

Teil II Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. – für sein Institut: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Stuttgart)	Förderkennzeichen: 033RK099D
Förderprogramm: KMU-innovativ Ressourceneffizienz	
Titel des Vorhabens: LoopAdd - Geregelte Kreislaufführung von Kunststoffpulver für das selektive Lasersintern durch Inline-Analytik, Pulveraufbereitung und adaptive Prozessführung Teilvorhabenbezeichnung: Systemauslegung, Material- und Prozesscharakterisierung	
Projektleiter/ Projektleiterin: Mark Becker	Tel.: 0711/970-1790 E- Mail: mark.becker@ipa.fraunhofer.de
Laufzeit des Vorhabens von: 01.06.2022	bis: 30.11.2024

Weiter Projektpartner

Visiotech GmbH (*Koordinator*)

H. Börger & Co. GmbH

(Aufgrund Insolvenz 2023 aus dem Konsortium ausgeschieden)

iSud GmbH

Inhaltsverzeichnis

I.1	Überblick zu den durchgeführten Arbeiten und erzielten Forschungsergebnissen	3
I.1.1	Zwischenbericht LoopAdd – Zusammenfassung (01.06.2022 – 31.12.2022).....	3
I.1.2	Zusammenfassung des Zwischenberichts zum Projekt "LoopAdd" (Berichtszeitraum 01.01.2023 – 31.12.2023):.....	3
I.1.3	Letzte Berichtsphase (01.01.2024-31.11.2024).....	4
I.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	7
I.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	8
I.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	9
I.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit.....	9
I.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	10

I.1 Überblick zu den durchgeführten Arbeiten und erzielten Forschungsergebnissen

I.1.1 Zwischenbericht LoopAdd – Zusammenfassung (01.06.2022 – 31.12.2022)

Im ersten Projektabschnitt wurde im Arbeitspaket 1 (AP1) eine detaillierte Anforderungsliste für ein System zur qualitätsgeregelten Pulvermischung im SLS-Prozess erarbeitet und ein in fünf Teilsysteme untergliedertes Lösungskonzept entwickelt. Die Teilsysteme umfassen Konditionierung/Siebung, Dosierung, Lagerung, Mischung/Befeuchtung und Pulvercharakterisierung. Alle Systemkomponenten wurden so ausgelegt, dass sie eine flexible Integration in Produktionsumgebungen ermöglichen, insbesondere durch den Einsatz der Dichtstromförder-technik und integrierte Messtechnik, vorzugsweise spektroskopisch.

Im Arbeitspaket 2 (AP2) wurden umfangreiche Analysen zur Alterung und Additivierung von PA12-Pulvern durchgeführt. Mittels DSC, Laserbeugung, REM/EDX, Fließeigenschaftsmessung, BET-Oberfläche und Farbmessung konnten relevante Alterungseffekte quantifiziert und erste Korrelationen zu spektroskopischen Daten erarbeitet werden. Eine abschließende Validierung stand jedoch noch aus.

Arbeitspaket 3 (AP3) legte den methodischen Grundstein für die experimentelle Untersuchung von Prozessparametern wie Sieb- und Fördertechnik sowie Feuchtigkeitseinflüssen. Erste Laboraufbauten und Versuchspläne wurden hierzu vorbereitet.

Die Projektmeilensteine und Zielsetzungen waren im Zeit- und Kostenrahmen und wurden wie geplant erreicht. Der Projektfortschritt bestätigte die technische Machbarkeit des entwickelten Lösungskonzepts. Erkenntnisse aus externen Projekten wie AMPULS wurden abgeglichen, zeigten aber keine inhaltliche Konkurrenz.

