

*Simulation in Produktion und Logistik 2023*  
 Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)  
 Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023  
 DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

# Digital Twin – Einsatzbereiche des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik

## **Digital Twin – Digital Twins Applications within Production & Logistics**

Carsten Matysczok, UNITY AG, Büren (Germany), carsten.matysczok@unity.de

**Abstract:** This document provides an overview of digital twin use cases in the area of production and logistics. Starting with relevant definitions for a digital twin and its relation to digital shadow/thread, the main components of a digital twin are presented. Based on this, an overview of digital twin use cases within production and logistics is given. Afterwards an exemplary implementation of a digital twin for a mill center is presented. The paper closes with a summary and outlook on future developments.

## 1 Einleitung

Digitale Modelle sind in der Industrie ein längst etablierter Standard. Sie werden bei der Produktentwicklung (CAD), der digitalen Absicherung (DMU, Simulation), innerhalb der Produktion (CAM) oder auch im Marketing (fotorealistisches Rendering) eingesetzt. Ziel ist es, noch vor der eigentlichen Produktion oder Benutzung des Produkts unterschiedliche Untersuchungen und Analysen an diesem durchzuführen. Das Konzept des Digitalen Zwillings geht darüber hinaus: Der Digitale Zwilling ist das digitale Abbild eines materiellen Objekts (z.B. Produkt, Produktionsanlage) oder auch eines immateriellen Objekts (z.B. Geschäftsprozess) aus der realen Welt. Er besteht generell aus dem realen Objekt, seinem digitalen Modell und einer Verknüpfung zwischen diesen beiden Welten (siehe Abbildung 1).

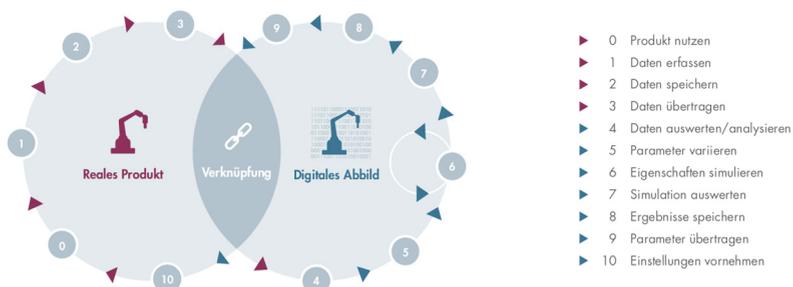


Abbildung 1: Konzept des Digitalen Zwillings (nach Schele und Kühn 2017)

Der Digitale Zwilling bildet das Verhalten realer Objekte in einem digitalen Modell ab. Zu definierten Zeitpunkten werden die Zustände des realen Objekts mit dem digitalen Modell abgeglichen (Wenzel et al. 2017). Dieser Abgleich erfolgt in der Regel über Sensoren, die am realen Objekt angebracht sind, sowie durch Nutzung dedizierter IT-Systeme wie z.B. MES (Manufacturing Execution Systems) oder BDE-Systeme (Betriebsdatenerfassungssysteme). Diese übertragen kontinuierlich aktuelle Zustandsdaten an das digitale Modell. Damit bleibt das digitale Modell nicht nur eine statische Abbildung zum Erstellungszeitpunkt, sondern kann kontinuierlich den Zustand des realen Objekts annehmen.

Auf diese Weise werden virtuelle Echtzeitabbilder geschaffen. Die Daten, die vom realen zum virtuellen Objekt fließen, werden auch Digitaler Schatten, Digital Shadow oder Digital Thread genannt (Grieves 2014). Durch diese können echtzeitfähige Auswertungen realisiert werden, die eine effiziente und effektive Entscheidungsunterstützung z.B. im Bereich der Produktion und Logistik unterstützen (Bauernhansl et al. 2016).

Generell lässt sich sagen, dass der Digitale Zwilling in allen Lebenszyklusphasen nutzbringend eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 2).

