Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48

Einsatz kombinierter Auto-ID-Systeme in der Produktionssteuerung

Produktionssteuerung additiver Prozessketten

F. Meister, A. Raber, J. Mück, C. Seidel

Bislang limitiert ein mangelnder Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad den wirtschaftlichen Erfolg der additiven Serienproduktion. Bedingt durch Spezifika wie die gemeinsame Fertigung von Bauteilen im Batch liegt eine Herausforderung in der Produktnachverfolgung. Der Beitrag zeigt Ansätze der Rückverfolgbarkeit und anhand eines Praxisbeispiels, wie passende Auto-ID-Systeme systematisch ausgewählt werden und in Kombination die notwendige Datenbasis für die Produktionssteuerung bereitstellen können.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Digitale Fabrik

Production control of additive process chains - Using combined auto-ID systems in production control

A low level of automation and digitization still limits the economic success of additive series production. Due to specifics such as the joint manufacturing of components in batches, a central challenge is product tracking. This paper provides insights into traceability approaches and uses a practical example to demonstrate how suitable auto-ID systems can be systematically selected and used in combination to provide the necessary data base for production control.

1 Ausgangssituation

Die additive Fertigung (englisch: additive manufacturing, AM) ist eine der technologischen Innovationen der letzten Jahre. Der globale Markt der AM verzeichnete im Jahr 2021 ein Volumen von 8,33 Milliarden Euro. Mit einem Wachstum von 16 % wird der erzielbare Umsatz von Metall- und Polymerdruck für 2026 auf circa 20 Milliarden Euro geschätzt [1]. Dies ist nicht zuletzt auf kürzere Produkteinführungszeiten durch einen CAD-gestützten Entwicklungsprozess, den Wegfall von Fertigungswerkzeugen [2] und einen geringeren Aufwand in der Herstellung kundenindividueller Produkte zurückzuführen. In der Einzel- und Kleinserienfertigung lässt sich daher oft kosteneffizienter als mit konventionellen Fertigungsverfahren produzieren.

Um für größere Stückzahlen attraktiv zu werden, muss neben der Steigerung der Leistungsfähigkeit der AM auch ein höherer Automatisierungsgrad durch das Ersetzen manueller Arbeitsschritte sichergestellt werden, wie etwa der Transport zwischen Nachbearbeitungsstationen [3]. Für technische Grenzen, wie geringe Wiederholgenauigkeiten in den Fertigungsabläufen und unzureichende Zuverlässigkeit der Prozesse bei der Bauteilqualität, verspricht die Digitalisierung Abhilfe. Eine hohe Datendurchgängigkeit über verschiedene IT-Systeme und entlang der Fertigungsprozesskette, über den eigentlichen Druckprozess hinaus, kann ein Schlüsselfaktor für den breiteren Einsatz von AM-Verfahren in der Serienproduktion mit hoher Variantenvielfalt sein. Wertvolle Reaktionsmechanismen und komplexe Ursachen-Wirkzusammenhänge können über die gesammelten und ausgewerteten Daten bereitgestellt werden. Es lassen sich Rückschlüsse auf Verbesserungen der Produktqualität ableiten und Produktivitätspotenziale, die in ineffizienten Prozessabläufen begründet sind, heben.

Die Grundlage bilden neben produktionsnahen IT-Systemen, wie Manufacturing Execution Systems (MES), Systeme zur automatischen Identifikation und Datenerfassung (Auto-ID-Systeme), die oft im Zusammenspiel mit dem Menschen in digitalisierten Fabriken (Human-in-the-Loop (HIL)) Einsatz finden. Auto-ID-Systeme können sensorgenerierte Daten zwischenspeichern (etwa Temperatursensorwert) oder Daten einer höheren Granularitätsebene (wie ‘Transportvorgang abgeschlossen’) generieren. Damit legen sie die Basis zur eventbasierten Produktionssteuerung (PS) von AM-Prozessen. Die Vielzahl an Auto-ID-Systemen (siehe Auszug in Bild 2) mit unterschiedlichen Funktionalitäten und technologischen Eigenschaften erschweren aber deren zielgerichtete Einführung. Dieser Beitrag soll die Auswahl und Ausgestaltung der Systeme für die AM unterstützen.

