



Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten

G. Schuh, C. Häfner,
C. Hopmann, B. Rumpe,
M. Brockmann, A. Wortmann,
J. Maibaum, M. Dalibor,
P. Bibow, P. Sapei und
M. Kröger, Aachen

Digitale Schatten bereiten heterogene Daten zielgerichtet auf

Die Digitalisierung stellt Produktionsunternehmen weltweit vor große Herausforderungen. Durch umfangreiche Datenerfassung und -analyse sollen hochflexible, wandlungsfähige Wertschöpfungs-systeme entstehen, die bei reduzierten Kosten die Produktivität steigern. Aufgrund zahlreicher domänenspezifischer IT-Systeme und komplexer cyber-physischer Produktionssysteme liegen Daten sehr heterogen vor und erschweren dadurch eine zielgerichtete Optimierung [1, 2]. Durch die Komplexität des betrachteten Systems ist ein vollständiges und funktional umfassendes digitales Abbild des Produktionssystems als Digitaler Zwilling aufwändig [3, 4], kann aber bei adäquater Vorgabe der notwendigen Genauigkeit erreicht werden, da der Begriff „digital“ per se eine Abstraktion von dem physischen System beinhaltet.

Im Gegensatz zum Digitalen Zwilling umfasst der Digitale Schatten lediglich eine für eine konkrete Aufgabe oder Fragestellung benötigte Teilmenge der verfügbaren Daten. Dazu werden Daten (u. a. Mess- und Simulationsdaten) domänen- und anwendungsfallspezifisch kombiniert sowie auf inhaltlicher und zeitlicher Betrachtungsebene geeignet aggregiert. Entscheidungssituationen in der Produk-

Die Digitalisierung verspricht Unternehmen, die Wandlungsfähigkeit und Produktivität bestehender Fertigungssysteme zu fördern. Durch die Komplexität cyber-physischer Produktionssysteme liegen Produktionsdaten jedoch heterogen, unstrukturiert und isoliert vor. Die für eine konkrete Aufgabe oder Fragestellung benötigten Daten werden durch Digitale Schatten zielgerichtet verknüpft, abstrahiert und aggregiert, sodass eine wissensbasierte und echtzeitfähige Entscheidungsfindung in der Produktion möglich wird.*)

tion werden durch die gezielte Aufbereitung der Daten bestmöglich unterstützt und in Bezug auf konkrete Optimierungsmodelle teilautomatisiert auflösbar. Zudem bieten sie die Möglichkeit, bestehende produktionstechnische Modelle durch datenbasierte Ansätze weiterzuentwickeln und in der Praxis zu erproben.

Bild 1 verdeutlicht den potenziellen Nutzen Digitaler Schatten am Beispiel von Google Maps. Während das physische Straßennetz zur allgemeinen Orientierung oder zur Abschätzung von Entfernungen bereits als starres, Digitales Modell genutzt werden kann, werden zur Abschätzung der realen Fahrzeit und zur Identifikation der fahrzeitorientierten Route dynamische Daten zum Verkehrsverhalten benötigt. Durch Anreichern des geographischen Modells um Daten zur aktuellen oder prognostizierten Verkehrslage als Digitaler Schatten lässt

sich die tatsächliche Fahrzeit verlässlich und routenspezifisch ermitteln. Ein vollständiger Digitaler Zwilling des betrachteten Erdausschnitts ist dazu nicht notwendig.

Analog zu Google Maps lassen sich Fertigungsaufträge in der Produktion ebenfalls anhand ihrer starren Merkmale (notwendigen Arbeitsschritte, durchschnittlichen Durchlaufzeiten) in den Produktionsablauf einlasten, doch wird der Fertigstellungstermin erst durch Einbeziehen der aktuellen Auslastung und etwaiger Maschinenausfälle verlässlich planbar. Aufgrund der komplexen Wirkbeziehungen in der Produktionstechnik werden im Exzellenzcluster „Internet of Production“ daher Methoden entwickelt, um Digitale Schatten in der Produktion flexibel zu generieren und zur datengestützten Optimierung der Prozesse zu nutzen.