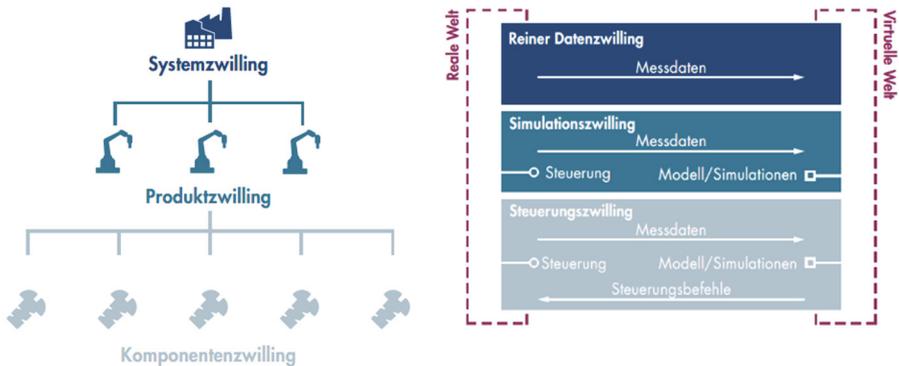
Phase	Produkt-planung	Produkt-entwicklung	Produktions-vorbereitung	Fertigung & Montage	Vertrieb & Versand	Nutzung	Service & Wartung	Demontage & Recycling
	Digitaler Schatten							
	Digitales Modell (DM)			Digitaler Zwilling (DZ)				
Nutzen	Das DM dient als Visualisierungsmodell und ersetzt erste Prototypen.	Das DM bildet das reale Produkt exakt ab und beschleunigt den Entwicklungsprozess.	Mit dem DM der Produktion und des Produktes können Prozesse virtuell abgestimmt werden.	Die Produktion kann sich selbst überwachen. Jedes Produkt erhält einen individuellen DZ.	Der Kunde kann ohne Aufwand Anwendungsfälle testen und Produkte individualisieren	Durch Kommunikation der DZ untereinander und mit der Cloud entsteht ein Netzwerk der DZ.	Mit den Sensoren der Produkte können die DZ die Instandhaltung automatisieren.	Der DZ der jeweiligen Produkte gibt Informationen und Anleitungen am Produktlebensende.

Abbildung 2: Nutzen des Digitalen Zwillings entlang des Lebenszyklus

So können z.B. schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung unterschiedliche Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden, getestet und durch Design-Alternativen abgebildet werden. Hier spricht man i.d.R. noch nicht vom Digitalen Zwilling, sondern vom digitalen Modell, da in dieser Phase noch kein physisches Objekt existiert (Matysczok 2021). Innerhalb der Produktion kann der Digitale Zwilling helfen, die Produktionseffizienz und -qualität zu erhöhen und Produktionskosten zu senken (Matysczok et al. 2018). Während der Betriebsphase eignet sich der Digitale Zwilling, die Verfügbarkeit von Maschinen durch Predictive Maintenance oder Condition Monitoring zu verbessern (Liu et al. 2022). Sogar am Lebensende, dem Recycling, kann der Digitale Zwilling Informationen für die Ersatzplanung oder die Eruierung von Upcycling-Potenzialen bereitstellen (Mügge et al. 2022).

In der Praxis zeigt es sich, dass Digitale Zwillinge sehr anwendungs- und unternehmensspezifisch sind. Es gibt verschiedene Arten von Digitaler Zwillingen – und nicht nur „den einen“ Digitalen Zwilling. Digitale Zwillinge können z.B. anhand

ihres Umfangs (siehe Abbildung 3 a) und der Art ihrer Anwendung (siehe Abbildung 3b) unterschieden werden.



(a) anhand der Art ihres Umfangs

(b) anhand der Art ihrer Anwendung  
(Matysczok 2021)

Abbildung 3: Unterscheidung von Digitalen Zwillingen

Je nach Umfang und Art der Anwendung nimmt die Komplexität des Digitalen Zwillings zu. Weitere Definitionen zu Digitalen Zwillingen liefern u.a.: Deuter und Pething 2019, Kuehner et al. 2021 oder Sjarov et al. 2020.

