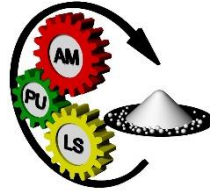


Teil II Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

AutoMatische **PUL**vermischung für das **Selektive Lasersintern**“ - AMPULS



in der Fördermaßnahme

KMU-Innovationsoffensive Produktionsforschung

Autor(en)

Christian Seifarth, cirp GmbH, seifarth@cirp.de
Jan Janhsen, FhG-IPA, jan.christoph.janhsen@ipa.fraunhofer.de
Jürgen Mohr, Process Control GmbH, juergen.mohr@processcontrol-gmbh.de

Projektlaufzeit: 01.07.2022 – 30.06.2024

Erstellungsdatum: 28.01.2025

Projektpartner

cirp GmbH: 02P21K040

Konzeption, Anbindung an die Produktion und Evaluierung einer Versuchsanlage zur automatischen Pulvermischung von Polymeren für eine SLS-Produktion

Process Control GmbH: 02P21K041

Konzeption und Fertigung einer Versuchsanlage zur automatischen Pulvermischung von Polymeren für eine SLS-Produktion

Fraunhofer IPA: 02P21K042

Konzeption eines Datenerfassungssystems zur Qualitätssicherung einer automatischen Pulvermischung von Polymeren für eine SLS-Produktion

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I.1	Eingehende Darstellung	3
I.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	3
I.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	4
I.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.5	Erzielte Ergebnisse	12
I.6	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	25
I.7	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	25
I.8	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes.....	25
I.9	Veröffentlichungen, Vorträge.....	25
I.10	Abbildungen	27

I.1 Eingehende Darstellung

Das AMPULS-Gesamtsystem, bestehend aus Pulversilos, Mischanlage und Qualitymanager, bietet eine automatisierte und präzise Dosierung sowie Homogenisierung von Neu- und Altpulver in frei wählbaren Mischungsverhältnissen. Sensoren überwachen simultan die Mischqualität und den Pulverzustand. Diese Daten werden automatisiert ausgewertet, in einer zentralen Datenbank dokumentiert und den SLS-Produktionsmaschinen sowie den gefertigten Bauteilen zugeordnet. Erstmals verbindet das System alle Stationen des SLS-Produktionsprozesses in einem vollständig geschlossenen Kreislauf.

Das AMPULS-Konzept ermöglicht eine bauteilspezifische Dokumentation von qualitätsrelevanten Informationen wie Pulvercharge, Mischqualität und Prozessparametern. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit und Rückverfolgbarkeit aller Produktionsschritte gewährleistet. Diese Daten dienen nicht nur der internen Qualitätssicherung, sondern auch der Zertifizierung der Bauteile. Änderungen von Prozessparametern werden automatisch dokumentiert, und das System erlaubt flexible Anpassungen auf Basis sensorischer und analytischer Werte sowie hinterlegten Erfahrungswissens. Ein regelbasiertes System sorgt für die Automatisierung und frühzeitige Intervention, um Ausschussteile zu minimieren.

Das skalierbare AMPULS-System ist für verschiedene Betriebsgrößen und Durchsatzmengen geeignet. Herstellerunabhängige Schnittstellen ermöglichen die Integration aller Prozessdaten in übergeordnete Systeme, QM-Dokumentationen und die Steuerung gekoppelte Anlagen. Ein geschlossener Pulverkreislauf von der Auspackstation bis zur Produktionsanlage reduziert manuelle Eingriffe, vermeidet Pulveremissionen und verbessert die Arbeitssicherheit durch Minimierung der Staubbelastung.

Mit modernster Technologie für Pulveraufbereitung, Qualitätssicherung und Automatisierung setzt AMPULS neue Maßstäbe in der SLS-Serienproduktion, indem es Effizienz, Nachhaltigkeit und Prozesssicherheit vereint. Die lückenlose Rückverfolgbarkeit und Bauteilzertifizierung machen das System zu einem innovativen Standard in der additiven Fertigung.

I.2 Motivation und Aufgabenstellung

Das additive Fertigungsverfahren Selektives Lasersintern (SLS) hat sich ausgehend vom Designprototypenbau hin zu einer Produktionstechnologie für funktionale Anwendungen und Serienfertigung weiterentwickelt. Im SLS-Verfahren dient ein thermoplastisches Pulver (z. B. Polyamid PA12, mittlere Korngröße ca. 50µm) als Ausgangsmaterial, das schichtweise aufgetragen wird. Das Pulver wird zunächst auf eine Temperatur knapp unterhalb seines Schmelzpunktes erhitzt und anschließend durch Laserstrahlung selektiv aufgeschmolzen. Nach Abschluss des Bauprozesses und der Abkühlung des Bauraums werden die Bauteile entnommen. Überschüssiges, nicht verfestigtes Pulver wird manuell oder teilautomatisiert entfernt.

Während des Bauprozesses unterliegt das Pulver mechanischen und thermischen Belastungen, die zu einer Degradation der Materialeigenschaften führen. Insbesondere verschlechtern sich Fließverhalten und Schmelzcharakteristik des Pulvers. Bauteile, die ausschließlich aus 100 % recyceltem Pulver hergestellt werden, zeigen deutliche optische und mechanische Qualitätseinbußen. Um einen ressourceneffizienten und stabilen Bauprozess zu gewährleisten, wird das Restpulver daher gesiebt und mit Neupulver in einem definierten Mischverhältnis (Neu zu Alt: ca. 50:50 bis 80:20, abhängig vom verwendeten Polymer) kombiniert, bevor es dem Produktionsprozess erneut zugeführt wird. Dieser Mischprozess wird derzeit noch überwiegend manuell durchgeführt.

Die gegenwärtig stark manuell geprägten und fehleranfälligen Arbeitsschritte erschweren es, den steigenden Anforderungen des Marktes (siehe Abbildung 1) gerecht zu werden.

Bereich	Bedarf
Normen	<ul style="list-style-type: none"> • Steigende Normung- und Definitionsaktivitäten von QM Standards für AM Serienbauteile • Einhaltung von definierten Qualitätsanforderungen der Bauteile • Anwendersicherheit in Produktionsumgebungen
Rohstoff	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion von Pulverausschuss, Pulververbrauch und Pulverquerkontamination • Steigerung der Recyclingquote sowie der Qualität des Recyclingrohstoffes • Prozesssichere Verarbeitung von unterschiedlichsten thermoplastischen Werkstoffklassen in einer Anlage
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Exakte Einhaltung der Prozessparameter • Fehlervermeidung im Mischungsverhältnis • Vermeidung von Deformationen und Oberflächendefekten an den Bauteilen • Nachverfolgbarkeit und Zuordnung von Prozessdaten zu produzierten Bauteilen und Pulverchargen
Automatisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaner Betrieb von vielen Anlagen • Schneller und flexibler Materialwechsel auf Maschinenebene • Verarbeitung von unterschiedlichsten thermoplastischen Werkstoffklassen • Anbindung von Pulvermischsystem und Fördersystem an SLS Pulverkreislauf • Effizienzsteigerung durch die automatische Prozesskette
Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Abfall • Vermeidung von unkontrollierter Pulverquerkontamination • Reduktion der Pulverbelastung von Mitarbeitern, Anlagen und Gebäuden durch Pulverstäube • Vermeidung von Ausschuss und Verschwendung

Abbildung 1: Entwicklungsbedarf in AMPULS

Insbesondere die Serienfertigung von Bauteilen sowie die Erfüllung von Zertifizierungsanforderungen entlang der gesamten Prozesskette sind nur mit erheblichen Mehraufwänden realisierbar. Zudem ist die physische und gesundheitliche Belastung der Mitarbeiter erheblich, insbesondere durch die Pulverstaubexposition. Beispielsweise müssen zur Herstellung von 40 kg gemischtem Pulver insgesamt 160 kg Material manuell bewegt werden, was eine hohe körperliche Beanspruchung bedeutet.

Das Ziel von AMPULS ist die Automatisierung des Pulverhandlings, das die Schritte Lagerung, Mischen, Sieben und Zuführung zu den Produktionsanlagen in einem geschlossenen System integriert. Durch diese Automatisierung soll die physische Belastung der Mitarbeiter deutlich reduziert und gleichzeitig die Prozesssicherheit erhöht werden. Darüber hinaus wird eine Digitalisierung des gesamten Pulverhandlings angestrebt, um die Grundlage für Zertifizierungen der Produktion und der hergestellten Bauteile zu schaffen.

I.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Homogenisieren von komplexen Pulverwerkstoffen

Pulverwerkstoffe für das Selektive Lasersintern (SLS) werden gemäß dem aktuellen Stand der Technik durch eine Auffrischung aus Alt- und Neupulver gemischt. Das Mischungsverhältnis variiert je nach Werkstoff und wird vom Anwender basierend auf Erfahrungswissen sowie Herstellerangaben festgelegt. Für Polyamid 12 (PA12) gibt die EOS GmbH beispielsweise ein Verhältnis von 50:50 (Neupulver: Altpulver) an, während andere Materialien Mischungsverhältnisse von 40:60 bis 20:80 aufweisen.

Für den Mischprozess kommen verschiedene Systeme wie Rollenmischer, Freifallmischer oder Konusmischer zum Einsatz. Die derzeit verbreiteten Freifallmischsysteme (z. B. Betonmischer) führen jedoch beim Befüllen und Umfüllen zu einer hohen Feinstaubbelastung, die negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hat.

Das Befüllen der Mischsysteme erfolgt durch Abwiegen und manuelles Zuführen des Pulvers. Die Dauer des Mischvorgangs und somit der Homogenisierungsgrad werden über zeitliche Erfahrungswerte gesteuert. Zu lange Mischzeiten können Entmischungseffekte hervorrufen, etwa das Trennen von Füllstoffen und Basismaterialien bei verstärkten Pulvern, was zu inhomogenen Fraktionen führt. Darüber hinaus wird eine Oberflächenfeuchtigkeit von 40–60 % für die Verarbeitung von PA12 empfohlen. Diese Feuchtigkeit wird entweder über die Luftfeuchtigkeit der Lagerumgebung oder durch Zugabe von Wasser im Mischprozess erreicht. Der Wechsel zwischen verschiedenen Pulverwerkstoffen erfordert eine umfangreiche manuelle Reinigung der Mischsysteme, was von Anwendern aus Effizienzgründen oft vermieden wird.

Anlagentechnik

Pulverhandlingkonzepte für das SLS umfassen sowohl die Pulverförderung als auch das Mischen von Pulver. Aktuelle Systeme beinhalten jedoch zahlreiche manuelle Eingriffe und Zwischenschritte. Automatisierte Lösungen existieren nur für Teilprozesse, wie den Sinterprozess, das Auspacken, Sieben, die Neupulverzufuhr oder das Mischen von Alt- und Neupulver. Behelfsmischsysteme, beispielsweise Baustellenbetonmischer, werden zweckentfremdet genutzt. Das Wiegen, Dosieren und Homogenisieren der Pulver erfolgt manuell, meist durch Abwiegen der Pulver und anschließende Zugabe in herkömmliche Mischsysteme wie Trommel-, Taumel- oder Konusmischer.

