

Digitale Nachverfolgung der Werkstoff- und Prozessdaten für die additive Fertigung im Pulverbett

Vernetzte Produktion im 3D-Druck

B. Ringel, A. Raber, M. Lubert, L. Trauner, J. Berlak, G. Schlick, C. Gonnermann, J. Schilp

ZUSAMMENFASSUNG Bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren wird der eingesetzte Pulverwerkstoff nicht vollständig verfestigt. Unverbrauchtes Material kann je nach Zustand wiederverwendet werden. Die Nachverfolgung über die Prozesskette, vor allem in der Multi-Materialfertigung, ist jedoch mit hoher Komplexität verbunden. Ein zugeschnittenes Manufacturing Execution System (MES) soll die behälterspezifische Nachverfolgung ermöglichen. Weiter sollen Maschinenzustands- und Prozessüberwachungsdaten automatisiert den Aufträgen zugeordnet werden.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Manufacturing Execution System (MES), Digitalisierung

Digital production for 3d-printing – Digital traceability of feedstock and process data for powder-based additive manufacturing

ABSTRACT In powder bed-based manufacturing processes, the powder feedstock is not completely solidified. Unused material can be reused depending on its condition. However, the complexity of tracking along the process chain, especially in multi-material production, is significant. A customized Manufacturing Execution System (MES) is intended to enable bin-specific tracking. In addition, machine status and process monitoring data are to be automatically assigned to orders.

1 Einleitung und Motivation

Das Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M) ist derzeit das dominierende additive Fertigungsverfahren für die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen [1]. Gründe sind die Vielfalt verfügbarer Systeme und Materialien, hohe Abbildungsgenauigkeit und der hohe Industrialisierungsgrad. Dem Verfahren wird häufig ein ressourcenschonender Charakter zugeschrieben. In dem schichtweisen Prozess wird überwiegend nur das Material (Pulverwerkstoff) aufgeschmolzen und verfestigt, welches Bestandteil der Bauteile werden soll. Überschüssiges Material kann für weitere Fertigungsaufträge wiederverwendet werden, sofern dieses die notwendigen Anforderungen erfüllt [2, 3].

Durch die mehrmalige Verwendung, Lagerung und Handhabung können sich die Werkstoffeigenschaften des Pulvers verändern. Häufig wird daher bereits verwendetes Material bei der Wiederaufbereitung mit Neupulver angereichert oder die Anzahl der Verwendungen einer Charge limitiert, um die Auswirkungen möglicher Veränderungen zu verringern [4]. Bei Nichterfüllung der zulässigen Grenzen vorgegebener Spezifikation kann der Werkstoff durch vollständiges Einschmelzen und erneute Umwandlung in Pulverform für die additive Fertigung (AM) zurückgewonnen werden.

Pulverbettverfahren stellen hohe Anforderungen an die Pulvereigenschaften. Es müssen metallurgische Eigenschaften (etwa die chemische Zusammensetzung) erfüllt und die Verarbeitbarkeit, insbesondere der Schichtauftrag, ermöglicht werden [5–7]. Dazu ist eine gute Fließfähigkeit nötig, welche maßgeblich

durch die Größenverteilung und die Sphärizität der Partikel bestimmt wird. Zur Werkstoffherstellung wird häufig das Inertgasverdüsen eingesetzt, das diese Anforderungen erfüllt [8]. Hierbei entstehen meist breitere Partikelgrößenverteilungen als benötigt werden, wodurch die Ausbeute geringer als die eingesetzte Materialmenge ausfällt [9]. Realistisch sind Ausbeuten im Bereich von etwa 30–50 % [10].

Um tatsächlich ressourcenschonend zu arbeiten, muss die Wiederverwendungsquote folglich möglichst nahe 100 % liegen. Durch das energie- und gasintensive Verdüsen liegen auch die Materialkosten im Vergleich zu Halbzeugen für konventionelle Fertigungsverfahren häufig höher. Eine für das PBF-LB/M geeignete Pulverfraktion von 20–53 µm kostet beispielsweise knapp 40 Euro je Kilogramm (CrNi-Stahl 1.4404). Für warmgewalzte Rundstäbe aus dem gleichen Material fallen weniger als 10 Euro an. Um das Ziel einer hohen Rezyklierungsrate zu erreichen, muss der jeweilige Werkstoffzustand exakt beschrieben werden können. Dies kann durch regelmäßige Materialprüfungen oder aus bekannten Zusammenhängen zwischen Alterung und Werkstoffnutzung geschehen.