## 2 Konkrete Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik

Der Digitale Zwilling kann in vielen Bereiche nutzbringend eingesetzt werden. Dieses beinhaltet auch die frühen Entwicklungsphasen, in denen lediglich das virtuelle/digitale Modell existiert. Über den gesamten Lebenszyklus ergeben sich je nach genutzter Technologie eine Vielzahl an möglichen Anwendungsfällen (siehe Abbildung 4).

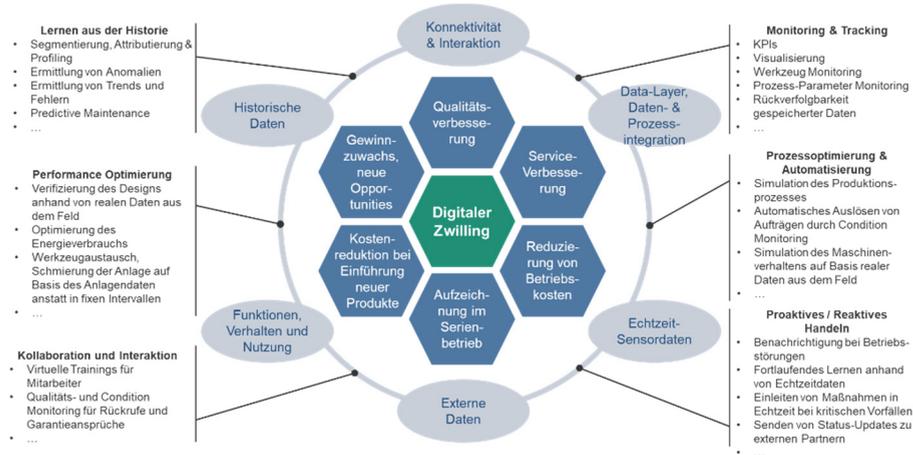


Abbildung 4: Technologien und Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings

So können Digitale Zwillinge in der Logistik (z.B. Beschaffung, Distribution, Filiallogistik, Letzte Meile, Logistiknetzwerk) wie folgt eingesetzt werden:

- Dokumentation des aktuellen Bearbeitungs- und Transportstatus sowie der aktuellen Position (siehe z.B. Gao et al. 2021)
- Detaillierte Transportplanung sowie realistische und belastbare Prognose des Zustellungsdatums und -zeit – insbesondere beim Weitertransport von Waren und bei Warenumladungen sowie bei Just-in-Time (JIT) / Just-in-Sequence (JIS) Lieferungen (siehe z.B. Busse et al. 2021, Herlyn und Zadek 2020)
- Zeitnahes Reagieren auf Transportverzögerungen durch Umplanung oder Nutzung von alternativen Weitertransportmöglichkeiten (Simulation von unterschiedlichen Transportoptionen und Ermittlung einer Vorzugsvariante) mit dem Ziel, den zugesagten Liefertermin einzuhalten (siehe z.B. Gerlach et al. 2021)
- Erfassung und Dokumentation der Transportbedingungen (z.B. Nutzung von Temperatursensoren zum Beleg, dass die Kühlkette beim Transport von Lebensmitteln nicht unterbrochen worden ist, zusätzliche Verwendung der Blockchain-Technologie zur Vermeidung von Datenmanipulationen) sowie automatische Dokumentation der Einhaltung der zugesicherten Transportauflagen/-pflichten (siehe z.B. Rudskoy et al. 2021)
- Reduktion von Sicherheitsbeständen im Lager aufgrund einer realistischeren Transportplanung und verlässlicheren Warenversorgung (siehe z.B. Marmolejo 2020)
- Minimierung des Bullwhip-Effekts in der Supply Chain, indem die ursächlichen Abstimmungs- und Kommunikationsprobleme durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen reduziert werden (siehe z.B. Badakhshan et al. 2022)