Diese Vorgehensweise erfordert zahlreiche manuelle Handhabungsschritte. Angelieferte Neupulver (z. B. in Big Packs oder Säcken) werden manuell abgewogen, gemischt und an separaten Siebstationen erneut gesiebt. Der Pulvertransport erfolgt häufig mit Eimern. Diese arbeitsintensiven und manufakturähnlichen Prozesse sind weder für hohe Pulverdurchsätze wirtschaftlich geeignet noch ermöglichen sie eine standardisierte Rückverfolgbarkeit der Pulverchargen. Mangels industrietauglicher, vollständig automatisierter Lösungen greifen SLS-Betreiber auf eigenentwickelte Behelfslösungen zurück. Diese sind meist rudimentär automatisiert und nur teilweise in Qualitätsmanagementsysteme (QM) integriert. Beispielsweise wird das gemischte Pulver in Silos gelagert und mittels Pumpen oder anderer Fördermethoden in die Vorratsbehälter transportiert.

Vom Anlagenhersteller EOS existieren teilautomatisierte IPCM-Systeme (Integrated Process Chain Management) für das Pulverhandling. Diese beinhalten unter anderem Auspackstationen und sogenannte Multiboxen für das Lagern und Fördern des Pulvers. Andere Anbieter bieten staubfreie Entleerungssysteme an, wie geschlossene Boxen mit Sichtscheiben und Handschuhdurchführungen. Diese Lösungen weisen jedoch nur Teilautomatismen auf, und die Prozessverknüpfung ist begrenzt. Eine vollständige Chargenrückverfolgung oder ein Mapping auf Bauteilebene sind damit nicht möglich. Zudem fehlt ein unternehmensübergreifendes Informationsmanagement, da einheitliche QM-Standards und Schnittstellen fehlen.

Prozessüberwachung und Rückverfolgung des Pulverwerkstoffes im Kreislauf

Die Überwachung von Pulverwerkstoffen im Kreislauf erfolgt derzeit stichprobenartig. Im VDI 3405 Blatt 1.1 werden Empfehlungen für die Prüfmethodik gegeben. Die entscheidenden Materialkenndaten, die die Verarbeitbarkeit beeinflussen, sind:

- *Fließfähigkeit*: Bestimmung nach EN ISO 60, Rieselfähigkeit nach DIN EN ISO 6186, und Berechnung der Hausner-Zahl.
- *Oberflächenfeuchtigkeit*: Indirekte Messung mittels Feuchtigkeitsmessgerät mit Einstecklanze direkt im Pulver.
- *Partikelgrößenverteilung*: Bestimmung durch Laserbeugung (ISO 13340) oder Bildanalyse (ISO 13322-1, ISO 13322-2).

Diese Analysen werden meist manuell und außerhalb des Produktionsprozesses durchgeführt und dokumentiert. Pulverchargen werden von Anwendern nach individuellen Systematiken geprüft, sortiert und gelagert. Behälter werden manuell beschriftet, und Mischdaten sowie Feuchtigkeitswerte werden in Tabellen oder ähnlichen Formaten dokumentiert. Die Reproduzierbarkeit und Nachverfolgbarkeit der Chargen ist durch diese manuelle Handhabung und Dokumentation nur eingeschränkt gewährleistet.

I.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der Innovation im Projekt baut AMPULS auf einen Anforderungskatalog auf, bei dem zu Beginn des Projektes die Erfahrung der einzelnen Projektpartner einfluss sowie einer konsequenten projektbegleitenden Evaluierung der Zwischenergebnisse. Dadurch war es dem Projektkonsortium möglich die eigenen Ergebnisse schnell zu evaluieren und eventuelle Korrekturen vorzunehmen.

Benchmark Baujob

Zur Sicherstellung einer konsistenten Evaluierung der Ergebnisse wurde zu Beginn des Projekts ein Benchmark-Baujob definiert (siehe Abbildung 2).

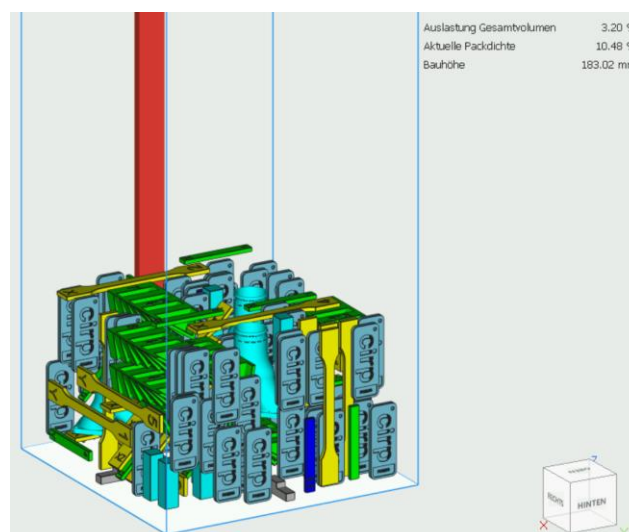


Abbildung 2: AMPULS Benchmark-Baujob

Dieser Benchmark-Baujob wurde so konzipiert, dass er eine Produktion unter optimalen Bedingungen repräsentiert und auf verschiedenen SLS-Anlagen reproduzierbar ist.

Die wesentlichen Merkmale des Benchmark-Baujobs umfassen:

- Packdichte: 10,5 %
- Bauhöhe: 183,02 mm
- Gleichmäßige Slice-Verteilung über den gesamten Job
- Homogene Verteilung der verschiedenen Bauteile

Die im Benchmark-Baujob enthaltenen Bauteile fungieren als „Fingerabdruck“ des Prozesses und ermöglichen die Repräsentation zentraler Prozesskennwerte, darunter:

- Zugfestigkeit und Biegefestigkeit
- Bruchdehnung
- Dichte
- Oberflächenqualität und –Rauigkeit
- Visuelle Bewertung

Darüber hinaus erlaubt die Analyse der Bauteile Rückschlüsse auf die Pulvereigenschaften zu Beginn des Prozesses.

Der Benchmark-Baujob bildet einen von drei zentralen Bausteinen zur Kontrolle und Validierung der Prozessergebnisse. Der zweite Baustein sind die verwendeten Produktionsanlagen. Dabei handelt es sich um Kunststoff-Lasersinteranlagen der Typen P396 und P395 der Firma EOS. Diese Anlagen wurden zu Projektbeginn qualifiziert, und ihr Zustand wurde umfassend dokumentiert. Diese Maßnahme war erforderlich, um maschinenbedingte Einflussfaktoren, wie etwa eine abnehmende Laserleistung oder Verschleiß von Dichtungen, während des Projektverlaufs auszuschließen. Durch diese initiale Dokumentation konnte sichergestellt werden, dass jeder Benchmark-Baujob unter identischen Maschinenbedingungen hergestellt wurde.

Der dritte Baustein umfasst das im Prozess eingesetzte Material. Dieses wurde zu Projektbeginn und vor jedem Benchmark-Baujob durch AMPULS qualifiziert. Hierzu wurden Proben von Neu-, Alt- und gemischtem Pulver entnommen und anhand folgender Eigenschaften analysiert:

- Schüttdichte und Stampfdichte
- Schüttkegel
- Hausner-Faktor
- Staubverhalten
- Spaltenwinkel und Kollapswinkel
- Feuchtigkeitsgehalt (gebundene Feuchte im Pulver)
- Korngrößenverteilung
- Schmelzviskosität

Durch die umfassende und systematische Dokumentation dieser drei Bausteine zu Projektbeginn konnten Messwiederholungen und Streuungen der Messergebnisse effektiv vermieden werden. Dies führte im weiteren Projektverlauf zu signifikanten Einsparungen an Zeit und Ressourcen.

Zur Bewertung des Ist – Zustands bei der Firma cirp, wurden für die Validierung der Anlagen und der Pulvermischungen definierte Testbaujobs gebaut und systematisch qualitative, sowie quantitative Bewertungen des Pulverwerkstoffs, sowie der Bauteile abgeleitet. Die ermittelten Werte dienen als Benchmark für das neu zu entwickelnde Mischsystem.

Durch die Firma cirp wurde Testbaujobs zur Ermittlung Referenzkennwerte ihres bestehenden manuellen Mischsystems mit Standartmaterialmischung mit folgenden Materialien:

- PA3200 GF (PA12 mit Glaskugelgefüllt),
- PA2200 (PA12),
- Luvosint (PA12 schwarz)

hergestellt.

Die gedruckten Zugprüfkörper wurden am Fraunhofer IPA mittels Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-1 geprüft (E-Modul, Bruchdehnung, Zugfestigkeit). Die verwendeten Pulvermischungen wurden auf ihre Pulvereigenschaften untersucht. Dabei wurde der Schüttkegel, Schüttdichte sowie Stampfdichte der Materialien ermittelt. Diese Werte geben u.a. Rückschluss über das Fließverhalten des gemischten Pulvers und man kann erste Abschätzungen treffen, ob die Mischung einen gleichbleibenden Zustand hat oder z.B. durch Reduzierung der Schüttdichte sich Fraktionen des Pulvers beim Mischvorgang abgesetzt oder verloren gegangen sind.

