

Mehrwerte des Process Data Twins in einem herstellerübergreifenden Industrial IoT Netzwerk

Anwendung des Process Data Twin

A. Leinenbach, M. Wagner, F. Oettl, J. Schilp

Der digitale Zwilling wird als virtuelle Abbildung von bestehenden oder entstehenden Produktionsanlagen eingesetzt. Die Nutzung für tiefergreifende Anwendungen erfordert einen datengetriebenen Zwilling basierend auf dynamischen Daten. Hierfür wird der Process Data Twin (PDT) eingeführt und die dafür entwickelte Open-Source-Technologieumgebung beschrieben. Die Anwendung, seine Mehrwerte sowie weiterführende Entwicklungsschritte zeigen abschließend die vielfältigen Möglichkeiten des PDT.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Industrie 4.0

Application of Process Data Twin

The digital twin is used as a virtual representation of existing or emerging production facilities. The use for deeper applications requires a data-driven twin based on dynamic data. The Process Data Twin (PDT) is distinguished from the previous definitions of the digital twin and its application is presented. Finally, the added values show the manifold possibilities of the PDT and the further development steps.

1 Einleitung/Motivation

Der digitale Zwilling ist im Kontext von Industrie 4.0 ein zentrales Schlagwort. Die Grundlage des digitalen Zwillings in aktuellen Anwendungsfällen ist bisher die grafische Darstellung einer bestehenden oder entstehenden Produktionsanlage, die mit den benötigten Betriebsdaten angereichert wird. Datenbasierte Ansätze wie die Asset Administration Shell setzen den interoperablen Datenaustausch um, bieten allerdings aktuell keine ganzheitliche Lösung, um beispielsweise Plug-and-Produce von Maschinen in einem offenen Ökosystem zu realisieren, da die AAS eine passive API bereitstellt, aber keine vollständige Infrastruktur wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Weitergehende Anwendungsfälle wie zum Beispiel die maschinenübergreifende Optimierung von Produktionsprozessen oder die Nutzung von neuen Geschäftsmodellen, wie Equipment-as-a-Service, benötigen dynamische Daten und müssen diese herstellerunabhängig zur Verfügung stellen. Dieser Beitrag zeigt zunächst unterschiedliche Definitionen von digitalen Zwillingen und erklärt anschließend die technologische Umgebung sowie den strukturellen Aufbau des PDT. Dessen Anwendung in verschiedenen Use-Cases zeigt die Mehrwerte auf.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

Es existieren unterschiedliche, kontextabhängige Definitionen für den Begriff digitaler Zwilling. Grundsätzlich definiert der digitale Zwilling einen digitalen Repräsentanten einer Entität. [1] Dabei kann ein Datenaustausch zwischen dem realen Asset und der digitalen Repräsentation stattfinden. [2] Abhängig von der

Art der Interaktion haben die digitalen Repräsentanten unterschiedliche Bezeichnungen, wie in **Bild 1** zu sehen.

Findet eine Interaktion auf rein manueller Art statt, spricht man von einem digitalen Modell. Existiert ein automatischer Datenfluss ausschließlich weg von dem realen Asset, definiert [3] dies als digitaler Schatten. Bei einem automatischen, bidirektionalen Datenfluss spricht man von einem digitalen Zwilling. Diese Definition ergibt die Möglichkeit, das physische Objekt über den digitalen Zwilling automatisiert auf Basis der digital gewonnenen Daten zu steuern. [3]

Ein datenbasierter Ansatz zur Beschreibung eines Assets liefert die Asset Administration Shell (AAS). Teilmodelle bieten die Möglichkeit, Daten standardisiert zu speichern, um den gesamten Lebenszyklus des Assets abzubilden und auf Assetinformationen über standardisierte Kommunikationskanäle zuzugreifen. [4, 5]

3 Technische Grundlagen des Systems

Um ein tieferes Verständnis für das entwickelte Open-Source-Ökosystem zu entwickeln, wird zunächst die technische Sicht der Umsetzung beschrieben (3.1). Der dort implementierte Process Data Twin (PDT) wird anschließend strukturell definiert.

3.1. Technologieumgebung

Da für einen Digitalen Zwilling interoperable Datenmodelle, Datenaustausch und Dateninteraktion zwischen verschiedenen Domänen, zum Beispiel den Maschinen, Werkstücke, Menschen, Gebäude, Prozesse, etc., notwendig sind, muss ein Standard verwendet werden, der ein großes Ökosystem an Datenmodellen