Um Messungen, Werkstoff sowie Nutzungsverhalten vollständig abbilden, untersuchen und einander zuordnen zu können, entwickeln das Fraunhofer IGC und die software4production GmbH gemeinsam ein auf die AM angepasstes Manufacturing Execution System (MES). Da die Verfolgung einzelner Partikel kaum möglich ist, wird die Nachverfolgung von Behältern oder deren Inhalten angestrebt. Dadurch werden Kennzahlen digital erfassbar und analysierbar, die heute teils unzugänglich sind, wie

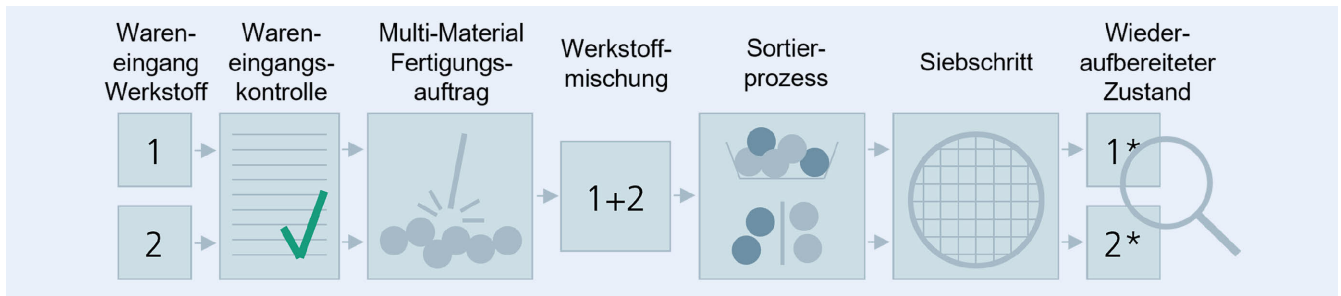


Bild 1. Komplexität der Pulverprozesskette am Beispiel des Multi-Material-Laserstrahlschmelzens (Fraunhofer IGCV). Grafik: Fraunhofer IGCV

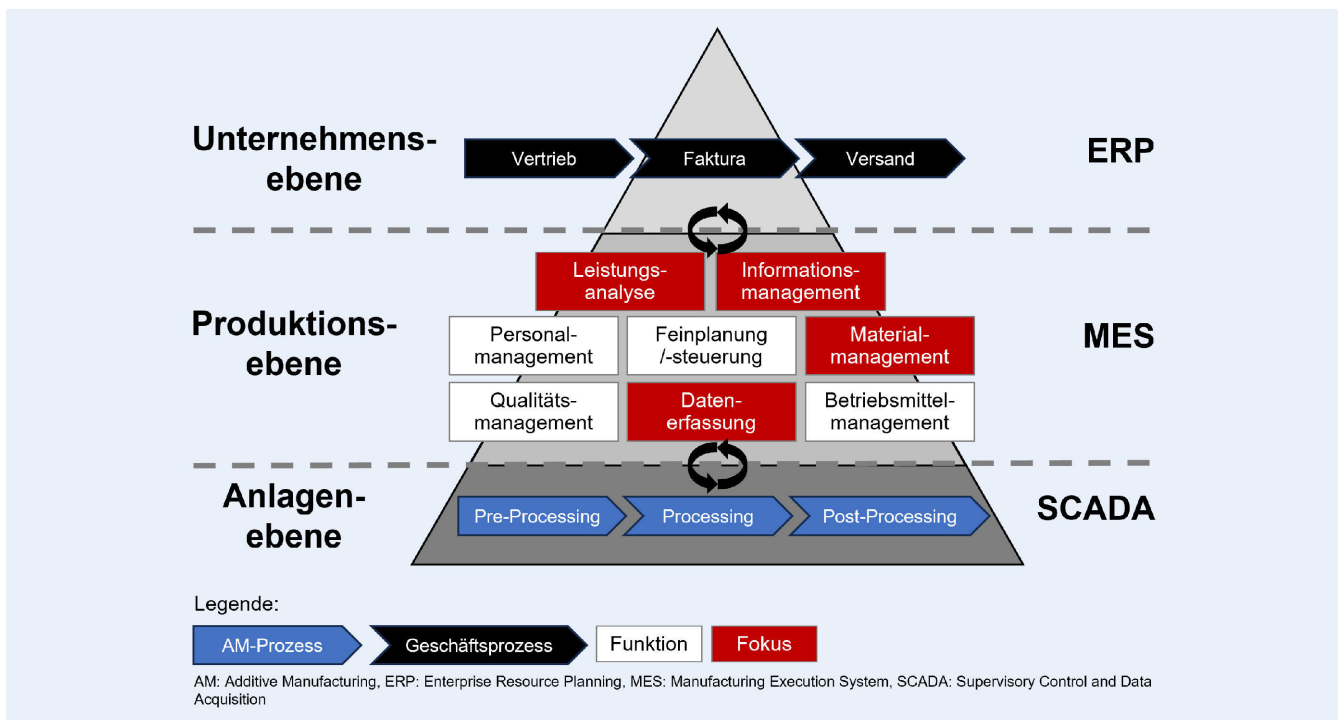


Bild 2. Automatisierungspyramide für ein MES für die AM (additive Fertigung); in Anlehnung an VDI 5600 und VDI 3405. Grafik: software4production GmbH

etwa die Häufigkeit der Nutzung des Werkstoffs in Fertigungsprozessen oder die dabei ertragenen Pulverbettvorwärmtemperaturen. Außerdem können besondere Herausforderungen durch die Forschungsinhalte am Fraunhofer IGCV adressiert werden. Beispielsweise wird in Augsburg das Multi-Material-Laserstrahlschmelzen beforscht. Im Pulverbett vermischen sich bei diesem besonderen Fertigungsprozess verschiedene Werkstoffe, die bei der Wiederaufbereitung sortiert werden müssen [11, 12]. Das MES soll helfen, die teils sehr komplexe Historie des Pulverwerkstoffs mit geringem Aufwand vollständig zu erfassen und für Analysen zugänglich zu machen (Bild 1).