Auch im Bereich der Produktion ergeben sich durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen folgende konkrete Anwendungsfälle:

- Vorausschauende Wartung und Instandhaltung von Maschinen und Anlagen (Predictive Maintenance) durch Analyse von Zustandsdaten, Prognose von

Ausfällen sowie Ermittlung des optimalen Zeitpunkts einer bedarfsgerechten Wartung (siehe z.B. van Dinter et al. 2022)

- Optimierung von Produktionssystemen durch Analyse von Maschinenparametern und Simulation von Optimierungsmöglichkeiten im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Herlyn und Zadek 2020)
- Virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen durch Simulation des Verhaltens (Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL)) der eingesetzten Komponente, Maschine oder Anlage inkl. der verwendeten Feldbusse im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Pankow 2021, von Salzburg und Hoher 2020)
- Analyse der Fertigungsleistung und -qualität sowie frühzeitige Ermittlung von Trends (Condition Monitoring, Trend Analysen von Fehlern und Ausfällen) im Digitalen Zwilling (siehe z.B. Wagner et al. 2021, Ma et al. 2020)

### 3 Typische Komponenten des Digitalen Zwillings

Zur Abbildung der in Kapitel 2 vorgestellten Anwendungsfälle besteht der Digitale Zwilling typischerweise aus den folgenden sieben Komponenten (siehe Abbildung 5):

1. Reales Objekt: Physisches Objekt in der Realität
2. Virtuelles Modell: Virtuelles Abbild des realen Objekts
3. Sensoren: Die Sensoren sind am realen Objekt angebracht und erfassen kontinuierlich Zustandsdaten. Beispiele für Sensordaten sind Maschinenzustände, der Bearbeitungszustand eines Fertigungsauftrags oder die Motordrehzahl.
4. Zentrale Datenbereitstellung: Die Daten der Sensoren und anderer IT-Systeme werden gesammelt, miteinander in Verbindung gesetzt und zentral zur Verfügung gestellt. Hierfür eignet sich z.B. eine IoT-Plattform (Internet of Things Plattform). Müssen Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen zusammengeführt werden, resultiert das meist in einer Vielzahl an zusätzlichen Schnittstellen, die zwischen den IT-Systemen implementiert werden müssen. Hier kann z.B. der Einsatz des Data-Layer-Konzepts (siehe z.B. Jacob et al. 2008) Abhilfe schaffen.
5. Datenverarbeitung: Eine Datenverarbeitung ermöglicht die Verarbeitung einer hohen Anzahl an Daten. Dieses können zum einen die durch die Sensoren erfassten und in Echtzeit bereitgestellten Daten sein, zusätzlich aber auch historische Daten. Typischerweise findet eine solche Datenverarbeitung am Rande des Netzwerkes (Edge-Computing) oder in der Cloud (Cloud Computing) statt.
6. Simulationsmodell(e): Auf Basis von Simulationsmodellen und der erfassten Daten kann der aktuelle Zustand des realen Objekts ermittelt, Prognosen über künftige Zustände erstellt oder Szenarien zu möglichen Optimierungen durchgespielt werden. Werden dazu unterschiedliche Simulationen durchgeführt (z.B. Materialflusssimulation, Simulation von Bauteilabnutzungen, etc.), müssen auch unterschiedliche Simulationsmodelle bereitgestellt werden.
7. Visualisierungsanwendung: Die erfassten Daten und Simulationsergebnisse werden dann in geeigneter Art und Weise dem Anwender präsentiert. Eine solche Visualisierung kann z.B. in einem 3D- oder VR-Modell erfolgen.