2 Systemarchitektur für den Einsatz von Auto-ID-Systemen

Als übergeordnete Leitsysteme in der Produktion dienen Planungs- und Steuerungssysteme. Damit diese auf Grundlage der tatsächlichen Umstände in der Produktion agieren können, sammeln Erfassungssysteme Daten auf dem Shopfloor, etwa zur Ermittlung von Transportbewegungen oder Lagerbeständen. Durch vertikale Kommunikation zielen MES darauf ab, die Informationslücke zwischen Planungs- und Prozessebene durch kurzfristige Eingriffe in die PS zu schließen [4]. Die Verwendung auf-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

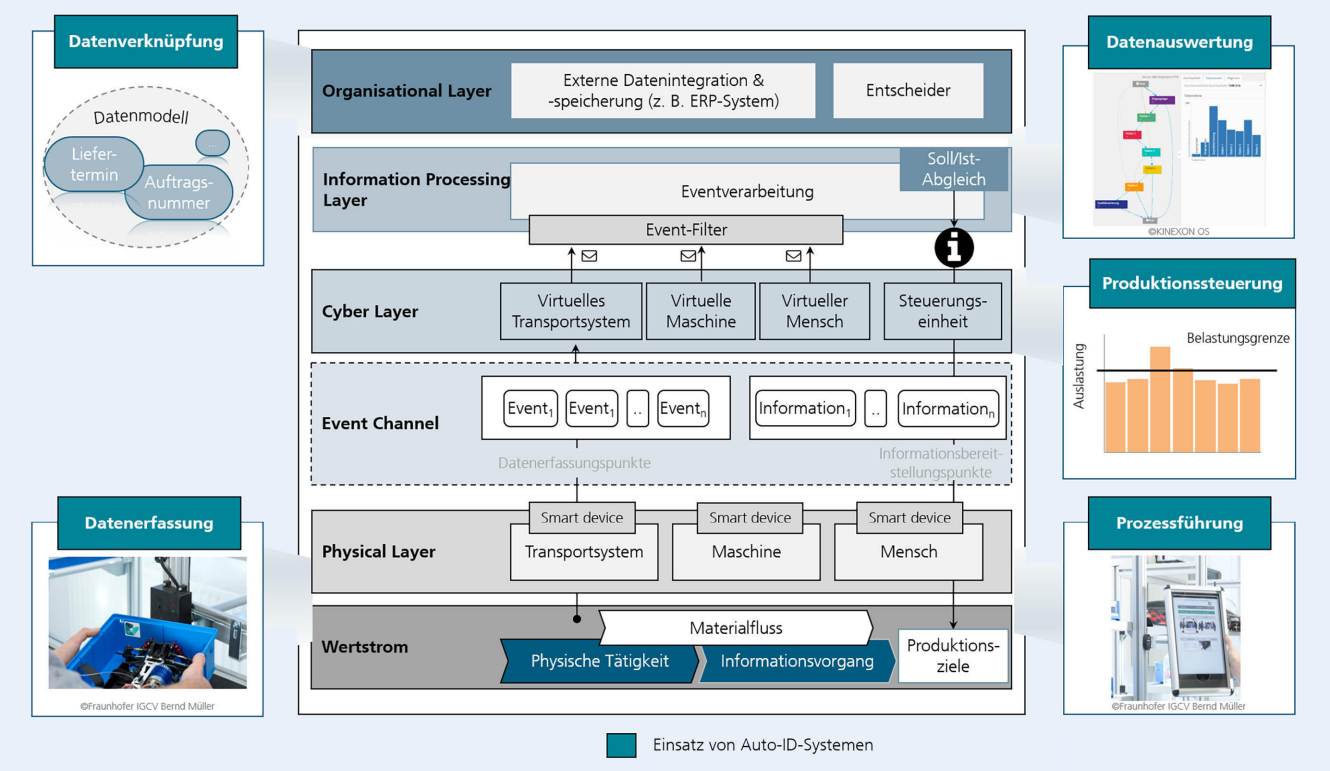

Bild 1. Möglichkeiten von Auto-ID-Systemen im Kontext der Produktionssteuerung (vergleiche [6]). *Grafik: Fraunhofer IGCV mit Ausschnitt aus [7]*

gezeichneter Daten für steuernde Eingriffe bleibt durch mangelnde Datendurchgängigkeit meist hinter dem technisch Möglichen zurück [5]. Zudem hängt die Effizienz des Datenflusses für die PS von Funktionalitäten der eingesetzten Technologien ab. So gewinnen Auto-ID-Systeme zwar an Popularität, da sie durch Funktionen zum Speichern und Übertragen von Daten einen Beitrag zur besseren Datendurchgängigkeit leisten können. Um der PS einen Mehrwert zu bieten, müssen sie auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Im Folgenden werden anhand des HIL-Konzepts unterstützende Funktionen der Auto-ID-Systeme für die PS aufgezeigt (**Bild 1**, [6, 7]).

Im HIL-Modell werden alle physischen Ressourcen durch digitale Repräsentationen auch auf einer cyber-physischen Ebene dargestellt. Die Verbindung dieser Ebenen wird durch einen Eventfluss gekennzeichnet, der am Beispiel des Menschen aufgrund dessen Interaktion mit Geräten und Informationssystemen entsteht [8]. In der Rolle des Entscheiders bewertet der Mensch auf Basis von Prozessdaten den Istzustand der Produktion durch Vergleich mit dem Sollzustand. Sein steuernder Eingriff nimmt über die Ressourcen auf dem Shopfloor Einfluss auf das Produktionsgeschehen und dient