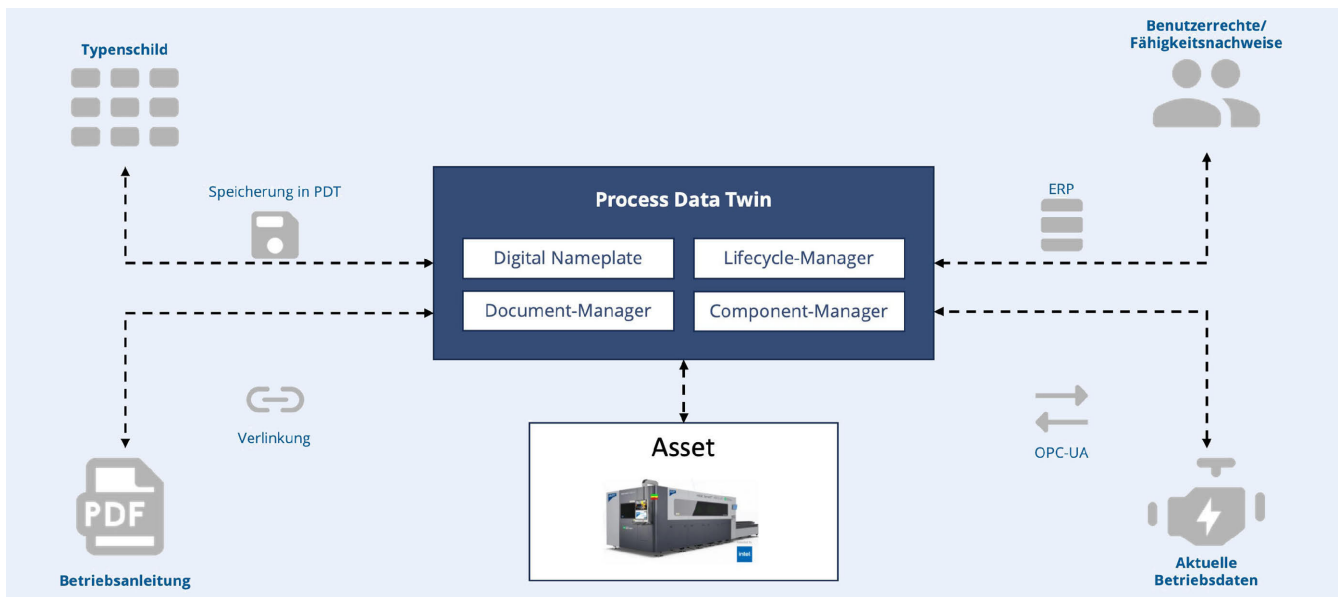


Bild 1. Interaktion zwischen Instanz und digitaler Repräsentant. Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik, in Anlehnung an [3]

und Lösungen bereitstellt. Ein solcher Standard wird zum Beispiel von der Fiware Foundation definiert. [6] Der Next-Generation-Service-Interface-Linked-Data Standard (NGSI-LD) spezifiziert ein sehr flexibles Datenmodell und ein Objekt-Broker Application Programming Interface (API), mit dem man auf diesen Daten operieren kann. [7] NGSI-LD setzt dabei auf existierenden, semantischen Standards von W3C [8], wie JSON-LD, Resource Description Framework Schema (RDFS) [9] und Shapes Constraint Language (SHACL) [10]. Dadurch ist es nicht nur leicht, semantische Objekte zu definieren, zu validieren und zu verknüpfen, sondern auch möglich diese in Echtzeit mit Wissens-Graphen zu verbinden. Des Weiteren werden von Fiware wichtige Europäische Themen der Datensouveränität adressiert. Schließlich kommt dazu noch ein großes Ökosystem: Allein der Context Broker hat drei unabhängige Open Source Implementierungen und es existiert eine große Anzahl von Lösungsbausteinen. Deshalb bietet NGSI-LD eine standardisierte und mächtige Grundlage für einen datenbasierten Digitalen Zwilling. Das beschriebene System wird bereits für Smart Cities genutzt. [11]

Beide Konzepte, die Asset Administration Shell und NGSI-LD, haben überlappende und komplementäre Eigenschaften und beeinflussen die Zukunft der Europäischen Industrie. Deshalb wird es zukünftig entscheidend sein, beide Konzepte zu kombinieren, um die im Verlauf beschriebenen Use-Cases weiter optimieren zu können und die Industrie im technologischen Wandel zu unterstützen. Diese Publikation fokussiert sich nachfolgend auf die Umsetzung und Anwendung der Technologieumgebung mit NGSI-LD.

3.2. Struktureller Aufbau

Jedes Asset besitzt einen PDT. Assets können Maschinen, Logistikfahrzeuge, Softwarekomponenten oder Menschen sein. Für Maschinen entsteht der PDT am Ende des Produktionsprozesses, so dass dort alle nötigen statischen Informationen hinterlegt werden.

Mit der Erzeugung erhält der PDT und damit das physische Asset eine weltweit eindeutige Identifizierung, die von einer

übergeordneten Instanz vergeben wird. Die Identifizierung ermöglicht eine Zuordnung sämtlicher Informationen, Produktionsdaten, Wartungspläne, etc. exakt zu einer Maschine.

Wird die Maschine in die Produktion eingebracht, erzeugt sie zusätzliche Betriebsdaten.

Ein zentraler Datensatz ist der Maschinenzustand, der im PDT nach VDI 3423 definiert ist. Bereits aus diesem Datensatz lassen sich einfache Rückschlüsse über die Maschinenverfügbarkeit ziehen. Mit der Normierung nach VDI 3423 sieht der Nutzer zusätzlich bspw. die organisatorischen oder technischen Ausfallzeiten. Weitere Standarddaten sind die Spannungs- und Stromwerte der Maschine als Grundlage für die CO₂-Bilanzierung und Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs.

