

WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“

Digitale Zwillinge verbinden und erweitern die bisherigen digitalen Modelle in der Entwicklung mit den neuartigen Datenströmen des operativen Betriebs von Produkten, Maschinen und Dienstleistungen. Digitale Zwillinge werden die Produktentstehung nachhaltig verändern und neue Geschäfts- und Wertschöpfungsmodelle ermöglichen.

Die Erforschung der konzeptionellen Grundlagen, praktischen Umsetzung und nutzbringenden Anwendung *Digitaler Zwillinge* entlang des Produktlebenszyklus stellt ein essenzielles Querschnittsthema innerhalb der Forschungsaktivitäten der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) dar. Das vorliegende Positionspapier fasst die aktuellen Erkenntnisse zusammen und stellt wegweisende Thesen und Erwartungen für zukünftige Forschungsaktivitäten und deren industrielle Umsetzung auf. Hierbei übernimmt die WiGeP bewusst eine Führungsrolle, um die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten um den *Digitalen Zwilling* gemäß der Zukunftsausrichtung von Industrie 4.0 in Deutschland, der damit verbundenen Innovationen der zirkularen Industrie in Europa und den verschärften globalen Wettbewerbssituationen im Umfeld der digitalen Transformationen in den industriellen Schlüsselbranchen maßgeblich zu treiben und zu gestalten.

EINLEITUNG & ERKLÄRUNG

Ein *Digitaler Zwilling* ist eine digitale Repräsentation einer Produktinstanz (reales Gerät, Objekt, Maschine, Dienst oder immaterielles Gut) oder einer Instanz eines Produkt-Service-Systems (eines aus Produkt und zugehöriger Dienstleistung bestehenden Systems).

Diese digitale Repräsentation beinhaltet ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhalten der Produktinstanz oder des Systems. Ebenfalls werden innerhalb dieser digitalen Repräsentation während verschiedener Lebenszyklusphasen unterschiedliche Modelle, Informationen und Daten miteinander verknüpft (siehe [1] und [2]).

Ein *Digitaler Zwilling* wird aus dem *Digitalen Master* abgeleitet oder aus der realen Produktinstanz erzeugt. Zudem kann ein *Digitaler Schatten* Daten einer realen Produktinstanz

enthalten sowie Informationen über seine Herstellung abbilden. Ein *Digitaler Schatten* wird somit als Teilmenge eines *Digitalen Zwilling*s verstanden. Der *Digitale Zwilling* enthält folglich Verknüpfungen aus *Digitalen Master* und *Digitalen Schatten*. Der *Digitale Master* beinhaltet dabei die Produktgeometrie sowie verhaltensbeschreibende Modelle dieses Produkts bzw. Systems. Der *Digitale Schatten* wird als Abbild der Betriebs-, Zustands- oder Prozessdaten der realen Produktinstanz, auch hinsichtlich seiner Herstellung, verstanden. Ein *Digitaler Zwilling* ist in der Lage entsprechende Daten der zugehörigen Produktinstanz zu erfassen und zu speichern, zu verarbeiten und bereitzustellen oder sogar bilateral mit der physischen Produktinstanz zu kommunizieren [3]. Er erlaubt somit Zugriff auf z.B. Fertigungs-, Montage-, Mess-, Betriebs-, Rekonfigurations- oder auch Instandhaltungs- und Recyclingdaten. Diese Produktinstanz-spezifischen Daten können entweder direkt über den *Digitalen Zwilling* verwaltet werden oder durch Zugriff auf eine seiner Teilmengen, dem *Digitalen Schatten*, abgerufen werden.

Ein *Digitaler Zwilling* hat einen eigenen Lebenszyklus, der allerdings mit dem Lebenszyklus der zugehörigen Produktinstanz in Beziehung steht. Die Instanziierung erfolgt nach entsprechender Produktionsfreigabe auf der Grundlage der Produktrepräsentation des *Digitalen Masters* oder durch die Erfassung von Daten der physisch existierenden Produktinstanz bzw. Teilen davon.

Er kann beispielsweise mit frühen Schritten der Fertigung, mit der Inbetriebnahme oder später für eine aktive Produktinstanz erfolgen (siehe Abbildung 1).

Ein *Digitaler Zwilling* kann:

- als Teil eines Produkts bzw. Systems und in Verbindung mit einem *Digitalen Master* entwickelt oder
- für eine bereits existierende Produktinstanz bzw. Teilen davon entwickelt werden oder
- durch Konfiguration bzw. Parametrisierung auf konkrete Anwendungsbereiche angepasst werden.