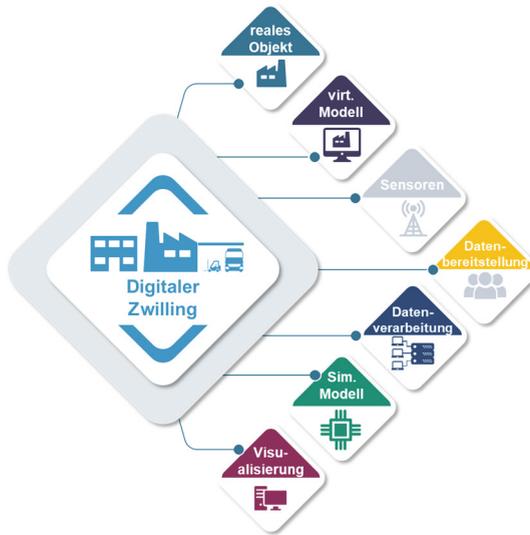


Abbildung 5: Typische Komponenten eines Digitalen Zwillings

#### 4 Realisierung eines Digitalen Zwillings für ein Fräszentrum

Für einen Unternehmen aus der Automobilindustrie wurde ein Digitaler Zwilling eines Fräszentrums realisiert. Gemäß der in Kapitel 1 vorgestellten Kategorisierung handelt es sich hierbei um einen Simulationszwilling. Ziel des Projekts war die Abbildung eines Roboters sowie von zwei Fräszentren als Digitaler Zwilling. Alle Komponenten besitzen eine Reihe von Sensoren (z.B. für Teilebelegung, Temperatur, etc.). Ziel des zu realisierenden Digitalen Zwillings war es, zum einen Optimierungspotentiale für die Belegung und Auslastung des Produktionssystems zu ermitteln (siehe Abbildung 6). Zum anderen sollte eine Anwendung entwickelt werden, mit der weitere Optimierungen der Produktionsanlage simuliert und beurteilt werden können. Dieses sollte während des laufenden Betriebes auf Basis aktueller Sensor- und Produktionsdaten möglich sein.



Abbildung 6: Digitaler Zwilling eines Fräszentrums (links: reale Anlage, rechts: Digitaler Zwilling der Anlage)

Der realisierte Digitale Zwilling bestand aus einem Simulationsmodell und einem VR-Modell, mit sich dem die Produktionsprozesse visualisieren lassen. Die Abbildung der einzelnen Produktionsprozesse und die Steuerung der Simulationslogik erfolge auf Basis der vor Ort aufgenommenen und validierten Prozessabläufe. Zur Versorgung des Simulationsmodells mit aktuellen Daten (Auftragsdaten, Arbeitspläne, Durchlaufzeiten, etc.) wurde dieses an eine Connyun IIoT Plattform (Industrial Internet of Things Plattform) angebunden. Die Connyun IIoT Plattform erhielt ihre Daten von MES- und BDE-Systemen sowie von weiteren zusätzlichen Sensoren.

Ein SPS-Daterecording wurde genutzt, um Durchlaufzeiten mittels Histogrammdarstellungen zu validieren. Je nach Aufmaß und Gussstärke variieren dabei die Prozesszeiten (siehe Abbildung 7a). Die Auswertung der über die Connyun-Cloud bereitgestellten Daten ermöglicht die Überprüfung der mannlos gefertigten Teile (siehe Abbildung 7b). Die zu sehenden regelmäßigen Sägezähne bei der Tischbelegung zeigen eine ausreichende Materialversorgung mit allen Bauteilen (siehe Abbildung 7c). Die Auslastung des Fräszentrums konnte optimiert werden: eine verbesserte Ressourcenbelegung mit einer erhöhten Wertschöpfung bis 8% wurden ermittelt (siehe Abbildung 7d).



Abbildung 7: Auswertungen im Digitalen Zwilling

Der realisierte Digitale Zwilling wurde so aufgebaut, dass Fertigungsmitarbeiter auch ohne dedizierte Simulationskenntnisse eigene Optimierungsideen durch einfache tabellarische Eingaben abbilden, testen und bewerten können (siehe Abbildung 8). So konnten Mitarbeiter aus der Fertigung verschiedene Produktionsparameter (z.B.

Puffergröße, etc.) anpassen und testen, bevor diese in die Produktion übernommen werden. Die dargestellten Auswertungen im Digitalen Zwilling ermöglichten es dem Unternehmen dann, den aktuellen Fertigungsstatus und weitere Optimierungsansätze zu bewerten.

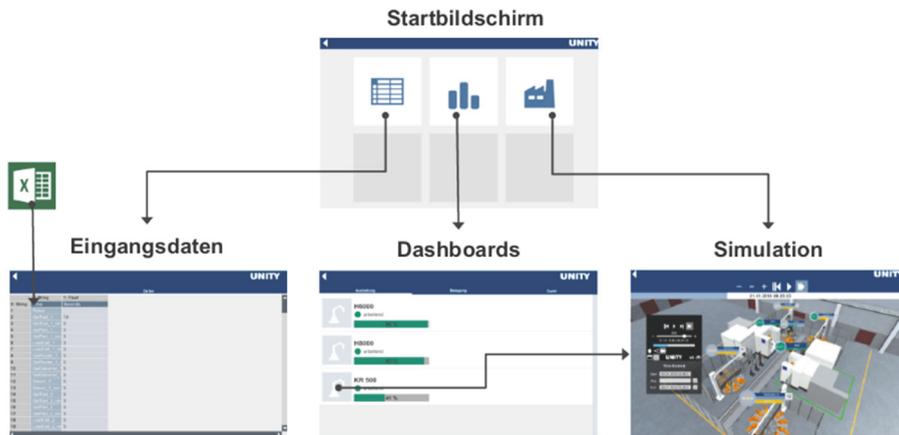


Abbildung 8: Funktionen des realisierten Digitalen Zwillings

So konnten im realisierten Digitalen Zwilling Abweichungen vom Ideal analysiert werden, Optimierungen an der Steuerung oder Fräsprogrammen im dynamischen Modell bewertet, und der Live-Zustand der Anlage visualisiert werden. Die realisierte Anwendung war sowohl stationär auf einem PC als auch mobil auf einem Tabletcomputer/iPad lauffähig.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen müssen sich weiter digital transformieren, um in einer digital geprägten Welt auch künftig wettbewerbsfähig agieren zu können. Basis für eine erfolgreiche Transformation ist die konsequente Nutzung digitaler Technologien. Der Digitale Zwilling ist eine solche digitale Technologie. Seine Einsatzbereiche und Nutzenpotentiale im Bereich der Produktion und Logistik wurden in diesem Beitrag vorgestellt.

Die für den Digitalen Zwilling notwendigen Technologien wie z.B. KI (Künstliche Intelligenz), Big Data und weitere Emerging Technologies (IoT, 5G, Edge Computing, etc.) werden sich in Zukunft rasant weiterentwickeln und damit die Hürden für eine Umsetzung senken. Zudem werden sich IoT-Sensoren immer weiterverbreiten, wodurch die Erfassung von benötigten Daten erleichtert wird. Zurzeit investieren Unternehmen stark in die Digitalisierung ihrer Prozesse und Anlagen. Hier wird der Digitale Zwilling wirksame Mittel anbieten, um die betrieblichen Prozesse transparent darzustellen und diese weiter zu optimieren.

Die Visualisierung des Digitalen Zwillings wird künftig vermehrt im Industrial Metaverse erfolgen (siehe Abbildung 9). Das Industrial Metaverse ist ein virtueller Erfahrungsraum, in dem Digitale Zwillinge von vernetzten industriellen Anlagen mit Hilfe von Visualisierungen anschaulich dargestellt und nutzbar gemacht werden

(Marko et al. 2023). Die Bereitstellung der Daten kann über sogenannte Datenräume (z.B. GAIA-X, Catena-X oder Manufacturing X) erfolgen.

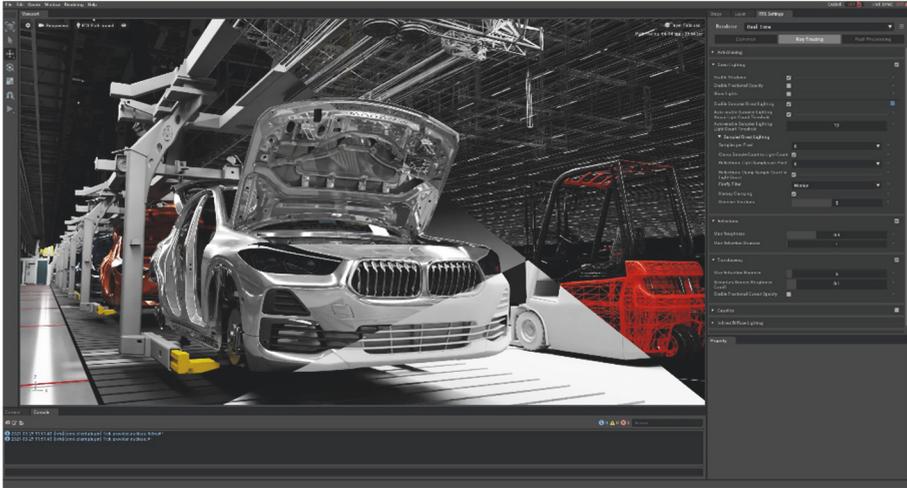


Abbildung 9: Darstellung des Digitalen Zwillings einer Fabrik in NVIDIA's Omniverse Plattform (Quelle: BMW AG)

Der Digitale Zwilling ist zudem ein essenzieller Baustein zur Realisierung von intelligenten, vernetzten Fabriken – sogenannte Smart Factories (Matysczok et al. 2023). Solche Smart Factories sind wandelbar, sodass sich Fertigungsanlagen und Logistiksysteme selbständig und ohne menschliche Eingriffe organisieren und fortlaufend an neue Gegebenheiten anpassen.

Es ist ebenfalls abzusehen, dass in der Zukunft nicht mehr allein das physische Produkt, sondern sein digitales Pendant die Wertschöpfung eines Unternehmens bestimmen wird. Ermöglicht wird dieses durch weitere Services und Dienstleistungen (z.B. Condition Monitoring, Predictive Maintenance) rund um das Produkt sowie durch neue Geschäftsmodelle, die sich nur durch Digitale Zwillinge realisieren lassen.

## Literatur

- Badakhshan, Ehsan; Ball, Peter; Badakhshan, Ali: Using digital twins for inventory and cash management in supply chains. In: 10<sup>th</sup> IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM, 2022.
- Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Hrsg.: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP. Darmstadt: Technische Universität, 2016.
- Busse, Anselm; Gerlach, Benno; Lengeling, Joel Cedric; Poschmann, Peter; Werner, Johannes; Zarnitz, Simon: Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains. In: Exploring the Potentials of Automation in Logistics and Supply Chain Management: Paving the Way for Autonomous Supply Chains, 2021.
- Deuter, Andreas; Pethig, Florian: The Digital Twin Theory - Eine neue Sicht auf ein Modewort. In: Industrie 4.0 Management, 2019.

- Gao, Yan; Qian, Shuyue; Li, Zihan; Wang, Ping; Wang, Feiyue; He, Qing: Digital Twin and Its Application in Transportation Infrastructure. In: 2021 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), 2021.
- Gerlach, Benno; Zarnitz, Simon; Nitsche, Benhamin; Straube, Frank: Digital Supply Chain Twins—Conceptual Clarification, Use Cases and Benefits. In: Logistics, Volume 5, 2021.
- Grieves, Michael: Digital Twin – Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (Whitepaper), LLC, 2014.
- Herlyn, Wilmjakob; Zadek, Hartmut: Mastering the Supply Chain by a Concept of a Digital Control-Twin. In: Data science and innovation in supply chain management, 2020.
- Herlyn, Wilmjakob; Zadek, Hartmut: Der Digitale Steuerungs-Zwilling - Dynamische Auftrags- und Materialflusssteuerung auf Basis des Konzeptes eines digitalen Steuerungs-Zwillings. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 2020.
- Jacob, Bruce; Ng, Spencer W.; Wang, David T.: Memory Systems – Cache, DRAM, Disk. Morgan Kaufmann, 2008.
- Kuehner, Kim Jessica; Scheer, Richard; Strassburger, Steffen: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. In: Proceedings of CIRP – Material Aspects of Manufacturing Processes, Volume 104, 2021.
- Liu, He; Xia, Min; Williams, Darren; Sun, Jianzhong; Yan, Hongsheng: Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. In: Intelligent Sensing, Monitoring, and Optimization of Advanced Manufacturing Systems, 2022.
- Ma, Jun; Chen, Huimin; Zhang, Yu; Guo, Hongfei; Ren, Yaping; Mo, Rong; Liu, Luyang: A digital twin-driven production management system for production workshop. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 110, 2020.
- Marko, Angelina; Plass, Chrisoph; Kuttner, Diemar; Laß, Dietmar; Bashiri, Erfan; Barnstedt, Erich; Piller, Frank; Heinrich, Henning; Gayko, Jens; Wirth, Jonas; Görlitz, Julia; Hoffmann, Martin; Wittek, Nick; Madeja, Nils; de Beauregard, Paul; Kiradjie, Plamen; Müller, Sascha; Lehman Brauns, Sicco; Falk, Svenja; Kroke, Ted; Guggenberger, Tobias; von Diemar, Undine: Impulspapier Industrial Metaverse, 2023.
- Marmolejo-Saucedo, Jose Antonio: Design and Development of Digital Twins: a Case Study in Supply Chains. In: Mobile Network Application, Volume 25, 2020.
- Matysczok, Carsten: Kernelement künftiger Wertschöpfung – Optimierungen am digitalen Zwilling verproben. In: IT@Production, 10/2021.
- Matysczok, Carsten; Arnhold, Dennis; Bracht, Uwe; Sauer, Olaf; Seewaldt, Marco; Wenzel, Siegrid; Zülch, Gerd: Die Digitale Fabrik – Treiber der Digitalen Transformation, VDI-Roadmap, 2023.
- Matysczok, Carsten; Schele, Moritz; Kühn, Moritz: Mit dem Digitalen Zwilling Wettbewerbsfähigkeit sichern. In: Mitteldeutschen Mitteilungen des VDI, 2/2018.
- Mügge, Janine; Hahn, Inka Rebekka; Riedelsheimer, Theresa; Chatzis, Johannes: Digital Twins for Circular Economy – Enabling Decision Support for R-Strategies. In: Industrie 4.0 Management, Volume 6, 2022.
- Pankow, Gabriel: Der durchgängige Digital Twin macht's möglich – Umsetzung und Vorteile einer virtuellen Inbetriebnahme. In: Produktion, 2021.

- Rudskoy Andrey; Ilin, Igor; Prokhorov, Andrey: Digital Twins in the Intelligent Transport Systems. In: Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021.
- Schele, Moritz; Kühn, Markus: Vorsprünge durch Digitale Zwillinge. In: Smart Engineering, No. 5, 2017.
- Sjarov, Martin; Lechler, Tobias; Fuchs, Jonathan; Brossog, Matthias; Selmaier, Andreas; Faltus, Florian; Donhauser, Toni; Franke, Jörg: The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2020.
- van Dinter, Raymon; Tekinerdogan, Bedir; Catal, Cagatay: Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. In: Information and Software Technology, Volume 151, 2022.
- von Salzburg, Güntner; Hoher, Simon: Digital Twins im Anlagen-Lebenszyklus. In: White Paper des DTZ Salzburg, 2020.
- Wagner, Sarah; Milde, Michael; Barhebwa-Mushamuka, Félicien; Reinhart, Gunther: Digital Twin Design in Production. In: Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems, 2021.
- Wenzel, Sigrid; Jessen, Ulrich; Stolipin, Jana: Rolle der Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Aufgaben und Integration. In: Gronau, N.: Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation. Hrsg.: Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (WGAB), 2017.