Neben diesen Standarddaten gibt es maschinenspezifisch weitere Vorgaben, um die Interoperabilität zwischen einzelnen Maschinen sicherzustellen. Beispielfähig sei hier eine Laserschneidanlage genannt, die für den Betrieb weitere Medien wie Druckluft oder Prozessgase verbraucht. Die gesammelten Daten können in strukturierter Form gruppiert werden, wie in Bild 2 zu sehen. Dabei wird zwischen Bereichen Digital Nameplate sowie den Lifecycle-, Document- und Component-Managern unterschieden. Zusätzlich sind in der Abbildung die Möglichkeiten zur Verfügbarkeit der Daten dargestellt. Das Digital Nameplate enthält grundlegende Maschineninformationen analog zu einem klassischen Typenschild. Dazu gehören beispielsweise der Maschinentyp, der Hersteller oder das Baujahr. Der Document Manager stellt wichtige Dokumente wie zum Beispiel die CE-Zertifizierung bereit, liefert aber auch über Verlinkungen die aktuellste Version von Betriebsanleitungen bereit. Durch die aktive Anbindung weiterer System wie einem ERP ist es möglich, Schulungsnachweise und Benutzerrechte einfließen zu lassen. Die semantische Struktur erlaubt dabei eine Verknüpfung von Schulungen bezogen auf Maschinentypen. Die aktuellen Betriebsdaten fließen über diverse Kommunikationsschnittstellen wie OPC-UA, MQTT etc. in den PDT und können damit für diverse Anwendungen genutzt werden. Exemplarisch genannt seien die Optimierung von Produktionsprozessen oder die Anwendung von KI-Modellen.

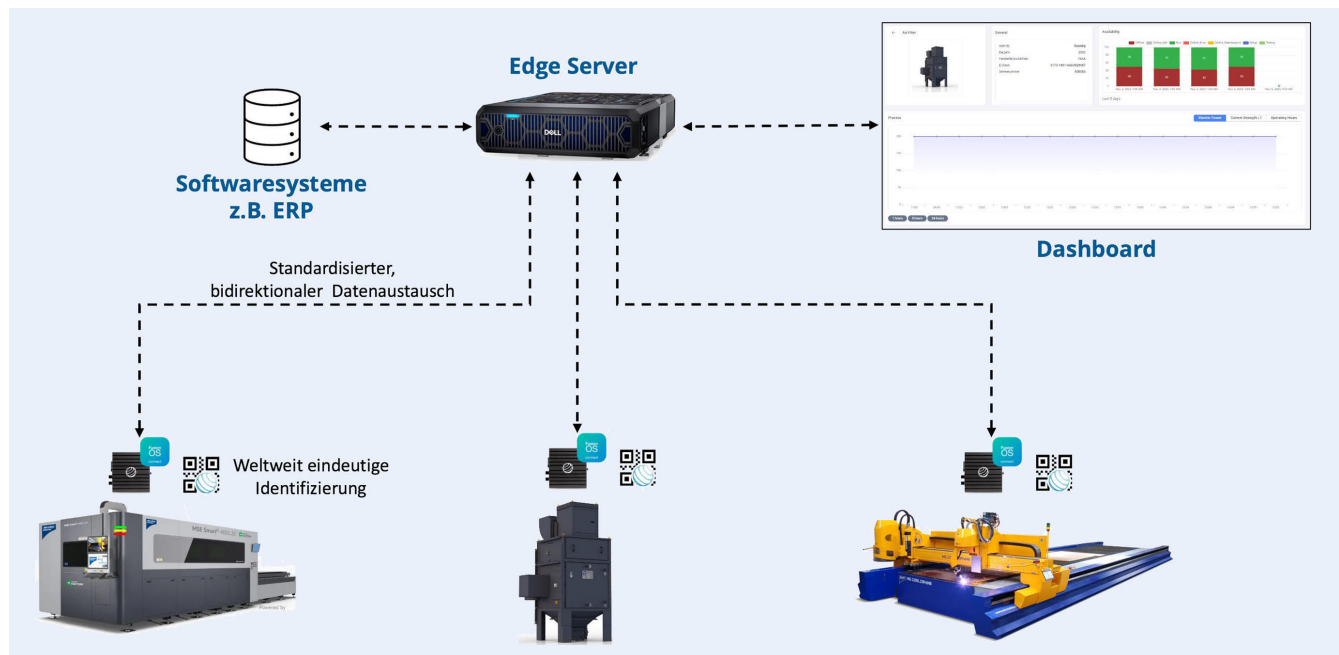


Bild 2. Aufbau des Process Data Twins (PDT) und den verschiedenen Informationen sowie Speicherungsarten und -orten.
 Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik

Die semantische Struktur erlaubt dabei die Anwendung von Algorithmen auf Maschinen verschiedener Hersteller.