Auszug aus einem der Prüfberichte (PA3200):

PA3200 GF Datenblattwerte:

Dehnung (X / Y - Richtung): 20 %

Dehnung (Z - Richtung): 10 %

Zugfestigkeit: 50 MPa

E - Modul: 1700 MPa

Probenkennung	Teile - Nr.	Dicke (mm)	Breite (mm)	Dehnung (%)	Zugfestigkeit (Mpa)	E - Modul (Mpa)	Beobachtung
PA 3200 GF	X1	4,189	9,982	4	40,7	2810	Guter Bruch
	X2	4,215	9,982	3,7	40,9	2870	Guter Bruch
	X3	4,093	9,997	3,9	38,9	2860	Guter Bruch
	X4	4,247	10,05	3,6	40,9	2960	Guter Bruch
	X5	4,088	9,993	3,8	10,1	2870	Guter Bruch
	Y1	3,966	10,121	2,9	35,6	2950	Guter Bruch
	Z1	3,922	9,923	1,2	20,7	2350	Bruch außerhalb der Toleranz
	Z2	4,012	9,984	2,3	33,4	2920	Guter Bruch
	Z5	3,95	9,945	2,1	27,9	2440	Bruch außerhalb der Toleranz

Abbildung 3: Auszug aus AMPULS Prüfbericht für PA3200

Anforderungskatalog

Der zuvor erwähnte Anforderungskatalog wurde in enger Zusammenarbeit aller Projektpartner entwickelt. Er umfasst die Definition und Abgrenzung der einzelnen Teilsysteme, wie beispielsweise das Mischen, Lagern und Fördern des Pulvers, die Parameter des Qualitätsmanagements sowie die potenziellen Komponenten für den Aufbau der Anlage. Bei der Auswahl der Komponenten wurde besonderer Wert daraufgelegt, möglichst viele einheitliche Bauteile bei allen Partnern einzusetzen. Dies sollte nicht nur den Austausch der während des Projekts gewonnenen Erkenntnisse erleichtern, sondern auch die Kompatibilität der Bauteile sicherstellen. Darüber hinaus beinhaltet der Anforderungskatalog die Definition des AMPULS-Prozessablaufs, die programmseitige Steuerung sowie die maschinenseitige Integration in die Produktion. Der Anforderungskatalog diente als zentrale Grundlage für alle Arbeitspakete des Projekts und wurde im Verlauf bei Bedarf oder aufgrund neu auftretender Anforderungen flexibel ergänzt oder angepasst. Die folgenden Anforderungen sind ein Ausschnitt aus der Anforderungsdefinition:

- Bessere Arbeitsbedingungen für Produktionsmitarbeiter schaffen
 - o Reduktion von Staub und Mikroplastik durch eine geschlossene Mischanlage
 - o Mit Hilfe Pumpen eine Pulverbeförderung und damit keine schweren Eimer zu tragen
- Unsicherheitsfaktor Mensch eliminieren
 - o Automatische Dokumentation der gemischten Chargen
 - o Digitale Unterstützung für Abwiegen, Berechnen, Mischungsverhältnis und Mischdauer
 - o Integrierter Qualitätsmanager wodurch falsche Materialien mischen etc. ausgeschlossen sind
- Arbeitsaufwand reduzieren
 - o Mehrfaches Umfüllen vermeiden mit einer Pulverbeförderung
 - o Heben der schweren Behälter auf ein Minimum reduzieren
 - o Reinigungsaufwand bei Materialwechsel reduzieren mit einem Selbstreinigungssystem
- Prozesssicherheit gewährleisten
 - o Produktionsmaschinen dürfen nie länger als 30min von der Materialzuführung getrennt sein
 - o Sicheres, nachvollziehbares und reproduzierbares Mischverhältnis
 - o Vermeidung von Fremdkörper im Material
- Gesamthöhe der Maschine
 - o Nicht über 4000mm angestrebt
- Effizienzsteigerung
 - o Arbeitszeit wird reduziert

Alle weiteren Anforderungen, einschließlich der programmseitigen Steuerung und der Anbindung an die Produktion, wurden ebenfalls in den Anforderungskatalog integriert. Diese Anforderungen wurden im Rahmen mehrerer Arbeitstreffen gemeinsam mit allen Projektpartnern abgestimmt und verfeinert.

Zur besseren Verständlichkeit und zur Unterstützung der Entwicklung der AMPULS-Konzepte wurden die Anforderungen anschließend in schematische Darstellungen überführt.

Diese Schemata dienen dazu, die Komplexität zu reduzieren und die Umsetzung der Anforderungen zu erleichtern. Abbildung 4 zeigt das aus diesen Anforderungen abgeleitete Schema für die programmseitigen Anforderungen.

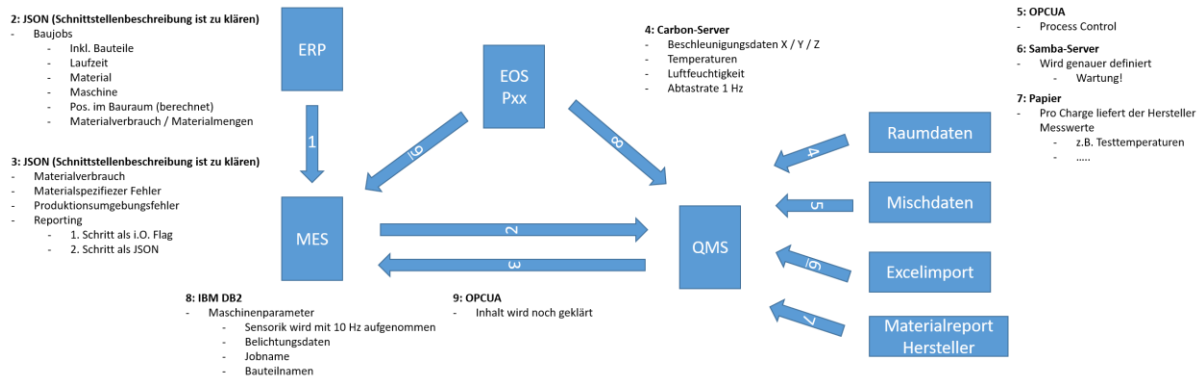


Abbildung 4: Schematische Darstellung der programmseitigen Ansteuerung der AMPULS Anlage

Für die Definition der maschinenseitigen Anbindung an die Produktion wurden die Anforderungen in schematischen Schaubildern dargestellt, die das Konzept visualisieren und im weiteren Projektverlauf als Grundlage für die Auswahl der Komponenten dienen (siehe Abbildung 5).

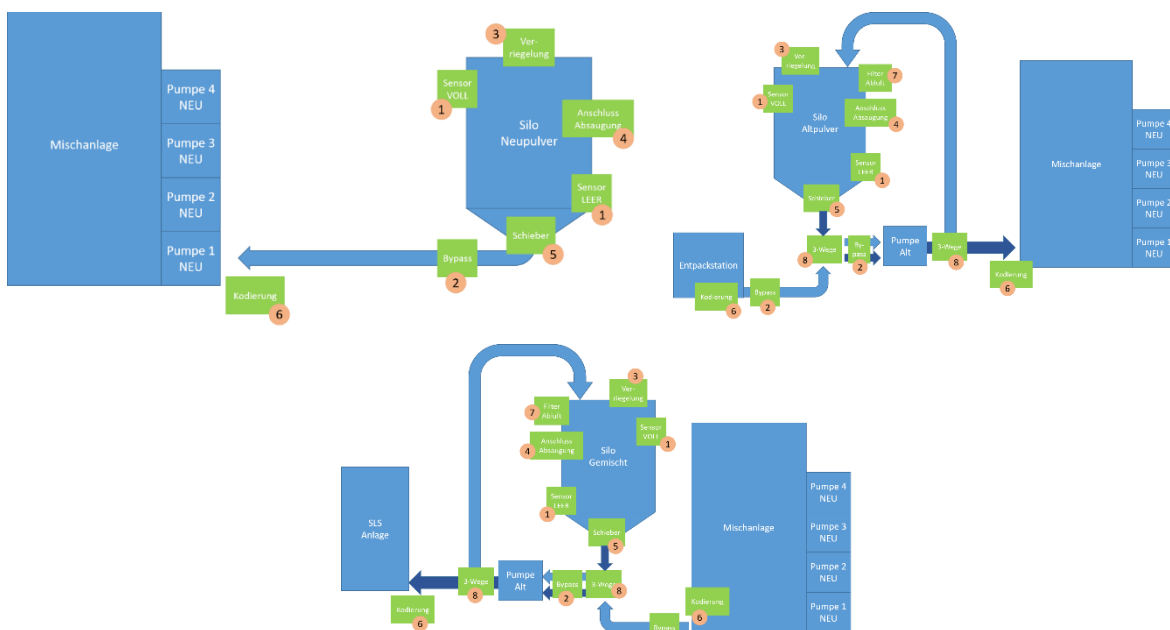


Abbildung 5: Maschinenseitige Anbindung an die Produktion Neu- Alt- Gemischtpulver

Die Anforderungen an den zu entwickelnden Qualitätsmanager wurden zu Projektstart definiert. Die relevantesten sind u.a.:

- Tracking Pulverzustands und der Umgebungsbedingungen über die gesamte Prozesskette
- Modulare Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit des Systems (sowohl Hardware als auch Software)
- Abgriff von möglichst vieler Maschinenkennwerte (Inline)
- Verwendung standardisierten Maschinenprotokollen wie OPC-UA / Mtconnect
- Persistente Datenspeicherung
- Speicherung und Korrelation von Offline-Messungen
- Einfache Visualisierung und Auswertung der erfassten Daten
- Möglichkeit der Anbindung MES / ERP Systeme

Relevante Kenn- und Messgrößen wurden definiert, die durch Sensorik (inline) oder Messanalytik (offline) erfasst werden sollen:

Inline:

- Umgebungsbedingungen an div. Punkten der Produktion:
 - o Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Luftdruck, Vibration, laufende Maschinen im Raum
- Pulvermischung:
 - o Mischungsverhältnisse, Füllstände, Mischzeiten und –Mengen, Fehlermeldungen, Identifikation der Neu- und Altpulverbatches.
- Druckprozess:
 - o Prozesstemperaturen, Laserleistung, Heizungsleistung / el. Leistung, Baujob (Start und Endzeit), Inerte Umgebung im Prozess (N)

Offline:

- Pulvereigenschaften:
 - o Schüttdicht, Schüttkegel, Stampfdichte, Hausnerfaktor, Carr – Indes (Aussage über Fluidisierung und Fließfähigkeit, evtl. eine Größe für die Auslegung von Silo und Zuführungen), Staubung, Spartenwinkel, Kollapswinkel, Feuchtigkeit (gebundene Feuchte im Pulver), Korngrößenverteilung, Schmelzviskosität
- Bauteileigenschaften:
 - o Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung, Schlagzähigkeit, Biegefestigkeit, Biegemodul, Verzug / Geometrietreue, Farbe (Verfärbungen), Oberflächenqualität

I.5 Erzielte Ergebnisse

Gesamtsystem

Das AMPULS-Gesamtsystem bestehend aus Pulversilos, einer Mischanlage und einem Qualitymanagers ermöglicht eine automatisierte und präzise Dosierung sowie die anschließende Homogenisierung zweier Pulvertypen (Neu- und Altpulver) in einem frei wählbaren Mischungsverhältnis. Dabei erfolgt eine sensorbasierte, simultane Überwachung der Mischungsqualität sowie des Pulverzustands. Die erhobenen Sensordaten werden durch einen automatisierten Auswertalgorithmus erfasst, in einer zentralen Datenbank dokumentiert und sowohl den Produktionsmaschinen (SLS-Anlagen) als auch den gefertigten Bauteilen eindeutig zugeordnet. Diese innovative Lösung integriert erstmals alle Stationen des SLS-Produktionsprozesses in ein vollständig geschlossenes System.

In Kombination mit dem im Projekt AMPULS entwickelten Pulverlager- und Handlingsystem wird eine bauteilspezifische Dokumentation qualitätsrelevanter Informationen wie Pulvercharge, Mischqualität und Mischzustand für jede verarbeitende SLS-Produktionsanlage ermöglicht. Dieser Ansatz stellt die vollständige Reproduzierbarkeit und Rückverfolgbarkeit sämtlicher Produktionsschritte sowie der eingestellten Prozessparameter sicher. Die erfassten Informationen dienen nicht nur der internen Qualitätssicherung, sondern bilden auch die Grundlage für eine Zertifizierung der hergestellten Bauteile.