I.1.2 Zusammenfassung des Zwischenberichts zum Projekt "LoopAdd" (Berichtszeitraum 01.01.2023 – 31.12.2023):

Im Rahmen der zweiten Projektphase wurden wesentliche Fortschritte in den Arbeitspaketen erzielt. In AP2 lag der Fokus auf der Charakterisierung von Kunststoffpulvern für das selektive Lasersintern (SLS). Hierbei konnten durch Kombination spektroskopischer Analysen und physikalischer Messungen (Feuchtigkeit, Mischverhältnisse, etc.) relevante Parameter zur Beschreibung von Pulverzuständen erfolgreich identifiziert werden. Die Ergebnisse dienen als Basis für weiterführende Bewertungen im Realbetrieb.

Im AP3 wurde der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Fließeigenschaften und die elektrostatische Aufladung des PA12-Pulvers untersucht. Dabei zeigten sich stabile Schüttwinkel und geringe Unterschiede bei Dichte und Kohäsion über verschiedene Konditionierungen hinweg. Überraschend war, dass die Materialfeuchte keinen klaren Einfluss auf die Kohäsion hatte. Elektrostatische Aufladung beeinflusste hingegen deutlich die Haftung und Pulververteilung, wobei Luftfeuchtigkeit und Behältermaterialien wichtige Einflussgrößen darstellten.

Im AP4 wurden am Fraunhofer IPA erste Dosiersysteme für die präzise Additivierung von Pulvern entwickelt, um die Wiederverwertbarkeit zu verbessern. Während der Plattendosierer mit Materialverdichtungen zu kämpfen hatte, zeigte der Schneckendosierer vielversprechende Ergebnisse, benötigt jedoch weitere Optimierung zur verbesserten Materialaustragung.

Insgesamt zeigt sich, dass die entwickelten Verfahren und Geräte die Prozessstabilität im SLS-Verfahren verbessern können, insbesondere durch gezielte Pulverbehandlung und präzise Additivierung.

I.1.3 Letzte Berichtsphase (01.01.2024-31.11.2024)

AP4 – Weiterentwicklung des Dosiersystems, Aufbau einer automatisierten Ultraschallsieb- und Förderstation

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 (AP4) konnte der entwickelte Schneckendosierer erfolgreich getestet werden. Er erwies sich als zuverlässig und für den vorgesehenen Anwendungszweck gut geeignet. Aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens der Firma Börger war es jedoch nicht möglich, das ursprünglich geplante Gesamtsystem vollständig zu realisieren. Aus diesem Grund wurde das Dosiersystem so weiterentwickelt, dass es künftig sowohl in ein Gesamtsystem integriert als auch als eigenständige Lösung mit Entnahmebecher betrieben werden kann (siehe Abbildung). Die Systemarchitektur musste dementsprechend flexibel ausgelegt werden, so dass die Validierung auch außerhalb eines Anlagensystems erfolgen konnte und Fa. Visiotech als Anwendungspartner entsprechende Praxisversuche damit durchführen konnte.



Dosierstation für das Dosieren von Hilfsstoffen, als Stand Alone-Station

Automatisierte Ultraschallsiebstation mit Fördermodul

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde eine automatisierte Ultraschallsiebstation aufgebaut. Diese ermöglicht nicht nur die Siebung des Pulvers mittels Ultraschall, sondern auch dessen Förderung über Adapter direkt in eine Anlage am Fraunhofer IPA. Die verbauten Komponenten stammen größtenteils von der Firma Börger, da die eingesetzte Pumpe auf der patentierten Dichtstromtechnik dieses Unternehmens basiert.

In der zugehörigen Abbildung ist der Aufbau der Station dargestellt: Auf der linken Seite befindet sich das Gestell, das die Pumpe, die Steuerungseinheit sowie Vorratsbehälter für das zu siebende bzw. zu fördernde Material enthält. Rechts ist das Ultraschallsieb mit Rüttelmotor dargestellt. Darunter wurde ein Auffangfass installiert, in dem das gesiebte Pulver gesammelt wird.