Das Erfassen der relevanten Arbeitsabläufe soll außerdem eine digitale Maschinenbuchführung sowie eine automatisierte Behälterbeschriftung ermöglichen. Die Reduktion manueller Protokollierung soll zu Zeitersparnissen im Betrieb führen. Durch den selektiven Schmelzprozess und das schichtweise Erzeugen von Bauteilen können Maschinenzustands- und Prozessüberwachungsdaten eine große Rolle für die Bewertung der Bauteilqualität bei der Qualitätskontrolle, aber auch schon während des Aufbauprozesses liefern [13]. Daher soll das MES die Zuordnung von Sensor- und Zustandsdaten zu Fertigungsaufträgen sowie einen zentralen Zugriff zur Datenverarbeitung ermöglichen.

2 Stand der Technik, Abgrenzung und Neuheitsgrad

MES ist die Bezeichnung für eine Klasse von Informationssystemen, die in der Produktion eingesetzt werden, um den Transformationsprozess von Rohstoffen zu Fertigprodukten zu planen, zu steuern, zu verfolgen und zu dokumentieren [14]. Damit sind MES ein Bindeglied zwischen übergeordneten Systemen auf der Unternehmensebene wie Enterprise Resource Planning (ERP) und IT-Systemen zu Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) auf der Maschinen- und Anlagenebene [15]. Bild 2 zeigt die Einordnung dieser Systeme und die Hauptfunktionen von MES basierend auf den VDI-Richtlinien 3405 und 5600 im Kontext von AM.

Im AM-Bereich existierten bisher keine spezialisierten MES [16]. Erst in den letzten Jahren wenden sich Softwarehersteller im AM-Bereich dem Thema MES zu. Hierzu zählen Hersteller wie Materialise NV durch den Erwerb von „Link3D“ oder Oqton mit „3D Systems“. Um reproduzierbar qualitativ hochwertige Produkte mittels AM herstellen zu können, müssen die Materialeigenschaften bekannt sein und eine Vielzahl von beeinflussenden Produktionsparametern erfasst werden. Beispiele sind die Bauteil-

ausrichtung im Maschinenbauraum, die Baugeschwindigkeit und die Vorwärmtemperatur des Pulverbettes [16]. Anomalien während des Fertigungsprozesses können sich direkt auf die Bauteilposition zum Zeitpunkt des Auftretens auswirken und sollten entsprechend zugewiesen werden können. Zudem existieren im AM-Bereich Herausforderungen in folgenden Bereichen [17]:

- Feinplanung: fehlende Verknüpfung von konventioneller und additiver Fertigung, Planung auf Zeitbasis stark erschwert (etwa durch die dreidimensionale Verschachtelung der Bauteile innerhalb eines Bauauftrages)
- Informationsmanagement: fehlende Schnittstellen bei zentraler AM-Software
- Materialmanagement: fehlende Unterstützung bei vollständiger Chargen-/ Seriennummernverwaltung, vor allem für Pulverwerkstoffe
- Datenerfassung: geringe Verbreitung von Industriestandards für Datenschnittstellen (beispielsweise OPC UA) entlang der AM-Prozesskette

Vor diesem Hintergrund liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Weiterentwicklung eines MES für die AM mit vertikaler und horizontaler Integration zwischen Unternehmens-, Produktions- und Anlagenebene. Dies wird im Wesentlichen durch folgende Funktionserweiterungen erzielt:

- Materialmanagement und Materialverfolgbarkeit durch durchgängige Pulverchargenverfolgung vom Wareneingang über die Verarbeitung, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung bis zur Entsorgung
- Erfassung von Zustands- und Prozessüberwachungsdaten der AM-Maschinen und Verknüpfung mit den Fertigungsauftragsdaten
- Feinplanung und -steuerung der Jobs über alle Arbeitsabläufe
- durchgehendes Informationsmanagement unter anderem zur Dokumentation und Bilanzierung

Fokus ist ein intuitiv bedienbares System für alle Stakeholder, welches Technologieakzeptanzprobleme überwindet und AM für die industrielle Einzel-, Klein- und Serienproduktion befähigt [18].

3 Informationslogistische Auslegung des MES

Der zielgerichtete Einsatz von Informationslogistik schafft Datentransparenz, indem alle in der Produktion beteiligten Ressourcen miteinander verknüpft werden. In Abstimmung der Datenflüsse auf den vorliegenden Informationsbedarf entsteht eine Datenbasis zur Entscheidungsunterstützung der Nutzer [19]. Der Bedarf im vorliegenden Szenario wurde eingangs beschrieben: eine zentrale Erfassung der Informationen entlang der Prozesskette als Basis für eine ganzheitliche Datenauswertung.