Neben der Nutzung der dort gespeicherten Daten zur Maschine kann beispielsweise geprüft werden, ob ein Mitarbeiter die erforderlichen Schulungen für die Arbeit an einer Maschine besitzt.

Die Speicherung des PDTs erfolgt direkt auf der Maschine mit Zugriff auf die beschriebenen Daten. Gleichzeitig entsteht eine aktuelle Kopie auf Fabrik- und/oder Cloudebene. Der Eigentümer des Assets entscheidet, welche Daten freigegeben werden, beispielsweise Maschinendaten für den Hersteller für die Optimierung von Maschinen und Prozessen.

Strukturell ergeben sich Überschneidungen beziehungsweise gleiche Eigenschaften wie bei der Asset Administration Shell, die teilweise gleiche Daten wie zum Beispiel das digitale Typenschild oder aktuelle Betriebsdaten verarbeitet beziehungsweise speichern kann. Der Unterschied liegt in der technologischen Umsetzung. Durch die Anwendung eines Context-Brokers in Kombination mit den beschriebenen Standards bietet das Ökosystem weitere Verknüpfungs- und Anwendungsmöglichkeiten wie beispielsweise die direkte Interaktion von Maschinen entlang einer Prozesskette. Insbesondere führen die verwendeten Technologien dazu, herstellerunabhängige Beschreibungen zu finden und diese für gleiche Maschinentypen anzuwenden. Diese Beschreibungen werden in weiteren Veröffentlichungen beschrieben, da sie für die nachfolgenden Use-Cases im ersten Schritt keine Relevanz haben.

4 Anwendung und Mehrwerte des PDT

Die nachfolgenden exemplarischen Anwendungen sollen die Umsetzung der in Abschnitt drei beschriebenen Technologieumgebung beschreiben und die damit generierten Mehrwerte aufzeigen.

4.1. Transparente Produktionsprozesse

Die Produktion mittelständischer Unternehmen besteht häufig aus einem heterogenen Maschinenpark. Dies erschwert die einheitliche Darstellung von maschinenübergreifenden Produktionsprozessen und verhindert damit die einfache Schaffung von Transparenz. Durch die Abbildung der Maschinen in einem PDT, der in einer herstellerunabhängigen Vernetzungslösung implementiert ist, kann die Maschine einfach in die bestehende Infrastruktur integriert werden. Schematisch ist diese Verknüpfung in **Bild 3** dargestellt. Jede Maschine besitzt ein standardisiertes Gateway, zu dem die Maschinenkommunikation individuell erfolgt. Der Austausch zwischen Gateway und Edge Server erfolgt über eine standardisierte, bidirektionale Kommunikation. Der Edge Server ist der Knotenpunkt in der Fabrik und bindet neben Maschinen auch weitere Assets wie Softwaresysteme an. Gleichzeitig kann über den Edge Server auf sämtliche Maschinendaten zugegriffen werden. In dieser lokalen Kommunikationsstruktur befindet sich der PDT auf dem Gateway, um die Informationen bei Standortänderungen dauerhaft vorliegen zu haben und damit eine Plug-and-Produce-Lösung zu erreichen. Eine Back-Up-Kopie wird auf dem Edge Server zur Datensicherung erstellt. In den Anwendungsfällen zwei und drei wird auf die Kommunikationsstruktur zwischen Edge Server und Cloud weiterführend eingegangen.

Der PDT liefert damit grundlegende Maschinendaten herstellerunabhängig, die beispielsweise in einem Dashboard angezeigt werden können. Mit den Nutzungsdaten lassen sich zum Beispiel die Maschinenverfügbarkeit nach aktuellen Normen VDI 3423 ausgegeben oder Produktionsprozesse nachvollziehen. Die grundlegenden Daten des Stromverbrauches liefern zudem die Möglichkeit, eine CO₂-Bilanzierung entlang des gesamten Produktionsprozesses durchzuführen und damit zukünftigen gesetzlichen Anforderungen zu entsprechen. Perspektivisch liefert diese Datenverfügbarkeit die Möglichkeit, maschinenentyp-spezifische Da-

