Abschlussbericht

Teilvorhaben:

Entwicklung einer Anlagentechnologie zur kombinierten additiven und subtraktiven Fertigung von Flugzeugkomponenten aus rezyklierten Hochleistungsthermoplasten

Förderkennzeichen:

20W2103K

im Verbundvorhaben:

TIRIKA

Technologi**e**n und **R**eparaturverfahren für nachhaltige Luftfahrt **i**n **K**reisl**a**ufwirtschaft

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.03.2025

Förderantrag im Rahmen der Luftfahrtforschung und -technologie LuFo VI-2
Programmlinie: C) Basistechnologien
Fachbereich: (4) Strukturen und Bauweisen
Förderziel: Ziel 1: umweltfreundliche Luftfahrt

Zuwendungsempfänger:

Hans Weber Maschinenfabrik GmbH
Bamberger Str. 20
96317 Kronach

HANSWEBER Maschinenfabrik

1. Projektziele nach Antrag

AP 3.1 - Nachhaltige additive Fertigung

AP 3.1.3 - Entwicklung Direktextrusionsprozess und Oberflächenbearbeitung

Automatischer Werkzeugwechsel

Ein wesentlicher Meilenstein des Projekts war die Entwicklung und erfolgreiche Umsetzung eines automatischen Werkzeugwechselsystems, das einen nahtlosen Wechsel zwischen verschiedenen Endeffektoren ohne manuelles Eingreifen ermöglicht. Dieses System wurde speziell für die Anforderungen der Technikumsanlagen konzipiert, implementiert und erfolgreich getestet, sodass seine Funktionalität in der Praxis nachgewiesen werden konnte.
Der automatische Werkzeugwechsel wurde so entwickelt, dass der Wechselbefehl direkt im Programmcode hinterlegt und automatisiert ausgeführt werden kann. Dadurch wird der Endeffektorwechsel vollständig in den Fertigungsprozess integriert, ohne dass eine manuelle Intervention erforderlich ist. Diese Automatisierung steigert die Effizienz erheblich und ermöglicht eine durchgehende Produktion ohne Unterbrechungen oder zusätzliche Rüstzeiten.
Ein wesentlicher Aspekt der Umsetzung war die Entscheidung, alle benötigten Medien, wie Strom, Kühlmittel oder Druckluft, nicht beim Werkzeugwechsel zu trennen, sondern diese über ein fest installiertes Schlauchpaket zu führen. Dieses Schlauchpaket verläuft über die Zellendecke und stellt sicher, dass sowohl der Extruder als auch der Fräser jederzeit angeschlossen bleiben. Diese Lösung hat sich als äußerst vorteilhaft erwiesen, da sie mögliche Fehlerquellen durch das Trennen und Wiederverbinden der Medien eliminiert und gleichzeitig eine hohe Prozessstabilität gewährleistet.
Aufgrund der erfolgreichen Implementierung und der überzeugenden Ergebnisse wurde das System bereits kommerziell vertrieben und konnte in realen industriellen Anwendungen überzeugen. Durch die Automatisierung des Werkzeugwechselsystems wird die Flexibilität der Produktionsanlage erheblich gesteigert und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Fertigungsprozesses optimiert.

Steuerung des Extruders auf Parkposition

Die Ansteuerung des Extruders auf einer definierte Parkposition wurde erfolgreich umgesetzt und stellt einen wichtigen Fortschritt in der Automatisierung und Prozesskontrolle der Anlage dar. Dies wurde durch die bewusste Entscheidung ermöglicht, das Schlauchpaket nicht zu trennen, sondern über die Zellendecke zu führen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer Medien- oder Energietrennung, sodass der Extruder jederzeit vollständig ansteuerbar bleibt.
Durch diese kontinuierliche Anbindung kann der Extruder in jeder Phase des Produktionsprozesses flexibel genutzt werden. Das bedeutet, dass die Extruderschnecke nicht nur auf der Parkposition bewegt werden kann, sondern auch im Vorfeld der Extruder für eine Nutzung gezielt vorbereitet wird. Beispielsweise kann über den Programmcode gesteuert werden, dass der Extruder vor seiner eigentlichen Verwendung bereits auf die erforderliche Temperatur vorgeheizt wird. Ebenso kann eine automatische Spülung und kontrollierte Abkühlung nach Abschluss eines Druckvorgangs erfolgen, was insbesondere für eine saubere Verarbeitung und dem Entgegenwirken von Materialdegratation essentiell ist.
Diese neue Steuerungsmöglichkeit eröffnet große Freiheiten im Betrieb der Anlage, da nun für unterschiedliche Anwendungsfälle maßgeschneiderte Abläufe programmiert werden können. Je nach

Bedarf kann der Extruder somit optimal in den Gesamtprozess integriert werden, sei es zur effizienten Vorbereitung, zur präzisen Temperaturregelung oder zur automatisierten Reinigung.