Um das passende Angebot zu schaffen, sollen zunächst drei Informationsquellen vernetzt werden: die Informationen zum Fertigungsauftrag, die Prozess- und die nachgelagerten Messinformationen. Die erste Gruppe wird zum Zeitpunkt des Anlegens eines neuen Fertigungsauftrags mit Daten befüllt und umfasst beispielsweise Projektnummer, Menge, Wunschliefertermin, zu verwendender Werkstoff. Die Daten der zweiten Gruppe werden über den Fertigungsprozess hinweg gesammelt und ergänzen die Basisinformationen etwa um die verwendete Pulvercharge, den aktuellen Siebzustand des Pulvers, die eingesetzte AM-Anlage oder den Sauerstoffgehalt in der Baukammer. Hierzu können

auch Daten aus Prozessüberwachungssystemen gezählt werden. Messinformationen, welche dem Prozess nachgelagert je nach ausgewählten Versuchsständen (zum Beispiel Ergebnisse einer CT-Messung zur Dichtebestimmung) entstehen, bilden die dritte Gruppe. Das MES fungiert dabei als zentrale Datendrehscheibe, welche die Daten aus allen Gruppen erfasst, bereinigt, aggregiert, visualisiert und für Analysen bereitstellt [14].

Die Daten werden entweder über Nutzereingaben direkt im MES erfasst oder durch die Weitergabe von Sensorwerten an das MES. Für ersteres steht den Anwendenden ein Softwarezugang am PC oder über ein Handheld für die mobile Nutzung im AM-Labor zur Verfügung. Die Sensordaten der AM-Anlagen werden über die umgesetzte Kommunikationsarchitektur weitergeben, die im folgenden Kapitel vorgestellt wird. Das Beispiel des Pulvermanagements zeigt deutlich den Mehrwert für die Anwendenden des MES. Vor der Einführung des MES wurden die Informationen zum Pulverbehälter handschriftlich auf dem Behälter festgehalten. Mit MES sollen die Informationen über Buchungsterminals digital erfasst, aktualisiert und automatisiert neue Etiketten ausgedruckt werden. Unterschieden wird zwischen einem Wareneingang vom Lieferanten (initiale Datenerfassung) und einem Wareneingang aus der Produktion (Angabe von Restmenge und Siebzustand des Pulvers). **Bild 3** zeigt die Zielvorstellung vom Wareneingang hin zur Nachverfolgbarkeit für die Pulverwerkstoffe.

Durch das Zuordnen von Gefahrstoffdatenblättern lassen sich Gefahrstoffsymbole beim Wechsel vom Behälter übernehmen und Kennzeichnungsvorschriften leicht erfüllen. Die einzelnen Datensätze müssen so miteinander verknüpft werden, dass auch später folgende beispielhafte Fragen zu beantworten sind: Mit welchen Pulverchargen wurde gemischt? In welchen Baujobs wurde diese Pulvercharge bereits eingesetzt? Welche Mitarbeitenden haben bereits mit dieser Pulvercharge gearbeitet? Wie oft wurde diese Pulvercharge bereits gesiebt?

4 Kommunikationsarchitektur

Es wurde eine Kommunikationsarchitektur konzeptioniert und umgesetzt, die eine Vernetzung verschiedener Ressourcen über eine Plattform ermöglicht. Ein Visualisierungsserver ist die zentrale Komponente dieses Konzeptes. Die zur Datenerfassung, Strukturierung und Verarbeitung notwendige IT-Architektur umfasst neben diesem Virtualisierungsserver serverseitige oder interne Anwendungen, eine Middleware (Übersetzungsebene) und externe Ressourcen (Anwendungen/ Geräte). Der physische Virtualisierungsserver ist dabei mit der Software „VMware“ in mehrere virtuelle Umgebungen unterteilbar und wird als Cloud System genutzt. Auf diesen virtuellen Maschinen (VM) können verschiedene datenverarbeitende Dienste und Anwendungen eingerichtet werden.

Im dargelegten Szenario ist das MES des Unternehmens software4production GmbH als Dienst eingerichtet, um eingehende Aufträge und Maschinendaten auf der Plattform zu verwalten. Um eine gesicherte und skalierbare Kommunikationsschnittstelle zu schaffen, wird ein Message Broker als Middleware verwendet. Dabei wird auf die Open-Source-Lösung „RabbitMQ“ (VMware) zurückgegriffen. Der Broker wird ebenso auf einer VM betrieben und bietet eine Vielzahl an Protokolloptionen und eine integrierte Managementoberfläche für kleinere Analysen und Rechteverwaltung. Bei dem verwendeten Protokoll handelt es sich um Message