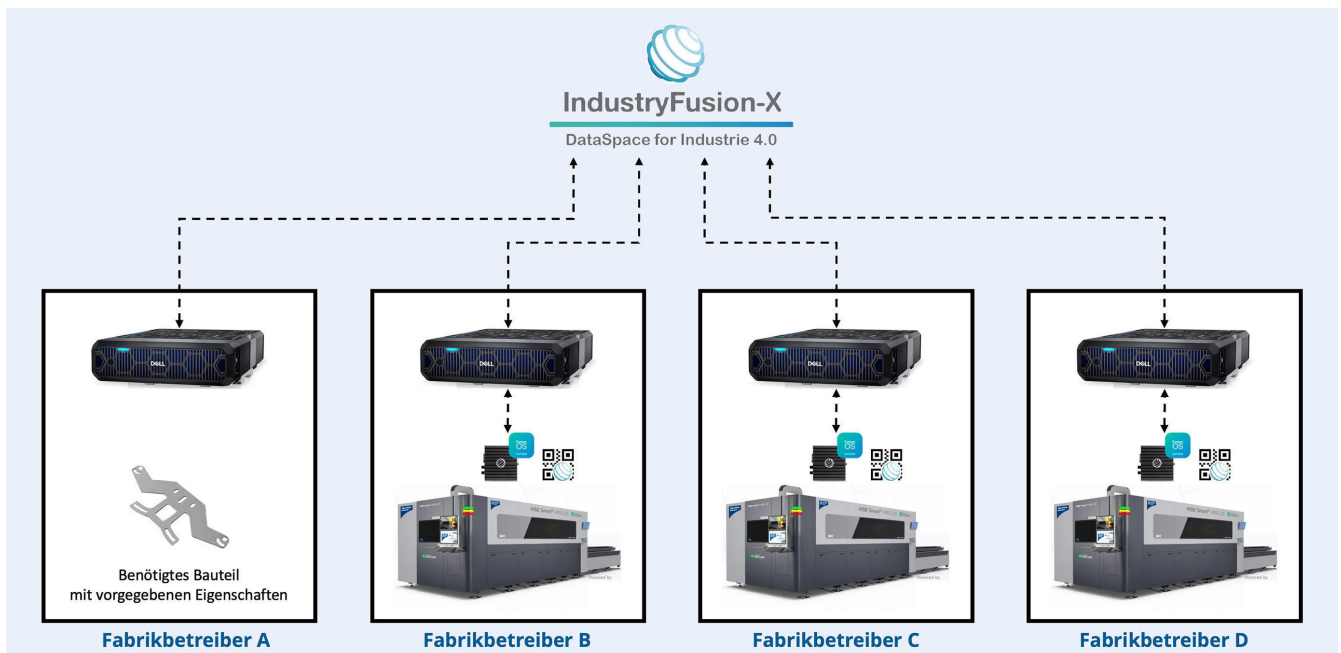


Bild 3. Infrastruktur für die Umsetzung von transparenten Produktionsprozessen mit einem Edge Server sowie die Anbindung von Softwaresystemen und Maschinen. Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik

ten auszugeben und damit maschinenübergreifend Produktionsprozesse zu optimieren. Beispielhaft sei hier das Zusammenspiel zwischen einer Laserschneidanlage und der dazugehörigen Filterung genannt. In bisheriger Konstellation wird die Filteranlage in einem binären Zustand betrieben (Filterung ist aktiv/nicht aktiv).

Durch die Verwendung der Maschinendaten können Modelle entwickelt werden, die für alle Kombinationen aus Schneidmaschine und Filteranlage herstellerunabhängig Anwendung finden können, um die Ansteuerung zu optimieren und damit zum Beispiel die Energieeffizienz durch eine geringere Leistung der Filteranlage zu erhöhen. Grundlage dafür ist die beschriebene technologische Umsetzung mit dem Context-Broker sowie die Modellierung mit Echtzeit-Wissensgraphen.

4.2. Equipment-as-a-Service

Speziell für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stellt die Anschaffung einer neuen Maschine aufgrund der Kapitalbindung und des Eigenkapitalbedarfs eine große finanzielle Herausforderung dar. Im Vergleich zu größeren Unternehmen unterliegt die Maschinenauslastung im Durchschnitt größeren Schwankungen, wodurch sich der Return on Investment verschiebt.

Dies hat zur Folge, dass kleine und mittlere Unternehmen ihre Maschinen sehr lange halten und damit später auf neue, effizientere Technologien umsteigen. Hierdurch werden ihre Produktionskosten Jahr für Jahr höher, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit und -verfügbarkeit abnimmt.

Einen Ausweg aus dieser Situation bieten Mietmodelle, da hier weniger finanzielle Mittel gebunden werden. Jedoch stellt die Begleichung der fixen monatlichen Rate eine Hürde in auslastungsschwachen Monaten dar, da in diesen weniger Cashflow generiert wird.

An dieser Stelle setzt auf der technologischen Basis des PDT das Finanzierungsmodell Equipment-as-a-Service an, bei

welchem das Unternehmen die Anlage auch mietet. Im Gegensatz zum reinen Mietmodell variiert allerdings die monatliche Rate. Diese richtet sich nach der tatsächlichen Maschinenauslastung. Wird in einem Monat mehr produziert, ist die Rate höher als bei einem vergleichbaren Mietmodell. Jedoch kann das Unternehmen diese leichter begleichen, da eine höhere Maschinenauslastung aus einer guten Auftragslage resultiert und so ein höherer Cashflow generiert wird. Bei einer schlechten Auftragslage ist die Maschinenauslastung dementsprechend geringer, wodurch auch die monatliche Rate sinkt. In **Bild 4** wird der Zusammenhang zwischen der Maschinenauslastung und der monatlichen Rate beider Finanzierungsmodelle gegenübergestellt.