Ein *Digitaler Zwilling* kann beispielsweise zum Zwecke der Diagnose und Prognose des realen Produktinstanzverhaltens, sowie zur Absicherung neuer Produktgenerationen genutzt werden.

Ebenfalls werden neue Geschäftsmodelle für Produkte, Systeme bzw. Produkt-Service-Systeme ermöglicht. *Digitale Zwillinge* werden direkt durch Produkt-Nutzer, innerhalb einer Dienstleistung durch den Produkthersteller oder in einer Dienstleistung durch Dritte genutzt.

Die Fähigkeit zur Modellierung intelligenter technischer Produkte, Produktsysteme sowie vielschichtiger Produkt-Service-Systeme ist elementare Voraussetzung moderner Produktentwicklungsprozesse und somit Kernbestandteil zukünftiger Entwicklungskompetenzen. Eben diese Fähigkeit spielt auch für die Entwicklung und die Nutzung *Digitaler Zwillinge* im gesamten Produktlebenszyklus eine zentrale Rolle.

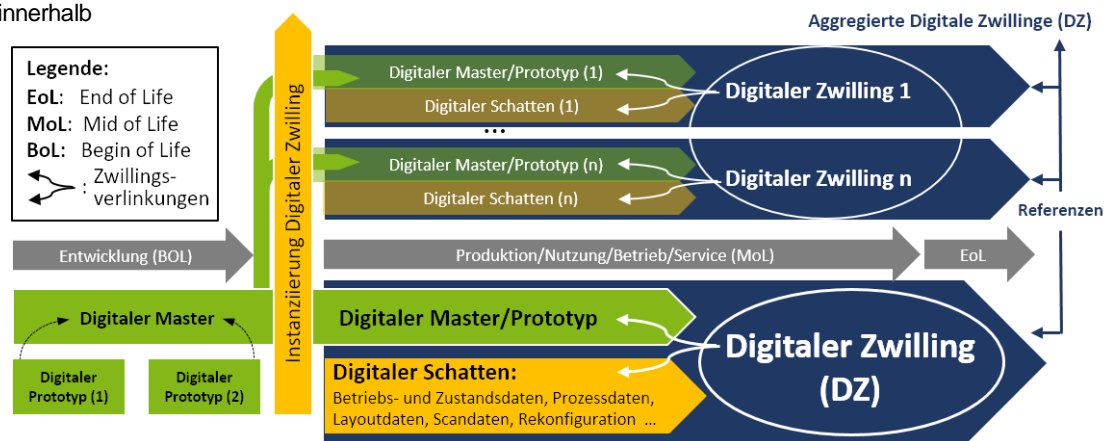


Abbildung 1: Definition des Digitalen Zwillinges in Abhängigkeit von Produkt (unten) und Produktinstanz (oben) sowie Digitalem Master bzw. Prototyp und Digitalem Schatten

Traditionell ist es eine Kernaufgabe der Produktentwicklung, vor der Produktfertigung oder der Bereitstellung eines Service, ein digitales Mastermodell zu erstellen. Mit diesem frühzeitig entwickelten *Digitalen Mastermodell*, welches auch als Urmodell bezeichnet werden kann, wird beispielsweise ein Produkt-Service-System aufgebaut, um es für verschiedene Anwendungsbereiche zu ertüchtigen.

Hierbei handelt es sich bisher um digital-mathematische rechnerinterne Produktmodelle mit dem Ziel, *Digitale Prototypen* zu erstellen. Es steht dabei im Vordergrund die Funktionalität festzulegen und diese rechnerisch bzw. simulativ nachzuweisen, abzusichern und zu optimieren.

Zukünftig kommt dem *Digitalen Zwilling* eine bedeutende und erweiterte Rolle in zweifacher Form zu:

1. Für die Entwicklung und konkrete Ausgestaltung der *Digitalen Zwillinge* müssen bisherige digitale Repräsentationen um weitere Elemente erweitert werden. Dies sind zum einen Schnittstellentechniken, Datenübertragungs- sowie Vernetzungs- und Kommunikationsfunktionalitäten. Zum anderen sind Fähigkeiten erforderlich, um Sensordaten aufzunehmen, zu analysieren, zu verarbeiten und weiterzuleiten. Dadurch lassen sich Grundlagen bereitstellen, um Produkt-Service-Systeme mit neuen Dienstleistungsprofilen zu entwickeln.
2. Aus den bereits vorhandenen *Digitalen Zwillingen* muss das erworbene Knowhow im Sinne des „Feedback to Design“ aktiv genutzt werden (als Teil eines aktiven Wissensrückflusses). Der *Digitale Zwilling* wird also für die Optimierung des aktuellen Produkts wie auch für die Entwicklung zukünftiger Generationen des Produkts genutzt.