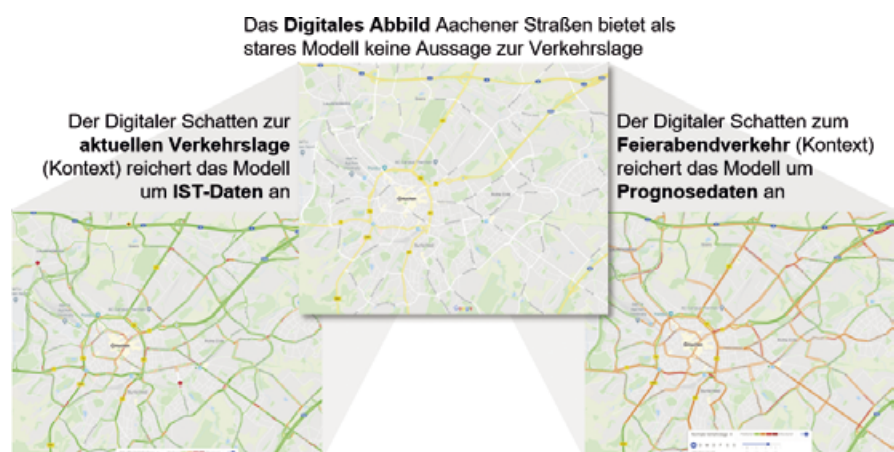


Bild 1. Beispielhafte Digitale Schatten dynamischer Daten in dem von Google Maps gebotenen Strukturmodell

*) Förderhinweis

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production.

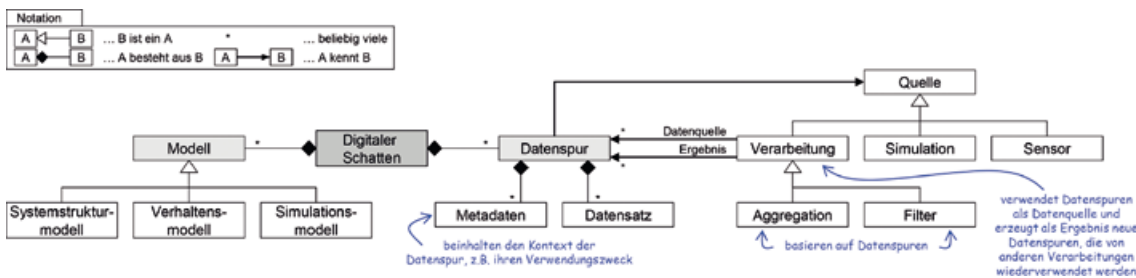


Bild 2. Metamodell des Konzepts Digitaler Schatten

Das Wesen Digitaler Schatten

Um Digitale Schatten in der Produktion erfassen und nutzen zu können, muss zunächst eine Informationsarchitektur aufgestellt werden, die es ermöglicht, die Vielzahl der in der Produktion anfallenden Daten zu erfassen, zu verarbeiten und zu verstehen. Im Software Engineering werden hierzu Modelle verwendet, die zugleich die konzeptionelle Kluft zwischen domänenspezifischen Abstraktionsebenen schließen [5]. Bestehende digitale Modelle, die zumeist statisch und unintegriert sind [6], werden dagegen zur Typisierung Digitaler Schatten und der notwendigen Datenstrukturen genutzt. Der Digitale Schatten wird hierzu gemäß des entwickelten Metamodells aus Bild 2 wie folgt definiert:

Ein Digitaler Schatten ist eine Menge von Modellen und Datenspuren, die neben dem reinen Datensatz auch kontextbeschreibende Metadaten zum jeweiligen Verwendungszweck enthalten.

Digitale Schatten bestehen demnach aus Datenspuren, die zu einem bestimmten Verwendungszweck oder Analysefokus erzeugt und ausgewertet werden. Hierzu beinhalten die Datenspuren neben den reinen Datensätzen kontextbehaftete Metadaten (z.B. Bezugsquelle, Erfassungszeitpunkt, Auflösung), die zur semantischen Verarbeitung benötigt werden. Sie können aus verschiedenen Quellen (z.B. Sensorsignale, Simulationsdaten) stammen, oder als Verarbeitung durch Aggregation oder Filterung anderer Datenspuren (z.B. Temperaturgradient aus mehreren Temperaturmessungen) entstanden sein. Darüber hinaus können Digitale Schatten Modelle enthalten, die sie um dynamische Daten anreichern oder zur Analyse der Datenspur nutzen.