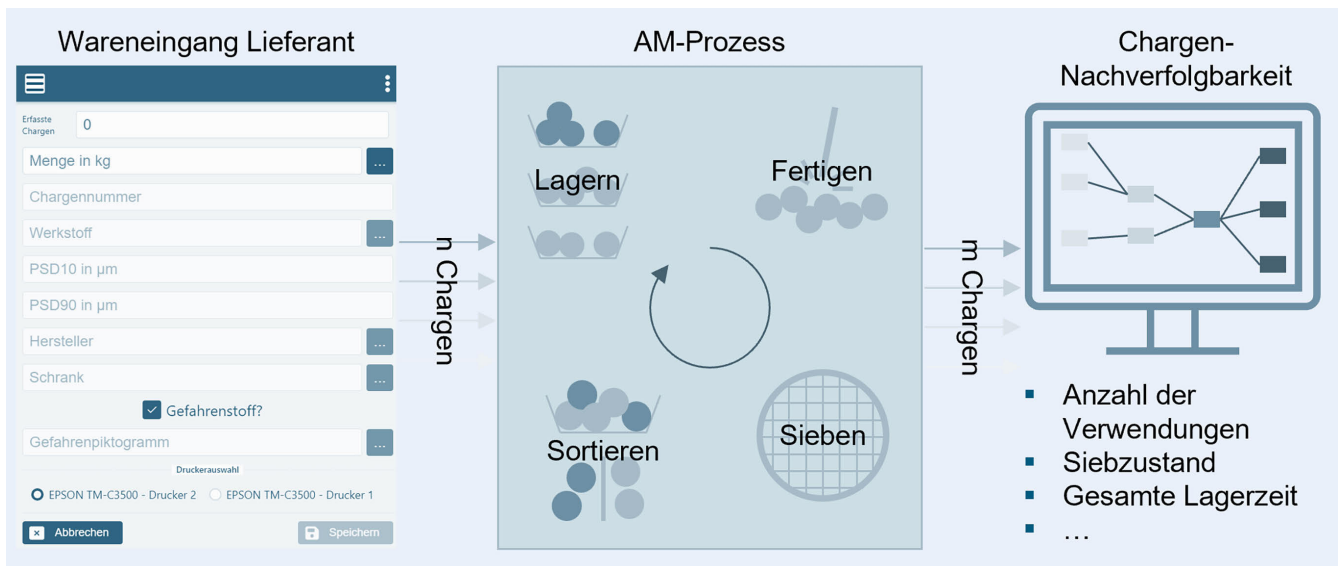


Bild 3. Schematische Zielvorstellung der Chargennachverfolgbarkeit. Grafik: Fraunhofer IGCV

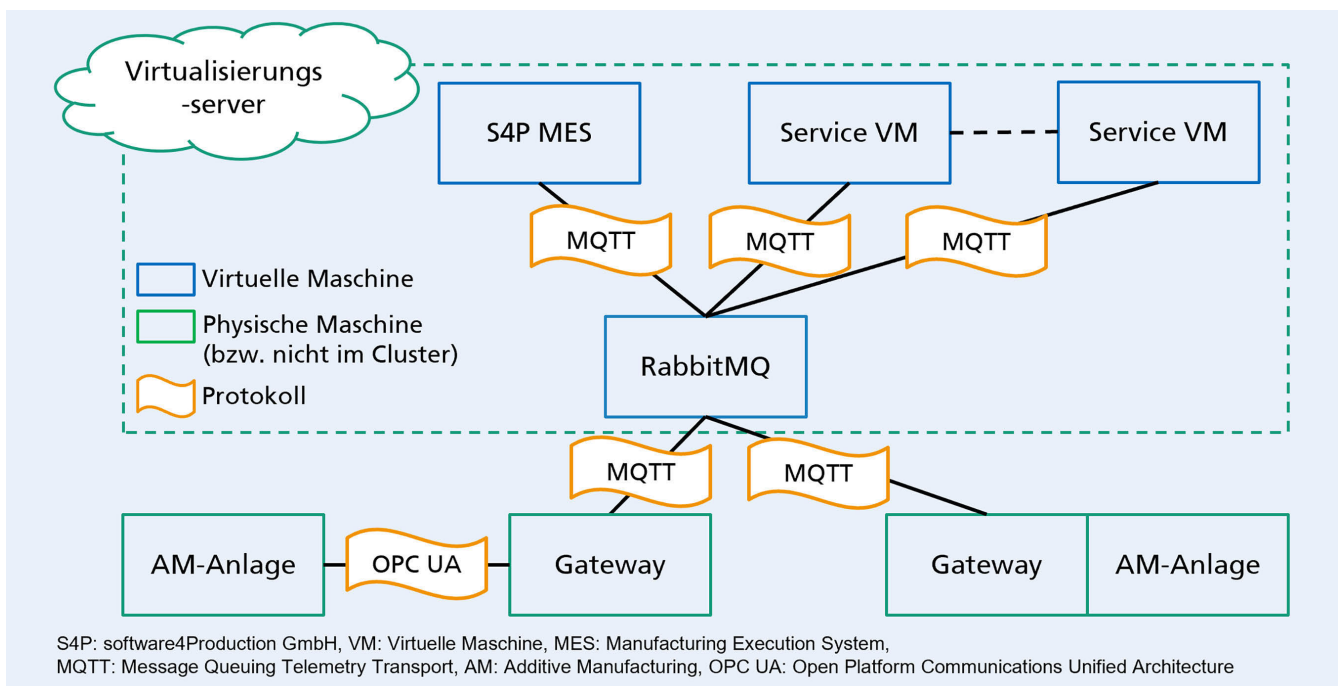


Bild 4. Schema der IT-Infrastruktur für das MES. Grafik: Fraunhofer IGCV

Queueing Telemetry Transport (MQTT). Die Eigenschaften von MQTT machen es zu einer robusten Option für das Senden großer Mengen von Sensornachrichten an Analyseplattformen und Cloud-Lösungen im Bereich Internet der Dinge und bieten gleichzeitig die Möglichkeit bidirektionaler Kommunikation.