Linearachse für großen Bauraum

Die Umsetzung der Linearachse wurde zu 80 % erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden alle mechanischen und elektrischen Komponenten vollständig ausgelegt, konfiguriert, ausgerichtet und verbaut. Die Integration in die Gesamtsteuerung der Anlage konnte ebenfalls erfolgreich abgeschlossen werden, sodass alle notwendigen elektrischen Anschlüsse und Schnittstellen implementiert wurden.
Einzig die softwareseitige Inbetriebnahme der Linearachse konnte nicht mehr finalisiert werden, da die zuständige Sparte vor dem Abschluss dieser Arbeiten geschlossen wurde. Dies bedeutet, dass die physische Achse zwar vollständig verbaut und elektrisch angebunden ist, jedoch keine finale Softwareintegration zur Steuerung im realen Betrieb mehr erfolgen konnte.
Trotzdem wurde die Funktionalität der Linearachse im digitalen Zwilling erfolgreich abgebildet. In der virtuellen Umgebung konnte die Achse bereits in Betrieb genommen und in die Bahnplanung integriert werden. Dies ermöglichte eine realitätsnahe Simulation des Bewegungsablaufs und der Einsatzmöglichkeiten der Linearachse innerhalb des Gesamtprozesses. Somit wurde die Funktionsweise zumindest in der Simulation erfolgreich nachgewiesen, was eine spätere Implementierung in eine reale Steuerungsumgebung grundsätzlich ermöglichen würde.

Großer Druck-Frästisch mit Spannmöglichkeiten

Die Entwicklung und Umsetzung eines großen Druck-Frästischs mit vielseitigen Spannmöglichkeiten wurde zu 90 % erfolgreich abgeschlossen. Der Tisch wurde mit einer großzügigen Arbeitsfläche von 1600 x 3600 mm konstruiert und gefertigt, um auch großformatige Bauteile zuverlässig bearbeiten zu können.
Ein zentrales Element des Konzepts war eine innovative Druck- und Fräsplattenhalterung, die eine schwimmende Lagerung in der Ebene ermöglicht. Diese spezielle Konstruktion trägt dazu bei, Wärmeausdehnungen der Materialien zu kompensieren, ohne die Ebenheit der Arbeitsfläche zu beeinträchtigen. Dadurch bleibt die Präzision sowohl beim Druck- als auch beim Fräsprozess konstant gewährleistet.
Zusätzlich wurden neuartige, dickere Druck- und Frässegmente entwickelt, die eine flexiblere Möglichkeit zum Einsatz von Dichtschnüren bieten. Diese Optimierung ermöglicht die Anpassung von Vakuumfeldern in beliebiger Größe, wodurch verschiedene Bauteile flexibel und sicher fixiert werden können. Besonders vorteilhaft ist dies für die fräsende Bearbeitung, da das Spannen mittels Vakuum eine gleichmäßige Fixierung des Werkstücks ohne mechanische Spannkräfte erlaubt.
Neben der Vakuumspanntechnik wurden zusätzliche mechanische Spannpunkte integriert. Diese ermöglichen es, Bauteile auf den Druckplatten mithilfe von Spannpratzen zu fixieren, was insbesondere für spezielle Fräsbearbeitungen eine erweiterte Spannoption bietet.
Während die mechanische Konstruktion, Fertigung und Implementierung des Tisches vollständig abgeschlossen wurden, konnte die Softwareintegration nicht mehr finalisiert werden. Grund hierfür war die Schließung der Abteilung, bevor die finale Inbetriebnahme und Ansteuerung der Software erfolgen konnte. Ein weiteres wesentliches Merkmal des Tisches ist die Verwendung robusterer Tischplatten, die eine höhere Flächenlast und größere Fräskräfte aufnehmen können, ohne die Ebenheit zu

verlieren. Dadurch bleibt die Präzision und Stabilität des Systems auch unter hohen mechanischen Belastungen erhalten, was eine langfristige und zuverlässige Nutzung für unterschiedliche Bearbeitungsprozesse sicherstellt.

Dreh-Schwenktisch

Die Notwendigkeit eines Dreh-Schwenktisches wurde im Laufe des Projektes neu bewertet. Die Analyse der anvisierten Luftfahrtbauteile ergab, dass für deren Fertigung aktuell kein Dreh-Schwenktisch erforderlich ist. Daher wurde dieser Bestandteil aus der Zielstellung gestrichen.

Moderne Vernetzungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten

Durch den Aufbau der Hybridanlage mit einer Siemens Sinumerik One Steuerung sind moderne Vernetzungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten gegeben. Dies erleichtert die Integration verschiedener Komponenten und ermöglicht eine effiziente Steuerung und Überwachung der Prozesse.