Das AMPULS-System dokumentiert Parameteränderungen automatisch und ermöglicht Sonderprozesseingriffe in jedem Verfahrensschritt. Variable Mischparameter können auf Basis sensorischer und analytischer Werte sowie hinterlegten Erfahrungswissens flexibel angepasst werden. Die Integration eines regelbasierten Systems gewährleistet die quantifizierte Erfassung und weitgehende Automatisierung der Prozessparameter. Dies führt zu einem kürzeren Regelkreis, der frühzeitig in die Pulveraufbereitung eingreifen kann, um die Entstehung von Ausschussteilen zu minimieren.

Das AMPULS-Konzept ist skalierbar und für unterschiedliche Betriebsgrößen sowie Durchsatzmengen anpassbar. Alle Prozessdaten, einschließlich der von Sensoren erfassten Parameter, werden über herstellerunabhängige Schnittstellen bereitgestellt. Diese Daten können in übergeordnete Systeme integriert und für die QM-Dokumentation, die Steuerung gekoppelte Anlagen oder als Qualitätsnachweis für produzierte Bauteile werden.

Ein zentrales Merkmal des AMPULS-Systems ist der geschlossene Pulverkreislauf, der von der Aupackstation bis zu den Produktionsanlagen reicht. Die Wiederaufbereitung von Altpulver erfolgt automatisiert über integrierte Sieb- und Mischsysteme. Manuelle Eingriffe und Pulvertransporte entfallen vollständig, wodurch die Gefahr der Umweltkontamination durch Pulveremissionen eliminiert wird. Mitarbeiter am Arbeitsplatz profitieren von einer signifikanten Reduktion der Staubbelastung, was die Arbeitssicherheit und den Gesundheitsschutz erheblich verbessert.

Das AMPULS-System stellt somit erfolgreich eine umfassende Lösung für die Herausforderungen der SLS-Serienproduktion dar. Es kombiniert modernste Technologien für die Pulveraufbereitung, Qualitätssicherung und Automatisierung, um höchste Effizienz, Nachhaltigkeit und Prozesssicherheit zu gewährleisten. Die Möglichkeit zur lückenlosen Rückverfolgbarkeit und Zertifizierung der Bauteile macht das System zu einem wegweisenden Standard für die additive Fertigung.

Material- Handling und Förderung

Das AMPULS-Konzept für die Integration in Produktionsprozesse, einschließlich Pulverhandling und Pulverlagerung, ist modular aufgebaut. Dieser modulare Ansatz ermöglicht eine flexible und bedarfsgerechte Anpassung des Systems an die spezifischen Anforderungen verschiedener Produktionsumgebungen.

Um das AMPULS-System an unterschiedliche Produktionsanforderungen anzupassen, ist zunächst eine Unterscheidung zwischen den Pulverarten Neupulver, Altpulver und gemischtes Pulver erforderlich. Basierend auf der festgelegten Pulverart wird das benötigte Silo-Volumen bestimmt. Sämtliche volumenabhängigen Baugruppen des AMPULS-Systems sind parametrisch konstruiert, sodass eine automatische Anpassung an unterschiedliche Volumina und damit an variierende Produktionsanforderungen gewährleistet ist. Dieser Prozess ist in Abbildung 6 und Abbildung 7 schematisch dargestellt.



Abbildung 6: Pulversilo für gemischtes Pulver mit 704 Litern Volumen

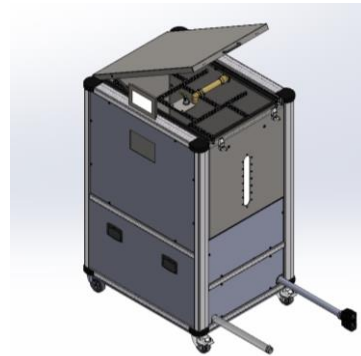


Abbildung 7: Pulversilo für gemischtes Pulver mit 400 Litern Volumen

Die Anpassungen erfolgen automatisiert mittels CAD-Systemen. Nach der Festlegung der volumenspezifischen Baugruppen werden die weiteren für die jeweilige Anwendung erforderlichen Komponenten ergänzt. Die schrittweise Konfiguration des AMPULS-Systems folgt dabei einem klar definierten Prozess:

1. Festlegung der Pulverart (Neupulver, Altpulver oder gemischtes Pulver).
2. Berechnung des erforderlichen Volumens auf Basis der Produktionsanforderungen.
3. Automatische Anpassung der volumenabhängigen Baugruppen mittels parametrischer Konstruktionsmethoden.
4. Ergänzung weiterer Baugruppen, abhängig vom gewählten Silo-Typ.

Ein Silo zur Förderung, Lagerung und Handhabung von Pulver im AMPULS-System besteht typischerweise aus den folgenden Baugruppen:

- Gestell (volumenabhängig)
- Silo (volumenabhängig)
- Steuerung
- Pulverflusssystem
- Filterungseinheit
- Pneumatikkomponenten

- Siloausgang

Die Auswahl und Konfiguration der Baugruppen orientieren sich an spezifischen Anforderungen und erfolgen automatisiert gemäß den parametrischen Konstruktionsprinzipien. Eine exemplarische Darstellung der Auswahl und Zuordnung der Baugruppen zur Silokonfiguration ist in Abbildung 8 aufgeführt.

Auswahltable	Siloart			
	neu	alt	gemischt	
Gestell		x		volumenabhängig
Silo		x		volumenabhängig
Steuerung	x	x	x	
Pulverfluss	x		x	
Filterung	x		x	
Pneumatik	x		x	
Siloausgang		x		

Abbildung 8: Auswahlbeispiel zur Silokonfiguration

Das AMPULS-Konzept zum Pulver- Handling und Förderung zeichnet sich durch seine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit aus. Der modulare Aufbau in Kombination mit automatisierten Anpassungsprozessen ermöglicht eine effiziente Integration des Systems in unterschiedlichste Produktionsumgebungen. Die Parametrisierung der Baugruppen stellt dabei sicher, dass das System sowohl wirtschaftlich als auch technisch optimal auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmt ist.

Pulverdosierung und Homogenisierung Pulvermischen

Die Pulverdosierung und Homogenisierung erfolgt durch effiziente und präzise Handhabung von Alt- und Neupulvern.

Das System umfasst mehrere Schlüsselkomponenten: Förderabscheider, unterlagerte Dosierelemente mit Dosierschnecken, einen Verwiege-Bereich sowie einen Mischbereich. (siehe Abbildung 9).

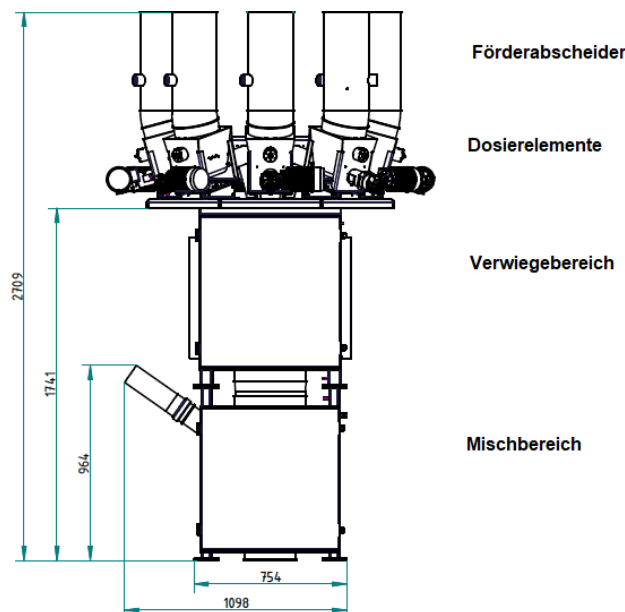


Abbildung 9: Darstellung der AMPULS Mischanlagenbereiche

Die Zuführung von Alt- und Neupulvern zu den jeweiligen Förderabscheidern und damit zu den Dosierelementen erfolgt über den Anschluss an die entsprechenden Pulversilos. Um eine fehlerhafte Zuordnung der Pulversilos zu vermeiden, sind die Schnittstellen entsprechend codiert. Dies gewährleistet eine reibungslose und fehlerfreie Materialzufuhr.

Die Steuerung des Dosier- und Mischsystems ist darauf ausgelegt, die Alt- und Neupulveranteile gemäß der vorgegebenen Rezeptur nacheinander zu dosieren, bis das Zielgewicht in einem staubdichten Wiegebehälter erreicht ist. Die resultierende Charge, die zwar rezepturgetreu, jedoch nicht homogen ist, wird anschließend in die ebenfalls staubdichte Mischkammer abgeworfen.

Dort erfolgt die Homogenisierung der Charge mithilfe eines Rührwerks, welches sicherstellt, dass die Pulverpartikel gleichmäßig verteilt sind. Im Anschluss wird das homogenisierte Material durch ein Ultraschallsieb in einen Absaugbereich geleitet.

Die Schnittstelle im Absaugbereich ist speziell für die „Gemischt-Pulver“-Silos konzipiert, welche die Pulvermischung aufnimmt.

Die Steuerung liefert dem QM präzise Verwiege-Werte für jede einzelne Pulverkomponente sowie für die gesamte Charge. Darüber hinaus werden wichtige Parameter wie Chargengröße, Mischdauer und prozentuale Abweichungen vom Sollwert für das Qualitätsmanagement bereitgestellt.

Die größtmögliche Flexibilität der Pulverdosierung und -homogenisierung im AMPULS-Konzept wird durch den modularen Aufbau der Komponenten gewährleistet. Dies ermöglicht die Erweiterung um zusätzliche Dosierelemente und die Integration verschiedenster Pulvermaterialien. Unterschiedliche Anforderungen können durch gezielte Parametrierung des Systems auf definierte Durchsätze, Chargengrößen und Mischzeiten optimal realisiert werden.

Herstellerunabhängige Schnittstellen

Die Implementierung herstellerunabhängiger Schnittstellen im Projekt AMPULS bietet zahlreiche Vorteile, die sowohl die Effizienz der Prozesse als auch die Flexibilität und Nachhaltigkeit der Systemintegration fördern. Diese Schnittstellen dienen als zentrale Grundlage für die Kommunikation zwischen verschiedenen Systemkomponenten, unabhängig vom jeweiligen Anlagenhersteller, und stellen sicher, dass die Zusammenarbeit der beteiligten AMPULS-Systeme nahtlos erfolgen kann.

