

Implementierung eines simulationsbasierten Digitalen Prozess-Zwillings als Entscheidungsunterstützungssystem

Vollständiger Beitrag

Corinna Huber¹, Lukas Rissmann² und Sebastian Meißner³

Abstract: This paper deals with the implementation of a simulation-based Digital Process Twin as a decision support system. The approach is based on a framework developed by Zuhr et al. The framework provides a two-part architecture consisting of a data supply unit and an information control unit, enabling the integration of operational data and supporting services such as state monitoring, process analysis, and process improvement. The digital twin is visualized through a dashboard, presenting recommendations and their implications. An implementation example demonstrates the application of this framework in a production environment. Discussions on the effectiveness and challenges of implementation, as well as prospects for further research approaches, conclude the paper.

Keywords: Digital twin, simulation, logistics process, dashboard, Industry 4.0

1 Einleitung

In der wissenschaftlichen Literatur lassen sich aufbauend auf den unterschiedlichen theoretischen Überlegungen seit der Einführung des Konzepts der Digitalen Zwillinge 2002 durch *Grieves* [Grie16] verschiedene Definitionen des Digitalen Zwillings finden. Diese Definitionen variieren in ihren Schwerpunkten abhängig von den Anwendungsbereichen und den Zielgruppen. In diesem Artikel werden Digitale Prozess-Zwillinge definiert als eine funktionale, virtuelle und dynamische Repräsentation eines realen Prozesses. Sie bestehen aus Diensten sowie relevanten Modellen und wird mit aktuellen Betriebsdaten gespeist, um Informationen für Entscheidungsunterstützung oder Prozessoptimierung bereitzustellen [Zuhr21].

Entscheidungen basieren meist auf einer Vielzahl an gleichzeitig anfallenden Informationen [FRBM17]. Die Menge an Daten und die Komplexität ihrer Zusammenhänge können Menschen beim Treffen schneller Entscheidungen teilweise überfordern. Entscheidungsunterstützungssysteme können die Anwender bei der

¹Technologiezentrum für Produktions- und Logistiksysteme, Hochschule Landshut, Bräuhausgasse 33, 84130 Dingolfing, <https://orcid.org/0009-0007-6555-5321>

²Technologiezentrum für Produktions- und Logistiksysteme, Hochschule Landshut, Bräuhausgasse 33, 84130 Dingolfing, <https://orcid.org/0000-0002-9747-7707>

³Technologiezentrum für Produktions- und Logistiksysteme, Hochschule Landshut, Bräuhausgasse 33, 84130 Dingolfing, sebastian.meissner@haw-landshut.de, <https://orcid.org/0000-0002-5808-9648>

Entscheidungsfindung unterstützen oder teilweise Entscheidungsprozesse vollständig übernehmen [BCKM09]. Entscheidungsunterstützungssysteme sind wesentliche Bestandteile der Mensch-Maschine-Systemtechnik, die sich durch die informationelle Verbindung von Maschinen und Anwendern auszeichnet [TiBa02]. Digitale Zwillinge können als Entscheidungsunterstützungssysteme angewendet werden. Sie verwenden vorhandene Daten, um zukünftige Prozesse und deren Auswirkungen im Kontext neuer Herausforderungen zu analysieren und zu prognostizieren [KoSc23].

Dieser Artikel beschreibt die beispielhafte Umsetzung des von Zuhr et al. entwickelten Frameworks zur Entwicklung eines simulationsbasierten Digitalen Prozess-Zwilling. Dieses Framework unterstützt die Integration von Betriebsdaten und nutzt simulationsbasierte Methoden zur Bewertung von Zukunftsszenarien für die Unterstützung von Entscheidungsprozessen.

Ein realisiertes Anwendungsbeispiel in der Lern- und Musterfabrik des Technologiezentrum Produktions- und Logistiksysteme (TZ PULS) belegt die Umsetzbarkeit des Frameworks und den Nutzen von simulationsbasierten Digitalen Zwillingen als Entscheidungsunterstützungssystem. Ein Dashboard dient zur Visualisierung der Simulationsergebnisse, der daraus resultierenden Handlungsempfehlungen und deren Auswirkungen. Die Veranschaulichung erleichtert die Interaktion mit dem Digitalen Zwilling, was wiederum schnelle Reaktionen und Entscheidungsfindungen auf Basis realer Daten ermöglicht.

2 Digitale Zwillinge

Die in der Literatur beschriebenen Konzepte zu Anwendung Digitaler Zwillinge unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Anwendungsbereiche und der technischen Umsetzungen [JSNY20, SFHQ21]. Dabei werden unterschiedliche Konzepte und Definition von Digitalen Zwillingen beschrieben, welche nachfolgend diskutiert werden.