LCA-Datensammlung

Die Datensammlung für die Lebenszyklusanalyse (LCA) wurde zu 90 % erfolgreich abgeschlossen. Dabei konnten sämtliche relevanten Input- und Outputströme für die Berechnung der Umweltbilanz erfasst und systematisch dokumentiert werden. Die Erhebung der Daten erfolgte durch umfassende Messungen, sodass alle Ströme mit realen, belastbaren Werten unterfüttert wurden.
Alle erfassten Werte wurden erfolgreich an HAP 1 übergeben, womit die Grundlage für eine fundierte LCA-Berechnung geschaffen wurde. Damit hat Weber alle erforderlichen Maßnahmen innerhalb des eigenen Verantwortungsbereichs abgeschlossen und die vollständige Bereitstellung der Daten für dieses Teilprojekt sichergestellt.
Ein noch offener Punkt betrifft die Datenerhebung im Bereich des Fräsprozesses. Während für den Fused Granulate Fabrication (FGF)-Prozess alle notwendigen Daten vollständig erfasst und bereitgestellt wurden, konnten die spezifischen Werte für das robotische Fräsen nicht mehr erhoben werden. Hintergrund ist, dass während des Projektzeitraums kein robotisches Fräsen im Technikum durchgeführt werden konnte. Ursprünglich war geplant, diese fehlenden Daten über Partnerunternehmen und befreundete Betriebe nachträglich zu erfassen.
Allerdings konnte dieser Schritt aufgrund der vorzeitigen Schließung der Abteilung nicht mehr realisiert werden. Somit bleibt die Datensammlung für den FGF-Prozess vollständig abgeschlossen, während für das robotische Fräsen noch eine Lücke besteht, die potenziell durch externe Partner geschlossen werden könnte.

Robotisches Fräsen

Die Umsetzung des robotischen Fräsens konnte zu 50 % abgeschlossen werden, wobei alle erforderlichen Vorbereitungen für die Implementierung getroffen wurden. Dazu gehörte die Auswahl und Integration aller wesentlichen Komponenten, um das robotische Fräsen technisch umsetzbar zu machen. Im Detail wurden die Frässpindel sowie deren mechanische und elektrische Anbindung sorgfältig ausgewählt und in die bestehende Anlage integriert. Die Steuerungssysteme wurden entsprechend angepasst, um die präzise Ansteuerung der Frässpindel zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden geeignete Fräswerkzeuge für die Bearbeitung der Hochleistungsthermoplaste definiert und die CAM-Integration

vorbereitet, sodass eine automatisierte Generierung von Fräsbahnen für die Robotiksteuerung möglich wäre.
Zusätzlich wurde ein Spindelablagesystem entwickelt, um die sichere und effiziente Ablage der Frässpindel zu ermöglichen. Ein weiterer zentraler Bestandteil der Vorbereitung war die Implementierung eines automatisierten Fräserwechselsystems, welches eine flexible Anpassung an unterschiedliche Bearbeitungsszenarien erlaubt.
Trotz der umfangreichen Vorbereitungen konnte das robotische Fräsen jedoch nicht in Betrieb genommen werden. Die entscheidende Hürde war die ausstehende Softwareinbetriebnahme, die aufgrund der vorzeitigen Schließung der Abteilung nicht mehr durchgeführt werden konnte. Ohne diese finale Integration war es nicht möglich, die ersten praktischen Fräsversuche mit dem Roboter durchzuführen. Somit bleibt festzuhalten, dass alle infrastrukturellen und technischen Voraussetzungen für das robotische Fräsen geschaffen wurden. Die eigentliche Inbetriebnahme sowie die Durchführung der ersten Versuche konnten jedoch nicht mehr realisiert werden, sodass dieser Teilbereich letztendlich unvollendet blieb.

Integration des DLR-Miniaturextruders

Die Integration des DLR-Miniaturextruders in die Gesamtanlage für die Fertigung feiner Strukturen wurde vollständig abgeschlossen, wobei im Laufe des Projekts eine Anpassung der ursprünglichen Zielstellung erfolgte.
Zunächst wurden alle relevanten Schnittstellen zwischen dem Miniaturextruder und der aufzubauenden Gesamtanlage entwickelt und implementiert. Dies umfasste sowohl mechanische als auch elektrische Anpassungen, um eine reibungslose Kommunikation und Steuerung zu ermöglichen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei auf die Programmierung der Steuerungssysteme gelegt, um den Extruder nahtlos in die vorhandenen Prozesse zu integrieren.
Ein entscheidender Aspekt der Vorbereitung war zudem die Abstimmung des Miniaturextruders mit dem bestehenden Werkzeugwechselsystem. Durch eine gezielte Konstruktion konnte sichergestellt werden, dass der Extruder bei Bedarf schnell und effizient in den Fertigungsprozess eingebunden werden kann. Auch die digitale Integration wurde erfolgreich abgeschlossen, sodass die Funktionalität des Systems umfassend getestet und nachgewiesen werden konnte.
Allerdings wurde im Verlauf des Projekts entschieden, den Miniaturextruder nicht physisch in die Gesamtanlage zu integrieren. Diese Entscheidung basierte nicht auf technischen Hürden, sondern vielmehr auf einer strategischen Neuausrichtung der Prioritäten innerhalb des Projekts. Aufgrund der zuvor erarbeiteten Vorbereitungen ist eine spätere physische Integration ohne größere Herausforderungen jederzeit möglich.
Die freigewordenen zeitlichen und personellen Ressourcen wurden stattdessen gezielt zur Kompensation von Verzögerungen beim Anlagenaufbau eingesetzt.