Das Auslastungsrisiko liegt bei diesem Modell nicht mehr beim Mieter, sondern beim Finanzierer, wodurch speziell KMUs immens profitieren. Zudem wird der Zugang zu neuen Technologien für KMUs deutlich erleichtert und die Wettbewerbsfähigkeit dieser aufgrund der geringen Produktionskosten gesteigert. Der Maschinenhersteller profitiert bei diesem Modell von der Gewinnung neuer Kunden und durch langfristige Serviceverträge sowie Ersatzteillieferungen.

Grundlage dieses Modells stellen validierbare und sichere Daten identifizierbarer Entitäten dar, da die monatliche Rate anhand der tatsächlichen Laufzeit der Maschine berechnet wird. Daher ist die Grundvoraussetzung, dass die übertragenen Daten, wie der Maschinenstatus, nicht von anderen Maschinen oder Gateways gesendet werden können und so die Berechnungen der monatlichen Rate auf einer falschen Datenbasis erfolgen. Der Einsatz des PDT ermöglicht die Hinterlegung einer weltweit eindeutigen ID für das Asset und das Gateway, welche von einer non-profit Organisation bereitgestellt und verwaltet wird. Hierdurch wird sichergestellt, dass gesendete Daten anderer Assets oder Gateways erkannt werden, da diese eine andere ID aufweisen. [12] Somit schafft der PDT einen Vertrauensraum zwischen Finanzierer, Fabrikbetreiber und Maschinenhersteller.

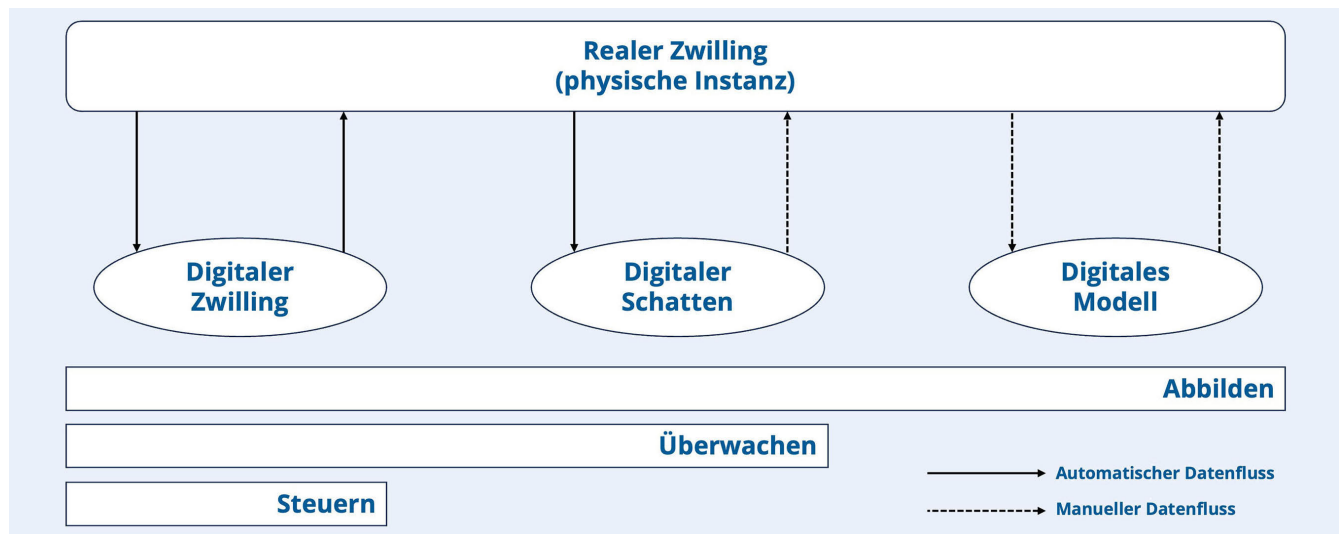


Bild 4. Kostenvergleich für ein klassisches Mietmodell und Equipment-as-a-Service. Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik

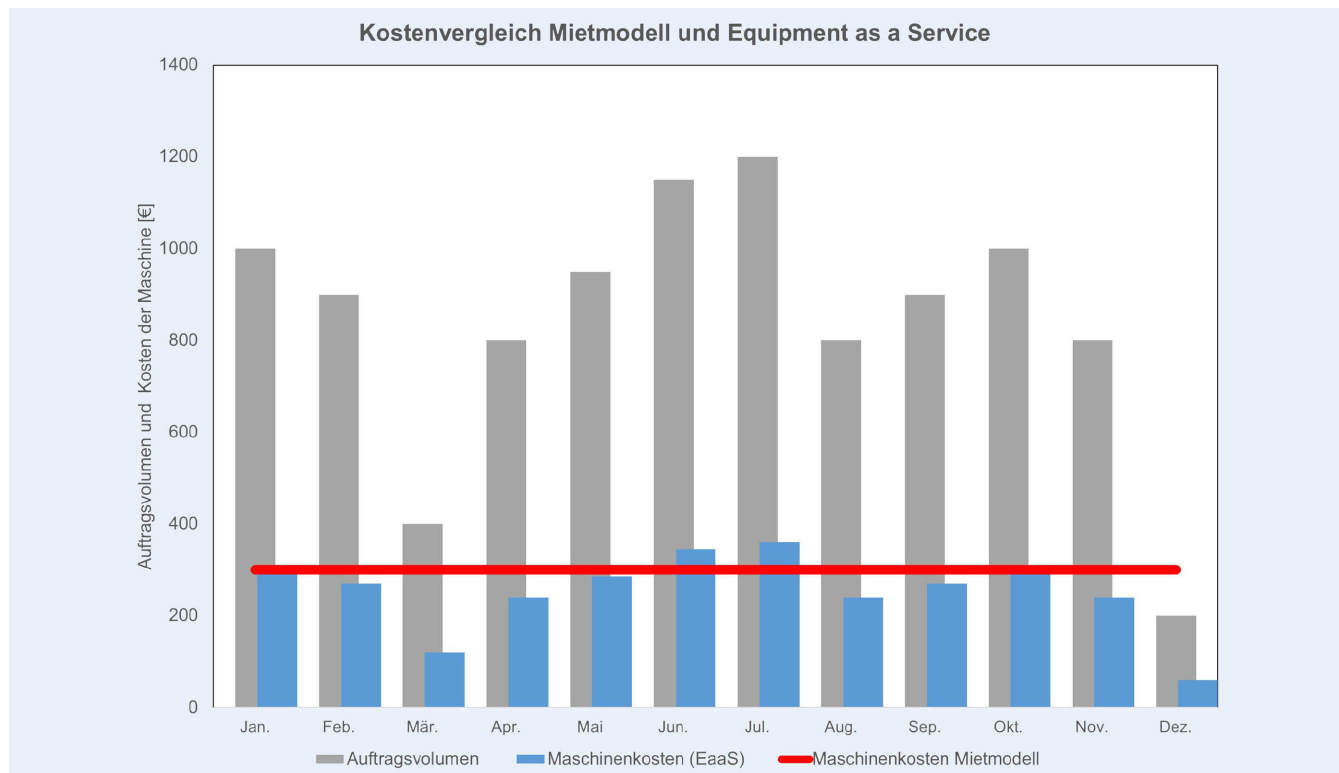


Bild 5. Vernetzte Fabriken über IndustryFusion-X als Dataspace für Industrie 4.0. Grafik: Lehrstuhl für Produktionsinformatik.

4.3. Cloud Manufacturing

Wie in 4.2. beschrieben wird die Maschinenkapazität in vielen Unternehmen nicht vollumfänglich ausgenutzt, wobei andere Unternehmen Auftragsspitzen abarbeiten müssen. Wenn Unternehmen Produktionskapazitäten standardisiert und ohne zusätzlichen bürokratischen Aufwand zur Verfügung stellen, steigt die Rendite der Maschineneigentümer und Kunden von fertigenden Unternehmen haben kürzere Lieferzeiten. Gleichzeitig können Maschinenkapazitäten als zusätzliche Einnahmequelle zur Verfügung gestellt werden. In [13] ist dieses Vorgehen als Sharing Economy

beschrieben, üblicherweise nutzt man den Begriff Cloud Manufacturing. [14]

Der strukturelle Aufbau ist in **Bild 5** zu sehen. Jedes schwarze Rechteck stellt ein Unternehmen beziehungsweise einen Fabrikbetreiber dar, der über den Edge Server mit einer Cloudinfrastruktur kommuniziert. Durch den PDT als Kommunikationsschnittstelle schafft die Struktur semantische Interoperabilität und ermöglicht maschinenherstellerunabhängig die Integration in die Infrastruktur. Fabrikbetreiber A möchte das gezeigte Bauteil fertigen, hat aber keine passende Maschine, keine Rohmaterialien oder fehlende Maschinenkapazitäten. Über die Anbindung an die Cloudinfrastruktur stellt er die Bauteilgeometrie sowie ge-

wünschte Eigenschaften zur Verfügung. Die Fabrikbetreiber B bis D prüfen, ob, wann und unter welchen Rahmenbedingungen eine Fertigung möglich ist. Fabrikbetreiber A wählt das für ihn passende Angebot. Nach den Produktions- und Logistikprozessen erfolgt die Abrechnung ebenfalls über die digitale Infrastruktur. Sämtliche Daten zum Bauteil sind im PDT gespeichert und damit für Fabrikbetreiber A dauerhaft verfügbar. Für eine maximale Flexibilität unter geringem zeitlichem Aufwand müssen diese Prozesse automatisiert ablaufen. Dann kann dieser einzelne Beschaffungsprozess in die Gesamtbeschaffung einer Baugruppe eingebunden sein und zu einem möglichst günstigen Zeitpunkt erfolgen. Mehrwerte für die beteiligten Unternehmen ergeben sich, wenn der gesamte Angebots-, Bestell- und Bezahlungsprozess automatisiert abgebildet wird. Für die Unternehmen ergibt sich dann ein Anreiz, ohne hohe technologische Hürden an Cloud Manufacturing teilzunehmen, die Auslastung der eigenen Maschinen zu steigern und damit die Rentabilität zu erhöhen. Freie Produktionsressourcen werden effektiv durch den Maschinenpark genutzt und die Vergabe von Produktionsaufträgen erfolgt auf einem automatischen Weg.