Die Verwendung herstellerunabhängiger Schnittstellen im Projekt AMPULS leistet einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Projektziele. Sie ermöglicht nicht nur eine effiziente und flexible Systemintegration, sondern auch eine nachhaltige und zukunftssichere Gestaltung der Produktionsprozesse. Dieser Ansatz unterstützt die langfristige Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsfähigkeit der beteiligten Unternehmen. Die Abbildung 10 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die im Projekt verwendete Schnittstelle und einen Teil Ihrer Dokumentation.

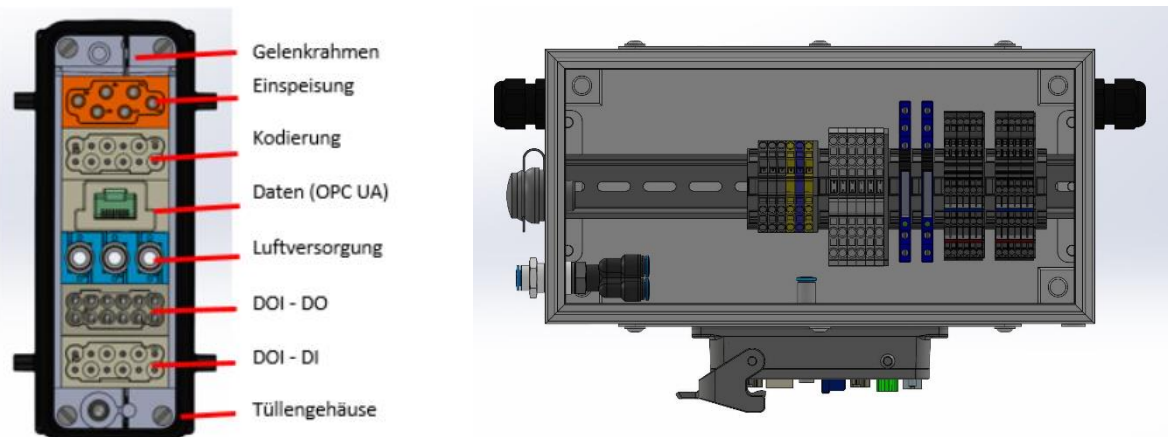


Abbildung 10: Darstellung des AMPULS Schnittstellenstecker und der anlagenseitigen Schnittstelle

Vorteile von herstellerunabhängigen Schnittstellen für AMPULS sind:

Interoperabilität und Flexibilität:

Herstellerunabhängige Schnittstellen ermöglichen eine reibungslose Interoperabilität zwischen den unterschiedlichen AMPULS Anlagenteilen, Softwarelösungen und Komponenten. Dies reduziert die Abhängigkeit von spezifischen Anbietern und ermöglicht den Austausch oder die Integration neuer Technologien ohne umfangreiche Anpassungen. Die Flexibilität in der Wahl der Komponenten unterstützt die Optimierung der Produktionsprozesse und minimiert langfristige Abhängigkeiten.

Standardisierung und Effizienz:

Durch die Verwendung standardisierter Schnittstellen wie z.B. OPCUA wird die Integration und Inbetriebnahme von AMPULS mit verschiedenen SLS-Systemanbietern vereinfacht. Einheitliche Kommunikationsprotokolle und Datenformate reduzieren die Komplexität der Systemarchitektur und ermöglichen schnellere Entwicklungszyklen. Zudem wird der Aufwand für die Anpassung von Schnittstellen bei Systemänderungen erheblich reduziert.

Kosteneinsparungen:

Der Einsatz herstellerunabhängiger Schnittstellen verringert die Notwendigkeit spezifischer proprietärer Lösungen und senkt die Kosten für die Entwicklung und Wartung der Systeme. Darüber hinaus können durch den Wettbewerb zwischen Anbietern von Komponenten und Dienstleistungen wettbewerbsfähigere Preise erzielt werden, wodurch sich die Verwertung der AMPULS—Ergebnisse erheblich vereinfacht.

Nachhaltigkeit und Zukunftssicherheit:

Herstellerunabhängige Schnittstellen fördern die Nachhaltigkeit, indem sie die Wiederverwendbarkeit und Austauschbarkeit von Komponenten sicherstellen. Dies erleichtert zukünftige Upgrades und Anpassungen an neue Anforderungen oder Technologien. Systeme können so flexibel erweitert werden, ohne dass eine vollständige Neuintegration erforderlich ist.

Transparenz und Datenverfügbarkeit:

Die Verwendung einheitlicher Schnittstellen ermöglicht eine bessere Nachvollziehbarkeit und Überwachung der Prozessdaten. Dies verbessert die Qualitätssicherung und erleichtert die Implementierung von datenbasierten Optimierungen, wie beispielsweise im Bereich des Qualitätsmanagements (Qualitymanager).

Interne Datenschnittstellen

Um die Bereitstellung von Echtzeitdaten für die Datenbanken des Qualitymanagers (vgl. Kapitel Qualitymanager) zu ermöglichen, ist eine nahtlose Verbindung der verschiedenen Einzelstationen erforderlich. Die Konnektivität wird über standardisierte Industrial Internet of Things (IIoT)-Protokolle hergestellt, in dieser Applikation OPC-UA (Drucker und Sieb- und Mischstation), MQTT (Umgebungssensoren) und Modbus TCP (Silos). Um eine skalierbare Infrastruktur zu gewährleisten, wird auch für die Maschinenanbindung eine containerisierte Applikation aufgebaut unter Verwendung von Docker. Angesichts der verschiedenen unterstützten Kommunikationsschnittstellen wird für jede Station ein eigener Telegraf-Container konfiguriert, der die Echtzeitdaten erfasst und an die zugehörige Datenbank überträgt. Telegraf ist ein Open-Source-Server-Agent, der Metriken und Ereignisse von Datenbanken, Systemen und IoT-Sensoren erfasst und überträgt. Die Implementierung erfolgt entsprechend des nötigen Kommunikationsprotokolls. Die containerisierte Applikation und stationspezifischen Kommunikation verleiht den einzelnen Stationen die erforderliche Unabhängigkeit und stellt sicher, dass die Funktionalität des Systems auch bei einem Ausfall einer Station erhalten bleibt. Abbildung 11 zeigt schematisch das Konzept zur Maschinenanbindung an den Qualitätsmanager.

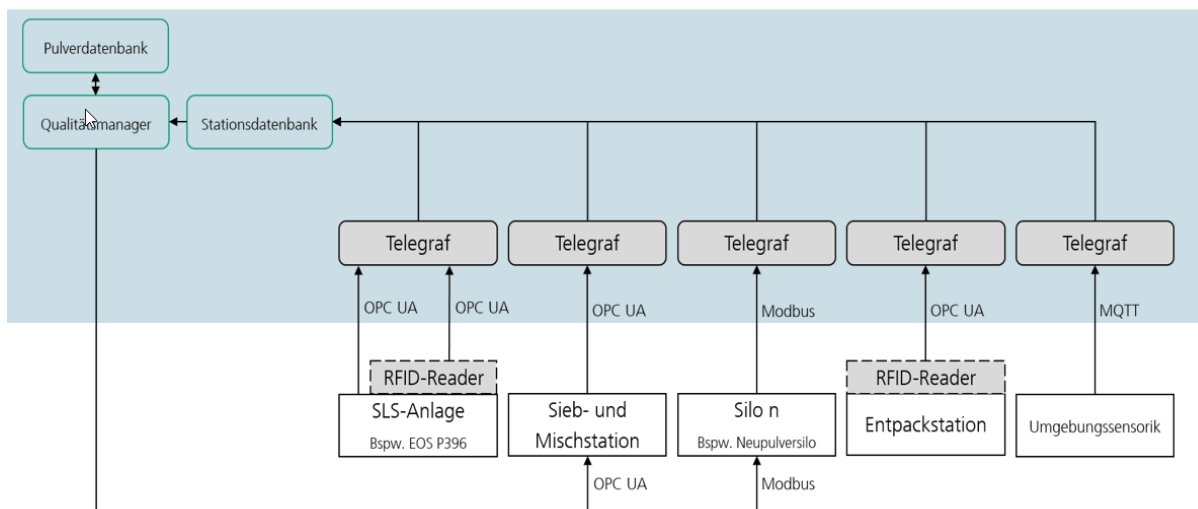


Abbildung 11: Anbindung der Maschinen an das Datenbanksystem über Kommunikationsschnittstellen

Die in Abbildung 11 grau unterlegten Telegraf-Container sind jeweils für das Erfassen der Metriken einer Station zuständig und übermittelt diese an die Stationsdatenbank des Qualitätsmanagers (grün umrandet) weiter.

Obwohl die EOS Druckersteuerungen über OPC-UA Statusinformationen zum Maschinenzustand und Druckprozess liefern, können sie den entnehmbaren Wechselrahmen nicht identifizieren. Aktuell verfügt die Entpackstation auch über keine Steuerung. Für eine lückenlose Rückverfolgbarkeit des Pulvers ist es notwendig, diese Stationen so zu erweitern, dass die Wechselrahmen an den einzelnen Stationen identifiziert werden können. Hierzu wurden verschiedene Optionen evaluiert, wobei optische Scanner aufgrund von Pulverschmutzungen an den Außenflächen des Wechselrahmens als ungeeignet eingestuft wurden. Die Drucker und Entpackstationen werden mit autarken RFID-Lesegeräten ausgestattet, die die RFID-Tags an den Wechselrahmen auslesen. Diese Tags ermöglichen die Identifizierung des Druckerraums und die Zuordnung des Pulvers zu den Druckaufträgen. Bei der Auswahl der Lesegeräte wurden Normen wie elektromagnetische Verträglichkeit (EN 301489-3), Vibrationsfestigkeit (EN 60068-2-6:2007), Schockfestigkeit (EN 60068-2-27:2008) und Schutzklasse IP67 für Staubfestigkeit berücksichtigt. Die OPC UA Schnittstelle wurde für die Integration in bestehende Systeme priorisiert. Die IronTAG UHF-Tags von HID wurden aufgrund ihrer Kompaktheit und hohen Temperaturbeständigkeit (400 Stunden bei 180°C) ausgewählt.