Im beschriebenen Szenario werden AM-Anlagen eingebunden (Bild 4). Diese verfügen über eine große Anzahl auslesbarer Sensoren, deren Werte vom System protokolliert werden. Eine Gateway-Software wird mit Python entwickelt und implementiert. Diese Software übersetzt Systemprotokolle in Nachrichten, die vom MES gelesen werden können und übermittelt sie über eine Brokeranbindung. Nötige und vom MES vergebene Auftragsnummern werden von der Gateway-Software auf gleichem Weg entgegengenommen und in den Ablauf integriert.

Ziel ist es, einen übertrag- und skalierbaren Anwendungsfall zu schaffen, der auf zukünftige Anlagen, Geräten oder Anwendungen ausgerollt werden kann. Dies geschieht auch unter Berücksichtigung moderner Standards und Anlagen, wie etwa der Kommunikation mittels Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA).

5 Bewertung der Lösung und Ausblick

Das in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellte MES befindet sich aktuell im Testbetrieb mit simulierten Maschinen und Arbeitsgängen und wird in den nächsten Wochen auf das reale Labor mit ausgewählten Mitarbeitenden ausgeweitet. Mitte 2024 soll das System vollständig einsatzbereit sein und spezifische Auf-

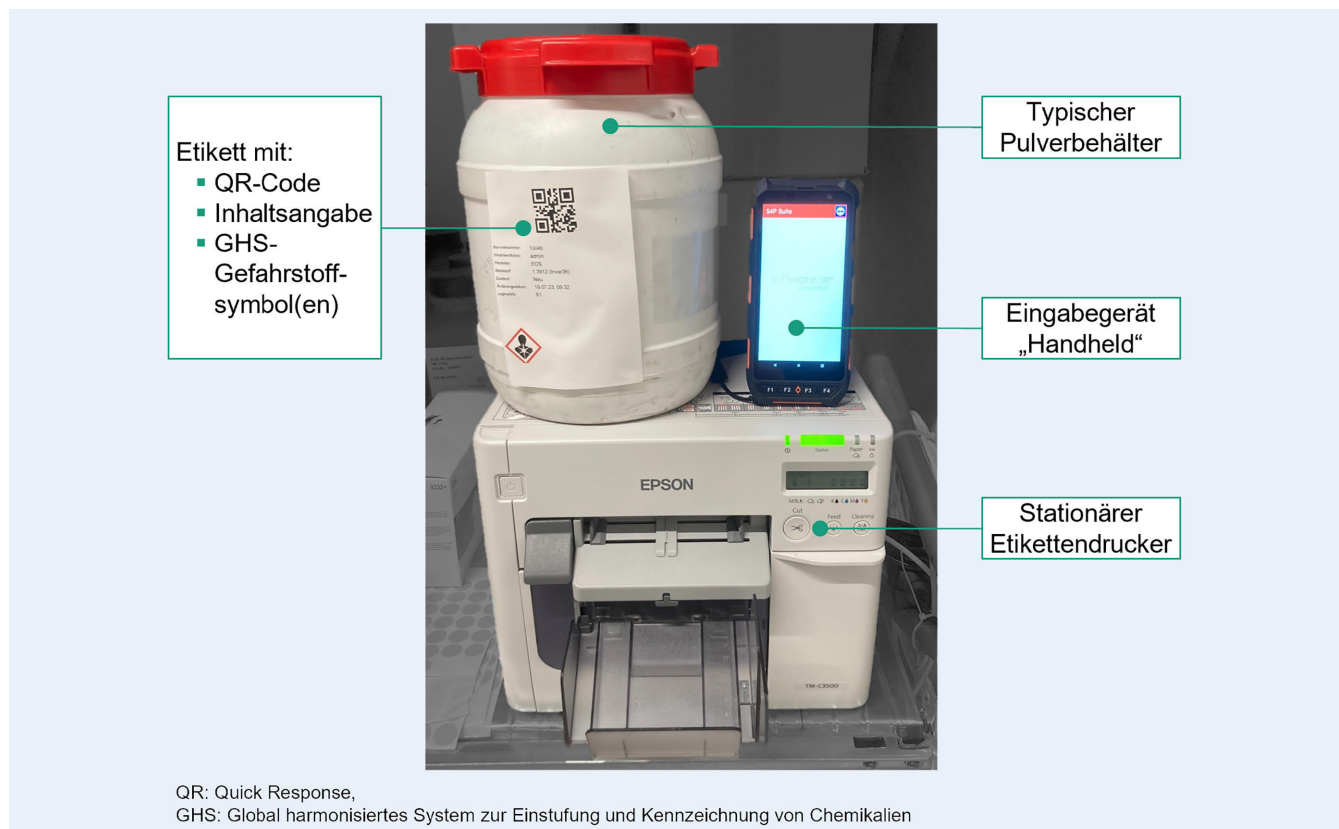


Bild 5. Laborausstattung zur Interaktion mit dem MES. Foto: Fraunhofer IGCV

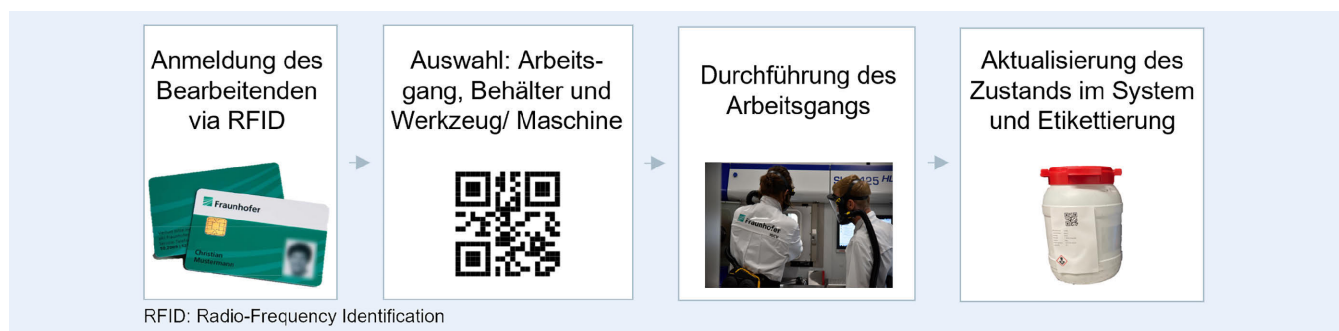


Bild 6. Begleitung von Tätigkeiten oder Arbeitsabläufen zur Interaktion mit dem MES. Grafik: Fraunhofer IGCV

gaben für die AM lösen, vor allem die des Materialmanagements und der Datenerfassung zur Rückverfolgbarkeit. Die angestrebten Ziele sind in Kapitel 2 formuliert. Dies ermöglicht einerseits eine digitale Erfassung und Auswertung der Arbeitsabläufe und andererseits werden Zeitersparnisse umgesetzt. **Bild 5** zeigt einen durch das MES etikettierten Pulverbehälter für den Laborbetrieb sowie ein Eingabegerät und einen Etikettendrucker.