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt den strukturellen Aufbau des PDT in der Open-Source-Technologieumgebung. Durch die Beschreibung von drei Anwendungsfällen wurden die Mehrwerte des Ansatzes gezeigt und abgeleitet. Die Vorteile durch eine weltweit eindeutige Identifizierung sowie die Standardisierung von Daten führen zu einer semantischen Interoperabilität und damit zur Nutzung aller Ansätze aus Industrie 4.0. Ähnliche Ansätze und Umsetzungen zur Interoperabilität bestehen mit der Asset Administration Shell.

Aktuell befindet sich mit der IndustryFusion-Foundation [15] ein Konsortium in der Umsetzung der Entwicklung und zeigt bei seinen Technologiedaten im Mai 2024? die praktische Anwendung von Equipment-as-a-Service. Dabei erfolgt die Umsetzung mit verschiedenen Industriepartnern und wird im Bereich Safety durch den TÜV begleitet.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollen die Möglichkeiten der beschriebenen Open-Source-Technologien untersucht werden, aber auch bestehende Ansätze wie die Asset-Administration-Shell einbezogen werden. Weitere wichtige Forschungsfragen sind die Umsetzung einer zentralen Produktionssteuerung oder der Aufbau einer dynamischen Safetystruktur für die verwendeten Maschinen und Systeme.

Literatur

- [1] Tao, F.; Zhang, H.; Liu, A. et al.: DigitalTwin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15 (2019) 4, S. 2405–2415
- [2] 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, S. 76–81
- [3] Kritzing, W.; Karner, M.; Traar, G. et al.: DigitalTwin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 1016–1022
- [4] IDTA: Specification of the Asset Administration Shell Part 1: Metamodel, Industrial Digital Twin Association, Stand: 2023, Internet: [https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/06/IDTA-](https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/06/IDTA-01001-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf)

01001-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf, Zugriff 20.01.2024

- [5] IDTA: Specification of the Asset Administration Shell Part 3a: Data Specification – IEC 61360, Industrial Digital Twin Association, Stand: 2023, Internet: https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/04/IDTA-01003-a-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part3a_DataSpecification_IEC61360.pdf, Zugriff 20.01.2024
- [6] Ahle, U.; Hierro, J.; Panfilis, S. et al.: Fiware, Stand 2023, Internet: <https://www.fiware.org/>, Zugriff am 02.23.2023
- [7] ETSI GS CIM 009 V1.6.1 – Context Information Management (CIM); NGSI-LD API, Stand: 2022, Internet: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>, Zugriff 08.12.2023
- [8] Smith, M. et al.: OWL 2 Web Ontology Language Document Overview, Stand:2012, Internet: <https://www.w3.org/TR/owl2-primer/>, Zugriff 08.12.2023
- [9] Knublauch, H.; Kontokostas, D. Shapes: Constraint Language (SHACL)-W3C Recommendation, Stand: 2017, Internet: <https://www.w3.org/TR/shacl/>, Zugriff 08.12.2023
- [10] Cyganiak, R.; Wood, D.; Lanthaler, M.: W3c 2014, RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax, Stand:2014, Internet <https://www.w3.org/TR/rdf11-concepts/>, Zugriff 09.12.2023
- [11] Ahle, U.; Hierro, J.; De Panfilis, S. et al.: FIWARE – Cities Directory, Stand 2023, Internet: <https://fiware.org/about-us/smart-cities/cities-directory/>, Zugriff am 02.12.2023
- [12] Wagner, M., Feyz, M.: Digital Twin Industry Fusion GitHub Stand: 2023, Internet: <https://github.com/IndustryFusion/DigitalTwin>, Zugriff 08.12.2023
- [13] Haese, M.: Aktueller Begriff Sharing Economy, Wissenschaftliche Dienste deutscher Bundestag, 2015
- [14] Zhou, J.; Wang, M.: Cloud Manufacturing Service Paradigm for Group Manufacturing Companies. Adv. Mech. Eng. 2014, 6, 740725.
- [15] IndustryFusion Foundation: Vernetzung als Treiber von innovation, Wohlstand & Nachhaltigkeit, Stand 2023, <https://industry-fusion.org/de>. Zugriff 03.12.2023




Andreas Leinenbach, M. Eng. 

Foto: Autor

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Produktionsinformatik
Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg
Tel. +49 821 598 69319
andreas.leinenbach@uni-a.de
www.uni-augsburg.de

Dr. rer. nat. Marcel Wagner 

Intel Deutschland GmbH
Dornacherstr. 1, 85622 Feldkirchen
marcel.wagner@intel.com
www.intel.de

Fabio Oetli, M. Sc.

MicroStep Europa GmbH
Messerschmittstr. 10, 86825 Bad Wörishofen
fabio.oetli@microstep.com
www.microstep.com

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Fraunhofer-Institut für Gießerei-,
Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
johannes.schilp@igcv.fraunhofer.de
www.igcv.fraunhofer.de

LIZENZ



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