der Erreichung produktionslogistischer Zielgrößen. Durch ihre Funktionen können Auto-ID-Systeme im Zusammenspiel mit dem Menschen (zum Beispiel Scannen von Barcodes) oder mit automatisierter Datenerfassung (etwa mittels Sender-Empfänger-Systemen) Transparenz über das aktuelle Produktionsgeschehen schaffen.

Für eine Identifizierung und Lokalisierung in Echtzeit kommen beispielsweise Real-Time-Location-Systeme (RTLS) zum Einsatz. Sie ermöglichen die durchgängige Verfolgung von Produktionsressourcen, indem sie Auskunft über die Art des Objekts, den Zeitpunkt und den Ort liefern. Üblicherweise arbeitet die PS mit solchen Ereignissen oder Echtzeitdaten von Informationssystemen über den Status eines Prozesses (wie etwa 'Druckprozess beendet, Transport gestartet'). Durch Einsatz von Technologien zur komplexen Ereignisverarbeitung können auch mittels Auto-ID-Systemen gespeicherte Sensordaten in die für die PS zu verarbeitende Granularität gebracht und beispielsweise Mining-Techniken auf vorverarbeitete Rohdaten angewendet werden [9].

Grundlegend für die weitere Datenauswertung ist neben der Filterung diverser Events die Anreicherung dieser mit weiterem Kontext. Drittsysteme können Lieferantendaten nachhalten und die Informationen mit herstellungsspezifischen Daten für eine erweiterte Datenauswertung verknüpfen. Zudem können ERP-Systeme steuerungsrelevante Informationen über Auftragsdaten liefern, die zu Produktivitätsanalysen (wie Aufdecken von Bottlenecks) oder zu kurzfristigen Auftragsreihenfolgeverschiebungen befähigen. Durch Verknüpfung von gekennzeichneten Produkten mit digitalen Arbeitsanweisungen ist es möglich, die Prozessebene über Änderungen in der produktspezifischen Produktionskette zu informieren und so die Prozessführung zu verbessern. Die Vorgänge im Wertstrom charakterisieren sich damit durch physische und unmittelbar an der Wertschöpfung beteiligte Aktivitäten wie auch durch Informationsflussvorgänge in Form von digitalen Arbeitsanweisungen oder Rückmeldevorgängen.