Diese weitreichenden Erweiterungen und Veränderungen im Umfeld des *Digitalen Zwilling*s begründen den dringenden Bedarf der Positionierung und Erklärung von

dafür benötigten neuen und zusätzlichen Kompetenzen durch die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (Wi-GeP). Motiviert hierdurch werden im Folgenden verschiedene Ausprägungsformen *Digitaler Zwillinge* beleuchtet, der Aufbau *Digitaler Zwillinge* diskutiert, notwendige Kompetenzen für die Entwicklung von und mit *Digitalen Zwillingen* erarbeitet und Anwendungsszenarien für *Digitale Zwillinge* skizziert. Abschließend werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

AUSPRÄGUNGSFORMEN DIGITALER ZWILLINGE

Bisher wurden insbesondere von Lösungsanbietern digitaler Systeme keine klaren Abgrenzungen zu den bisherigen digitalen Modellen der virtuellen Produktentstehung vorgenommen, so dass in der industriellen Praxis bisher noch ein unklares Bild bzgl. des Potentials und der Lösungsformen von Digitalen Zwillingen herrscht.

Es ist notwendig die verschiedenen Ausprägungsformen von *Digitalen Zwillingen* zu unterscheiden. Eine singuläre Ausprägung erscheint durch bereits vorliegende divergente Konzepte weder sinnvoll noch möglich. Die Ausprägungsformen von *Digitalen Zwillingen* unterscheiden sich hinsichtlich einer Vielzahl von Charakteristiken. Zur Klassifizierung unterschiedlicher Konzepte des *Digitalen Zwilling*s kann das

in Abbildung 2 dargestellte Schema dienen, welches auf Vorarbeiten der Autoren ([4], [5]) und der Analyse der identifizierten Anwendungsfälle basiert.

Anwendungsfokus: Die Ausprägung der technischen Realisierung des *Digitalen Zwilling*s wird über die Anforderungsdefinition und deren Zielsetzung bestimmt. Die Zielsetzung kann dabei nicht nur Informationsbeschaffung und -analyse [6], sondern auch die Entscheidungsunterstützung [7] bis hin zur Steuerung autonomer Systeme [5] bzw. autonomen Veranlassung und Durchführung von Operationen umfassen. Es gibt eine enorme Bandbreite an Anwendungsbereichen in den Lebenszyklusphasen eines technischen Systems. Der *Digitale Zwilling* soll die Produktinstanz möglichst realitätsgetreu abbilden und damit auch sein realitätsgetreues Verhalten simulieren können. Des Weiteren beeinflusst die Anwendungsdomäne und auch das mit dem Produkt verknüpfte Geschäftsmodell, die Ausprägung des *Digitalen Zwilling*s.

Modellqualität: Der *Digitale Zwilling* sollte über den *Digitalen Master* bereits direkt am Anfang der Produktentstehungsphase vorbereitet und kontinuierlich weiterentwickelt werden. Durchgängig modellbasierte Systementwicklung (Model Based Systems Engineering) mit der Vernetzung von Modellen ermöglicht ganzheitliche Aussagen zur Absicherung und Optimierung der

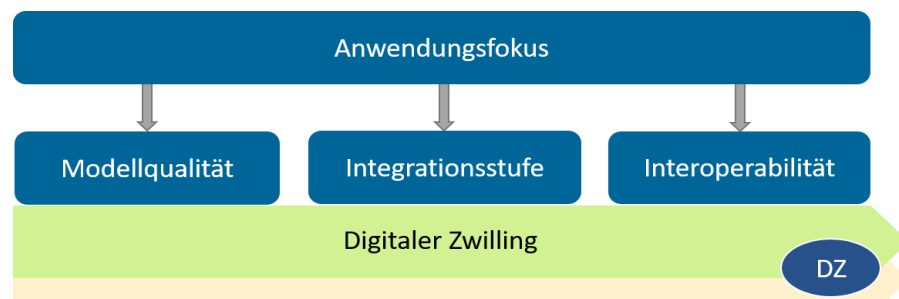


Abbildung 2: Charakteristiken Digitaler Zwillinge zur Unterscheidung verschiedener Ausprägungsformen

Funktionalität eines Systems während der Entwicklung. Der vom *Digitalen Master* abgeleitete *Digitale Prototyp* in der Entwicklung kann somit bereits als Voraussetzung gesehen werden, die Grundlagen für eine Verhaltenssimulation eines *Digitalen Zwilling* in der Nutzungsphase zu legen.