Die verschiedenen Kommunikationsprotokolle zur Interaktion mit den Stationen wurden in initialen Demo Szenarien getestet und validiert. Für die OPC UA Kommunikation wurde ein Server implementiert, der verschiedene Sensordaten eines realen EOS-Druckers zur Verfügung stellt. Diese Daten wurden anschließend mittels OPC UA Client abgegriffen und in eine Influx-Datenbank gespeichert, die entsprechend dem oben beschriebenen Konzept einen Bucket und eine Messreihe enthält. Geprüft wurde, ob die Daten korrekt in der Datenbank abgelegt werden und ob sie für eine nachfolgende Auswertung zugänglich sind. Die Kommunikation mit der Steuerung (SPS) der Silos findet über Modbus-TCP Schnittstellen angesteuert werden können. Mittels einer Modbus Clients wird eine Verbindung zu der entsprechenden SPS (Controllino) aufgebaut, die Daten abgegriffen und in einer Influx-Datenbank gespeichert. Getestet wurde, dass die Daten korrekt abgelegt werden und zugänglich sind. Die Clients und die Datenbank sind wie im Konzept vorgesehen in separaten Docker Containern angelegt. Jeder Container kann unabhängig von den anderen gestartet und beendet werden. Geprüft wurde zudem das Verhalten bei einem Verbindungsabbruch, sollten Client oder Server nicht erreichbar sein. Ziel ist es, dass sich die Verbindung automatisch erneut aufbaut. Dafür wird zyklisch geprüft, ob der Server wieder erreichbar ist und eine Verbindung etabliert werden kann. Sollte der Client neu gestartet werden, baut auch dieser automatisch beim Neustart die Verbindung zum Server wieder auf. Sollte die Datenbank nicht erreichbar sein, wird auch hier zyklisch geprüft, ob Daten erneut geschrieben werden können. Die Kommunikation mit den Umgebungssensoren (Luftfeuchte, Temperatur) erfolgt über das MQTT-Protokoll. Zur Überprüfung dieser Prozesse wurde ein Telegraf-Container eingerichtet. Es wurde erfolgreich getestet, ob die Daten ordnungsgemäß abgelegt werden und zugänglich sind.

Qualitätsmanager

Das beinhaltet die Überwachung und Freigabe der Pulverführung über die einzelnen Prozessstationen, sowie einer Chargenrückverfolgbarkeit über die einzelnen Prozesse (siehe Abbildung 1). Der Prozesskreislauf des Pulvers wurde analysiert und schematisch dargestellt (Siehe Abbildung 12). Für die einzelnen Stationen wurde untersucht, welche Daten gespeichert werden müssen und wann Prozessfreigaben erteilt werden können, sowie welche Informationen nötig sind, um das Pulver durch den gesamten Kreislauf verfolgen zu können. Berücksichtigt wurde die Verfolgung des Neu- und Altpulvers von Beginn bis Ende des Prozesses, sowie die Zusammensetzung des Altpulvers aus den verschiedenen Kreisläufen.

Das Konzept sieht vor möglichst allumfassende Daten der Stationen und der Umgebung zu sammeln. Der Qualitätsmanager beinhaltet dazu ein Datenbanksystem, dass all diese Informationen speichern und zuordnen kann, sowie verschiedene Kommunikationsschnittstellen um Zugriff auf die Sensor-/Maschinendaten zu erlangen.

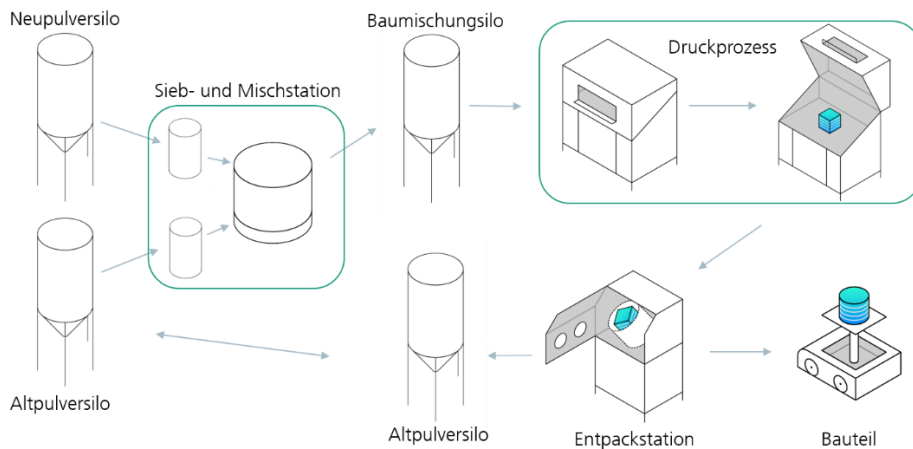


Abbildung 12: Pulverkreislauf durch die einzelnen Prozessstationen

Für den Qualitätsmanager wird der Prozessbeginn als der Mischvorgang aus Neu- und Altpulver definiert, um daraus eine Zuordnung der gesammelten Daten ableiten zu können. Das Neupulversilo wird händisch befüllt und die Chargen ID des eingefüllten Pulvers erfasst. Im Mischer wird dann Alt- und Neupulver gemischt und in den Produktionskreislauf gegeben. Das Pulver durchläuft in diesem Prozess verschiedene Stationen von Druckprozess, über entpacken, sieben und anschließend Rückführung in das Altpulversilo. All diese Stationen werden im Qualitätsmanager berücksichtigt.

Das entwickelte Konzept für das Datenbanksystem setzt sich folgendermaßen zusammen: verwendet wird Docker als containerisierte Applikation zum modularen Aufbau des Systems, um bei Bedarf weitere Stationen hinzuzufügen oder ändern zu können. Jede Applikation des Qualitätsmanagers läuft in einem separaten Container, welcher über Schnittstellen nach außen kommunizieren kann. Der Qualitätsmanager setzt sich aus einem Datenbanksystem, Datenakquise Services und einer Auswerteeinheit zusammen.

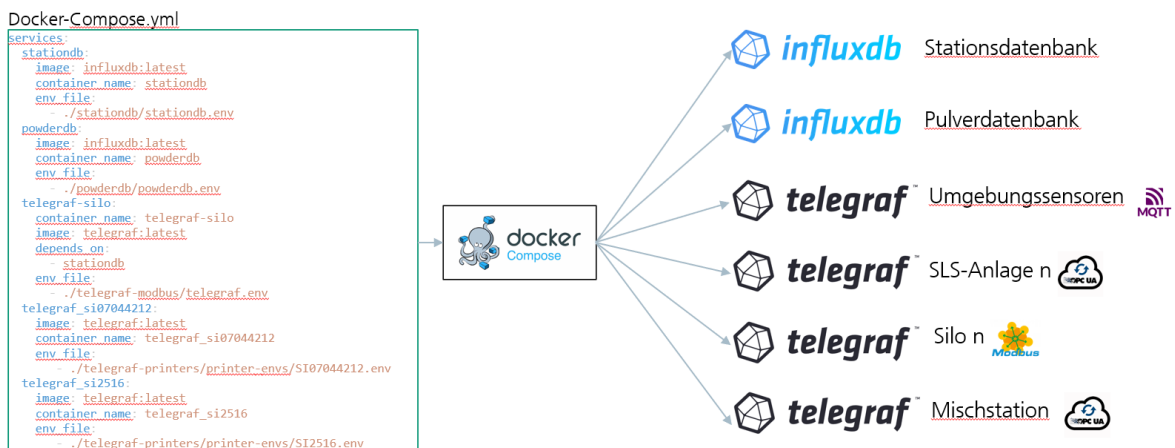


Abbildung 13: Schematischer Aufbau der einzelnen Applikationsbestandteile des Qualitymanager mittels Docker Container

Das Datenbanksystem setzt sich aus zwei Influx-Datenbanken zusammen. Die erste Datenbank beinhaltet die Daten zu den einzelnen Stationen, die zweite Datenbank beinhaltet die Informationen zu den Pulverchargen. Die Verknüpfung der Daten erfolgt über eine eindeutige ID. Diese ID wird als Kreislauf-ID beim Mischprozess festgelegt und für jedes Datenpaket mitverfolgt (siehe unten in Abbildung 15). In Abbildung 14 sind diese beiden Datenbanktypen beispielhaft an zwei Stationen aufgeführt und der Zusammenhang zur Pulverdatenbank schematisch über Pfeile dargestellt.

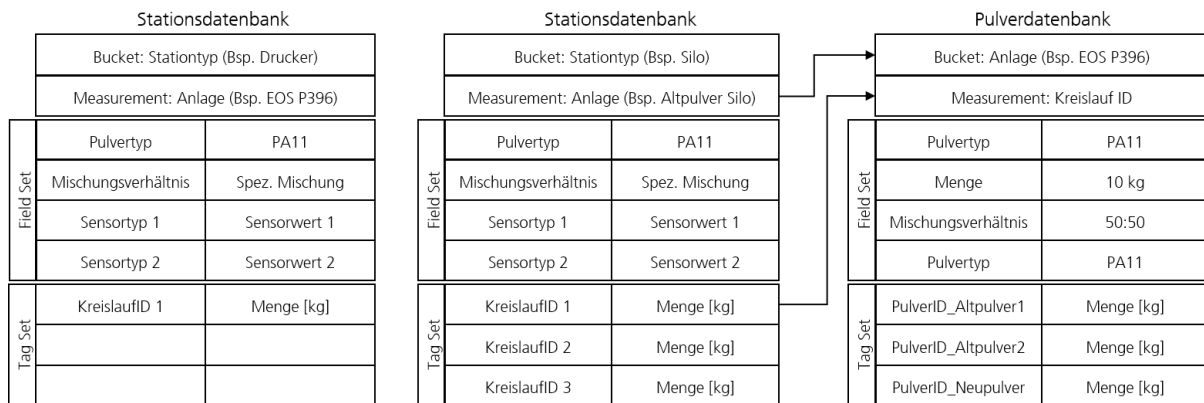


Abbildung 14: Datenbank-System mit bspw. zwei Stationen und einer Pulvercharge

Jeder Station (Bsp. Drucker) wird ein sogenannter Bucket zugewiesen, der wiederum die Messreihen spezifisch für jede Station dieses Typs (Bsp. EOS P396) beinhaltet. In der Messreihe sind wiederum die in der Station enthaltenen Sensordaten (Bsp. Temperatur), sowie der enthaltene Pulvertyp (Bsp. PA11) gespeichert. Die Verbindung zur Pulverdatenbank wird über die beim Prozessbeginn erstellte Kreislauf-ID (siehe nächster Abschnitt) hergestellt. Diese Kreislauf-ID weist in der Pulverdatenbank auf die zugehörigen Pulverdaten (Menge, Mischung, Typ und enthaltene Pulverchargen). Dargestellt ist das in Abbildung 14 über die Pfeile. Die Generierung der Kreislauf-ID und daraus ableitende Rückverfolgbarkeit innerhalb des Prozesses ist in Abbildung 15 dargestellt.

Die Kreislauf-ID wird in der Mischstation erstellt und anschließend in allen nachfolgenden Stationen als Identifikation verwendet. Zum Ende des Prozesses, wenn das überschüssige Pulver zum Altpulver hinzugefügt wird, wird die Kreislauf-ID zur neuen Altpulver-ID. Dadurch bleibt der Inhalt dieser Altpulvercharge weiterhin bekannt und eine Nachverfolgung des Alterungszustandes des enthaltenen Pulvers ist möglich.