Extruderentwicklung für Hochleistungsthermoplaste und Schreddergut

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Extruderentwicklung vorangetrieben, die sich insbesondere auf die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten sowie die direkte Nutzung von Schreddergut konzentrierte. Zwei Hauptvarianten – AE20 LD15,5 und AE20 LD25 – wurden entwickelt und

erfolgreich getestet, wobei beide Extruder speziell an die hohen Anforderungen dieser Materialklasse angepasst wurden.
Der AE20 LD15,5 erhielt eine optimierte Schneckengeometrie sowie eine angepasste Verfahrenseinheit, um eine stabile Verarbeitung von Hochleistungspolymeren wie PEEK, PEKK und PPS zu ermöglichen. Durch gezielte Anpassungen wurde eine gleichmäßige Schmelz- und Homogenisierungsleistung erreicht, wodurch eine konstante Materialqualität gewährleistet werden konnte.
Mit dem AE20 LD25 wurde eine leistungsstärkere Extruderversion entwickelt, die durch eine verlängerte Verfahrensstrecke eine effizientere Aufschmelzung und höhere Durchsatzleistung ermöglicht. Diese Variante eignet sich besonders für größere Materialmengen und konnte durch umfangreiche Tests am Extrudertestst and ihre Vorteile in Bezug auf Materialvielfalt und Prozessstabilität unter Beweis stellen. Darüber hinaus wurden verschiedene Einzugs- und Schneckengeometrien entwickelt, um die Materialverarbeitung weiter zu optimieren.
Ein wichtiger Aspekt der Entwicklung war die direkte Verarbeitung von Schreddergut zur Schließung des Materialkreislaufs. Erste Versuche zeigten, dass geschreddertes Material gut verarbeitet werden kann. Herausfordernder gestaltete sich jedoch die Nutzung von Frässpänen, da deren Form und Größe stark variieren und so die Extrusionsleistung beeinträchtigen. Es wurde festgestellt, dass eine zusätzliche Zerkleinerung der Späne notwendig ist, um eine gleichmäßige Verarbeitung zu gewährleisten.
Mit der erfolgreichen Entwicklung der Extrudervarianten AE20 LD15,5 und AE20 LD25 konnten wesentliche Fortschritte in der additiven Fertigung mit Hochleistungsthermoplasten erzielt werden. Während der AE20 LD15,5 bereits eine hohe Effizienz für spezialisierte Anwendungen zeigte, eröffnete der AE20 LD25 durch seine verlängerte Verfahrensstrecke zusätzliche Optimierungspotenziale für Materialvielfalt und Durchsatzleistung. Die Möglichkeit, recyceltes Material direkt wiederzuverwenden, wurde erfolgreich demonstriert und bildet eine wichtige Grundlage für nachhaltige Fertigungsprozesse.

Verarbeitung einer großen Materialvielfalt

Im Verlauf des Projekts konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass eine breite Materialvielfalt mit den entwickelten Extrudern verarbeitet werden kann. Bereits mit gezielten Anpassungen am AE20 LD15,5 zeigte sich, dass verschiedene Hochleistungsthermoplaste zuverlässig extrudiert und verarbeitet werden konnten. Die Weiterentwicklung des Extruders hin zum AE20 LD25 brachte zusätzliche Vorteile mit sich, insbesondere durch die verlängerte Verfahrenslänge, die eine noch gleichmäßigere Aufschmelzung der Polymere ermöglicht. Dies wurde durch umfassende Extrudertests bestätigt, in denen die Verarbeitungsqualität und Materialkompatibilität geprüft wurden.
Während der Testreihen wurden Materialien aus sämtlichen relevanten Materialklassen untersucht. Dies umfasste Standardthermoplaste, technische Thermoplaste sowie Hochleistungsthermoplaste. Dabei wurde sowohl die Verarbeitung amorpher als auch teilkristalliner Materialien getestet, um eine möglichst umfassende Materialpalette abzubilden.
Zusätzlich wurde besonderes Augenmerk auf unterschiedliche Füllstoffe und deren Einfluss auf den Extrusionsprozess gelegt. Neben ungefüllten Varianten wurden auch faserverstärkte Materialien mit Glas- und Kohlenstofffasern in verschiedenen Konzentrationen untersucht. Hierbei konnte bestätigt werden, dass die entwickelten Extruder eine hohe Flexibilität bei der Materialverarbeitung bieten und eine stabile Verarbeitung unterschiedlicher Materialkombinationen ermöglichen. Dies stellt einen

entscheidenden Vorteil für zukünftige Anwendungen dar, da je nach Bauteilanforderung eine gezielte Materialauswahl erfolgen kann.