Kontextspezifische Digitale Schatten entstehen daher durch zielgerichtete Selektion der benötigten Parameter, Bereinigung der Rohdaten und Kombination von Daten aus verschiedenen Quellen. Damit diese heterogenen Daten semantisch verwertet werden können, werden Modelle und Metadaten benötigt, die das Bezugssystem und die darin anfallenden

Daten typisieren und strukturieren. Für Digitale Schatten der Produktion ergeben sich daher folgende Konsequenzen (K1 – K5) hinsichtlich der Modellierung, Datenerfassung und Funktionalität:

K1: Digitale Schatten müssen domänenspezifisches Wissen beinhalten

Zur zielgerichteten Analyse Digitaler Schatten und der semantischen Verknüpfung enthaltener Daten ist es notwendig, auf domänenspezifisches Wissen zurückzugreifen. Hierzu müssen die bei Planung und Betrieb eines Produktionssystems genutzten Modelle (z.B. Verhaltensmodelle, Simulationsmodelle) in geeigneter Form digitalisiert werden. In der Modellbasierten Systementwicklung haben sich dazu bereits verschiedene Modellierungssprachen (z.B. SysML, UML, CAD, Modellica) etabliert, um Wissen domänenübergreifend abzubilden. Dadurch wird es möglich, Modelle über Digitale Schatten mit dynamischen Daten anzureichern, um gleichzeitig die Modellgenauigkeit und das Bezugssystem kontinuierlich zu optimieren.

K2: Digitale Schatten sind stets kontextbezogen

Ziel des Digitalen Schattens ist es, die Entscheidungssituation einer spezifischen Aufgabe oder Fragestellung hinreichend gut zu unterstützen. Der Kontext (z.B. Wartung, Betriebspunktoptimierung) bestimmt den Analysefokus und wird in den Metadaten der Datenspur zur semantischen Verknüpfung hinterlegt. Der Digitale Schatten bildet das reale System daher nicht vollständig ab, sondern gewährt lediglich einen zweckgerichteten Blick auf das Original. Derselbe Datensatz kann dadurch in einem veränderten Kontext wiederverwendet werden und andere Erkenntnisse liefern.

K3: Digitale Schatten ermöglichen domänenübergreifende Analysen

Digitale Schatten verknüpfen Daten aus heterogenen Datenquellen. Dadurch können sie Daten beinhalten, die dem Be-

zugssystem unzugänglich sind (z.B. Historien-, Wartungs- oder Entwicklungsdaten) und ermöglichen multiperspektivische und systemübergreifende Analysen.

K4: Digitale Schatten benötigen angepasste IT Infrastrukturen im Fabrikbetrieb

Die aufgabenspezifische Verarbeitung (z.B. Aggregation, Filterung) der Datenspuren multiperspektivischer Digitaler Schatten stellt die derzeit verfügbaren IT-Systeme vor große Herausforderungen, da ebenso flexibel veränderbare Soft- und Hardware-Systeme notwendig werden. Datenerfassungs- und Verarbeitungssysteme im Fabrikbetrieb müssen für einen transparenten und konsistenten Datenzugriff veränderbaren Anforderungen (z.B. domänenspezifische Echtzeit, dezentraler Datenzugriff) genügen.

K5: Digitale Schatten nehmen keinen Einfluss auf das reale Systemverhalten

Digitale Schatten sind kontextbehaftete Datenspuren. Sie dienen der aufgabenspezifischen Analyse und der Anreicherung zugrundeliegender Modelle um relevante Daten. Als solche üben sie keinen aktiven Einfluss auf das reale Bezugssystem aus. Erst auf den Digitalen Schatten reagierende Systeme (z.B. Sensor-Aktor-Systeme) können voll- oder teilautomatisiert Aktionen ausführen und die Produktion beeinflussen.