Korth et al. entwickelten ein Konzept simulationsbasierter Digitaler Zwillinge zur Optimierung von Logistiksystemen, mit einem Fokus auf Datenerfassung durch Sensoren und spezifischen Datenschnittstellen. Der Ansatz umfasst eine Architektur mit Ereignissteuerung, Modellierung, Simulation und Berichterstattung, die sowohl auf Personal- als auch auf Produktionsplanung angewendet wird. Ein automatisches Palettenregallager und Kommissionierbereiche in einem Verteilzentrum dienen als praktisches Beispiel, um die Vorteile einer gleichmäßigen Mitarbeiterauslastung aufzuzeigen. Der Digitale Zwilling dient hier als Entscheidungsunterstützung, indem er Anpassungen von Arbeitsplänen basierend auf vorherigen Erfahrungen durch die Anwender ermöglicht. Trotz der Präsentation von Ergebnisdaten wird die Übertragbarkeit des Konzepts auf komplexere Systeme in den Arbeiten nicht näher beschrieben [KoSZ18].

Kritzinger et al. ordnen die verschiedenen Ansätze in Kategorien wie Digitale Modelle, Digitale Schatten und Digitale Zwillinge ein, wie Abbildung 1 zeigt [KTH18].

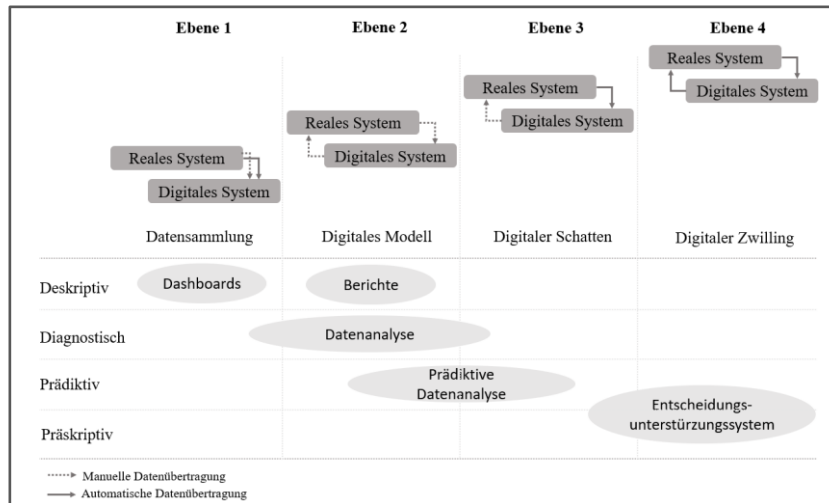


Abb. 1: Ebenen digitaler Abbildungen (eigene Darstellung nach [KKTH18])

Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Ebenen der digitalen Abbildungen eines Realsystems. Auf der ersten Ebene, der „Datensammlung“-Ebene, werden die Daten des Realsystems auf einem Dashboard angezeigt. Unterstützen digitale Abbildungen die Generierung von Berichten sowie die retrospektive und beschreibende Untersuchung von Systemen so werden diese der zweiten Ebene zugeordnet. Solche Analysen werden zuerst nur periodisch und für bestimmte Fragestellungen durchgeführt, was vor allem in der strategischen Planung Anwendung findet. Digitale Schatten, die der dritten Ebene zuzuordnen sind, ermöglichen einen automatisierten Datentransfer von der physischen in die virtuelle Welt, wodurch umfangreiche Datenmengen analysiert werden können. Allerdings ist die Modellierung von Systemabhängigkeiten hier weniger detailliert und nicht zukunftsgerichtet im Vergleich zu Digitalen Zwillingen. Dies befähigt Digitale Schatten besonders für die Untersuchung spezifischer Systemsegmente (beispielsweise einzelner Maschinen). Ihre umfangreiche Datenbasis unterstützt Prognosen, etwa im Hinblick auf den Einsatz von Ressourcen. Digitale Zwillinge in der letzten Ebene zeichnen sich ebenfalls durch eine große Datenmenge aus. Digitale Zwillinge verfügen häufig über ein Simulations- oder Prognosemodell, die die erforderlichen Daten automatisch verarbeiten und somit präskriptive Analysen ermöglicht [KKTH18]. Ein Merkmal Digitaler Zwillinge ist der bidirektionale Informationsfluss zwischen dem physischen System und seiner digitalen Abbildung. Die Frequenz, mit der diese Datenübertragungen stattfinden, ist dabei nicht festgelegt [HaMG19]. Der gegenseitige Datenaustausch simulationsbasierter Digitaler Zwilling ermöglicht es, den aktuellen Zustand des Systems abzubilden und die Umsetzbarkeit von Entscheidungen vorab durch Simulationen im digitalen Modell zu prüfen. [TCQZ18].

Zuhr et al. beschreiben einen Digitalen Prozess-Zwilling (DPZ) als ein funktionales, virtuelle und dynamisches Modell eines realen Prozesses. Der DPZ besteht aus einer Kombination von Diensten und Modellen und wird kontinuierlich mit aktuellen Betriebsdaten versorgt. Der DPZ dient als Überwachungs- und Steuerungssystem, das in drei mögliche Hauptdienste gegliedert werden kann: Zustandsüberwachung, Prozessanalyse und Prozessverbesserung. Bei der Zustandsüberwachung kann der Zustand von Hardware- und Softwarekomponenten überwacht werden, um die Verfügbarkeit und Leistung sicherzustellen. Die Prozessanalyse identifiziert Schwachstellen und gibt Warnungen aus, während sie gleichzeitig zukünftige Zustände vorhersagt, um präventive Maßnahmen zu erleichtern. Die Prozessverbesserung nutzt Simulationswerkzeuge und optional künstliche Intelligenz, um die Produktivität zu steigern und ermöglicht die Selbststeuerung durch regelbasierte Algorithmen.