Ein *Digitaler Zwilling* muss für den jeweils adressierten Einsatzbereich eine Produktinstanz möglichst realitätsgetreu abbilden. In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff Modellqualität definiert, wie realitätsgetreu ein *Digitaler Zwilling* seine physische Produktinstanz abbildet und welche Aussagekraft damit hinsichtlich Umfang, Genauigkeit und Anwendbarkeit verbunden ist.

Zur genaueren Definition der Modellqualität *Digitaler Zwillinge* besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Es wird jedoch gefordert, dass kompatible Modellqualitätsstufen festgelegt werden. Ebenso sind zugehörige Transformationsmethoden erforderlich, die ein Vergrößern und ein Verfeinern *Digitaler Zwillinge* sowie deren Anpassung an spezifische Anwendungskontexte unterstützen.

Integrationsstufe / Interoperabilität: *Digitale Zwillinge* werden auch durch ihre Fähigkeiten zur Integration und Interoperabilität geprägt. Die Integration basiert dabei auf der Aggregation mehrerer *Digitaler Zwillinge* und kann über Integrationsstufen ausgedrückt werden. Integrationsstufen können z.B. den funktionalen oder autarken Zustand eines Produktes im Feld, die systemische Interaktion des Produktes mit seinem Umfeld, die Repräsentation einer Fertigungskomponente, einer Fertigungsmaschine, einer Fertigungslinie, einer Produktionsanlage oder eines Produktionsstandortes umfassen. Interoperabilität bedeutet, dass die einzelnen *Digitalen Zwillinge* verträglich miteinander vernetzt sind und miteinander kommunizieren. Weiterführend ist das Zusammenspiel von *Digitalen Zwillingen* Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsaktivitäten.

KOMPETENZEN FÜR DIE ENTWICKLUNG DIGITALER ZWILLINGE

Die für die Entwicklung eines *Digitalen Zwilling*s notwendigen Informationen leiten sich aus dem *Digitalen Master* ab, d.h. es sind spezifische Modelle aus verschiedenen Disziplinen der Produktentwicklung zu beherrschen. Zusätzlich Fähigkeiten bzgl. Wirtschaftlichkeit und rechtlicher Randbedingungen sowie tiefe Kenntnisse der Informations- und Kommunikationstechnik und der Data Science werden unerlässlich. Die hohe Komplexität der Wirkzusammenhänge innerhalb eines physischen Produkts stellt erhebliche Anforderungen an die Kompetenzen zur Entwicklung *Digitaler Zwillinge*. Die Spezifikation, Modellierung und Implementierung *Digitaler Zwillinge* wird in Zukunft sowohl zum integralen Bestandteil der Produktentwicklung wie auch zum neuen Anwendungsfeld für bereits bestehende physische „Produkte“, zu denen ein *Digitaler Zwilling* ergänzt werden muss. Die Entwicklung *Digitaler Zwillinge* erfordert

- Systemkompetenz und
- Methodenkompetenz.

Unter Systemkompetenz werden die Fähigkeiten verstanden, einen komplexen Wirklichkeitsbereich in seiner Struktur und seinem Verhalten als System zu erkennen, zu beschreiben und zu modellieren [13].

Methodenkompetenz ist erforderlich zur Nutzung der spezifischen Struktur- und Verhaltensmodelle *Digitaler Zwillinge*. Modellintegration und -interoperabilität ermöglichen dabei eine Einbindung von Betriebsdaten für die Nutzung im *Digitalen Zwilling*. Dadurch kann mit grundlegendem Methodenwissen ein *Digitaler Zwilling* betrieben werden. Durch die Interpretation von aggregierten Daten aus *Digitalen Zwillingen* lassen sich Erkenntnisse zur Weiterentwicklung nachfolgender Produktgenerationen nutzen. Es ist zudem notwendig, dass für die Repräsentationsformen von *Digitalen Zwillingen* die folgenden Fachkompetenzen etabliert werden müssen:

- Aufbau standardisierter Technologie-Stacks wie z.B. REST API, Microservices und dynamische Datenformate
- Entwicklung semantischer Kontextualisierungen im Umfeld von Datenanalytik und Künstlicher Intelligenz.

