeinstr. 3
01307 Dresden
forel@plattform-forel.de

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

BETREUT VOM
PTKA Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie