UNIVERSITÄT AUGSBURG
Universitätsbibliothek

OPEN ACCESS
OPUS AUGSBURG

Digitaler Zwilling für die additive Fertigung

Tobias Wittmeir, Fabio Oettl, Johannes Schilp

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Wittmeir, Tobias, Fabio Oettl, and Johannes Schilp. 2023. "Digitaler Zwilling für die additive Fertigung." *wt Werkstattstechnik online* 113 (3): 119–23.
https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

CC BY 4.0

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:
CC-BY 4.0: Creative Commons: Namensnennung
Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de

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

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53

Digitalisierung in der additiven Fertigung

Digitaler Zwilling für die additive Fertigung

T. Wittmeir, F. Oettl, J. Schilp

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung von sowohl gleichen als auch unterschiedlichen Komponenten in einem Bauvorgang. Um insbesondere für die additive Serienfertigung eine gleichbleibende Bauteilqualität zu gewährleisten, kann der Einsatz eines digitalen Zwillings sinnvoll sein. Dieser stellt hohe Anforderungen an die Datenbasis in Bezug auf Strukturierung, Rechenleistung und Datensicherheit und muss auf die relevanten Funktionen des Einsatzbereichs zugeschnitten sein.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Digitalisierung

Digital twin for additive manufacturing

Additive manufacturing enables the production of both several identical and different components in a single printing process. To ensure consistent component quality, especially for additive series production, the application of a digital twin can be useful. This places high demands on the data basis in terms of structuring, computing power and data security and must be tailored to the relevant functions of the respective application.

1 Motivation

In den letzten Jahrzehnten sehen sich Unternehmen verstärkt mit Herausforderungen konfrontiert, die durch immer kürzer werdende Produktlebenszyklen und dem zunehmenden Wunsch nach kundenindividuellen Produkten ausgelöst werden [1]. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren, wie dem Gießen oder Fräsen, erlauben additive Fertigungsverfahren eine ökonomische Produktion von individuellen und funktionsintegrierten Bauteilen durch den für diese Verfahren charakteristischen schichtweisen Aufbau. Das Spektrum reicht dabei von der Serienfertigung bis hin zu Losgröße 1 [2]. Die additive Fertigung bietet eine Möglichkeit, um den genannten Herausforderungen zu begegnen und die Produktion von industriellen Produkten auch in Ländern mit einem höheren Lohnkostenniveau zu erhalten [3].

Entscheidend für die Anwendung von additiven Fertigungsverfahren in der Serienfertigung ist eine gleichbleibende Bauteilqualität. Um dieses Ziel zu erreichen, kann der Einsatz eines digitalen Zwilling (DZ) für Unternehmen sinnvoll sein. Ein DZ ermöglicht es beispielsweise die Qualität von additiv hergestellten Komponenten zu verbessern. Dazu werden die im Produktionsprozess anfallenden Sensordaten im DZ gespeichert, analysiert und entsprechende Maßnahmen abgeleitet [4]. Darüber hinaus kann die organisatorische Integration von additiven Fertigungsverfahren in bestehende Unternehmensprozesse erleichtert werden, da durch die Verknüpfung der Daten innerhalb des DZ die Transparenz erhöht wird [5]. Zusätzlich existieren zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten wie etwa eine proaktive Fehlervermeidung durch Eingriffe in den laufenden Bauprozess oder eine aufwandsreduzierte Bauteilqualifizierung mithilfe von KI (künstliche Intelligenz)-Anwendungen basierend auf der Datenbasis im DZ, um Zeit und Kosten in der Produktion zu sparen [6, 7].

Durch die hohen Anforderungen eines DZ an Datenmanagement und Rechenleistungen ist es von essenzieller Bedeutung, den DZ auf die relevanten Funktionen des jeweiligen Einsatzgebietes zu reduzieren [8, 9]. Dieser Beitrag stellt ein Konzept für einen DZ in der additiven Serienfertigung vor, in welchem Parameter abgebildet werden, die insbesondere für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie für die Qualität relevant sind.

2 Grundlagen digitaler Zwilling

In Bezug auf den DZ existieren verschiedene Definitionen in der Literatur, welche auch in Literaturübersichten zusammengefasst wurden [10–17]. Die Vielzahl an Ansätzen macht deutlich, dass es in der Wissenschaft bislang keine einheitliche Definition gibt. Im Allgemeinen wird der DZ als virtuelle Repräsentation eines realen Objekts verstanden [14, 16]. Der bidirektionale Datenaustausch zwischen realer Instanz und virtuellem Abbild ist eine zentrale Charakteristik des DZ [17]. Dieser Beitrag versteht unter einem DZ das virtuelle Abbild eines realen Objekts, welches durch den bidirektionalen Austausch von historischen Daten und Echtzeitdaten erzeugt wird.

Bild 1 veranschaulicht verschiedene Ausbaustufen virtueller Abbilder in Abhängigkeit vom Datenfluss zwischen realer und virtueller Instanz. Bei einem digitalen Modell handelt es sich um eine digitale Abbildung des realen Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt. Der bidirektionale Datenfluss muss manuell angestoßen werden. Beim digitalen Schatten hingegen erfolgt der Datenaustausch in Richtung der virtuellen Instanz automatisiert. Dies

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53, am 24.04.2023, 12:59:10
Open Access - (cc) BY - http://elibrary.vdi-verlag.de/agb

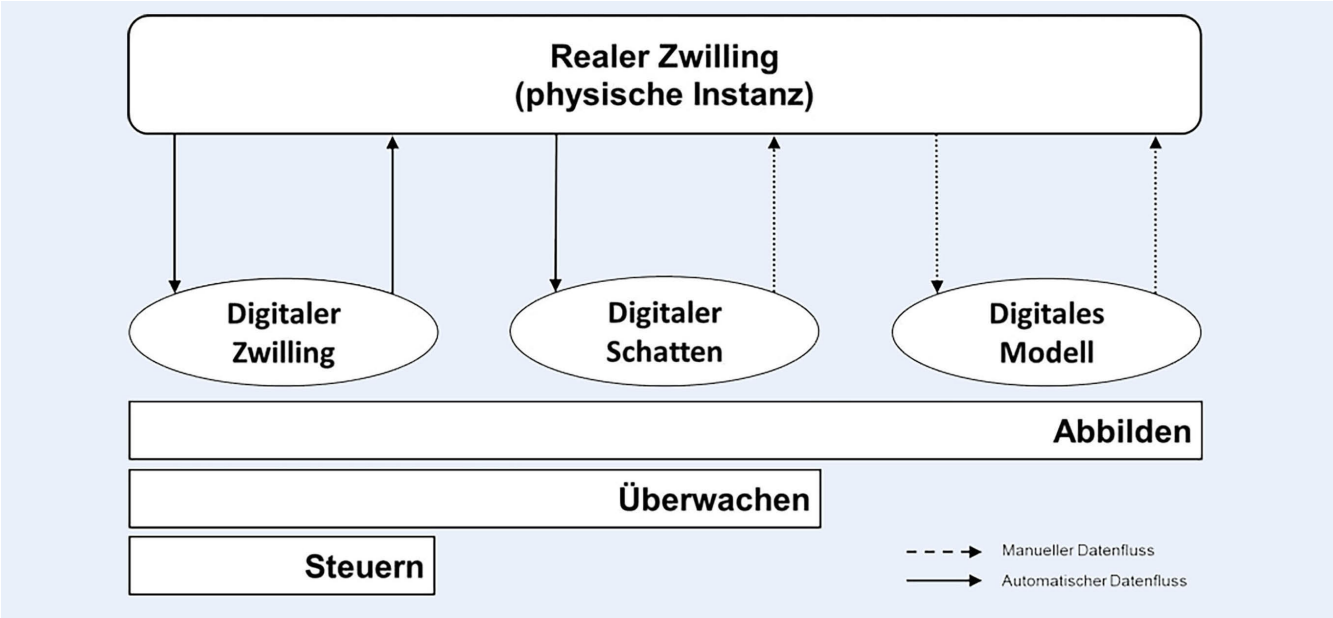


Bild 1. Stufen des Datenflusses zwischen physischer und virtueller Instanz. *Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik, in Anlehnung an [18]*

erlaubt die Überwachung des realen Zwillings, da zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Zustand der physischen Instanz an den digitalen Schatten übertragen wird und somit Veränderungen schnell erkennbar sind. Beim DZ als höchste Ausbaustufe ist der Datenfluss bidirektional automatisiert, sodass die physische Instanz nicht nur überwacht, sondern auch gesteuert werden kann. Die Steuerung erfolgt durch automatisierte Eingriffe am realen Zwilling, welche aus einer Auswertung der übertragenen Daten im DZ abgeleitet werden. [18]

3 Prozesskette der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren in einer Linienanwendung

In diesem Beitrag wird die Prozesskette der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren (PBF-LB/P) als vollständig automatisiertes und effizientes Produktionsverfahren vorgestellt. Die Neuheit dieses Ansatzes bezieht sich auf die integrierte Betrachtung aller zur Herstellung eines Produkts notwendigen Prozesse sowohl auf physischer wie informationstechnischer Ebene. Dabei werden über die reinen additiven Fertigungsprozesse (Pulverhandhabung, Laser-Sintern, Abkühlen) hinaus, welche die vertikale Prozesskette repräsentieren, eine Vielzahl an vor- und nachgelagerten Prozessen der horizontalen Prozesskette (Engineering, Datenaufbereitung, Auspacken, Reinigen, Färben) adressiert. Das Ziel dieser Lösung ist die vollständige Automatisierung des gesamten Material- und Bauteilflusses inklusive aller Pre-, In- und Post-Prozesse sowie der Pulverhandhabung innerhalb einer Linienanwendung. Alle Wirkzusammenhänge in den Prozessketten werden über eine durchgängige digitale Prozesskette miteinander verknüpft und aufeinander abgestimmt.

Da ein solches Vorhaben realistischerweise nicht durch einen einzelnen Technologie- oder Anwendungspartner abgedeckt werden kann, ist es zunächst notwendig, mit allen beteiligten Hard- und Softwareherstellern den Gesamtprozess zu definieren. Kern der Prozessdefinition ist die Prozessdarstellung beziehungsweise -modellierung [19]. Dafür wird in diesem Beitrag die grafische Spezifikationssprache „BPMN 2.0“ (Business Modeling and Notation Version 2.0) verwendet, die den aktuellen Standard zur Geschäftsprozessmodellierung darstellt.

Das Prozessmodell ist aus Gründen der Übersichtlichkeit in „Lanes“ aufgeteilt. In einer Lane werden alle Ereignisse und Tasks abgebildet, die aus systemorganisatorischer Sicht derselben zugeordnet werden können. Die übergeordnete Lane repräsentiert die „Digitale Prozesskette“. In dieser werden die Prozesse dargestellt, welche in einem Leitsystem (wie etwa Manufacturing Execution System, kurz: MES) stattfinden. Eingehende Nachrichten stoßen Prozesse in der Leitebene an, ausgehende Nachrichtenflüsse wiederum lösen Prozesse in anderen Lanes aus. Unterhalb der „Digitalen Prozesskette“ befinden sich die Lanes „Additive Fertigung“, „Reinigung“ und „Logistik“ als die drei zentralsten Oberbegriffe für alle weiteren wertschöpfenden Prozesse der gesamten Linie. **Bild 2** zeigt eine vereinfachte Darstellung des Prozessmodells und skizzenhaft einige Nachrichtenflüsse zwischen den Lanes.

4 Konzept eines DZ für den beschriebenen Anwendungsfall

Im Folgenden wird ein konzeptionell ausgearbeiteter DZ für den beschriebenen Anwendungsfall vorgestellt. Bei diesem handelt es sich um ein virtuelles Bauteildokument, das ein vollständiges, digitales Abbild jedes einzelnen physischen Produkts widerspiegelt, das auf der Linie hergestellt wird. Der DZ enthält somit alle zur Herstellung eines Produkts nötigen, produktspezifischen Daten und Informationen, die während des Herstellungsprozess anfallen und die insbesondere für die Bauteilqualität und die PPS von Bedeutung sind. Die dazu benötigten Parameter wurden auf Basis von Expertenwissen mit den Anwendungspartnern ausgewählt und definiert. Dies soll eine lückenlose Dokumentation entlang der gesamten Wertschöpfungskette sicherstellen, um die Transparenz des Prozesses zu steigern und die Rückverfolgbarkeit im Fall von Prozessstörungen oder Fehlern zu erleichtern. Insbesondere Parameter, welche die Pulverhandhabung betreffen, müssen im DZ exakt abgebildet werden. Da beim PBF-LB/P

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53, am 24.04.2023, 12:59:10
Open Access - (cc) BY - http://elibrary.vdi-verlag.de/agb

üblicherweise Neupulver mit Altpulver vermischt wird, ist dieses Mischungsverhältnis ein für die Bauteilqualität entscheidendes Kriterium.

Die wichtigste Grundlage für die Konzeption des DZ bildet das Prozessmodell. Ausgehend von diesem werden allen Prozessschritten jene Parameter zugeordnet, die potenziell einen Einfluss auf die Herstellung der physischen Produkte haben. Dazu gehören Kenn- und Messwerte, Qualitätskriterien und Metadaten. Beispiele sind Kennzeichnungen, Historie-Daten, CAD-Daten, Slicing-Daten, Fertigungsparameter, Daten und Parameter zur Nachbearbeitung. Sämtliche Prozessparameter müssen zunächst identifiziert, definiert und extrahiert werden, bevor diese im nächsten Schritt in einem übergeordneten Datenmodell aufbereitet und aggregiert werden können. Die Zusammenführung der generierten Basis erfolgt üblicherweise auf einem Server oder in einer Cloud-Anwendung.

Da große Mengen an physischen Daten an einen DZ übertragen werden, müssen die Daten durch Datenverarbeitungsmethoden effektiv aufbereitet werden. Je umfangreicher die additive Prozesskette ist, umso größer ist auch die Menge der von den Sensoren gesammelten Daten. Die Datenmenge liegt etwa im Bereich von 100 Gbits/s. Bei der Übertragung von Daten dieser Größenordnung kann es zu Überlastungen kommen. Daher müssen die Daten bereinigt werden, um Datenredundanzen, Datenkonflikte und Datenfehler im DZ zu beseitigen und die Robustheit und Zuverlässigkeit der Zwillingsdaten zu verbessern. [20]

Tao et al. [21] schlagen eine Datenfusion zur Dimensionsreduktion vor: Sensordaten können fusioniert und in ihrer Dimensionalität reduziert werden, etwa durch die Umwandlung von Bildern in spezifische Informationen (zum Beispiel Zustandsparameter) des gewünschten Ziels durch einen Erkennungsalgorithmus. So können redundante Informationen reduziert und nur die notwendigen Informationen beibehalten werden.

Üblicherweise gibt es in einem DZ viele ähnliche physische Objekte, wobei die meisten ihrer Parameter als Referenz verwendet werden können. Der Abgleich von Daten physischer Objekte mit hoher Ähnlichkeit durch einen Erkennungsalgorithmus kann dazu beitragen, die Daten der physischen Objekte besser zu clustern, zu verarbeiten und zu analysieren, wodurch die Nutzung der Daten verbessert werden kann. [20]

Um ein durchgängiges und robustes Datenmanagement zu gewährleisten, ist die Strukturierung der Datenbasis von entscheidender Wichtigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür ein Konzept in „MS Excel“ präsentiert. Um Speicherplatz zu sparen, werden Datenredundanzen vermieden und durch die Einführung von Ebenen die Datenmenge reduziert. Der DZ wird dazu in die vier Ebenen „Bauteilklasse“, „Kundenauftrag“, „Baujob“ und „Bauteil“ geclustert. Jede dieser Ebenen wird in MS Excel als separates Tabellenblatt angelegt, in welchem die zugehörigen Datensätze gespeichert werden. Die einzelnen Ebenen sind dabei über Primärschlüssel logisch miteinander verknüpft. Die Strukturierung trägt darüber hinaus zu einer Erhöhung der Übersichtlichkeit und der Anwenderfreundlichkeit bei.

Auf der höchsten Ebene werden die verschiedenen Bauteilklassen repräsentiert. Identische, baugleiche Produkte werden als eine Bauteilklasse zusammengefasst. Beispiele für Daten auf der Ebene „Bauteilklasse“ sind Abmessungen, Volumina und Toleranzen. Eine Ebene unterhalb sind die Kundenaufträge angesiedelt. Ein Kundenauftrag besteht aus einer oder mehreren Positionen und kann anhand der Kundenauftragsnummer eindeutig identifiziert werden. Eine einzelne Position eines Kundenauftrags gibt die zu produzierende Stückzahl von identischen Bauteilen (Bauteilklasse) wieder. Die Herstellung der Bauteile eines Kundenauftrags erfolgt abhängig vom Umfang desselben in einem oder mehreren Baujobs. Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung wird eine ressourcenoptimierte Zusammenstellung der Bauteile ermittelt und im nachgelagerten Nesting wird die Positionierung aller einem Baujob zugeordneten Bauteile bestimmt [22]. Auf Bauteil-Ebene befinden sich die einzelnen Bauteile. Jedes Bauteil der vorgestellten Linienanwendung ist aus Gründen der Rückverfolgbarkeit individuell und lässt sich mit einer eindeutigen Bauteil-ID identifizieren, die nach dem Slicen vergeben und während des Bauvorgangs aufgedruckt wird.

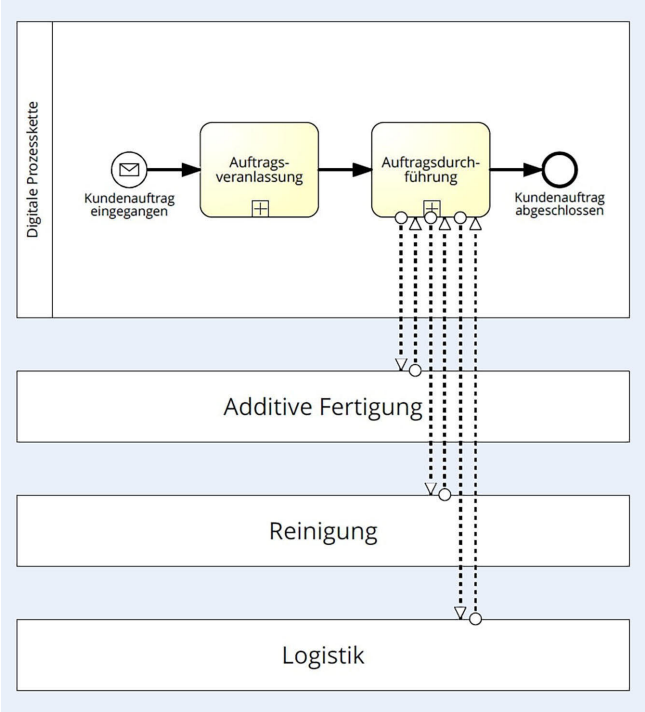


Bild 2. In „Lanes“ aufgeteiltes Prozessmodell der gesamten Wertschöpfungskette. *Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik*

Auf der Ebene „Baujob“ werden die Parameter erfasst, die für alle Bauteile eines Baujobs identisch sind. Beispiele sind die Chargennummer des im PBF-LB/P-Prozess verwendeten Materials, Start- und Endzeit des Baujobs und einige Fertigungsparameter. Auf Bauteil-Ebene müssen demnach lediglich bauteilindividuelle Informationen wie etwa die Orientierung im Bauraum oder die XYZ-Positionierung des Bauteils gespeichert werden.

Die Verknüpfung von Kundenauftrag, Bauteilklasse und individuellem Bauteil erfolgt auf Baujob-Ebene. Dies ist sinnvoll, da verschiedene Kundenaufträge in einem gemeinsamen Bauvorgang aber auch gleiche Bauteilklassen eines Kundenauftrags aufgeteilt auf mehrere Bauvorgänge produziert werden können.

Durch die Einteilung in Ebenen wird sichergestellt, dass Parameter nicht mehrfach im DZ abgespeichert werden. Über die Verwendung von Primärschlüsseln auf jeder Ebene wird die eindeutige Zuordenbarkeit bis auf Bauteil-Ebene gewährleistet. **Bild 3** stellt die Ebenen des DZ mit Beispielen dar.

Innerhalb einer Ebene werden für jeden gespeicherten Parameter die Attribute Lane, Prozessschritt, Bezeichnung, Einheit, Datentyp, Anwendung und Kommentar (optional) definiert. So-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53, am 24.04.2023, 12:59:10
Open Access - (cc) BY - http://elibrary.vdi-verlag.de/agb

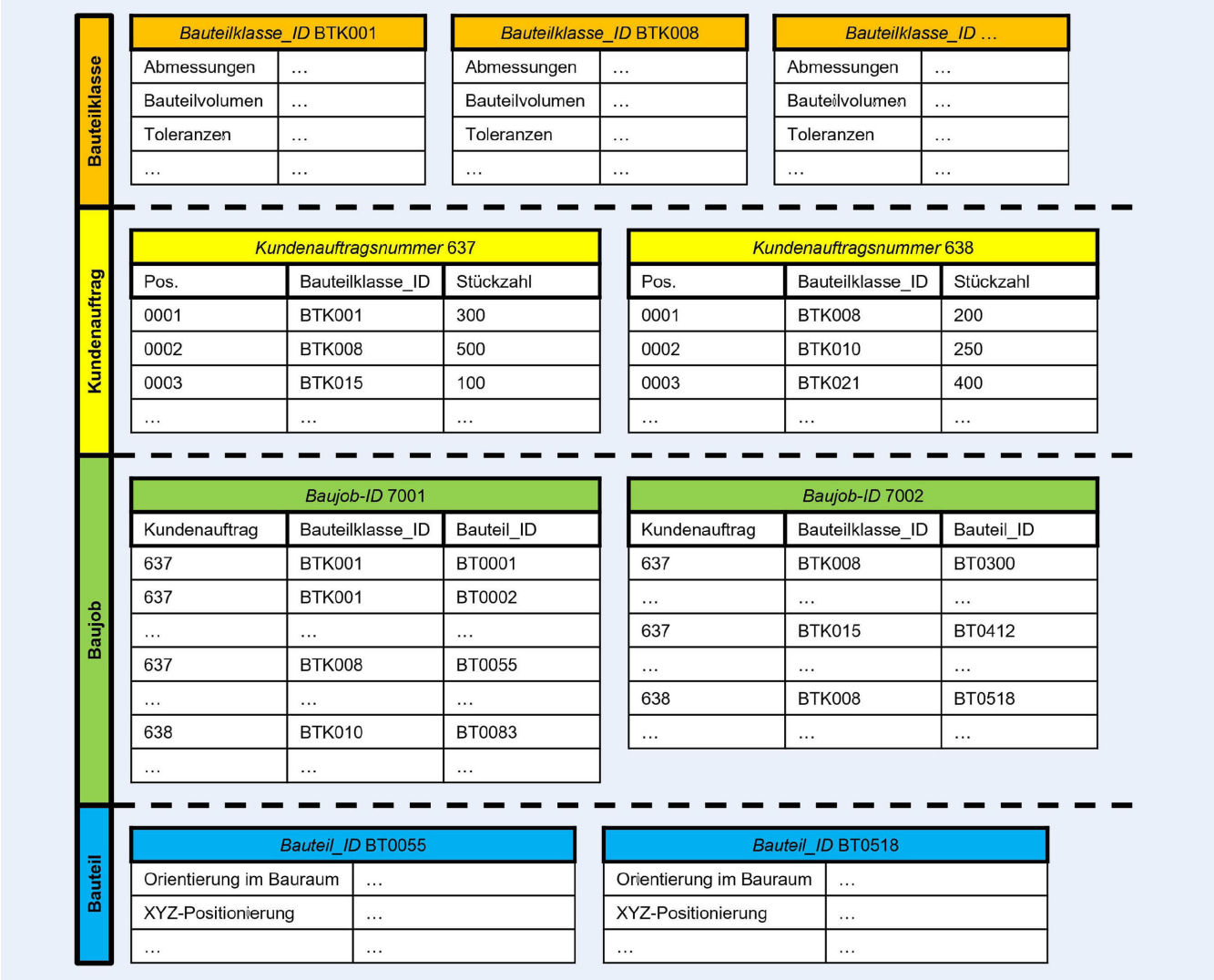


Bild 3. Ebenen des DZ (digitaler Zwilling) mit beispielhaften Primärschlüsseln. *Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik*

Lane	Prozessschritt	Bezeichnung	Einheit	Dateityp	Anwendung	Kommentar
Digitale Prozesskette	Aufbringung der Markierungen im Baujob	Werkstoffzusammensetzung	/	string	Qualität	
Digitale Prozesskette	Aufbringung der Markierungen im Baujob	Sicherheitsklasse	/	string	Organisation/Planung	Sicherheitsdatenblatt
Digitale Prozesskette	Aufbringung der Markierungen im Baujob	Werkstofflieferant	/	string	Qualität	
Digitale Prozesskette	Aufbringung der Markierungen im Baujob	Materialnummer/Chargennummer	/	integer	Organisation/Planung	
Digitale Prozesskette	Aufbringung der Markierungen im Baujob	Fertigungsauftragsnummer	/	integer	Organisation/Planung	
Digitale Prozesskette	Slicen	Step-Format	/	string	Qualität/Produktivität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Auflösung	Sehnenhöhe	float	Qualität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Minimaler Kantenwinkel	rad	float	Qualität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Volumen der Supports	mm3	float	Qualität/Produktivität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Art der Supports	/	string	Produktivität/Qualität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Supportfläche	mm2	float	Produktivität/Qualität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Anteil der effektiven Nutzung des Bauraums	%	integer	Produktivität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Anzahl der Bauteile	/	integer	Produktivität	
Digitale Prozesskette	Slicen	Schichtdicke	µm-mm	float	Produktivität/Qualität	
Digitale Prozesskette	Einordnung in Fertigungsreihenfolge	Baujob-ID	/	integer	Organisation/Planung/Produktivität	

Bild 4. Ausschnitt des DZ auf der Ebene „Baujob". *Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik*

mit können alle Produkt- und Prozessdaten, die entlang der Wertschöpfungskette anfallen, in der jeweiligen Ebene als Tupel (Datensatz) abgespeichert werden. Die Attribute Lane und Prozessschritt ordnen jedem Datensatz den jeweiligen Prozessschritt im Prozessmodell zu. Das Attribut Anwendung klassifiziert jedes Merkmal hinsichtlich seines potenziellen Use Cases. Die auswählbaren Anwendungsgebiete lauten Organisation, Planung, Qualität und Produktivität. Diese können etwa bei der Produktionsplanung oder bei Qualitätsanalysen von Bedeutung sein. **Bild 4** zeigt einen Ausschnitt des DZ-Konzepts auf der Ebene „Baujob".

Um das Zusammenspiel aller Komponenten des Gesamtsystems zu gewährleisten, ist es notwendig eine geeignete Systemarchitektur umzusetzen, die alle nötigen Softwaresysteme sowie deren Schnittstellen beschreibt. Dafür ist zu definieren, wie und in welcher Form Informationen der verschiedenen Prozessketten ausgetauscht werden. Da das Gesamtsystem aus einer heterogen Anlagen- und IT-Landschaft besteht, ist ein Zugriff auf Standardprotokolle sinnvoll. Für die Kommunikation zwischen den Anlagen der Prozesskette kann aufgrund der vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten in Kombination mit hoher Interoperabilität

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53, am 24.04.2023, 12:59:10
Open Access - (cc) BY - http://elibrary.vdi-verlag.de/agb

im gesamten Netzwerk das OPCUA-Protokoll als de-facto-Standard genutzt werden [23]. Durch die Systemarchitektur wird neben der Kommunikation entlang der Prozessketten auch die Datenverfügbarkeit und -durchgängigkeit gewährleistet.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag stellt einen konzeptionell ausgearbeiteten DZ für die additive Fertigung mit PBF-LB/P vor. Die Besonderheit des Ansatzes besteht in der integrierten Betrachtung aller Pre-, In- und PostProzesse sowie der Pulverhandhabung innerhalb einer Linienanwendung. Beim vorgestellten DZ handelt es sich um ein digitales Bauteildokument, in welchem alle während der Wertschöpfungskette anfallenden Daten, Metadaten und Parameter erfasst, auf Basis einer Ebenen-Struktur in logische Relation gesetzt und abgespeichert werden.

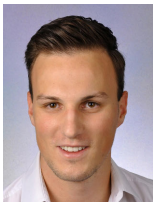
Weitere Forschungstätigkeiten widmen sich der Strukturierung heterogener Datenformate, dem Umgang mit großvolumigen Datenmengen und der Datensicherheit. Die Implementierung und Validierung des Prototyps erfolgt im Rahmen des Forschungsprojekts „Polyline“ und wird bei der BMW Group umgesetzt.