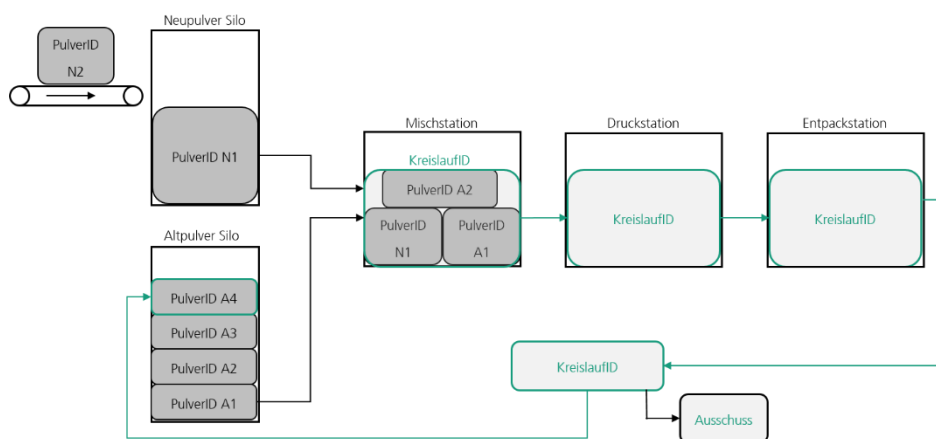


Abbildung 15: Kreislauf-ID Generierung und Rückverfolgbarkeit

Nach der Aufnahme und Speicherung der (Pulver-)Daten in dem Datenbanksystem müssen diese zur Laufzeit ausgewertet und entsprechende Handlungen ausgelöst werden. Dafür wurde der Prozessablauf skizziert und die sich in jedem Prozessschritt ableitenden Handlungen zur Verarbeitung der Daten konzeptioniert.

a : Anteil Altpulver in Mischung
 n : Anteil Neupulver in Mischung
 z : Anzahl der Mischungszyklen
 p_i : i -te Pulvermischung
 x : Bezeichnung Altpulver
 y_i : gealtertes Neupulver (neuer Anteil in Altpulver)
 y : Bezeichnung Neupulver

$$p_i = \underbrace{\left(\frac{a}{100}\right)^i x}_{\text{Alt-Pulver}} + \underbrace{\sum_{i=1}^z \frac{a^{i-1} n}{100^i} y_i}_{\text{Neupulver Auffrischung (mit Alterung für } i > 1)}} \quad \text{mit } i \geq 1$$

$$p_i = \underbrace{\left(\frac{a}{100}\right)^i x}_{\text{Alt-Pulver}} + \underbrace{\sum_{i=2}^z \frac{a^{i-1} n}{100^i} y_i}_{\text{Auffrischungen gealtert (wird erst ab } i = 2 \text{ berücksichtigt)}} + \underbrace{\frac{n}{100} y}_{\text{Neu-Pulver}} \quad \text{mit } i \geq 1$$

Andere Darstellung zur Auftrennung Alt-/Neupulver

Abbildung 16: Berechnung des statischen Altpulveranteils in einer gemischten Pulvercharge nach z Zyklen

Mit der Datenbasis des Datenbanksystems und dem hergeleiteten Berechnungsalgorithmus (siehe Abbildung 16) kann die prozentuale Pulverzusammensetzung einer Pulvercharge berechnet werden und in Folge den entsprechenden Druckjob(s) zugeordnet werden. Somit kann erstmal eine Aussage getroffen werden, welche Pulverhistorie prozentual in einem Baujob verwendet wurde und entsprechend auch den Bauteilen zugeordnet werden.

Nachfolgende Abbildung 17 zeigt den Prozessablauf, Steuerung und Freigabeschritte der Datenauswertung und Interaktion mit den Prozessstationen. Farblich markiert sind die Daten Ein- und Ausgabeschritte im Auswertesystems. Wichtig für das Pulversystem sind vor allem die jeweiligen Freigaben der Stationen, wenn die Daten korrekt sind und eine Weiterverarbeitung des Pulvers bestätigt wird. Diese Freigaben stellen sicher, dass keine falsche Pulvermischung in eine Station gefüllt wird oder unbeabsichtigte Mischungen entstehen.

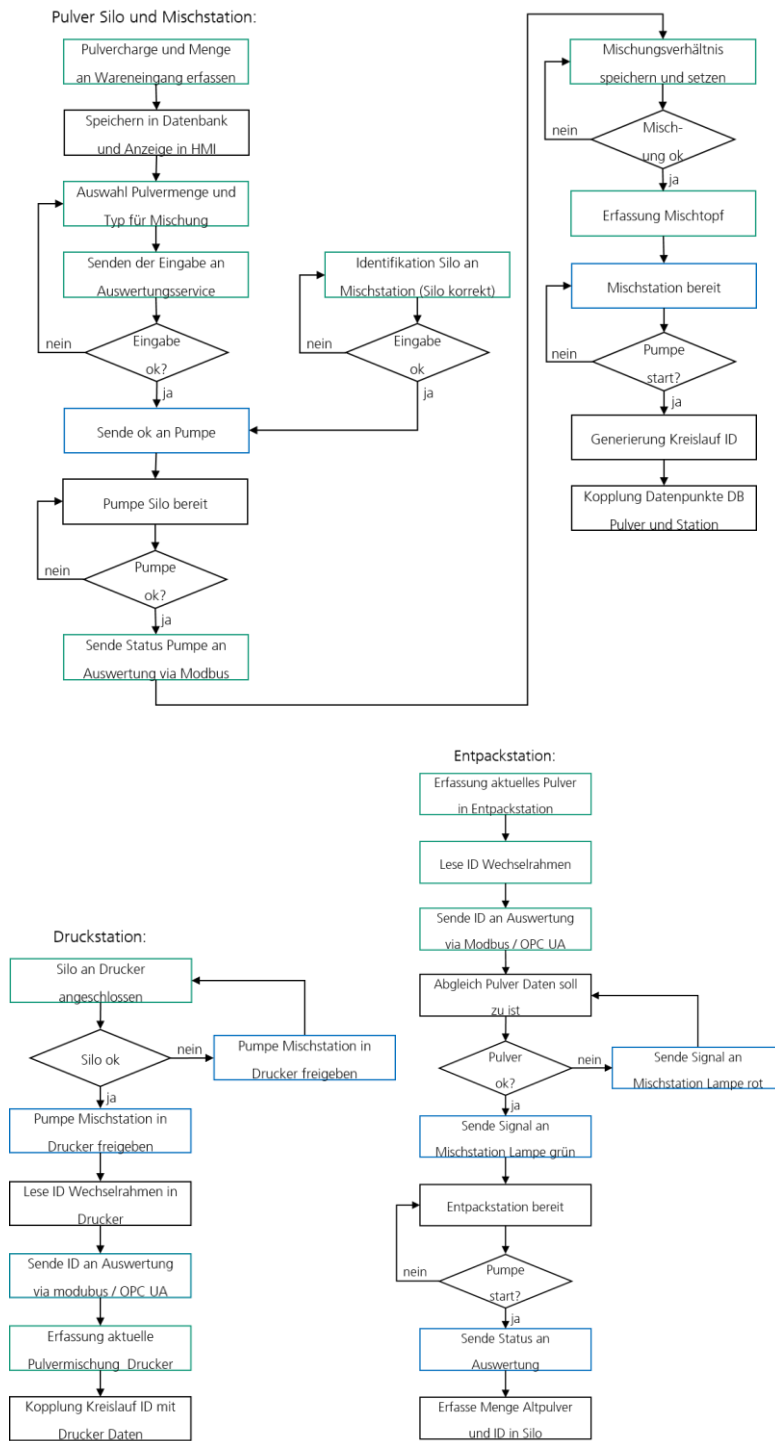


Abbildung 17: Prozessablauf Datenmanagement für einzelne Stationen (Misch-, Druck-, Entpackstation)

Die erfassten und ausgewerteten Daten des Qualitymanagers können über eine Weboberfläche visualisiert werden (siehe Abbildung 18).

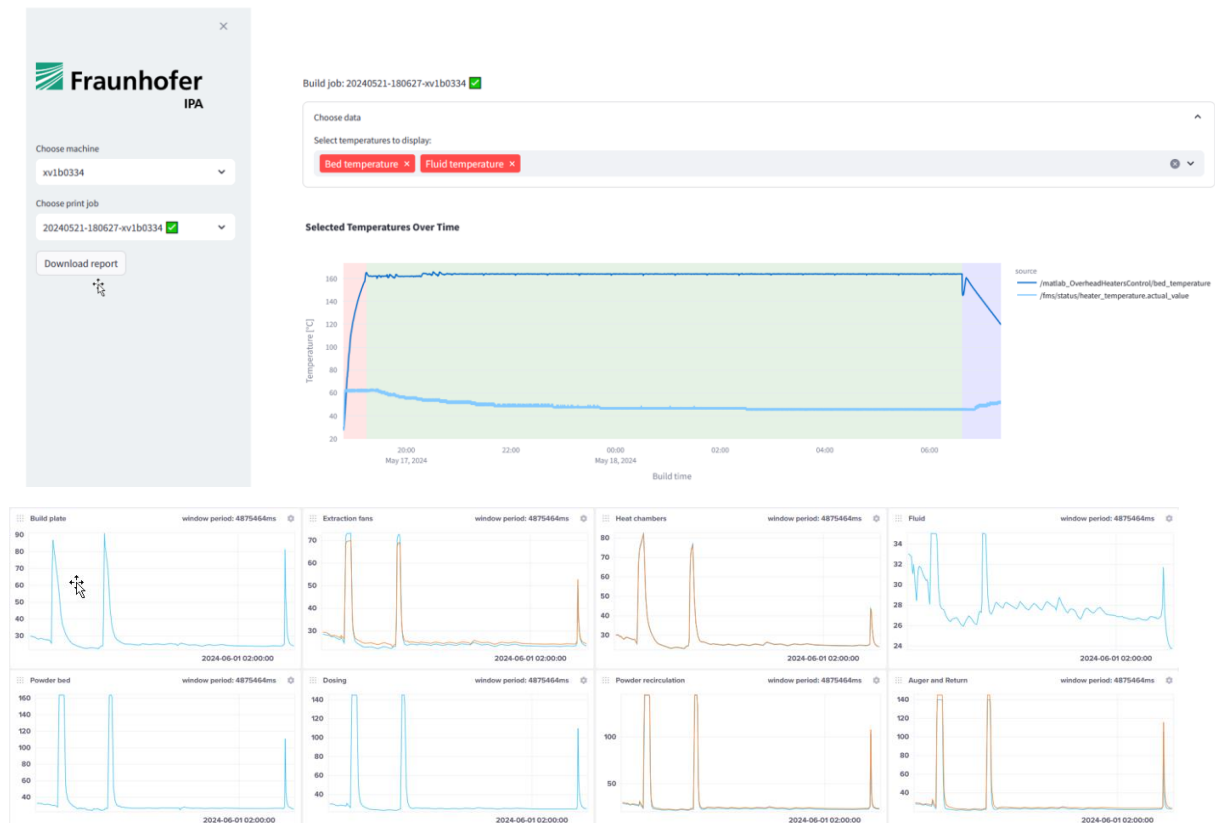


Abbildung 18: Benutzeroberfläche des Qualitymanagers mit Zuordnung der Prozess- und Umgebungsdaten zu Druckjobs

Validierung

Mit einem ersten Anlagenprototypen eines Mischsystem, konnten Referenzmischungen in einer Batchgröße von ca. 80kg aus PA2200 (PA12) erstellt. Aus Kostengründen wurde entschieden Tests nur für das Standardpulver PA2200 durchzuführen und nicht für alle 3 Pulver wie in Arbeitspaket A6 vorgesehen. In Abbildung 19 ist das Mischsystem der Firma Process Control während der Mischversuche dargestellt.