Der maschinenlesbare Quick-Response-Code (QR-Code) verknüpft die vollständig auf dem Server gespeicherten Informationen der sich im Behälter befindlichen Pulvermenge. Zusätzlich sind menschenlesbare Informationen wie Werkstoffbezeichnung, Verantwortungsperson, Zustandsinformationen und Gefahrstoffsymbole angegeben. Mindestens jede Tätigkeit (Arbeitsgang), welche die physikalischen oder chemischen Eigenschaften des Behälterinhalts verändert, wird digital begleitet und die Zustandsveränderung mit einer neuen Identifikation festgehalten. Die Benutzerinteraktion erfolgt dabei minimalistisch. Jede Information,

welche das System durch Logik bereits besitzt, wird automatisch angepasst. Buttons erlauben die schnelle Auswahl von Möglichkeiten und textuelle Eingaben werden reduziert. Die Interaktion folgt damit in etwa dem in **Bild 6** dargestellten Ablauf. Bearbeitende melden sich am Gerät an, wählen den Arbeitsgang und die zu verwendenden Arbeitsmittel aus, führen den Arbeitsgang durch und beenden diesen mit der Aktualisierung im System sowie der Behälterbeschriftung.

Durch die konsequente Verfolgung des pulverförmigen Ausgangswerkstoffs ist für jeden Fertigungsauftrag über die Chargennummer hinaus jeder Schritt in dessen Historie bekannt und nachvollziehbar. Dies gilt auch für die Maschinenzustandsdaten, die während eines Fertigungsauftrags erfasst werden, unabhängig davon, ob sie vom Fertigungssystem selbst oder von der Messtechnik im Labor stammen. Vor allem für heterogene Maschinenparks, wie am Fraunhofer IGCV in Augsburg mit acht verschiedenen PBF-Maschinen, wird die einheitliche Qualitätskontrolle

und Protokollierung umgesetzt. Sicherheitstechnische Anforderungen wie die Beschriftung von Gefahrstoffen nach Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) sowie eine detaillierte Maschinenbuchführung werden vom System abgedeckt. Zukünftig soll das System um Datenquellen und Tätigkeiten, welche dem Produktionsprozess vor- und nachgelagert sind, erweitert werden. Mittels der Integration eines Energiemonitoringsystems soll beispielsweise eine bauteilspezifische ökologische Bilanzierung erreicht werden.