FÖRDERHINWEIS

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

Literatur

[1] Pistorius, J.: Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion. Grundlagen, Potenziale, Anwendungen. Heidelberg: Springer-Verlag 2020
[2] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Thurn, L.: 3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). München: Hanser-Verlag 2016
[3] Lindemann, C.; Jahnke, U.; Moi, M. et al.: Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Austin TX/USA, 2012
[4] Crowell, A. M.; Cramer, S. A.; Lopez, J. P. et al.: Development of a quality assurance tool for additive manufacturing. 2018 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville/VA, 2018, pp. 76–81
[5] Kim, D. B.; Witherell, P.; Lipman, R. et al.: Streamlining the additive manufacturing digital spectrum: A systems approach. Additive Manufacturing 5 (2015), pp. 20–30
[6] DebRoy, T.; Zhang, W.; Turner, J. et al.: Building digital twins of 3D printing machines. Scripta Materialia 135 (2017), pp. 119–124
[7] Mukherjee, T.; DebRoy, T.: A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. Applied Materials Today 14 (2019), pp. 59–65
[8] Riesener, M.; Schuh, G.; Dölle, C. et al.: The Digital Shadow as Enabler for Data Analytics in Product Life Cycle Management. Procedia CIRP 80 (2019), pp. 729–734
[9] Schuh, G.; Häfner, C.; Hopmann, C. et al.: Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 1, S. 105–107
[10] Oettl, F.; Schoeler, J.; Schilp, J.: Development of a method for evaluating the benefits of using a digital twin. 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, pp. 1–7
[11] Glaessgen, E.; Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu/Hawaii, 2012, doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609
[12] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Whitepaper, LLC, 2014. pp. 1–7, doi.org/10.2514/6.2012–1818
[13] Grieves, M.; Vickers, J.: Origins of the Digital Twin Concept. 2016
[14] Liu, M.; Fang, S.; Dong, H. et al.: Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems 58 (2021), pp. 346–361
[15] Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R. et al.: DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Technology Area 11. Stand: 2010. Internet: www.researchgate.net/profile/Mike-Shafto/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap/links/55b2b0ef08aed621ddfe1337/Modeling-Simulation-Information-Technology-and-Processing-Roadmap.pdf. Zugriff am 09.02.2023
[16] Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchy, E. et al.: Digital Twin: Origin to Future. Applied System Innovation 4 (2021) 2, pp. 36
[17] Tao, F.; Zhang, H.; Liu, A. et al.: Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15 (2019) 4, pp. 2405–2415
[18] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G. et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, pp. 1016–1022
[19] DiConneX: Digitaler Zwilling – Womit fange ich an? Stand: 24.11.2021. Internet: diconnex.com/blog/2019/08/19/digitaler-zwilling-womit-fange-ich-an/. Zugriff am 09.02.2023
[20] Wu, Y.; Zhang, K.; Zhang, Y.: Digital Twin Networks: A Survey. IEEE Internet of Things Journal 8 (2021) 18, pp. 13789–13804
[21] Tao, F.; Cheng, Y.; Cheng, J. et al.: Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor. Computer integrated manufacturing systems (2017) 8, pp. 1603–1611
[22] Meister, F.; Mück, J.; Hohmann, A. et al.: Automatisiertes Nesting in additiven Prozessketten. Produktionsplanung und -steuerung für die additive Serienproduktion. wt Werkstattstechnik online 112 (2022) 4, S. 248–252. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
[23] Klein, A.; Wolters, F.; Dederichs, S. et al.: Welcher Kommunikationsstandard für künftige Industrie 4.0-Fabriken? VDI-Z. Stand: 2016. Internet: www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/industrie-4–0/welcher-kommunikationsstandard-fuer-kuenftige-industrie-4–0-fabriken/. Zugriff am 09.02.2023



Tobias Wittmeir, M.Sc.
Foto: Autor

Fabio Oettl, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. **Johannes Schilp**

Lehrstuhl für Produktionsinformatik
Universität Augsburg
Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg
Tel. +49 821/ 598-69318
tobias.wittmeir@uni-a.de
www.uni-augsburg.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-53, am 24.04.2023, 12:59:10
Open Access - (cc) BY - http://elibrary.vdi-verlag.de/agb