Für die Gesamtheit an Einsatzmöglichkeiten von Auto-ID-Systemen bleibt zu klären, wie sich die Auswahl spezifischer Technologien auf die PS auswirkt. Nur durch die Kenntnis der Wirkung von Auto-ID-Systemen auf den Datenfluss kann sich die meist kostenintensive Beschaffung durch Ausschöpfung von Produktivitätspotenzialen amortisieren. Den Unternehmen muss ein Rahmen geboten werden, der im Vorfeld einer Technologieeinführung die zielgerichtete Auswahl ermöglicht. Entsprechende methodische Werkzeuge stellt das nachfolgende Kapitel am Beispiel der AM vor.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle. Anforderungen an Auto-ID-Systeme für die Auftragsabwicklung entlang der AM-Prozesskette (Auszug).

Prozess	Anforderungen an Auto-ID-Systeme
Pre-Prozess	• Flexibilität in der Anbringung aufgrund der Bauteilgeometrie • Integrierbarkeit der Auto-ID-Lösung in das Bauteil selbst (zum Beispiel Direktmarkierung, Berücksichtigung von Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren) • Integrierbarkeit der Daten in ein maschinenlesbares Datenmodell • Speicherkapazität der Auto-ID-Lösung
In-Prozess	• Identifikation und Auslesbarkeit der Auto-ID-Lösung in der Linie • Schnittstelle zur Hinterlegung von Druckprozess-Daten zur dezentralen Datenhaltung
Post-Prozess	• Unversehrtheit der Auto-ID-Lösung (keine Funktionsbeeinträchtigung) • Umsetzbarkeit weiterer Stakeholder-Spezifikationen (zum Beispiel Menschenlesbarkeit) • Granularität der Datenerfassung • Kennzahlenorientierung (Unterstützung der Auftragsabwicklung)
Datenmodell	• Hierarchisierung des Datenmodells • Spezifizierung des Datenmodells (zum Beispiel Bauteilinstanzen und Fertigungsdaten)

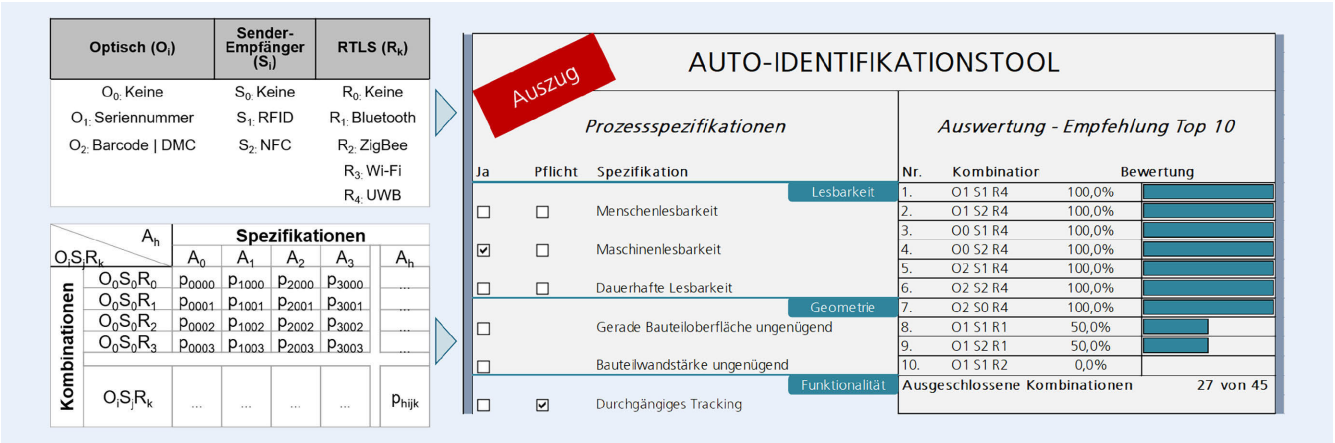

Bild 2. Aufbau und Auszug des Auswahltools. *Grafik: Fraunhofer IGCV*

3 Auswahl von Auto-ID-Systemen für die PS

Der Pre-Prozess in der AM umfasst vorbereitende Schritte wie die Konstruktion des Bauteils und die Bauteilanordnung im Bauraum. Im In-Prozess wird durch schichtweisen Materialauftrag das Bauteil erzeugt. Zu den nachfolgenden Schritten des Post-Prozesses gehören zum Beispiel Reinigungsarbeiten, um die gewünschten Oberflächeneigenschaften des Bauteils herzustellen. [10]

Die Eignung eines Auto-ID-Systems hängt von den Anforderungen in diesen Teilprozessen und vom übergeordneten Datenmodell ab: beispielsweise ist für die Bauteilrückverfolgung im Moment der Auflösung von Kunden- in Fertigungsaufträge eine bauteilindividuelle Kennzeichnung zu vergeben. Damit wird das Produkt unmittelbar nach dem Druckprozess dem Kunden zuordenbar und rückverfolgbar. In einer Kombination aus MES und Auto-ID-Systemen werden Attribute wie Baujobnummer, Planzeiten und qualitäts- sowie dokumentationsrelevante Parameter mit einem Fertigungsauftrag verbunden. [11]

Die Identifikation erfolgt oft anhand der Seriennummer in Klarschrift. Die Integration von Identifikationsträgern per Direktmarkierung innerhalb des Druckprozesses ist im Fall der optischen Auto-ID-Systeme wie zum Beispiel mit Datamatrix-Code (DMC) [12] und der Sender-Empfänger-Varianten [13] in praktischen Anwendungen erfolgreich erprobt. Die Anforderungen an ein Auto-ID-System entlang der Auftragsabwicklung ergänzend zur Maschinendatenerfassung wurden mittels Literaturrecherchen und Experteninterviews identifiziert und sind in der **Tabelle** zusammengefasst.

Ergänzend wurden Informationen zu Reichweite, Genauigkeit, Kosten und den Vor- sowie Nachteilen verschiedener Auto-ID-Systeme aus den Kategorien (Optisch, Sender-Empfänger, RTLS) gesammelt und in ein softwaregestütztes Auswahltool integriert, welches dem Anwendenden einen schnellen Überblick verschafft. Das Tool ist in Anlehnung an die Kombinationsmatrix von *Arndt* [12] entwickelt. Es stellt den 45 Auto-ID-System-Kombinationen, unter Ausschluss der Verwendung mehrerer Varianten einer Kategorie, die Anforderungen des Anwenders gegenüber, wie etwa Lesbarkeit durch Mensch oder Maschine (**Bild 2**).

Kombinationen, die die Anforderungen nicht erfüllen, werden ausgeschlossen. Die Kombinationsmatrix bildet eine Funktion über Spezifikationen (A_h) und Auto-ID-Kombinationen ($O_iS_jR_k$) ab. Die Einträge der Matrix (p_{hijk}) werden wie folgt deklariert [12]:

$$F\left(A_h, 0_i S_j R_k\right), (h, ijk) \rightarrow p_{hjk}$$

mit h = 1, … , l und i = 1, … , m und j = 1, … , n und k = 1, … , o

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

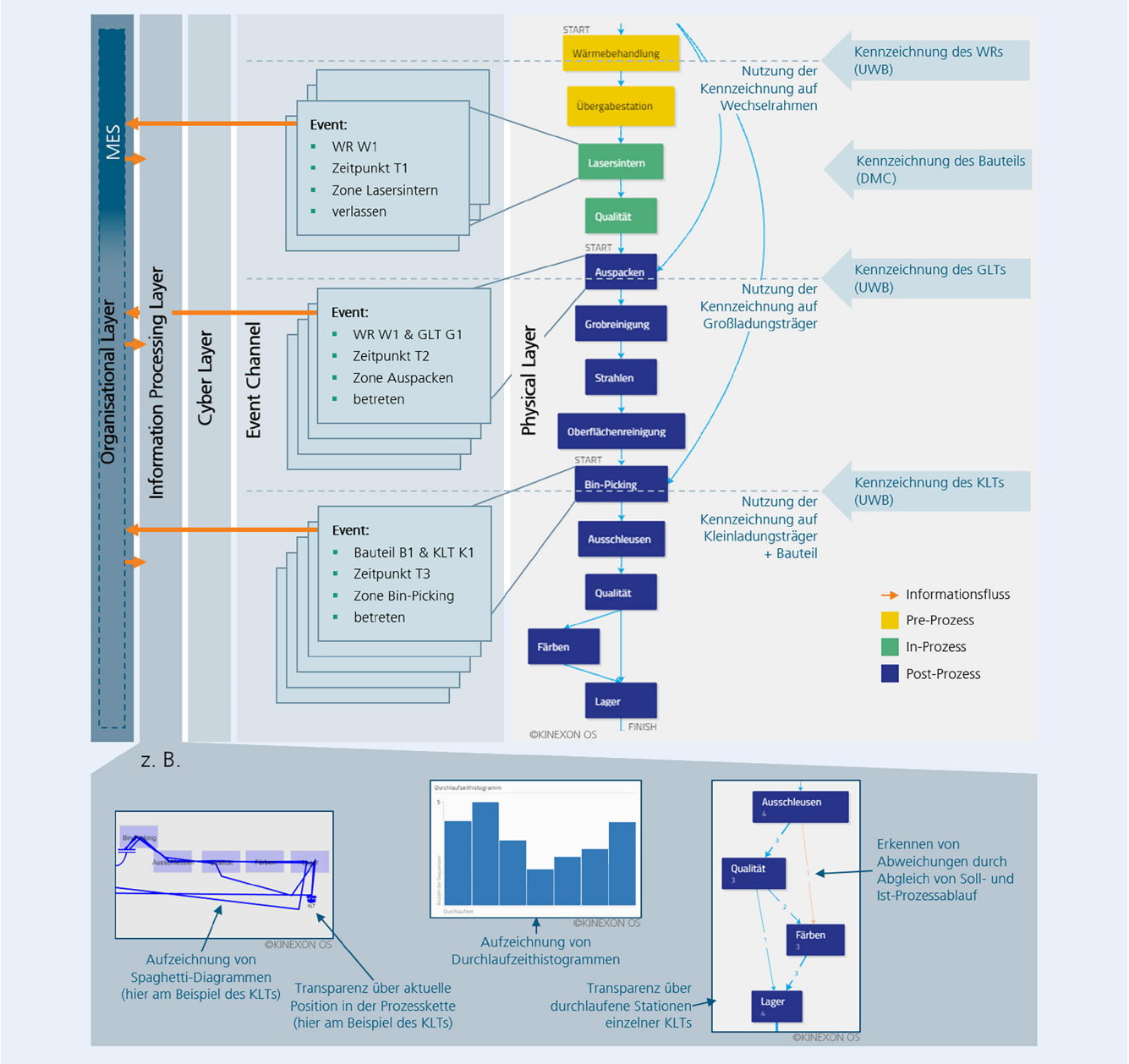

Bild 3. Material- und Informationsfluss am Beispiel der „Polyline". *Grafik: Fraunhofer IGCV mit Ausschnitten aus [7]*

Nach dieser Auswahl ist eine Ausgestaltung des Einsatzes der Kombination notwendig, wie das nachfolgende Kapitel näher beschreibt.