Darüber hinaus wird eine zugehörige Architektur für den Digitalen Prozess-Zwilling definiert, welche in Abbildung 2 vereinfacht dargestellt ist.

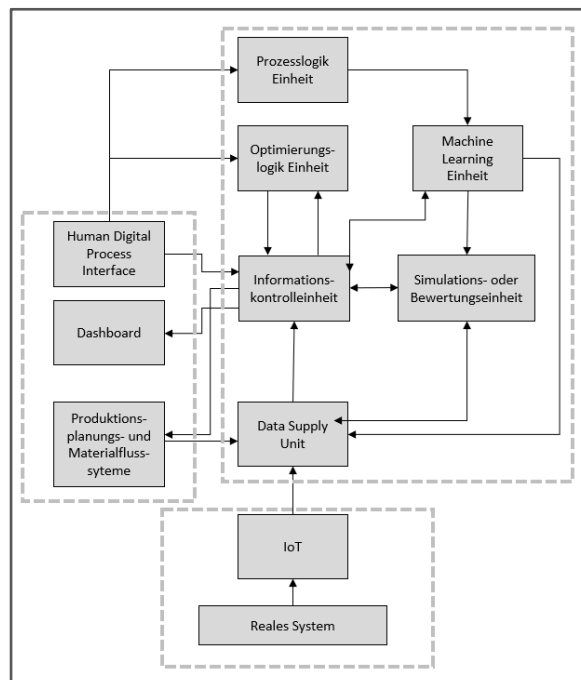


Abb. 2: Rahmenwerk Digitaler Prozess-Zwilling (eigene Darstellung nach Zuhr [ZuRM22])

Der DPZ ist an vier Stellen mit seiner Umgebung verbunden. Es erfasst dabei Daten direkt aus der physischen Umgebung (reales System) und ebenso mit bestehenden Produktionsplanungs- und Materialflusssystemen wie dem Enterprise Resource Planning (ERP) und dem Warehouse Management System (WMS) verbunden, um Operations-, Planungs- und Materialflussinformationen zu integrieren. Weiter ermöglicht ein Human

Digital Process Twin Interface (HDPTI) Nutzern die Interaktion mit dem System und visualisiert wichtige Informationen über ein Dashboard. Die Architektur des DPZ setzt sich aus der Datenversorgungseinheit und der Informationssteuerungseinheit zusammen. Die Datenversorgungseinheit ist für das Sammeln, Aufbereiten, Speichern und Bereitstellen von Daten zuständig, während die Informationssteuerungseinheit die Daten analysiert und auf Basis dieser Analysen Handlungsempfehlungen präsentiert. Diese Entscheidungsfindung basiert auf Algorithmen und Leistungsindikatoren (KPIs). Das Rahmenwerk erlaubt durch seine modulare Struktur die Integration zusätzlicher Dienste wie Simulationen und maschinelles Lernen, je nach spezifischem Bedarf. Durch die bidirektionale Verbindung zwischen Datenversorgungs- und Informationssteuerungseinheit wird ein kontinuierlicher Datenfluss sichergestellt, der eine dynamische Anpassung und Optimierung der Prozesse ermöglicht [ZuRM22].

Simulationsbasierter Digitaler Zwilling als Entscheidungsunterstützungssystem

Als Simulation wird die Durchführung von Experimenten an einem Modell zur Bewertung und Optimierung realer oder hypothetischer Systeme verstanden. Ein Simulationsmodell ist dabei eine abstrahierte Darstellung des zu untersuchenden Systems, in der dessen Struktur oder Verhalten mit reduziertem Detaillierungsgrad abgebildet wird. Dies ermöglicht es, durch Experimente am Modell Rückschlüsse auf das reale System zu ziehen und unterstützt Entscheidungsprozesse durch die Analyse verschiedener Systemvarianten. [Eley12]

Aufbauend auf den Definitionen von Simulation und Simulationsmodellen, zeigen sich simulationsbasierte Digitale Zwillinge als spezialisierte Anwendungen dieser Konzepte, die in der Praxis zur Unterstützung von operativen Entscheidungen eingesetzt werden.

Simulationsbasierte Digitale Zwillinge sind effektive Werkzeuge die vorab genutzt werden können, um Entscheidungen zu bewerten [KaGF21]. Diese digitalen Modelle können operative Abläufe unterstützen, wie beispielsweise die Planung des Ressourceneinsatzes zum Beispiel von Material und Mitarbeiter. Bei ihrer Entwicklung ist es wichtig, den richtigen Detaillierungsgrad für die Abbildung des realen Systems festzulegen [SGMM23]. Es gilt, die wesentlichen Entscheidungsparameter zu identifizieren, damit der Digitale Zwilling effektiv operative Entscheidungen unterstützen kann [VaDe11].