Zudem wurden verschiedene Sensoren zur Prozessüberwachung integriert. Diese dienen der Erkennung von Überfüllung und stellen sicher, dass alle notwendigen Schritte durch die Bedienerperson korrekt ausgeführt wurden. Die Sensorik trägt sowohl zur Arbeitssicherheit als auch zum Umweltschutz bei und gewährleistet eine effektive Steuerung und Überwachung der Prozesse. Ebenso wie bei der Dosiervorrichtung musste zusätzlicher Aufwand in die Lösung investiert werden, so dass ein Betrieb und die Validierung außerhalb des geplanten Gesamtsystems stattfinden konnte.



Ultraschallsiebstation mit Fördermodul auf Wagen und Behältern für das Pulverhandling

AP5.4 – Inbetriebnahme und Erprobung einzelner Subsysteme

Da durch den Wegfall der Firma Börger keine vollständige Integration des Gesamtsystems erfolgen konnte, lag der Fokus in AP5.4 auf der Inbetriebnahme und Erprobung der Einzelsysteme – Dosieren, Mischen und Messen. In mehreren Testreihen wurde die Funktionsfähigkeit sowie die Wiederholgenauigkeit des Dosiersystems erfolgreich überprüft.

Zudem wurde das Schneckendosiersystem konstruktiv überarbeitet, um es mit dem Messsystem der Firma iSUD kombinieren zu können. Diese Anpassung ermöglicht eine direkte Integration in bestehende Messprozesse und erhöht die Flexibilität des Systems sowie die Zuverlässigkeit der spektrometrischen Inline-Messung in einem perspektivischen Produktionssystem. Die Durchführung und Auswertung der Tests erfolgten in enger Zusammenarbeit mit allen im Konsortium verbliebenen Projektpartnern.

Zur Erprobung der Ultraschallsiebstation wurden Pulver automatisiert gesiebt und die zugehörige Lasersinteranlage befüllt. Ein vergleichbares System wurde bei der Firma Visiotech installiert und erfolgreich in Betrieb genommen.

AP6.4 – Anwendungstests und Validierung unter Praxisbedingungen

In AP6.4 erfolgte die Validierung der Einzelsysteme unter realen Praxisbedingungen bei der Firma Visiotech. Grundlage hierfür bildeten unter anderem die prototypischen Aufbauten aus AP5.4. Verschiedene Pulverproben unterschiedlicher Herkunft wurden mit dem iSUD-Messsystem charakterisiert. Anschließend wurden daraus SLS-Bauteile gefertigt und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Ziel war es, die Zusammenhänge zwischen Pulverzustand, Messwerten und Bauteileigenschaften und den angewandten Additivierungs-Rezepturen final zu evaluieren. Die Erkenntnisse dienten der Weiterentwicklung der in AP4.4 entstandenen Wissensbasis und legten das Fundament für eine adaptive Steuerung von Pulveraufbereitung und SLS-Prozessführung

I.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden werden die wichtigsten Kostenpositionen des Projektzeitraums dargestellt. Sie belegen die wirtschaftliche Umsetzung der geplanten Maßnahmen sowie die ordnungsgemäße Verwendung der Fördermittel.

Material- und Sachkosten

Ursprünglich wurden 44.000,00 € Material- und Sachkosten veranschlagt, tatsächlich wurden 30.648,43 € aufgewendet. Die Differenz in Höhe von 13.351,57 € erklärt sich im Wesentlichen durch das vorzeitige Ausscheiden der Firma Börger, wodurch das Projekt nicht vollständig wie geplant umgesetzt werden konnte und somit die Validierungsversuche an sich zwar bedeutend aufwändiger waren, hierfür jedoch weniger Verbrauchsmaterialien anfielen und teils für die Anlagenintegration geplante Sachkosten nicht in dem veranschlagten Maß anfielen.

Eingesetzt wurden die Mittel für:

- Komponenten zur Pulverförderung und -aufbereitung
- Bauteile für die Dosiereinheit
- Behälter und Gläser für Analyse- und Lagerungszwecke
- Lasersinterpulver für Versuchszwecke

Alle Ausgaben wurden sachgerecht dokumentiert und gemäß den Vorgaben des Fördergebers verwendet.

Personalkosten

In den ersten zwei Projektphasen wurden die die Personalkosten wie geplant verwendet. Nach Ausscheiden der Fa. Börger konnte für die Validierung jedoch nicht auf ein integriertes Gesamtsystem zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Arbeiten gestalteten sich dadurch zeitintensiver als geplant, weil beispielsweise provisorische Meßaufbauten realisiert werden mussten und eine Vielzahl an Einzelmessung notwendig wurden. Dies konnte durch Nutzung der Minderkosten im Bereich der Sach- und Materialkosten abgedeckt werden. Die Teilprojektziele konnten somit auch nach Ausscheiden der Fa. Börger wie geplant umgesetzt werden.

Reisekosten

Die im Projektverlauf entstandenen Reisekosten betragen insgesamt 1.520,00 €. Diese ergaben sich aus verschiedenen dienstlichen Reisen zu den Projektpartnern, insbesondere zur Koordination sowie zur Durchführung von Versuchen:

- Treffen bei Firma Börger (3 Personen) am 30.03.2023
- Kick-off-Treffen bei IPA und Visiotech (2 Personen) am 08.06.2022
- Projekttreffen bei Visiotech (3 Personen) am 16.11.2023
- Versuchsdurchführung bei Visiotech mit Novatec (iSUD) am 13.08.2024 (2 Personen)
- Weitere Versuche mit Novatec (iSUD) am 14.11.2024 (1 Person)
- Versuchsdurchführung bei Visiotech am 12.12.2023 (1 Person)
- Materialabholung bei Visiotech am 24.05.2023 und 07.06.2023 (je 1 Person)

Diese Reisen waren notwendig zur Abstimmung mit den Projektpartnern, zur Durchführung der Testreihen sowie zur logistischen Unterstützung innerhalb des Projekts.

I.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Notwendigkeit

Das Projekt "LoopAdd" hatte die Entwicklung eines Systems zur qualitätsgeregelten Wiederverwendung von PA12-Kunststoffpulvern im selektiven Lasersintern (SLS) zum Ziel. Da es an industrietauglichen Methoden zur Bewertung und Aufbereitung gealterter Pulver mangelt, entstehen bislang große Mengen an Kunststoffabfall, was zu wirtschaftlichen Verlusten führt. Die bisherigen Standardverfahren berücksichtigen weder die Alterungscharakteristik des Pulvers noch ermöglichen sie eine prozesssichere Wiederverwertung. Dies stellt insbesondere für anspruchsvolle Anwendungen, wie sie in der Medizintechnik oder Luftfahrt zu finden sind, ein bedeutendes Hindernis dar und führen somit dazu, dass entsprechend große Mengen an Kunststoffabfällen nicht vermieden.

Das Projekt adressiert die technologischen und wirtschaftlichen Lücken mit einem interdisziplinären Ansatz. Zu diesem Zweck wurden Inline-Messtechnik, gezielte Additivierung, materialschonende Förderung und adaptive Prozessregelung systematisch entwickelt. Die Validierung des Messsystems und der SLS-Bauteile unter realen Bedingungen, die in der letzten Projektphase durchgeführt wurde, bestätigt die Relevanz der technologischen Zielsetzung. Die gewonnenen Daten sind von entscheidender Bedeutung für die Feinabstimmung der Systemregelung und die Sicherstellung der Bauteilqualität.

Angemessenheit:

Die ausgeführten Arbeiten entsprechen in Umfang und Tiefe den ursprünglichen Planungen. Die Anforderungsanalyse, Materialcharakterisierung und Entwicklung modularer Systemkomponenten wurden erfolgreich abgeschlossen. In der finalen Phase des Projekts konnten trotz des vorzeitigen Ausscheidens der Firma Börger bedeutende Fortschritte erzielt werden. Der Schneckendosierer wurde erfolgreich als eigenständige Lösung weiterentwickelt und in einem modularen Ansatz für spätere Integrationsvorhaben vorbereitet. Darüber hinaus wurden alle Subsysteme (Dosieren, Messen, Mischen) einzeln in Betrieb genommen und unter Praxisbedingungen getestet. Die erfolgreiche Kombination des Messsystems mit dem Dosierer hat zu einer signifikanten Steigerung der Flexibilität und Anwendbarkeit des Gesamtkonzepts geführt.

Die erforderlichen Anpassungen aufgrund des Wegfalls eines Partners wurden zeitnah und zielgerichtet umgesetzt. Die wissenschaftliche Validierung durch Visiotech und Fraunhofer IPA unter Realbedingungen basierte auf den in der ersten Projektphase erarbeiteten Grundlagen und stellte den Abschluss des Projektverlaufs dar und konnte die technische Machbarkeit des entwickelten Lösungsansatzes nachweisen.

I.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt LoopAdd erzielten Ergebnisse bieten aus Sicht des Fraunhofer IPA eine wertvolle wissenschaftlich-technische Grundlage zur weiteren Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Kreislaufkonzepte in der additiven Fertigung. Durch die systematische Untersuchung von Alterungsmechanismen, Pulvercharakteristika und prozessrelevanten Einflussgrößen wurden praxisrelevante Erkenntnisse gewonnen, die in mehrfacher Hinsicht verwertbar sind.

Zum einen dienen die Ergebnisse als **Basis für zukünftige Projektanträge**, etwa im Kontext von Industrie 4.0, ressourceneffizienter Fertigung oder digitaler Prozessregelung. Konkrete Planungen für neue Forschungsvorhaben zur **Übertragung** der entwickelten Methoden auf andere Pulververfahren – z. B. Multi Jet Fusion (MJF), Selection Absorption Fusion (SAF) oder Binder Jetting – befinden sich in Vorbereitung. Auch eine Ausweitung auf andere Materialsysteme wie ist perspektivisch denkbar.

Darüber hinaus finden die im Projekt erarbeiteten Inhalte **direkt Eingang in die akademische Lehre**, insbesondere im Rahmen von Vorlesungen und Praktika an der Universität Stuttgart. Studierende profitieren dabei sowohl von den erarbeiteten wissenschaftlichen Grundlagen als auch von der praxisnahen Anwendung aktueller Messtechnik und Prozessanalyse im Bereich der additiven Fertigung.

Ein weiterer wichtiger Verwertungspfad ist die **Begleitung und Unterstützung der Industriepartner bei der Weiterentwicklung einzelner Systemkomponenten**. Das Fraunhofer IPA bringt hierbei seine Erfahrung in der prozessbegleitenden Analytik, der experimentellen Validierung sowie der Systemintegration ein. In zukünftigen Kooperationsprojekten kann so der Transfer der Technologien in industrielle Anwendungen gezielt unterstützt werden.

Insgesamt sieht das Fraunhofer IPA im Projekt LoopAdd einen wertvollen Beitrag zur Stärkung seiner wissenschaftlich-technologischen Kompetenz im Bereich nachhaltiger additiver Fertigung sowie eine tragfähige Grundlage für anwendungsnahe FuE in zukünftigen Projekten.

I.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit

Im Verlauf des Projekts LoopAdd wurden marktseitig einige neue Systeme zur Pulverhandhabung im Kontext des selektiven Lasersintern (SLS) bekannt, die hinsichtlich Teilfunktionen wie Mischen, Sieben oder Pulverhandlung Fortschritte zeigen. Zwei Systeme sind hier besonders hervorzuheben: die **Pulvermanagementstation von Farsoon** sowie die neuen **SLS-Systeme F1 und D1 von AM Solutions**.