ANWENDUNGSBEREICHE FÜR DIGITALE ZWILLINGE

Das Verständnis des *Digitalen Zwilling*s, welcher den Zustand und das Verhalten des physischen Produkts aus verschiedenen Perspektiven abbilden und vorhersagen kann, ist der Schlüssel zur Erschließung neuer Anwendungspotenziale des *Digitalen Zwilling*s entlang des Produktlebenszyklus.

Daneben entwickelt sich der *Digitale Zwilling* zunehmend zum Kern neuer Produkt-Service-Systeme und Geschäftsmodelle, wie beispielsweise sogenannte „Pay-per-Use“ Geschäftsmodelle, für die neben der Erbringung einer Leistung durch eine Maschine die Kenntnis deren Zustandes für einen nachhaltigen Erfolg ausschlaggebend ist. Dabei werden im Folgenden unterschiedliche Komplexitätsgrade der Anwendung betrachtet.

Die kontinuierliche Beobachtung des Verhaltens eines realen Produkts anhand seines *Digitalen Zwilling*s ermöglicht zunächst das Erkennen von Verhaltensauffälligkeiten und das Einleiten reagierender Maßnahmen. Zu nennen sind hier z.B. die echtzeitfähige Verschleiß- oder Fehlererkennung bei Fernüberwachung, insbesondere bei schlecht zugänglichem Einsatz der Produkte. So wird auch der Einsatz eines Produkt-Service-Systems ermöglicht z.B. durch verbrauchsabhängige Nachlieferung von Hilfsstoffen. Sowohl für den Maschinenhersteller als auch für die Betreiber bedeutet dies eine Kosteneinsparung, da Servicetechnikeinsätze besser geplant werden können bzw. gar nicht stattfinden müssen und eine Fernwartung oder Reparatur durch Techniker vor Ort erfolgen kann.

Weist der *Digitale Zwilling* neben der Zustandsbeobachtung die Fähigkeit zur Diagnose oder Prognose auf, d.h. zur Interpretation aktueller Daten aus dem Feld oder darauf aufbauend zur Vorhersage des zukünftigen Produktverhaltens, so werden proaktive Maßnahmen ermöglicht. Hier sind Wartungsbedarfsprognose und präventive Instandhaltung zu nennen, die auch über Distanz effizient und effektiv geplant werden können. Auch die Erweiterung des Dienstleistungsportfolios eines Produkt-Service-Systems ist durch Integration weiterer Prognosemodelle möglich, beispielsweise im Bereich des Car-Sharing, wenn bei Nutzungsanfragen insbesondere bei Elektrofahrzeugen eine temperaturabhängige Vorkonditionierung des Innenraumklimas gestartet werden kann. Das Verhalten bzw. die Abstellbedingungen des Fahrzeugs sind dazu neben dem Kundenwunsch die wichtigste Information. Abbildung 3 verdeutlicht den Informationsfluss anhand eines Demonstrators für den

Das Erkennen und die Rückführung von Nutzungs- und Verhaltensszenarien des realen Produkts über den *Digitalen Zwilling* in die Produktentwicklung ermöglicht, über die Erfassung von reinen Lastdaten zur Dimensionierung hinaus, die konkrete Definition von funktionalen Eigenschaften. Nutzung und Verhalten des realen Produkts in der Nutzungsphase sind wichtige Informationen zur Entwicklung ähnlicher Produkte und zur Ermittlung der Anforderungen an die nächste Produktgeneration und zur Abschätzung der Eigenschaften des kommenden Produktgenerationslebenszyklus. Die Wissensrückführung beim Demonstrator in Abbildung 3 ermöglicht die Überarbeitung von Tragwerkskomponenten und Verbindungselementen mit dem Ziel einer leichteren und gleichzeitig robusteren Konstruktion. Mit den beschriebenen Merkmalen ist der *Digitale Zwilling* ein Ansatz für die Entwicklung und den Betrieb nachhaltiger Systeme.

lation durch den *Digitalen Zwilling* nach umweltfreundlicheren, nachhaltigeren Betriebsstrategien für die reale Produktinstanz gesucht werden.