Digitale Schatten in der Produktion

Die notwendige Infrastruktur zum Erzeugen und Nutzen Digitaler Schatten wird im Exzellenzcluster derzeit anhand zweier praxisnaher Anwendungsfälle erprobt. Einerseits werden die Anforderungen an Digitale Schatten bei Ultrakurzpuls (UKP)-Laseranwendungen (z.B. zur Mikrostrukturierung von Bauteilen) und der damit einhergehenden Verarbeitung hoher Datenmengen in kürzester Zeit zur präzisen Ansteuerung des Lasers untersucht. Andererseits werden phasenbezo-

gene Digitale Schatten beim Spritzgießen von Kunststoffbauteilen erzeugt und zyklisch ausgewertet, um einen selbstadaptiven Digitalen Zwilling an das aktuelle Maschinenverhalten anzupassen.

Im UKP-Prozess hat die Komplexität des Bauteils kaum einen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Verfahrens. Vielmehr beeinflussen die Absorptionsrate des Materials und die Bewegungsgeschwindigkeit des Lasers die finale Prozess- und Bauteilqualität. Aufgrund der meist hohen Individualität und Produktionszeit der mikrostrukturierten Bauteile, kann die Qualität der Bauteile erst nach der vollständigen Bearbeitung evaluiert werden.

Zur Optimierung des Verfahrens wird mittels spezieller Sensorik und Edgedevice (K4) hochfrequent die spektrale Emission vom Verdampfen des Werkstoffs positionsgenau aufgenommen (K1). Durch eine automatisierte Auswertung dieser Datenströme entsteht ein dreidimensionaler digitaler Schatten der eingebrachten Mikrostruktur (K2), welcher für die automatische Anpassung der aktuellen Prozessparametern und der Bahnplanung auf die über das Werkstück heterogenen Materialeigenschaften genutzt werden kann. Somit ermöglicht die Nutzung dieses gezielten digitalen Schattens (K5) durch geeignete Services einen geregelten und gleichmäßigen Abtrag und verringert somit die Nachbearbeitung und den Ausschuss, schon während der Strukturierung.

Im Spritzgießen liegen dagegen in der Regel kurze Zykluszeiten zur Fertigstellung eines Bauteils und eine Vielzahl interagierender Systeme, wie z.B. Spritzgießmaschine, Temperiergeräte, Werkzeugsensorik, vor welche die Komplexität der Prozessführung und der verfügbaren Datenspur steigern. Mithilfe von Methoden der statistischen Versuchsplanung können Prozessmodelle ermittelt und robuste Arbeitspunkte für eine spezifische Werkzeug-Maschinen-Kombination identifiziert werden. Die ermittelten Prozessmodelle können jedoch nur bedingt auf andere Maschinen übertragen werden [7]. Da jede Maschine auch bei gleicher Spezifikation ein einzigartiges Betriebsverhalten aufweist (z.B. aufgrund des individuellen Verschleißzustands), müssen zur Modellierung funktionaler Digitaler Zwillinge zunächst Probleme bei der Datenerfassung heterogener Datenquellen, der Ansteuerung von Sensor-Aktor-Systemen sowie der echtzeitfähigen Datenanalyse zur Optimierung und Vorhersage der Bauteil- und Prozessqualität gelöst werden [8].

Das Konzept des Digitalen Schattens wird daher angewendet, um einen selbstadaptiven Digitalen Zwilling der Fertigungszelle zu erzeugen, der die heterogenen Datensätze der angeschlossenen Subsysteme verarbeitet (K3) und daraufhin das reale Produktionssystem ansteuert (K5). Zur Kommunikation mit den angeschlossenen Geräten liegt eine angepasste Software-Architektur vor, welche die Daten über verschiedene Schnittstellen (z.B. OPC-UA, EUROMAP, RS232) erfasst und einen konsistenten zyklusbezogenen Zugriff ermöglicht (4). Dazu wird das Domänenwissen zu relevanten Prozessparametern der Prozessphasen des Spritzgießzyklus in UML Klassen- und Aktivitätsdiagrammen abgebildet (K1). Je nach Analysefokus erzeugt der Digitale Zwilling daraus automatisiert eine Datenbank und erfasst die relevanten Prozessdaten als kontextbehaftete Datenspur (K2).