Farsoon Pulvermanagementstation

Die Pulvermanagementlösung von Farsoon umfasst eine automatisierte Einheit zum **Mischen und Sieben** von Neu- und Altpulver. Ziel ist eine gleichmäßige Homogenisierung vor dem Einsatz im SLS-Prozess. Das System ist auf den Farsoon-Maschinenpark abgestimmt und

ermöglicht eine arbeitserleichternde Handhabung, insbesondere für größere Produktionsmengen.

Im Gegensatz zu den in LoopAdd entwickelten Komponenten bietet die Farsoon-Station **keine Inline-Messtechnik** zur Erfassung qualitätsrelevanter Parameter wie Alterungsgrad, Feuchte oder Additivgehalt. Die Mischung erfolgt auf Basis fester Rezepturen ohne Berücksichtigung von Materialzuständen. Eine Rückkopplung mit dem eigentlichen Verarbeitungsprozess ist nicht vorgesehen. Damit unterscheidet sich das LoopAdd-System deutlich durch seine **regelungsbasierte, qualitätsadaptive Funktionsweise**, die eine höhere Prozessstabilität und Materialeffizienz ermöglicht.

AM Solutions – Anlagen F1 und D1

Die Systeme **F1 und D1** von AM Solutions stellen eine **kompakte Plattform für das Nachbearbeiten und das Pulverhandling** dar. Die Anlagen kombinieren das **Entpacken, Sieben und Mischen** des SLS-Pulvers in einem automatisierten Arbeitsablauf. Ziel ist eine ergonomische und effiziente Handhabung des gebrauchten Pulvers nach dem Bauprozess.

Auch bei diesen Systemen fehlt eine **integrierte messtechnische Bewertung** der Pulverqualität. Der Mischeinsatz basiert auf Erfahrungswerten und nicht auf materialbasiertem Feedback. Eine präzise Dosierung von Additiven sowie eine Prozessregelung auf Basis qualitätsrelevanter Kenngrößen sind nicht Bestandteil der Lösung. Zudem erfolgt keine direkte Verknüpfung mit dem Bauprozess oder dessen Parametrierung. Im Gegensatz dazu verfolgt LoopAdd einen **ganzheitlichen Ansatz**, bei dem Pulverzustand, Additivierung und Prozessführung in einem geschlossenen Regelkreis verknüpft sind.

Zusammenfassung

Beide Systeme zeigen, dass dem Thema Pulvermanagement zunehmend Bedeutung beigemessen wird. Sie bieten nützliche Automatisierungsschritte, adressieren jedoch **nicht die zentrale Herausforderung der qualitätsgeregelten Pulverrückführung**. Der in LoopAdd gewählte Ansatz mit integrierter Messtechnik und adaptiver Prozessführung ist derzeit **einzigartig** und bildet eine wichtige technologische Ergänzung zu bestehenden marktseitigen Lösungen.

I.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Veröffentlicht:

- Autoren: Mark Becker, Max Krichenbauer, Simon Höhn, Patrick Springer
- Titel: Dynamik der Wasseraufnahme von PA12-Pulver
- Zeitschrift/Verlag: WT Werkstattstechnik Ausgabe 09/2024
- DOI: doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-89
- Open Access: Ja

Geplant:

- Autoren: Marc Gabaldón González

- Titel: Thermal Degradation of PEKK/CF Powder Analyzed via Handheld Raman Spectroscopy: A Novel Method
- Zeitschrift/Verlag: Progress in Additive Manufacturing
- Open Access: Ja, geplant

Präsentationen & Vorträge

- Keine erfolgt oder geplant.

Patente & Schutzrechte

- Keine Anmeldung erfolgt.

Öffentlichkeitsarbeit & Medien

- Keine Berichterstattung bisher erfolgt.

Datenverfügbarkeit & Open Science

- Keine Daten veröffentlicht. Open-Access-Initiativen sind aktuell nicht geplant.