Identifikation geeigneter Hochleistungsthermoplaste

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Materialanalyse durchgeführt, um geeignete Hochleistungsthermoplaste für den additiven Fertigungsprozess zu identifizieren. Ziel war es zunächst, möglichst ungefüllte Materialien zu verwenden, da diese potenziell vorteilhafte mechanische Eigenschaften und eine höhere Reinheit aufweisen. Dieser Prozess nahm mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant, unter anderem aufgrund von Lieferengpässen bei Victrex, einem der führenden Hersteller von Hochleistungspolymeren.
Während der Analyse wurden verschiedene Hochleistungsthermoplaste von unterschiedlichen Herstellern gegenübergestellt und ausgiebig getestet. Obwohl die ungefüllten Materialien erfolgreich extrudiert werden konnten, traten erhebliche Herausforderungen bei der additiven Verarbeitung auf. Insbesondere zeigte sich, dass der starke Volumenschrumpf während des Abkühlprozesses zu erheblichen Bauteilverzügen führte, wodurch es unmöglich wurde, reproduzierbare und qualitativ hochwertige Strukturen zu fertigen.
Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde schließlich entschieden, carbonfasergefüllte Varianten der Hochleistungsthermoplaste zu verwenden. Durch die Zugabe von Kohlenstofffasern konnte der Verzug signifikant reduziert und die Maßhaltigkeit der gedruckten Bauteile gewährleistet werden. Diese Entscheidung erwies sich als essenziell für die erfolgreiche Umsetzung des Projekts, da sie eine stabile Verarbeitung und eine hohe Bauteilqualität ermöglichte.

Herstellung von Flugzeugkomponenten aus recycelten Hochleistungsthermoplasten

Ein zentrales Ziel des Projekts war es, Flugzeugkomponenten aus rezyklierten Hochleistungsthermoplasten herzustellen, um sowohl nachhaltige als auch leistungsfähige Fertigungsprozesse für die Luftfahrtindustrie zu ermöglichen. Dieses Vorhaben konnte in Zusammenarbeit mit Airbus erfolgreich umgesetzt werden.
Zu Beginn wurden gemeinsam mit Airbus mehrere repräsentative Bauteile identifiziert, die als Demonstratoren für den Fertigungsprozess dienen sollten. Die Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung luftfahrtspezifischer Anforderungen, darunter mechanische Belastbarkeit, thermische Stabilität und Gewichtseinsparung. Anschließend wurden die Bauteile geometrisch für das Fertigungsverfahren mittels Fused Granulate Fabrication (FGF) optimiert. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf einer an die additiven Fertigungsprozesse angepassten Bauteilkonstruktion, um eine fehlerfreie und effiziente Produktion zu gewährleisten.
Nach der erfolgreichen Anpassung der Geometrien wurden die Bauteile mit rezyklierten Hochleistungsthermoplasten gedruckt. Die Druckprozesse verliefen stabil und führten zu qualitativ hochwertigen Bauteilen, die sowohl in ihrer Maßhaltigkeit als auch in ihrer strukturellen Integrität überzeugten. Damit konnte das übergeordnete Ziel des Projekts vollständig erreicht werden: Es wurde nachgewiesen, dass Hochleistungsthermoplaste aus dem Recyclingprozess erneut für anspruchsvolle Anwendungen in der Luftfahrt nutzbar gemacht werden können. Dies stellt einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der nachhaltigen Fertigung dar und eröffnet neue Möglichkeiten für den Einsatz ressourcenschonender Materialien in der Luftfahrtindustrie.

AP 3.3 - Materialkreislauf für die additive Fertigung

AP 3.3.1 - Wiederverwertungskonzepte und Kreislaufwirtschaft

Geschlossener Materialkreislauf

Der geschlossene Materialkreislauf konnte erfolgreich und vollständig umgesetzt werden, sodass eine nachhaltige Wiederverwertung des eingesetzten Materials gewährleistet ist.
Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassendes System entwickelt und implementiert, das eine vollständige Rückführung und Wiederverwertung der verwendeten Hochleistungsthermoplaste ermöglicht. Dabei konnten insgesamt vier vollständige Materialkreisläufe abgebildet werden, die eine lückenlose Rückführung und erneute Nutzung des Materials über mehrere Verarbeitungszyklen hinweg sicherstellen.
Besonders herausfordernd war die Sicherstellung der Materialqualität über die verschiedenen Wiederverwertungszyklen. Hierbei wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um zu analysieren, wie sich das Material bei jeder erneuten Verarbeitung verhält und ob signifikante Qualitätseinbußen auftreten. Durch optimierte Aufbereitungsverfahren konnte jedoch sichergestellt werden, dass das recycelte Material auch nach mehrfacher Wiederverwertung die erforderlichen mechanischen Eigenschaften beibehält und somit weiterhin für anspruchsvolle Anwendungen, einschließlich des 3D-Drucks, genutzt werden kann.
Die erfolgreiche Implementierung des geschlossenen Materialkreislaufs stellt einen bedeutenden Schritt in Richtung nachhaltiger Fertigungsprozesse dar. Die gewonnenen Erkenntnisse und das entwickelte System bieten eine wertvolle Grundlage für zukünftige industrielle Anwendungen, bei denen ressourcenschonende Produktionsmethoden eine immer wichtigere Rolle spielen.