Die Aufwände, die notwendig werden, um *Digitale Zwillinge* initial zu etablieren, effizient zu repräsentieren und dauerhaft zu betreiben, sind derzeit noch nicht robust abschätzbar. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und erfordern gemäß der folgenden Punkte eine breite und intensive Untersuchung als Teil der weiteren Forschung:

- Unterscheidung zwischen dem *Digitalen Zwilling einer Produktinstanz* und dem *Digitalen Zwilling einer gesamten Produktfamilie*
- Art des Zwillingeffektes zwischen dem *Digitalen Master* bzw. dem *Digitalen Prototyp* und dem *digitalen Datenstrom des Digitalen Schattens* (siehe [1], [2])
- Angestrebte explizite Verlinkungspersistenz oder semantisch implizite Verlinkungsformen zwischen *Digitalem Schatten* und *Digitalem Master* bzw. *Prototyp*.

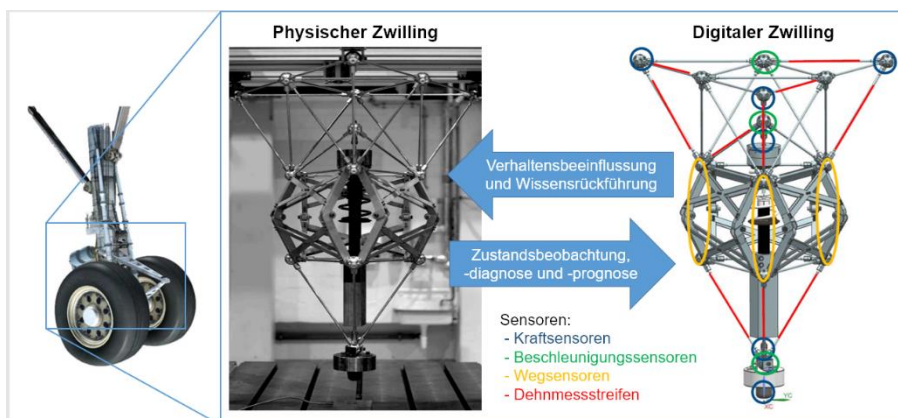


Abbildung 3: Demonstrator zur experimentellen Verhaltensanalyse eines Flugzeugfahrwerks mit Sensorik zur Ankopplung an den digitalen Zwilling [14, 15]

Prüfstand eines Flugzeugfahrwerks. Die Sensoren des Demonstrators ermöglichen die Verhaltensanalyse im *Digitalen Zwilling* und beispielsweise die Entwicklung von Regelstrategien zur Beherrschung von Störgrößen während des Landevorgangs.

Zum einen kann am Ende der Nutzungsphase über die Zustandserkennung und -prognose der realen Produktinstanz faktenbasiert über deren Weiter- oder Wiederverwendung entschieden werden. Zum anderen kann auf Basis der Verhaltenssimu-

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) hat mit diesem Positionspapier dem Lösungsportfolio *Digitaler Zwilling* und den damit verbundenen Kompetenzbedarfen eine zentral wichtige und wegweisende Bedeutung zugemessen. Das Verständnis bzgl. des Aufbaus und der damit möglichen Ausprägungsformen wird sowohl für Entscheider, als auch für operativ aktive Entwicklungs- und Betriebsingenieure von Unternehmen, welche Produkte und Dienstleistungen von technischen Systemen verantworten, entscheidend sein, um auch in der Zukunft neue und somit zunehmend digital ausgeprägte Wertschöpfung erfolgreich anbieten und betreiben zu können.

Die WiGeP als führende wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung hat es sich zum Ziel gesetzt, die Kompetenzen und Lösungsformen um *Digitale Zwillinge* gezielt zu erforschen, mit Ausbildungskonzepten zu versehen und Unternehmen bei der Einführung und Umsetzung von *Digitalen Zwillingen* aktiv zu unterstützen. Hierbei wird es entscheidend sein, die Fähigkeiten des systemischen Entwurfs, der Analyse und der Simulation in Form von digital vernetzten Modellen und Daten sowie die damit verbundenen neuen Entwicklungsmethoden des modellbasierten, systemischen Entwickelns (*MBSE, Model based Systems Engineering*) und der erweiterten Systemgestaltung (*ASE, Advanced Systems Engineering*) zu erforschen und sukzessive industriell zu etablieren.