Durch die Erfassung und Speicherung der Zustandsdaten entstehen digitale Schatten der Materialien und der AM-Anlagen. Diese bilden eine Grundlage für digitale Zwillinge, welche in nachfolgenden Arbeiten zur Nutzung der Daten erstellt werden, um relevante Eigenschaften für die Werkstoffverwendung und die Produktionsplanung auszuwerten und abzubilden. Insbesondere maschinelle Verfahren bieten hier die Möglichkeit, automatisiert Datenanalysen durchzuführen und komplexe Zusammenhänge zu identifizieren.

FÖRDERHINWEIS


Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie; KI-Produktionsnetzwerk©IGCV FuE“

Literatur


- [1] Wohlers, T.; Campbell, R. I.; Diegel, O. et al.: Wohlers report 2023. 3D printing and additive manufacturing : global state of the industry. Washington, DC: Wohlers Associates, ASTM International 2023
- [2] Meiners, W.: Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Dissertation, TH Aachen, 1999
- [3] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021). Deutsche Fassung 2021
- [4] Lutter-Günther, M.; Gebbe, C.; Kamps, T. et al.: Powder recycling in laser beam melting: strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency. Production Engineering 12 (2018) 3–4, pp. 377–389
- [5] DIN/TS 17026:2020–10: Unbefeuerte Druckbehälter – Zusätzliche Anforderungen an additiv gefertigte Druckgeräte und deren Bauteile. Berlin: Beuth-Verlag 2020
- [6] Bradler, M.; Horn, M.; Schlick, G. et al.: Influence Of Powder Characteristics On Material Properties In Laser Powder Bed Fusion Of CuCr12r. Proceedings of Euro Powder Metallurgy 2023 Congress & Exhibition, 2023, doi.org/10.59499/EP235796443
- [7] Lutter-Günther, M.: Qualitätsorientiertes und modellbasiertes Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen. Dissertation, TU München, 2020
- [8] Grzelak, K.; Bielecki, M.; Kluczyński, J. et al.: A Comparative Study on Laser Powder Bed Fusion of Differently Atomized 316L Stainless Steel. Materials (15 (2022) 4938; doi.org/10.3390/ma15144938
- [9] Anderson, I. E.; White, E. M.; Dehoff, R.: Feedstock powder processing research needs for additive manufacturing development. Current Opinion in Solid State and Materials Science 22 (2018) 1, pp. 8–15
- [10] Hinrichs, F.; Kauffmann, A.; Schliephake, D. et al.: Flexible Powder Production for Additive Manufacturing of Refractory Metal-Based Alloys. Metals 11 (2021) 11, p. 1723
- [11] Horn, M.; Prestel, L.; Schmitt, M. et al.: Multi-Material Additive Manufacturing – Recycling of binary Metal Powder Mixtures by Screening. Procedia CIRP 93 (2020) 1, pp. 50–55
- [12] Schneck, M.; Horn, M.; Schindler, M. et al.: Capability of Multi-Material Laser-Based Powder Bed Fusion—Development and Analysis of a Prototype Large Bore Engine Component. Metals 12 (2022) 1, #44, doi.org/10.3390/met12010044
- [13] Grasso, M.; Remani, A.; Dickens, A. et al.: In-situ measurement and monitoring methods for metal powder bed fusion: an updated review. Measurement Science and Technology 32 (2021) 11, #112001
- [14] Kletti, J.: MES – Manufacturing Execution System. Heidelberg: Springer 2015
- [15] Novak, P.; Douda, P.; Kadera, P. et al.: PyMES: Distributed Manufacturing Execution System for Flexible Industry 4.0 Cyber-Physical Production Systems. 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Prague, Czech Republic, 2022, pp. 235–241
- [16] D'Antonio, G.; Segonds, F. et al.: A framework for manufacturing execution system deployment in an advanced additive manufacturing process. International Journal of Product Lifecycle Management 10 (2017) 1, #1
- [17] Berlak, J.; Werner, D.: Additiv gefertigte Bauteile in der Automobilproduktion. VDI-Z 164 (2022) 05, S. 62–63
- [18] Berlak, J.; Hafner, S.; Kuppelwieser, V. G.: Digitalization's impacts on productivity: a model-based approach and evaluation in Germany's building construction industry. Production Planning & Control 32 (2021) 4, pp. 335–345
- [19] Dinter, B.; Winter, R.: Integrierte Informationslogistik. Heidelberg: Springer 2008



Dipl.-Ing. Björn Ringel 
Foto: Fraunhofer IGCV

Annemarie Raber, M. Eng. 

Mario Luber, M.Sc. 

Ludwig Trauner, B.Sc. 

Dr.-Ing. Georg Schlick 

Clemens Gonnermann, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Fraunhofer-Institut für Gießerei-,
Composite- und Verarbeitungstechnik
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
Tel. +49 821 / 90678-0
info@igcv.fraunhofer.de
www.igcv.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Joachim Berlak 

software4production GmbH
Anton-Böck-Str. 34, 81249 München
Tel. +49 89 / 4161406-0
info@s4p.de
www.s4p.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)