Druckabfälle, Ausstoß und sortenreine Trennung

Ein entscheidender Aspekt für einen effizienten und nachhaltigen geschlossenen Materialkreislauf ist die sortenreine Trennung von Druckabfällen, Ausstoßmaterial und weiteren Reststoffen, um eine hohe Materialqualität bei der Wiederverwertung sicherzustellen.
Im Rahmen des Projekts wurden geeignete Vorgehensweisen zur Erfassung, Analyse und Implementierung eines Trennsystems identifiziert. Es wurde ein umfassendes System zur Sammlung von sortenreinen Druckabfällen, fehlerhaften Testbauteilen sowie Spülmaterialien etabliert, das sicherstellt, dass keine Materialvermischungen auftreten und die Reinheit des wiederaufbereiteten Materials gewährleistet bleibt.
Durch gezielte Materialanalysen über vier vollständige Wiederverwertungszyklen hinweg konnte nachgewiesen werden, dass die Materialreinheit über die gesamte Prozesskette hinweg erhalten bleibt. Dies bedeutet, dass das gesammelte und erneut verwendete Material keine signifikanten Verunreinigungen aufweist, die die mechanischen oder thermischen Eigenschaften negativ beeinflussen könnten.

Frässpäneabsaugung

Die Entwicklung einer effektiven Frässpäneabsaugung war ein wichtiger Bestandteil des Projekts, um eine saubere Prozessumgebung zu gewährleisten, Materialverluste zu minimieren und eine sortenreine Wiederverwertung der Fräsreste zu ermöglichen.
Hierfür wurde ein innovatives Absaugkonzept entwickelt, das während des direkten Fräsprozesses automatisch in der Höhe verfahren werden kann. Diese adaptive Höhenverstellung sorgt dafür, dass die Absaugung stets optimal an der Frässtelle positioniert ist, wodurch eine hohe Absaugleistung sichergestellt und gleichzeitig das Risiko von Kollisionen mit dem Werkstück oder dem Werkzeug minimiert wird.
Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts besteht in der robusten Bauweise und der modularen Gestaltung der Verschleißteile, die einen einfachen Austausch ermöglichen, um eine langfristige und wartungsfreundliche Nutzung zu gewährleisten. Zudem wurde darauf geachtet, dass die abgesaugten Frässpäne direkt sortenrein separiert werden können, um sie in den geschlossenen Materialkreislauf zurückzuführen.
Trotz der erfolgreichen Konzeption, Konstruktion und elektrischen Einbindung konnte das System nicht mehr unter realen Bedingungen getestet werden, da die Abteilung vor der geplanten Inbetriebnahme geschlossen wurde. Dennoch wurden alle notwendigen Vorbereitungen getroffen, sodass die Frässpäneabsaugung mit minimalem Aufwand zu einem späteren Zeitpunkt implementiert und erprobt werden kann.

Verfügungstellung von Bauteilen an Partner zur Analyse der mechanischen Kennwerte, Materialdegradation & Kristallisation

Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassendes Konzept zur Bereitstellung von Bauteilen für Partnerinstitutionen entwickelt, um detaillierte Analysen der mechanischen Kennwerte, der Materialdegradation sowie der Kristallisationsvorgänge durchzuführen. Ziel war es, belastbare Daten zu generieren, die Rückschlüsse auf die Qualität und Langzeitstabilität der verarbeiteten Hochleistungsthermoplaste im geschlossenen Materialkreislauf ermöglichen.
Für jeden einzelnen Materialkreislauf wurden speziell designte Bauteile hergestellt, die Langlöcher zur Entnahme von Prüfkörpern enthielten. Diese Prüfkörper wurden systematisch entnommen und an das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) weitergeleitet, wo sie umfangreichen Tests unterzogen wurden. Hierbei standen insbesondere mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit und Dehnungsverhalten sowie materialwissenschaftliche Untersuchungen zur strukturellen Veränderung im Fokus.
Zusätzlich wurden alle relevanten Erkenntnisse und Design Principles zur Bewertung der Einflüsse der Recyclingzyklen und des gesamten Fertigungsprozesses an Airbus übermittelt. Dabei wurde dokumentiert, wie sich wiederholte Materialverarbeitungszyklen auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften auswirken und welche Anpassungen erforderlich sind, um eine gleichbleibend hohe Bauteilqualität sicherzustellen.
Durch diese umfassende Bereitstellung von Prüfkörpern und die enge Zusammenarbeit mit den Partnern konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die nicht nur für die wissenschaftliche Untersuchung, sondern auch für zukünftige industrielle Anwendungen von großer Bedeutung sind.