4 PS auf Basis kombinierter Auto-ID-Systeme im Anwendungsbeispiel

Das Forschungsprojekt „Polyline" verfolgt das Ziel einer durchgängigen digitalen Prozesskette für die Herstellung additiv gefertigter Kunststoffbauteile für die Automobilbranche. Durch das Auswahltool wurden für das Projekt zunächst verschiedene Kombinationen von Auto-ID-Systemen eingegrenzt. Um mögliche Anwenderanforderungen wie durchgängiges Bauteiltracking oder Maschinenlesbarkeit der Kennzeichnung zu erfüllen, wurde die Kombination aus Ultra-Wideband (UWB)-Technologie und DMC betrachtet. Die UWB-Technologie nutzt eine Softwarelösung, um die Position von Objekten aus den Laufzeiten von Signalen zwischen Sender und Empfänger kontinuierlich zu ermitteln und auf einer digitalen Karte zu visualisieren. Mittels DMC lässt sich die Position eines Objekts an definierten Scanpunkten, das heißt ortsbezogen, erfassen. Aus der Kombination ergeben sich verschiedene Anwendungspotenziale entlang der Prozesskette. **Bild 3** zeigt die konzeptionelle Ausgestaltung und Beispiele zur Datennutzung, modelliert mit dem UWB-System-Demonstrator am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV [7].

Im Beispiel wird prozessbedingt zu Beginn des Pre- beziehungsweise In-Prozesses die Kennzeichnung des Baujobs genutzt. Die Bauteile werden auf einem Wechselrahmen (WR) gedruckt und durch diesen zusammengehalten. Zur Rückverfolgung bietet sich dessen Kennzeichnung mit UWB-Sender an. Durch die Definition verschiedener Zonen, die im digitalen Abbild der Produkti-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

onslinie über die einzelnen Arbeitsstationen gelegt werden, können die Bewegungen der WR Events auslösen, beispielsweise „WR W1 (mit Auftrag A1) verlässt zum Zeitpunkt T1 die Zone Lasersintern“. Diese Information kann automatisiert über den Event Channel bis ins Information Processing Layer übertragen werden. Über eine Schnittstelle zum MES wird der Zonenaustritt automatisiert verbucht. Die so generierten Eventdaten stehen zur Datenauswertung zur Verfügung. So können Ist-Durchlaufzeiten bestimmt und Liege- beziehungsweise Wartezeiten lokalisiert werden. Durch den Abgleich mit einem Soll-Prozessmodell wird es möglich, Abweichungen in der Prozesskette zu detektieren und steuernd darauf zu reagieren. In der Auspack-Station ist eine Übertragung der Kennzeichnung des Fertigungsauftrags vom WR zum Großladungsträger (GLT) notwendig. Letzterer ist mit einem UWB-Sender versehen, steht in der Auspack-Station bereit und trägt die Eigenschaft ‚leer‘. Sobald ein WR mit der Eigenschaft ‚voll’ in der Auspack-Station auf einen leeren GLT trifft, wird das Event ‚Übergebe zu Zeitpunkt T2 Auftrag A1 von WR W1 an GLT G1’ ausgelöst.

Der DMC wird erst bei der Auflösung des Batchs relevant – beim Bin-Picking. Hier werden die Bauteile einzeln dem GLT entnommen, anhand der Direktmarkierung mittels DMC identifiziert und einem Kleinladungsträger (KLT) zugeordnet. Durch die Zuordnung jedes Bauteils zum wiederum mit UWB-Sender ausgestattetem KLT können im Post-Prozess bauteilspezifisch durchlaufende Nachbearbeitungsschritte ohne erneutes Ein- und Ausscannen, das heißt automatisiert mittels Events, an jeder Station nachvollzogen werden.