Abbildung 19: Anlagenprototyp des Mischsystems bei der Firma Process Control während der Mischversuche

Aus dieser Pulvermischung wurde am Fraunhofer IPA, genau wie in Arbeitspaket A6 schon bei der Firma cirp, mehrere Testdruckjobs auf einer EOS P396 mit diversen Probekörpern (Dichtkörper, Formkörper und Zugprüfkörpern) hergestellt. Im ersten Schritt der Analyse wurden die gedruckten Zugprüfkörper am Fraunhofer IPA mittels Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-1 geprüft (E-Modul, Bruchdehnung, Zugfestigkeit). Die Ergebnisse werden in Abbildung 20 dargestellt. Anhand der Daten ist zu erkennen, dass es keine Veränderungen der Festigkeit zu den ersten Ergebnissen der Referenzdrucks gab.

	Referenz		AMPULS		
	Untersuchung	PA 2200 (Messwert)	Untersuchung	PA 2200 (Messwert)	
Pulver-eigenschaften	Schüttwinkel	32,56°	Schüttwinkel	34,21°	
	Schüttdichte	0,41 g / cm ³	Schüttdichte	0,43 g / cm ³	
	Stampfdichte	0,51 g / cm ³	Stampfdichte	0,52 g / cm ³	
Bauteil-eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Rauheit Ra: 11,9 ± 0,7 µm Rauheit Rz: 71,1 ± 5,6 µm 		<ul style="list-style-type: none"> Rauheit Ra: 11,3 ± 0,8 µm Rauheit Rz: 69,6 ± 7,0 µm 		
	<ul style="list-style-type: none"> Zugfestigkeit: 46,12 Mpa 		<ul style="list-style-type: none"> Zugfestigkeit: 50,55 Mpa 		
	<ul style="list-style-type: none"> Dehnung: 8,13% 		<ul style="list-style-type: none"> Dehnung: 7,93% 		

Testreihe	Zugfestigkeit			Dehnung			Bemerkung
	Baurichtung	Mittelwert	Standardabweichung	Dehnung	Mittelwert	Standardabweichung	
cirp 11.2022	X	46,26	0,93	X	7,95	1,20	Mischung PA12 50/50 cirp
	Y	46,58	0,77	Y	8,39	0,97	
	Z	45,24	0,72	Z	7,84	1,27	
	ZX	46,38	0,71	ZX	8,33	0,47	
IPA 07.2023	X	51,13	1,47	X	8,70	0,07	Mischung PA12 von PC
	Y	51,00	0,57	Y	9,05	0,16	
	Z	49,81	0,92	Z	5,54	0,57	
	ZX	50,26	0,40	ZX	8,43	0,29	

Abbildung 20: Ergebnisse der Zugversuche (Referenz) von cirp 2022 im Vergleich zu den Ergebnissen des AMPULS Systems

Zusammenfassung

Der Entwicklungsstand im Projekt AMPULS belegt die Machbarkeit eines vollständig geschlossenen Fertigungsprozesses zum Pulvermischen mehrerer Materialien. Dabei werden verschiedene Sensor- und Prozessdaten im Qualitymanager verknüpft und das neue AMPULS-Konzept genutzt. Die produzierten Evaluierungsbaujobs und durchgeführten Messungen zeigen zudem, dass die grundlegenden Anforderungen an den Prozess und die neu entwickelten Anlagen erfolgreich erfüllt wurden. Zu Beginn des Projekts wurden mehrere Produktionsanlagen qualifiziert und der Ist-Zustand dokumentiert. Auf dieser Grundlage wurde ein Anforderungsprofil für den neuen Prozess sowie die Anlagentechnik erstellt. Dieses Profil diente als Basis für die Entwicklung von Versuchsdemonstratoren, an denen die weiterführende Prozessentwicklung durchgeführt wurde. Zwischenergebnisse von den Versuchsdemonstratoren wurden fortlaufend evaluiert, um die gesamte AMPULS-Prozesskette schrittweise zu demonstrieren.

Zur Prozessoptimierung und zur kontinuierlichen Steigerung der Anlagen- und Endproduktqualität sowie der Vermarktungs- und Einsatzfähigkeit wurden zwei zentrale Maßnahmen umgesetzt: die Entwicklung eines parametrischen Konstruktionstools und eine umfassende Markt- und Kundenrecherche, unter anderem auf verschiedenen Fachmessen der Industrie.

Mit diesen vielseitigen Werkzeugen werden kleine und mittelständische Unternehmen in Deutschland befähigt, die additive Fertigung mit dem pulverbasierten SLS-Verfahren nahtlos und automatisiert in ihre Prozesse zu integrieren, weiter zu optimieren oder als Grundlage für nachgelagerte Prozesse zu nutzen.

I.6 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Im Verlauf der Durchführung des Vorhabens wurden dem AMPULS-Konsortium keine relevanten Fortschritte Dritter bekannt.

I.7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der neue AMPULS-Prozess und die Anlagentechnik werden anschließend auf industrielle Maßstäbe skaliert, beispielsweise durch eine erweiterte Integration von Sensordaten. Dies erleichtert die hochkomplexe Serienfertigung im SLS-Verfahren erheblich. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die mehrere Anlagen betreiben, profitieren von der Entlastung des Fachpersonals, der Reduzierung der Ausschussrate und der hohen Flexibilität der herstellerunabhängigen AMPULS-Anlagentechnik.

Das Anlagenkonzept ermöglicht zudem die Verarbeitung einer Vielzahl von Materialien, wobei qualitätsrelevante Prozessparameter erfasst und aufbereitet werden. Derzeit laufen mehrere Gespräche mit Interessenten für das Gesamtsystem AMPULS, um breite Systeme in den Markt der additiven Fertigung zu integrieren.

Die Übertragbarkeit und Weiterentwicklung der entwickelten Software auf andere Produkte und Prozesse wurde im Projekt bereits berücksichtigt, um einen kontinuierlichen Wissenszuwachs zu gewährleisten. Die Ergebnisse fließen auch in Studium und Lehre ein, um den Wissenstransfer zu fördern und Raum für neue Ideen und Potenziale bei der Weiterentwicklung der AMPULS-Technologie zu schaffen.

I.8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes hat nicht stattgefunden.

I.9 Veröffentlichungen, Vorträge

AMPULS wurde im Rahmen von regelmäßigen Laborführungen, Akquisitions- und Projektaktivitäten sowie Netzwerkveranstaltungen vorgestellt, erläutert und diskutiert. Die Ergebnisse wurden von den Partnern auf folgenden Messen präsentiert:

- Formnext 2023, Frankfurt – Fraunhofer Gemeinschaftstand Halle 11.0, Stand D31 / Cirp GmbH Halle 12.1, Stand C01
- Formnext 2024, Frankfurt – Fraunhofer Gemeinschaftstand Halle 11.0, Stand D31/ Cirp GmbH Halle 12.1, Stand C01
- Fakuma 2023 Process Control GmbH
- Fakuma 2024 Process Control GmbH
- AM Forum 2024, Berlin – Fraunhofer IPA
- Jubiläumsfeier cirp GmbH, September 2024

Als Grundlage hierfür und für zukünftige Aktivitäten und öffentliche Auftritte wurden Demonstratoren und Informationsmaterial zwischen den Partnern ausgetauscht.

Das Softwarekonzept wurde erstmals 2023 auf der Konferenz DDMC 2024 vorgestellt und im Springer Verlag in der Zeitschrift "Progress in Additive Manufacturing" als Open Access Version veröffentlicht (Michalkowski et. al., "Concept for a generic modular software architecture for the integration of quality relevant data and sample implementation for a laser sintering system", <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00390-8>).

Darüber hinaus sind die Ergebnisse in die Mastervorlesung (Wintersemester 2024/2025) im Fachbereich Maschinenbau „Industrielle Prozessketten und Anwendungen für die Additive Fertigung“ an der Universität Stuttgart eingeflossen.

I.10 Abbildungen

Abbildung 1: Entwicklungsbedarf in AMPULS.....	4
Abbildung 2: AMPULS Benchmark-Baujob	6
Abbildung 3: Auszug aus AMPULS Prüfbericht für PA3200	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung der programmseitigen Ansteuerung der AMPULS Anlage ...	10
Abbildung 5: Maschinenseitige Anbindung an die Produktion Neu- Alt- Gemischtpulver.....	10
Abbildung 6: Pulversilo für gemischtes Pulver mit 704 Litern Volumen	13
Abbildung 7: Pulversilo für gemischtes Pulver mit 400 Litern Volumen	13
Abbildung 8: Auswahlbeispiel zur Silokonfiguration	14
Abbildung 9: Darstellung der AMPULS Mischanlagenbereiche	14
Abbildung 10: Darstellung des AMPULS Schnittstellenstecker und der anlagenseitigen Schnittstelle	16
Abbildung 11:Anbindung der Maschinen an das Datenbanksystem über Kommunikationsschnittstellen	17
Abbildung 12: Pulverkreislauf durch die einzelnen Prozessstationen.....	19
Abbildung 13: Schematischer Aufbau der einzelnen Applikationsbestandteile des Qualitymanager mittels Docker Container	19
Abbildung 14: Datenbank-System mit bspw. zwei Stationen und einer Pulvercharge.....	20
Abbildung 15: Kreislauf-ID Generierung und Rückverfolgbarkeit.....	20
Abbildung 16: Berechnung des statischen Altpulveranteils in einer gemischten Pulvercharge nach z Zyklen	21
Abbildung 17: Prozessablauf Datenmanagement für einzelne Stationen (Misch-, Druck-, Entpackstation)	22
Abbildung 18: Benutzeroberfläche des Qualitymanagers mit Zuordnung der Prozess- und Umgebungsdaten zu Druckjobs	23
Abbildung 19: Analgenprototyp des Mischsystems bei der Firma Process Control während der Mischversuche.....	23
Abbildung 20: Ergebnisse der Zugversuche (Referenz) von cirp 2022 im Vergleich zu den Ergebnissen des AMPULS Systems	24