Mahlgut und direkte Wiederverwertung im Weberextruder mit Inline-Auffrischung

Im Rahmen des Projekts wurde intensiv daran gearbeitet, Mahlgut so direkt wie möglich im Weber-Extruder wiederzuverwenden, um eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Ziel war es, das zerkleinerte Material ohne zusätzliche Zwischenschritte wie externe Aufbereitung oder Regranulierung wieder dem Extrusionsprozess zuzuführen. Dies sollte sowohl die Materialeffizienz steigern als auch den Energieaufwand und mögliche Materialschädigungen durch erneute thermische Belastungen minimieren.
Um dieses Vorhaben umzusetzen, wurde eine spezielle Inline-Materialdosierung und -mischung in die Materialzuführung des Extruders integriert. Dieses System ermöglicht eine präzise Steuerung der Zusammensetzung des eingesetzten Materials, sodass beispielsweise unterschiedliche Anteile von Neuware und recyceltem Mahlgut flexibel kombiniert werden können. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit geschaffen, das Mahlgut direkt vor der Verarbeitung gezielt mit Additiven aufzufrischen, um etwaigen Materialdegradationseffekten entgegenzuwirken und die mechanischen Eigenschaften über mehrere Kreisläufe hinweg stabil zu halten.
Die konstruktiven und prozesstechnischen Maßnahmen zur Umsetzung dieser direkten Wiederverwertung wurden erfolgreich abgeschlossen, jedoch konnte die abschließende softwareseitige Integration und Inbetriebnahme des Systems nicht mehr erfolgen. Grund dafür war die vorzeitige Schließung der Abteilung, wodurch die letzten Tests zur Optimierung der Inline-Auffrischung ausblieben. Dennoch wurde durch die getroffenen technischen Vorkehrungen eine solide Basis geschaffen, um diese Entwicklung zukünftig weiterzuführen und in der industriellen Praxis zu erproben.

Materialkreisläufe abbilden – Gegenüberstellung von geschreddertem und regranuliertem Material

Im Rahmen des Projekts wurden Materialkreisläufe detailliert untersucht, um eine nachhaltige und effiziente Wiederverwertung von Hochleistungsthermoplasten sicherzustellen. Dabei wurden vier vollständige Materialzyklen abgebildet, wobei zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt wurden: eine direkte Wiederverwertung durch Schreddern und eine zusätzliche Regranulierung.
Beim ersten Ansatz wurden die Bauteile nach ihrer Nutzung geschreddert und das gewonnene Material direkt ohne weitere Zwischenschritte erneut verarbeitet. Dies hatte den Vorteil, dass das Material nur minimal thermisch belastet wurde und somit möglichst viele seiner ursprünglichen Eigenschaften beibehalten konnte. Allerdings stellte sich heraus, dass die Partikelgrößenverteilung und die Fließfähigkeit des Materials entscheidende Faktoren für die Verarbeitbarkeit im Extrusionsprozess sind.
Der zweite Ansatz umfasste einen zusätzlichen Regranulierungsschritt nach dem Schreddern. Dabei wurde das Material zunächst aufbereitet, um eine homogenere Granulatstruktur zu erhalten. Dies führte zu einer besseren Dosierbarkeit und Verarbeitung, brachte jedoch eine zusätzliche thermische Belastung mit sich, da das Material während der Regranulierung erneut aufgeschmolzen wurde. Über vier Zyklen hinweg wurde beobachtet, dass dieser zusätzliche Wärmezyklus einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Materials hatte.
Um mögliche Materialdegradationen durch mehrfaches Recycling auszugleichen, wurde im vierten Zyklus von Ansatz zwei eine Auffrischungsstudie durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Auffrischungsraten untersucht, um zu ermitteln, inwieweit sich durch die gezielte Zugabe von Neumaterial oder Additiven eine Stabilisierung der Materialeigenschaften erreichen lässt.

Verlinkung von Herstellungsverfahren – Verarbeitung von Filamentresten von FIBRE sowie Altpulver von EOS

Dieses Ziel wurde zu 50 % abgeschlossen. Zwar konnten die finalen Verarbeitungstests nicht mehr durchgeführt werden, jedoch wurden bereits Vorversuche mit PEI erfolgreich durchgeführt, welches dem Material von FIBRE entspricht. Dabei zeigte sich, dass die direkte Verarbeitung von Schreddergut möglich ist, weshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass sich der Filamentprozess in den Granulatprozess überführen lässt.
Hinsichtlich des Altpulvers von EOS wurden keine spezifischen Versuche durchgeführt. Während der Projektlaufzeit erfolgten jedoch Tests mit anderen Altpulvern, darunter TPU und PA. Die Verarbeitung dieser Materialien erwies sich als herausfordernd, konnte aber durch den Einsatz zusätzlicher Dosier- und Zuführschnecken erfolgreich realisiert werden. Daher ist davon auszugehen, dass auch das Hochleistungsthermoplastpulver von EOS mit der längeren Verfahrenseinheit des AE20 LD25 verarbeitet werden könnte.
Da für diese Tests die Gesamtanlage erforderlich gewesen wäre und diese aufgrund der vorzeitigen Schließung der zuständigen Sparte nicht mehr finalisiert werden konnte, stehen die abschließenden Versuche noch aus. Dennoch liefern die bisher gewonnenen Erkenntnisse eine solide Grundlage für eine zukünftige Verlinkung der Herstellungsverfahren.