■ Zusammenfassung und Ausblick

Ein vollständiger und umfassend funktionaler Digitaler Zwilling ist in der Produktion kaum realisierbar, da eine Vielzahl heterogener Daten unter ständiger Konsistenzprüfung verarbeitet werden müsste [4]. Mit dem Konzept des Digitalen Schattens wird daher das Ziel verfolgt, lediglich die zu einer spezifischen Aufgabe oder Fragestellung notwendigen Daten zu erfassen, zu verarbeiten und zu analysieren. Dadurch werden Entscheidungssituationen in der Produktion bei geringen Latenzzeiten möglich. Das Konzept des Digitalen Schattens als kontextbehaftete Datenspur und sich daraus ergebende Konsequenzen für die IT-Infrastruktur innerhalb einer intelligenten Fertigung wurden hierzu erläutert.

Anhand der beschriebenen Anwendungsfälle (UKP, Spritzgießen) werden die umfassenden Rahmenbedingungen zum Erzeugen und nutzwertstiftenden Analysieren Digitaler Schatten in der Produktion erprobt. Hierzu müssen insbesondere Methoden entwickelt werden, wie gleichzeitig hohe Effizienz bei der Erstellung, aber auch Flexibilität und Konfiguration bei der Nutzung gewährleistet werden können. Durch die parallele Betrachtung zweier gegensätzlicher Anwendungsfälle sollen die Methoden eine breite Anwendbarkeit in unterschiedlichen Branchen finden.

Bibliography

DOI 10.3139/104.112339

ZWF 115 (2020) Special; page 105–107

© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 0947–0085

■ Literatur

1. Bienzeisler B.; Schletz A.; Gahle, A.: Industrie 4.0 Ready Services Technologietrends 2020. Fraunhofer IAO, Stuttgart 2014, S. 8–30
2. Bauernhansl, T. et al.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V., Darmstadt 2017, S. 6–30
3. Riesener, M.; Schuh, G.; Dölle, C.; Tönnies, C.: The Digital Shadow as Enabler for Data Analytics in Product Life Cycle Management. Procedia CIRP 26 (2019), S. 729–734 DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.083
4. Ashtari, B.; Schlögl, W.; Weyrich, M.: Synchronisierung von digitalen Modellen. atp magazin 59 (2017) 7/8, S. 62–69 DOI: 10.17560/atp.v59i07-08.1902
5. France, R.; Rumpe, B.: Model-Driven Development of Complex Software: A Research Roadmap. IEEE (Hrsg.): Future of Software Engineering 2007 at ICSE. Minneapolis, 2007, S. 37–54 DOI: 10.1109/FOSE.2007.14
6. Estefan, Jeff A. et al.: Survey of Model-based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. Incose MBSE Focus Group 25 (2007) 8, S. 1–12
7. Gierth, M. M.: Methoden und Hilfsmittel zur prozessnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten. Dissertation, RWTH Aachen, 1992
8. Liao, Y.; Lee, H.; Rhy, K.: Digital Twin Concept for Smart Injection Molding. Material Science and Engineering 324 (2018) 1, S. 1–5 DOI: 10.1088/1757-899X/324/1/012077

■ Die Autoren dieses Beitrags

Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh ist Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen.

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe ist Inhaber des Lehrstuhls für Software Engineering der RWTH Aachen.

Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner ist Inhaber des Lehrstuhls für Lasertechnik der RWTH Aachen und Direktor des Fraunhofer-Institut für Lasertechnik Aachen.

Dr.-Ing. Matthias Brockmann ist Geschäftsführer des Exzellenzclusters Internet of Production.

Dr. rer. nat. Andreas Wortmann ist akademischer Rat am Lehrstuhl für Software Engineering SE der RWTH Aachen.

Judith Maibaum, M.Sc., ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen.

Manuela Dalibor, M.Sc., ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Software Engineering SE der RWTH.

Pascal Bibow, M.Sc., und Patrick Sapel, M.Sc., sind Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung IKV an der RWTH Aachen.

Moritz Kröger, M.Sc., ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lasertechnik ILT an der RWTH Aachen.