Die jeweilige Komplexität des Systems erfordert eine sorgfältige Auswahl des Detaillierungsgrads für die digitale Abbildung, damit die erforderliche Qualität der Ergebnisse erreicht werden kann. Brooks in Robinson et al. heben hervor, dass die Beziehung zwischen der Leistung des Modells und der Detailgenauigkeit noch wenig erforscht ist und weitere Untersuchungen erfordert. Die Autoren nehmen an, dass ein Modell mit geringerem Detailgrad genauso wirkungsvoll sein kann, da der Nutzen weiterer Einzelheiten über einen bestimmten Punkt hinaus nicht mehr zur Genauigkeit der Ergebnisse beiträgt [RBKV10].

3 Realisierung des Digitalen Prozess-Zwillings in der Lern- und Musterfabrik des TZ PULS

Im Rahmen des Projekts Process Innovation Center (PRINCE) werden simulationsbasierte Digitale Prozess-Zwillinge als Entscheidungsunterstützungssystem erforscht, wobei verschiedene Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Detailierungsgraden erstellt wurden. Der folgende Abschnitt bietet einen Überblick über den Entwicklungsprozess eines Digitalen Prozess-Zwillings. Es wird dargestellt, wie digitale Modelle schrittweise zu simulationsbasierten Digitalen Zwillingen erweitert werden können. Zudem wird die Visualisierung des Digitalen Zwillings mithilfe eines Dashboards beschrieben, das die Erkenntnisse des Zwillings für die Anwender darstellt. Der Anwendungsfall wird in der U-Zelle der Lern und Musterfabrik des TZ-PULS umgesetzt. Hier werden Industrie 4.0-Technologien wie Robotik, IoT-Komponenten und intelligente Sensorik, um Produktionslogistikprozesse zu simulieren und zu optimieren, erforscht und angewendet. Auf einer Fläche von 900 m² wird eine Wertschöpfungskette abgebildet, die von Wareneingang über verschiedene Fertigungsbereiche bis zum Warenausgang reicht. Unter den Fertigungsbereichen befindet sich eine U-Zelle zur Fertigung von Bodenrollern. Neben der Forschung dient das Technologiezentrum auch als Ort der Weiterbildung und für Fachvorträge, um die Potenziale von Digitalisierung und Automatisierung in der Produktionslogistik zu erforschen und zu demonstrieren. Im Rahmen dieser Forschung werden die Simulationsmodelle mit der ereignisdiskreten Simulationssoftware Plant Simulation von Tecomatix [Htp00].

3.1 Vorgehen zur Entwicklung eines simulationsbasierten Digitalen Zwillings

Die Entwicklung des Verfahrens erfolgt in Anlehnung an den Vorgehensplan für Ablaufsimulationen von Mayer et al. [MPSW20]. Der Prozess beginnt mit einer Zieldefinition, gefolgt von einer Anforderungsanalyse. In dieser Phase erfolgt die Identifikation der erforderlichen Datenquellen und notwendigen technischen Ressourcen, einschließlich geeigneter Simulationssoftware. Im Anschluss erfolgt die Entwicklung eines digitalen Modells, das die physischen und funktionalen Merkmale eines Produkts oder Prozesses wiedergibt. Dieser Schritt erfordert zunächst die Datenerhebung, -analyse und -aufbereitung, insbesondere in Bezug auf Layout, Struktur und Prozessabläufe des realen Systems. Anschließend wird durch die Integration von Echtzeitdaten aus Sensoren sowie Wartungs- und Zustandsdaten von Anlagen das digitale Modell zu einem Digitalen Schatten weiterentwickelt. Die Implementierung einer Verbindung zwischen dem Digitalen Schatten, der Simulation und dem realen System ermöglicht die Entwicklung zum Digitalen Zwillings. Bei der Realisierung des Digitalen Zwillings wurde das von Zuhr et al. entwickelte Framework verwendet. Im nächsten Schritt werden Funktionen beschrieben, die auf Basis aktueller Daten und Simulationsergebnisse automatische Anpassungen der Simulationsparameter oder Entscheidungsvorschläge ermöglichen. Das Dashboard wird während der Phase „Datensammlung“ initiiert und kontinuierlich mit jeder Ebene in seinen Funktionen und Anwendungen weiterentwickelt. Der wesentliche

Unterschied zwischen Ebene 1 und 2 liegt in der Aktualisierungsfrequenz der integrierten Daten, während ab Ebene 3 das Dashboard dynamisch mit aktuellen Daten aktualisiert wird. Abschließend erfolgt die Erweiterung des Dashboards um eine bidirektionale Verbindung zum Digitalen Zwilling. Dadurch ermöglicht das Dashboard nicht nur die Visualisierung relevanter Kennzahlen, sondern bietet auch Interaktivität, die es Anwendern erlaubt, Simulationen zu steuern und Parameter anzupassen. Es dient als Schnittstelle für Entscheidungsträger, die auf Basis der gesammelten Daten Entscheidungen treffen und Prozesse optimieren können.

3.2 Anwendungsbeispiel: Implementierung in der U-Zelle

In diesem Abschnitt wird das zuvor beschriebene Vorgehen und Framework anhand eines praktischen Anwendungsfalls beschrieben und validiert. Diese Umsetzung konzentriert sich vorrangig auf die Ausarbeitung eines Digitalen Prozess-Zwillings als Entscheidungsunterstützungssystem.

Ziel ist es, einen Digitalen Prozess-Zwilling zu erforschen, der Entscheider bei der Kapazitätsplanung unterstützt. Als Demonstrationsplattform dienen Prozesse und Aufbau einer realitätsnahen Produktion in der Lern- und Musterfabrik.

Der betrachtete Fertigungsprozess umfasst sieben Montageschritte. In diesen sieben Schritten wird ein Bodenroller montiert. Ein U-Zellen-Montage-Layout wird verwendet. Die Montage besteht aus sieben Einzelarbeitsplätzen (OP 1-7), die von jeweils einem Mitarbeiter bedient werden, der Bearbeitungstakt beträgt 75 Sekunden. Die Produktion erfolgt an 240 Tagen pro Jahr im Zwei-Schichtbetrieb zu jeweils 7,5 Stunden pro Schicht. Auf Grundlage der vorhandenen Daten der Lern- und Musterfabrik wird zu Beginn ein digitales Modell der U-Zelle erstellt. Hierfür wird die U-Zelle mit den Einzelarbeitsstationen und ihrer zugehörigen internen Logistik abgebildet. Der Detaillierungsgrad wird dabei so gewählt, dass alle nötigen Bereiche abgebildet sind, um ein reales Abbild der Montage zu gewährleisten. In Abbildung 3 ist die physische U-Zelle und ihre digitale Abbildung in Plant Simulation dargestellt.

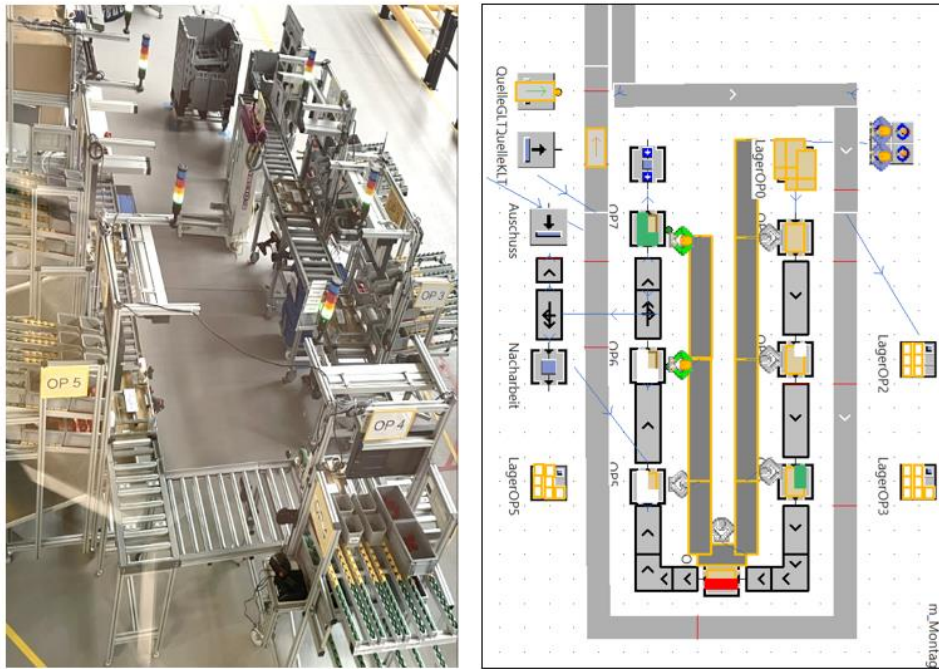


Abb. 3: Die physische U-Zelle und ihre digitale Abbildung

Im nächsten Schritt werden aktuelle Daten aus dem U-Zellen-Montageszenario in die Simulationsumgebung integriert. Dazu gehören Kundenaufträge, Teilelisten, Produktionszeit, Lagerbestände, Mitarbeiter sowie Schichtpläne. Die Daten werden über eine SQLite-Datenbank in die Simulation eingespeist. Im Anschluss wird ein Arbeitstag simuliert. Zu diesem Zweck werden mehrere Simulationsläufe durchgeführt wobei hier unterschiedliche Produktionsreihenfolgen angenommen werden. Zweck der Simulationsdurchläufe ist es, die tatsächliche Bearbeitungszeit an den Stationen und die Gesamtdurchlaufzeit zu evaluieren, um dadurch die Korrektheit der Kapazitätsplanung des Digitalen Zwillinges zu gewährleisten. Ein Ziel ist die Sicherstellung der täglichen Ausbringungsmenge von 770 Bodenrollern. Das Ergebnis der Simulation ist die Ausbringungsmenge. Abbildung 5 zeigt die digitale Abbildung der U-Zelle mit ihren sieben Einzelstationen im Bearbeitungsprozess.

Nachdem die Produktionsdaten erfolgreich in das digitale Modell der U-Zelle erfasst wurden, erfolgt die praktische Umsetzung des Frameworks für den Digitalen Zwilling. Die Simulationseinheit übernimmt dabei die Aufgabe die Simulation mit den notwendigen Daten zu versorgen. Im Anwendungsfall findet die Datenübertragung mithilfe einer Datenbank statt. Die Auswahl der Konfigurationen die simuliert werden sollen, erfolgt in der Informationskontrollereinheit. Hierzu kann auf die Datenversorgungseinheit (Data

Supply Unit) zugegriffen werden. Die Data Supply Unit ist als Datenbank (SQLite) realisiert, in der sich alle verfügbaren Daten befinden (u.a. historische Simulationsläufe sowie deren Ergebnisse und Daten aus dem System).

Die Ergebnisse der Simulation werden im Anschluss mit Hilfe der Simulationseinheit übertragen und in der Data Supply Unit gespeichert. Die Informationskontrolleinheit kann daraufhin die Simulationsergebnisse und Daten im Dashboard darstellen. Das Dashboard ist so gestaltet, dass es nicht nur Handlungsempfehlungen und aktuelle KPIs darstellt, sondern auch Entscheidungsträgern die Möglichkeit bietet, zusätzliche Simulationen vorzunehmen. Durch Änderungen im Dashboard können Simulationen mit geänderten Parametern gestartet werden. Dies wird durch die Informationskontrolleinheit ermöglicht, die die notwendigen Anpassungen an die Simulationskontrolleinheit weiterleitet. Die aus den veränderten Parametern resultierende Handlungsempfehlung und ihren Auswirkungen werden wiederum direkt durch die Informationskontrolleinheit im Dashboard visualisiert.

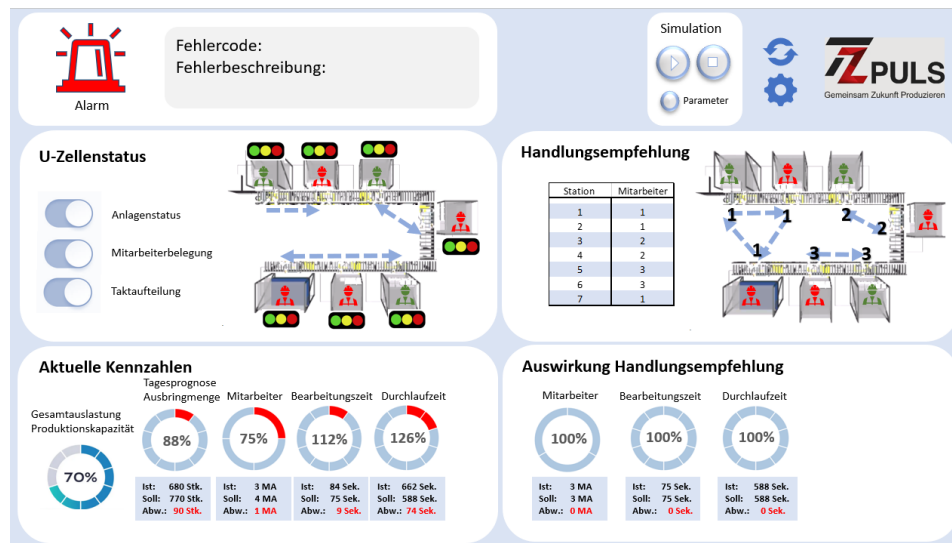


Abb. 4: Dashboard als Visualisierung des Digitalen Prozess Zwillings

Abbildung 4 zeigt ein Dashboard, das in zwei Hauptbereiche aufgeteilt ist. Im linken Bereich ist der Fokus auf der Zustandsüberwachung, die mit den Echtzeitdaten aus der U-Zelle eine kontinuierliche Überwachung ermöglicht. Der U-Zellenstatus zeigt den aktuellen Fertigungsstatus der Kundenbestellungen, Mitarbeiterbelegung und Taktzuweisung sowie den Status der Anlagen. Darunter werden relevante Kennzahlen und deren Erreichungsgrade visualisiert. Besonders kritische Abweichungen der Kennzahlen werden im Rahmen der Prozessanalyse angezeigt, was eine rasche Identifikation und

Reaktion auf mögliche Betriebsstörungen ermöglicht. Die rechte Seite des Dashboards zeigt mögliche Prozessverbesserungen, und visualisiert die aus der Simulation ermittelten Handlungsempfehlungen und deren Auswirkungen sowie die Steuerungselemente der Simulation.

Im abgebildeten Anwendungsfall wird die U-Zelle als visuelle Darstellung abgebildet. An den Einzelarbeitsstationen zeigen grün hinterlegte Symbole von Mitarbeitern die Anwesenheit und rote die Abwesenheit. Die Pfeile bilden die Taktzuweisung des jeweiligen Mitarbeiters ab. Abweichungen in den KPIs werden rot hervorgehoben. Durch die gleiche visuelle Abbildung der U-Zelle auf der Prozessverbesserungsseite (rechts) werden Änderungen der Mitarbeiterbelegung und deren Taktzuweisung übersichtlich dargestellt. Zudem werden die direkten Auswirkungen der Handlungsempfehlung auf die betreffenden Kennzahlen ersichtlich. Somit kann der Entscheiderkreis die Handlungsempfehlung bei Bedarf übernehmen und im System umsetzen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wird die Implementierung eines simulationsbasierten Digitalen Prozess-Zwillings auf Basis den von Zuhr et al. definierten Frameworks beschrieben und dessen Umsetzbarkeit verifiziert. Ziel des Frameworks ist es, Entscheidungsunterstützung und Prozessoptimierung durch simulationsbasierte Digitale Prozess-Zwillinge zu ermöglichen und dabei die strukturierte Vorgehensweise aufzuzeigen [Zuhr21]. Die erfolgreiche Umsetzung dieses Frameworks wurde in der Lern- und Musterfabrik des Technologiezentrums Produktions- und Logistiksysteme (TZ PULS) demonstriert.

Das Framework beschreibt die Datenaufnahme und -analyse durch eine zweiteilige Architektur aus Datenversorgungs- und Informationssteuerungseinheit, was die Integration von Betriebsdaten und den Einsatz von simulationsbasierten Methoden zur Entscheidungsfindung unterstützt.

Das vorgestellte Dashboard visualisiert die Ergebnisse der Simulation und stellt Echtzeitdaten des realen Systems dar. Es setzt folgende im Framework definierten Dienste um: Zustandsüberwachung, Prozessanalyse und Prozessverbesserung. Durch die Darstellung von Handlungsempfehlungen und deren Auswirkungen unterstützt das Dashboard Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung. Darüber hinaus fördert die Integration von Simulationsergebnissen mit Echtzeitbetriebsdaten im Dashboard ein besseres Verständnis der Betriebsprozesse und deren Potenzialen bei den Anwendern.

Durch die Implementierung und Anwendung des Digitalen Prozess-Zwillings kann die Effektivität der Entscheidungsfindung verbessert werden. Jedoch ergeben sich bei der Implementierung Digitaler Prozess-Zwillinge in Unternehmen auch Herausforderungen. Eine Schwierigkeit besteht in der Notwendigkeit, die Aktualität des Digitalen Prozess-

Zwillings stets zu gewährleisten. Jede Veränderung im realen System muss rechtzeitig im digitalen Abbild aktualisiert werden, um die Funktionsfähigkeit des Digitalen Prozess-Zwillings zu sichern. Ebenso muss der Datenfluss zwischen den beiden Systemen jederzeit aufrechterhalten werden. Eine zusätzliche Herausforderung ergibt sich aus dem Design des Dashboards. Dieses muss in der Lage sein, alle relevanten Informationen so darzustellen, dass sie den Entscheidungsträgern eine zuverlässige Entscheidungsgrundlage bieten. Dabei müssen diverse Perspektiven integriert werden, um die Anforderungen aller Beteiligten zu erfüllen.

In der weiterführenden Forschungsarbeit soll die Geeignetheit des gezeigten Vorgehens evaluiert werden. Dafür sollte ein Kriterienkatalog erarbeitet werden, anhand dessen die Umsetzung des Framework bewertet werden kann. Dieser Katalog soll insbesondere darauf eingehen, inwiefern das Framework allgemeingültig umgesetzt werden kann oder ob gegebenenfalls noch Änderungen am Modell vorgenommen werden müssen. Ebenso sollen die Einsatzvoraussetzungen und Grenzen des Frameworks bei praktischen Umsetzungsstudien erforscht werden. Auf Grundlage der daraus resultierenden Erkenntnisse soll das Framework weiter angepasst und zu einem allgemeingültigen Referenzmodell weiterentwickelt werden.

Darüber hinaus sollten zukünftige Forschungsarbeiten untersuchen, wie die technischen Fähigkeiten von Entscheidungsunterstützungssystemen weiterentwickelt werden können. Eine Möglichkeit ist, den Digitalen Prozess-Zwilling um maschinelles Lernen zu erweitern, um zu untersuchen, ob sich dadurch die Effizienz des Systems weiter verbessern lässt. Durch den vermehrten Einsatz von Modellen des maschinellen Lernens lässt sich der Simulationsaufwand reduzieren und damit die Reaktionsgeschwindigkeit des Digitalen Zwillings erhöhen, ohne auf die Prognosegenauigkeit der Simulation zu verzichten. Dies kann die Entscheidungsfindung der Anwender weiter optimieren [MuRM22].

Literatur

- [BCKM09] BLUTNER, DORIS ; CRAMER, STEPHAN ; KRAUSE, SVEN ; MÖNKS, TYCHO ; NAGEL, LARS ; REINHOLZ, ANDREAS ; WITTHAUT, MARKUS: Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung. In: BUCHHOLZ, P. ; CLAUSEN, U. (Hrsg.): *Große Netze der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 — ISBN 978-3-540-71047-9, S. 241–270
- [Eley12] ELEY, MICHAEL: *Simulation in der Logistik: eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges „Plant Simulation“*, Springer-Lehrbuch. Berlin Heidelberg : Springer Gabler, 2012 — ISBN 978-3-642-27372-8

- [FRBM17] FELLMANN, MICHAEL ; ROBERT, SEBASTIAN ; BÜTTNER, SEBASTIAN ; MUCHA, HENRIK ; RÖCKER, CARSTEN: Towards a Framework for Assistance Systems to Support Work Processes in Smart Factories. In: HOLZINGER, A. ; KIESEBERG, P. ; TJOA, A. M. ; WEIPPL, E. (Hrsg.): *Machine Learning and Knowledge Extraction, Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 10410. Cham : Springer International Publishing, 2017 — ISBN 978-3-319-66807-9, S. 59–68
- [Grie16] GRIEVES, MICHAEL: Origins of the Digital Twin Concept, [object Object] (2016)
- [HaMG19] HARPER, K. ERIC ; MALAKUTI, SOMAYEH ; GANZ, CHRISTOPHER: Digital Twin Architecture and Standards., [object Object] (2019)
- [Http00] <https://www.haw-landshut.de/forschungseinrichtungen/technologiezentren/tz-puls>.
- [JSNY20] JONES, DAVID ; SNIDER, CHRIS ; NASSEHI, AYDIN ; YON, JASON ; HICKS, BEN: Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 29 (2020), S. 36–52
- [KaGF21] KAUKE, DIRK ; GALKA, STEFAN ; FOTTNER, JOHANNES: Digital Twins in Order Picking Systems for Operational Decision Support. In: , 2021
- [KKTH18] KRITZINGER, WERNER ; KARNER, MATTHIAS ; TRAAR, GEORG ; HENJES, JAN ; SIHN, WILFRIED: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine* Bd. 51 (2018), Nr. 11, S. 1016–1022
- [KoSc23] KORNBLUM, WOLFGANG ; SCHUMANN, RENÉ: Digitale Zwillinge ermöglichen fundierte Entscheidungen durch vernetzte Daten. In: *Bautechnik* Bd. 100 (2023), Nr. 4, S. 198–205
- [KoSZ18] KORTH, BENJAMIN ; SCHWEDE, CHRISTIAN ; ZAJAC, MARKUS: Simulation-ready digital twin for realtime management of logistics systems. In: *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. Seattle, WA, USA : IEEE, 2018 — ISBN 978-1-5386-5035-6, S. 4194–4201
- [MPSW20] MAYER, GOTTFRIED ; PÖGE, CARSTEN ; SPIECKERMANN, SVEN ; WENZEL, SIGRID: Einleitung. In: MAYER, G. ; PÖGE, C. ; SPIECKERMANN, S. ; WENZEL, S. (Hrsg.): *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-59387-5, S. 1–19
- [MuRM22] MUEHLBAUER, KONSTANTIN ; RISSMANN, LUKAS ; MEISSNER, SEBASTIAN: Decision Support for Production Control based on Machine Learning by Simulation-generated Data: In: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*. Valletta, Malta : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2022 — ISBN 978-989-758-614-9, S. 54–62

- [RBKV10] ROBINSON, STEWART; BROOKS, ROGER; KOTIADIS, KATHY; VAN DER ZEE, DURK-JOUKE (Hrsg.): *Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation*. 0. Aufl. : CRC Press, 2010 — ISBN 978-1-4398-1038-5

- [SFHQ21] SINGH, MAULSHREE ; FUENMAYOR, EVERT ; HINCHY, EOIN ; QIAO, YUANSONG ; MURRAY, NIALL ; DEVINE, DECLAN: Digital Twin: Origin to Future. In: *Applied System Innovation* Bd. 4 (2021), Nr. 2, S. 36

- [SGMM23] SCHMID, FLORIAN ; GALKA, STEFAN ; MARINKOVIC, MINJA ; MEIBNER, SEBASTIAN: Simulationsbasierte Untersuchung von Abstraktionsgraden im Kontext Digitaler Zwillinge für innerbetriebliche Transportsysteme. In: *20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023*, [object Object] (2023), S. 135 — ISBN 9783863602765

- [TCQZ18] TAO, FEI ; CHENG, JIANGFENG ; QI, QINGLIN ; ZHANG, MENG ; ZHANG, HE ; SUI, FANGYUAN: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 94 (2018), Nr. 9–12, S. 3563–3576

- [TiBa02] TIMPE, KLAUS-PETER; BAGGEN, ROBERT. (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik: Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. 2. Aufl., Stand: Februar 2002. Düsseldorf : Symposion Publ, 2002 — ISBN 978-3-933814-83-8

- [VaDe11] VASUDEVAN, KARTHIK; DEVIKAR, ASHISH: Selecting simulation abstraction levels in simulation models of complex manufacturing systems. In: *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*. Phoenix, AZ, USA : IEEE, 2011 — ISBN 978-1-4577-2108-3, S. 2268–2277

- [Zuhr21] ZUHR, PASCAL; MUEHLBAUER, KONSTANTIN; BAEUML, STEPHANIE; MEIBNER, SEBASTIAN: An approach for target-oriented process analysis for the implementation of Digital Process Optimization Twins in the field of intralogistics. In: *Proceedings of the 33rd European Modeling & Simulation Symposium* : CAL-TEK srl, 2021 — ISBN 978-88-85741-57-7, S. 183–191

- [ZuRM22] ZUHR, PASCAL; RISSMANN, LUKAS ; MEIBNER, SEBASTIAN: Framework for planning and implementation of Digital Process Twins in the field of internal logistics. In: *IFAC-PapersOnLine, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022*. Bd. 55 (2022), Nr. 10, S. 2221–2227