AP 3.4 - Digitaler Kreislaufprozess

AP 3.4.1 - Prozesssimulation und Materialmodellentwicklung

Datenbereitstellung zur Erstellung von Prozesssimulationen

Im Rahmen der Prozessdatenerfassung und -bereitstellung spielte Weber eine zentrale Rolle, indem sämtliche relevanten Prozessparameter systematisch erfasst, geloggt und für weiterführende Analysen zur Verfügung gestellt wurden. Diese Parameter umfassen unter anderem Temperaturen, Massedruckverläufe, Massetemperaturverläufe, Standzeiten sowie weitere kritische Kenngrößen, die für die Entwicklung präziser Materialmodelle essenziell sind.
Die erfassten Daten dienen nicht nur der Materialmodellentwicklung, sondern sind auch von großer Bedeutung für die Prozessüberwachung und -optimierung im digitalen Kreislaufprozess. Eine kontinuierliche Analyse dieser Werte ermöglicht eine detaillierte Nachverfolgung des gesamten Produktionsprozesses und hilft, Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Dadurch kann die Qualität des hergestellten Materials gewährleistet und eine gleichbleibend hohe Prozessstabilität sichergestellt werden.
Um diese Daten effizient zu erfassen und zu verwalten, entwickelte Weber spezielle Abläufe sowie eine eigens konzipierte Software zur hochfrequenten Datenerfassung, -protokollierung und -visualisierung. Diese Software ermöglicht es, die erfassten Werte in Echtzeit auszuwerten und grafisch darzustellen, wodurch ein tiefgehendes Verständnis für die Prozessdynamik gewonnen werden konnte.
Alle relevanten Prozessparameter wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um eine umfassende Analyse und die Erstellung von präzisen Prozessmodellen zu ermöglichen. Dies bildet die Grundlage für weiterführende Optimierungsmaßnahmen und die Integration der erfassten Daten in digitale Zwillinge oder simulationsgestützte Vorhersagemodelle.

Digitales Anlagenmodell und kinematische Modelle

Im Rahmen der digitalen Abbildung der Gesamtanlage wurden sowohl ein vollständiges digitales Anlagenmodell als auch kinematische Modelle entwickelt, die sämtliche relevanten Komponenten und Bewegungsabläufe detailgetreu widerspiegeln. Diese Modelle dienen als essenzielle Grundlage für die Simulation und Optimierung der gesamten Prozesskette und ermöglichen eine tiefgehende Analyse verschiedener Betriebszustände, ohne dass physische Tests notwendig sind.
Das digitale Anlagenmodell umfasst eine präzise Nachbildung aller relevanten Maschinen- und Anlagenteile, einschließlich des Extruders, der Linearachse, des robotischen Systems sowie der Fräs- und Druckeinheiten. Dadurch konnten nicht nur sämtliche mechanischen und thermischen Wechselwirkungen innerhalb der Anlage modelliert, sondern auch unterschiedliche Betriebsstrategien im Vorfeld getestet werden. Dies trägt maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Fehlervermeidung bei.
Zusätzlich wurden kinematische Modelle erstellt, die die Bewegungsabläufe der einzelnen Maschinenkomponenten exakt abbilden. Dadurch war es möglich, komplexe Bewegungsabläufe, wie etwa den automatischen Werkzeugwechsel, das Verfahren des Extruders oder die kinematischen Abhängigkeiten innerhalb der Fräsprozesse, im Vorfeld zu analysieren und zu optimieren. Insbesondere für die Integration der Linearachse und den Wechsel zwischen den verschiedenen Bearbeitungsverfahren stellte dies einen bedeutenden Vorteil dar, da potenzielle Probleme frühzeitig identifiziert und behoben werden konnten.

Die entwickelten Modelle wurden den Projektpartnern vollständig bereitgestellt und ermöglichen eine nahtlose Einbindung in weiterführende Simulations- und Steuerungssysteme. Damit stehen nun digitale Werkzeuge zur Verfügung, die langfristig für die Planung neuer Prozesse, die Optimierung bestehender Abläufe und die Integration in digitale Zwillinge genutzt werden können.

Digitaler Zwilling zur Bahnplanung

Die Implementierung eines digitalen Zwillings zur Bahnplanung konnte ebenfalls vollständig umgesetzt werden. Der digitale Zwilling wurde erfolgreich in zwei Bahnplanungssoftwarelösungen integriert: Siemens NX und AIBuild. Durch diese Integration war es möglich, realistische und hochpräzise Bahnplanungen zu realisieren. Dies führte zu einer optimierten Fertigungsstrategie, indem potenzielle Fehlerquellen bereits in der Planungsphase identifiziert und eliminiert wurden. Die erfolgreiche Umsetzung des digitalen Zwillings trägt somit maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Prozesssicherheit innerhalb der Hybridanlage bei.