LITERATUR

- [1] Stark, R. und Damerau, T. 2019. Digital Twin. In: Chatti, S. und Tolio, T. [Hrsg.] *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1
- [2] Stark, R. et al. 2019. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services [online]. *CIRP Annals*. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.024.
- [3] Schleich, B. et al. 2017. Shaping the digital twin for design and production engineering [online]. *CIRP Annals*. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- [4] Uhlenkamp, J.-F. et al. 2019. Digital Twin Applications : A first systemization of their dimensions. In: *Proceedings, 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). Sophia Antipolis Innovation Park, France, 17-19 June 2019*. Piscataway, NJ: IEEE. 1-8.
- [5] Stark, R. et al. 2019. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services [online]. *CIRP Annals*. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.024.
- [6] Wang, J. et al. 2019. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing [online]. *International Journal of Production Research*. doi: 10.1080/00207543.2018.1552032.
- [7] Kunath, M. und Winkler, H. 2018. Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process [online]. *Procedia CIRP*. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.192.
- [8] Magargle, R. et al. 2017. A Simulation-Based Digital Twin for Model-Driven Health Monitoring and Predictive Maintenance of an Automotive Braking System. In: *Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017*. Linköping University Electronic Press. 35-46.
- [9] Zhang, Q. et al. 2017. Modeling of Digital Twin Workshop Based on Perception Data. In: Huang, Y. et al. [Hrsg.] *Intelligent robotics and applications. 10th International Conference, ICIRA 2017, Wuhan, China, August 16-18, 2017 ; proceedings*. Band 10464. Cham: Springer. 3-14.
- [10] Vachalek, J. et al. 2017. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. In: Fikar, M. [Hrsg.] *Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control (PC). Hotel Sorea Trigán Baník, Štrbské Pleso, Slovakia, June 6-9, 2017*. Piscataway, NJ: IEEE. 258-262.
- [11] Richárd Beregi et al. 2018. Synergy of multi-modelling for process control [online]. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.473.
- [12] Wuest, T. et al. 2015. Accessing servitisation potential of PLM data by applying the product avatar concept [online]. *Production Planning & Control*. doi: 10.1080/09537287.2015.1033494.
- [13] Rempfler, A. und Mehren, R. 2013. Systemkompetenz. In: 265-266.
- [14] Hartig, J.; Hoppe, F.; Martin, D.; Staudter, G.; Öztürk, T.; Anderl, R.; Groche, P.; Pelz, P.; Weigold, M.: Identification of lack of knowledge using analytical redundancy applied to structural dynamic system. IMAC XXXVIII - A Conference and Exposition on Structural Dynamics. Houston, TX USA, 2020.
- [15] Ríos, J., Staudter, G., Weber, M., & Anderl, R.: A review, focused on data transfer standards, of the uncertainty representation in the digital twin context. IFIP 16th International Conference on Product Lifecycle Management, In Press. Springer, Cham, 2019.

Impressum	
Erstellung: 25. September 2019 – 23. Februar 2020	
Kapitel	Verantwortlichkeiten
Leitung, Architektur & Edition	Prof. Rainer Stark
Kernteam Redaktion	Prof. Rainer Stark Prof. Reiner Anderl Prof. Klaus-Dieter Thoben Prof. Sandro Wartzack <i>Prof. Frank-Lothar Krause (Senior Advisor)</i>
Einleitung & Erklärung	Prof. Rainer Stark Prof. Reiner Anderl Prof. Iris Grässler Dr. Jens Pottebaum Dr. Benjamin Schleich
Ausprägungsformen Digitaler Zwillinge (mit der Integration des Aufbaus von Digitalen Zwillingen)	Prof. Klaus-Dieter Thoben Prof. Ralph Stelzer Prof. Hannes Hick + Kollegen Patrick Klein + Kollegen Dr. Bernhard Saske + Kollegen
	Prof. Detlef Gerhard Prof. Reiner Anderl, Cordula Czwick Sonika Gogineni, Lukas Klimmeck Matthias Bajzek Prof. Georg Jacobs, Dr. Joerg Berroth
Kompetenzen für die Entwicklung von Digitale Zwillingen	Prof. Hannes Hick Thomas Zimmermann Prof. Georg Jacobs, Dr. Joerg Berroth Philipp Kranabittl
Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge	Prof. Eckhard Kirchner Prof. Reiner Anderl Dr. Benjamin Schleich Dr Nicole Göckel.