Die Informationsflüsse entlang der Prozesskette sind beliebig erweiterbar. So lässt sich eingesetztes Materialpulver inklusive der Information über Werkstoff, Hersteller, Charge oder Pulverzustand (zum Beispiel Neu- oder Altpulver) identifizieren und dem Bauteil zuordnen. Auch die Prozessparameter oder Messwerte, etwa aus der AM-Anlage, lassen sich so bauteilindividuell auslesen. Sollen zudem Logistikleistungen beurteilt werden, können durch eine entsprechende Kennzeichnung zurückgelegte Wege von Transportsystemen und angefahrene Stationen aufgedeckt werden.

5 Zusammenfassung

Der wirtschaftliche Einsatz von AM in der Serienproduktion bedingt einen höheren Automatisierungs- beziehungsweise Digitalisierungsgrad. Auto-ID-Systeme bilden die Basis für eine durchgängige Datenverfügbarkeit und befähigen zur eventbasierten PS. Der Beitrag stellt ein Tool vor, das die zielgerichtete Auswahl von Auto-ID-Systemen anhand von Anforderungen seitens des AM-Prozesses und der Anwendenden unterstützt. Zudem wird anhand eines Praxisbeispiels eine mögliche Ausgestaltung kombinierbarer Systeme in der Anwendung aufgezeigt.

Literatur

[1] AMPOWER Report: Additive Manufacturing Report. Stand: 2022. Internet: www. additive-manufacturing-report.com. Zugriff am 28.02.2023

[2] Klemp, E.; Pottebaum, J.: Additive Fertigungsverfahren im Kontext von Industrie 4.0. Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2015, S. 1–21

[3] Caviezel, C.; Grünwald, R.; Ehrenberg-Silies, S.; et al.: Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). Innovationsanalyse. Stand: 2022. Internet: publikationen.bibliothek.kit.edu/1000078105. Zugriff am 28.02.2023

[4] Kletti J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Heidelberg: Springer- Verlag 2014

[5] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland. Aachen: FIR an der RWTH Aachen 2013

[6] Jost, J.; Kirks, T.; Mattig, B.: Multi-agent systems for decentralized control and adaptive interaction between humans and machines for industrial environments. IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET) (2017) 7, pp. 95–100

[7] KINEXON GmbH: Homepage. KINEXON Operating System. Stand: 2022. Internet: www.kinexon.com. Zugriff am 28.02.2023

[8] Cimini, C.; Pirola, F.; Pinto, R.; et al.: A human-in-the-loop manufacturing control architecture for the next generation of production systems. Journal of Manufacturing Systems 54 (2020), pp. 258–271

[9] Soffer, P.; Hinze, A.; Koschmider, A.; et al.: From event streams to process models and back: Challenges and opportunities. Information Systems 81 (2019) 7, pp. 181–200

[10] Verband Deutscher Ingenieure: VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag 2014

[11] Meister, F.; Mück, J.; Hohmann, A.; et al.: Automatisiertes Nesting in additiven Prozessketten. wt Werkstattstechnik online 112 (2022) 04, S. 248–252. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien

[12] Additive Marking: Kennzeichnungen in der Prozesskette des 3D-Drucks. Stand: 2022. Internet: additive-marking.de/solution/. Zugriff am 28.02.2023

[13] Binder, M.; Kirchbichler, L.; Seidel, C.; et al.: Design Concepts for the Integration of Electronic Components into Metal Laser-based Powder Bed Fusion Parts. Procedia CIRP 81 (2019), pp. 992–997

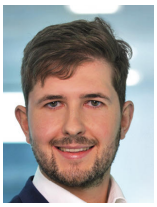

Foto: Fraunhofer IGCV

Frederic Meister, M.Sc.

Annemarie Raber, M.Eng.

Jochen Mück, B.Eng.

Prof. Dr.-Ing. **Christian Seidel**

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
Tel. +49 821 / 90678-325
frederic.meister@igcv.fraunhofer.de
www.igcv.fraunhofer.de

FÖRDERHINWEIS

Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Forschungsprojektes „Polyline – Integrierte Linienanwendung von polymerbasierten AM-Technologien“.

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY