

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

Der Hybride Digitale Zwilling: Eine praxistaugliche Verbindung von Simulation und operationellen Produktionssystemen

The Hybrid Digital Twin: A Practical Way to Connect Simulation with Operational Production Systems

Richard Scheer, Steffen Straßburger, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany),
richard.scheer@de.bosch.com, steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Marc Knapp, Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Germany),
marc.knapp@de.bosch.com

Abstract: Digital Twins are currently a topic of much discussion in academia. However, they have yet to be transferred to general industrial practice because there are still significant challenges concerning their implementation. This paper proposes the concept of the Hybrid Digital Twin to address these challenges. At first, it will elucidate the concept and introduce a real-world prototype of an operational production line. Afterwards, it will validate the prototypical implementation and demonstrate a detailed strategy to calibrate it. Then the paper presents potential strategies to use the Hybrid Digital Twin in a production environment. Finally, further developments and remaining issues are discussed.

1 Einführung

Produzierende Unternehmen stehen gegenwärtig vor einer Reihe struktureller Herausforderungen. Ressourcenknappheit und das Streben nach nachhaltiger Produktion erfordern innovative Strategien, um wettbewerbsfähig bleiben zu können. Die Methoden des Industrie 4.0 Paradigmas, insbesondere der Digitale Zwilling (DZ), bergen in diesem Kontext enormes Potenzial.

Der Begriff des DZ wird gegenwärtig sowohl in der akademischen Literatur als auch in der industriellen Praxis vermehrt eingesetzt. Kuehner et al. (2021) zeigten jedoch, dass es zum Zeitpunkt ihrer Analyse kein einheitliches Begriffsverständnis gab. Nachfolgend stellten sie jedoch auf Basis der untersuchten Literatur eine Begriffsdefinition auf, die auch in dieser Abhandlung gelten soll. Nach Kuehner et al. (2021) handelt es sich bei einem DZ um eine virtuelle Repräsentation eines physischen Gegenstücks. Der DZ bildet dabei die Grundlage für eine Simulation oder besteht selbst aus Simulationsmodellen. Zudem hat der DZ eine bidirektionale

Datenverbindung zwischen physischer und digitaler Komponente, welche über mehrere Lebensphasen des Systems bestehen kann.

Es existieren diverse wissenschaftliche Veröffentlichungen, die sich mit der spezifischen Implementierung von DZ im Produktionsumfeld befassen. Einige dieser Implementierungen fanden ausschließlich unter Laborbedingungen statt. So wurden bereits Produktionsanlagen wie z. B. eine Reibschweißanlage (Roy et al. 2020), ein Roboter (Matulis und Harvey 2021) oder ein Produktionssystem mit mehreren Elementen (Guo et al. 2020) unter Laborbedingungen mit einem DZ implementiert. Eine Übertragbarkeit auf reale Fertigungssysteme konnte jedoch nicht aufgezeigt werden. Es existieren auch bereits eine kleine Anzahl von Fallstudien, wie z. B. eine Satellitenfertigung (Zhuang et al. 2018), in welcher unter Realweltbedingungen Fertigungssysteme mit mehreren Elementen um einen DZ erweitert wurden. Hohe Implementierungsaufwände, wie bspw. dedizierte Vorrichtungen zur Datenaufnahme, zeigen jedoch, dass ihre Methodik nur bedingt praxistauglich ist.

Prinzipiell lässt sich feststellen, dass für die Implementierung eines DZ signifikante Hürden überwunden werden müssen. Kuchner et al. (2021) haben in einer weitläufigen Literaturanalyse in Form eines Meta-Reviews unter anderem folgende Implementierungshürden für den DZ identifiziert:

- Unzulänglichkeiten bei der Sammlung und Aufarbeitung von Daten
- Mangelnde Kenntnisse zur Modellierung und Simulation von DZ
- Fehlende Strategien, um einen DZ effizient und nutzbringend zu implementieren
- Mangelnde Konzeptstandardisierung

Es ist notwendig, die Überwindung dieser Hürden zu thematisieren, um ein praxistaugliches Implementierungskonzept für einen DZ zu erhalten. Bisherige Konzepte, die mit mindestens einer Fallstudie untermauert wurden, konnten dies bei Systemen mit mehreren Elementen unter Realweltbedingungen nicht genügend demonstrieren.

Im Rahmen dieser Abhandlung soll zu diesem Zweck die Implementierungsstrategie des Hybriden Digitalen Zwillings (HDZ) erörtert werden. Sie soll eine praxistaugliche Möglichkeit darstellen, welche die genannten Implementierungshürden überwinden kann, um das Konzept des DZ in die industrielle Anwendung zu überführen.

Zunächst soll daher das Konzept des HDZ sowie dessen Inspiration präsentiert werden. Anschließend erfolgt die Vorstellung einer Fallstudie, die anhand einer realen und operationellen Produktionslinie die Implementierung eines HDZ zeigen soll. Im Zuge dieser Implementierung sollen auch Strategien zur Validierung und insbesondere Kalibrierung der Simulation diskutiert werden. Nachfolgend erfolgt eine Erörterung von potenziellen Anwendungsmöglichkeiten des HDZ. Abschließend werden offene Problemstellungen identifiziert und das Konzept des HDZ kritisch eingeschätzt.

2 Konzept des Hybriden Digitalen Zwillings

Betrachtet man die Idee des DZ, so kann man erkennen, dass dieser im Wesentlichen aus zwei Elementen besteht: einer Datenkomponente und einer Verhaltenskomponente. Die Datenkomponente besteht aus Mechanismen, wie Daten im physischen System gesammelt, aufgearbeitet und dem DZ in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden können. Die Verhaltenskomponente besteht aus Modellen

und Simulationen, welche das Verhalten des physischen Systems mit genügender Genauigkeit replizieren können. Zwischen diesen Komponenten erfolgt ein bidirektionaler Informationsaustausch. Zusätzlich kann ein DZ je nach Anwendungsfall noch um weitere Komponenten wie z. B. zur Datenanalyse, zur Steuerung des physischen Systems, zur Ergebnisvisualisierung oder zur Orchestrierung von Experimenten erweitert werden.

Das Konzept des HDZ wurde durch Scheer et al. (2023) zum ersten Mal vorgestellt und detailliert beschrieben. Der Begriff wurde durch den Ansatz der hybriden Systemmodellierung nach Mustafee und Powell (2018) inspiriert. Sie beschreiben die hybride Systemmodellierung als einen Einsatz von Simulation in Kombination mit Techniken, welche aus anderen Wissenschaftsfeldern wie bspw. aus der allgemeinen Informatik, Systemtechnik oder Operations-Research stammen können. Nach diesem Vorbild sollen für die Hybridisierung des DZ bereits etablierte Methoden eingesetzt werden, um den DZ effizient implementieren zu können. Das konkrete Ziel der Hybridisierung ist die Substitution einzelner Komponenten des DZ mit bekannten und erprobten Methoden, um die spezifischen Implementierungshürden nach Kuehner et al. (2021) überwinden zu können. Der Fokus der Strategie liegt dabei ausdrücklich auf der Praxistauglichkeit. Eine weitere Quelle der Inspiration sind verwandte Verbundkonzepte zwischen digitalen und physischen Systemen, wie bspw. Online-Simulation oder symbiotische Simulation (vgl. Scheer et al. 2021). Im HDZ soll zudem auch darauf geachtet werden, nur jene Komponenten des Realsystems zu modellieren, die für die Zielerreichung notwendig sind, um den Modellier- und Simulationsaufwand möglichst gering zu halten.

Die Datenkomponente eines DZ muss echtzeitnah Informationen über das physische System bereitstellen. Gemäß dem Grundsatz der Praxistauglichkeit soll im HDZ die Installation zusätzlicher Sensorik und Dateninfrastruktur weitestgehend vermieden werden. Vielmehr sollen bestehende Daten neuartig verwendet werden, um die Funktionalität des HDZ zu gewährleisten. Moderne Fertigungssysteme werden i. d. R. mithilfe eines Fertigungsleiters (Manufacturing Execution System, MES) betrieben. Das MES erhält dabei alle Bewegungsdaten und Zustände aller Elemente in der Fertigung, um diese entsprechend zu leiten. Selbige Daten sollen nun auch die Datengrundlage für den HDZ sein. Speziell soll dabei die Position aller beweglichen Entitäten (z. B. Werkstückträger und Werkstücke) und der Status aller unbeweglichen Entitäten (z. B. Fertigungsmaschinen) bekannt sein. Betrachtet man Datenpunkte aus der Vergangenheit, so lassen sich auch Fertigungsparameter (z. B. Transfer- oder Bearbeitungszeiten) berechnen. Zusätzlich erfassen moderne Fertigungssysteme häufig auch Prozessmessdaten zur Qualitätssicherung, die ebenso wertvolle Informationen enthalten können. Eine Aufarbeitung der Daten kann mittels bekannter Methoden aus dem Wissenschaftsfeld der Wissensentdeckung in Datenbanken durchgeführt werden. Auf diesem Weg soll die Datenkomponente des HDZ den Digitalen Schatten (die Gesamtheit aller bereits gesammelten Daten des Systems) nutzen, um die Simulation des Systems zu ermöglichen. Diese Strategie der Datenakquisition adressiert die Implementierungshürde der Datensammlung und Dateninfrastruktur nach Kuehner et al. (2021).

Die Verhaltens- bzw. Simulationskomponente eines DZ muss die Prozesse des physischen Systems hinreichend genau darstellen. Dabei können je nach Anwendungsfall diverse Modellierparadigmen zum Einsatz kommen. Im HDZ soll die ereignisdiskrete Simulation (EDS) als Prinzipalmodell eingesetzt werden. Die

Nutzung von EDS birgt einige Vorteile. Sie ist methodisch gut erforscht und findet Anwendung in der industriellen Praxis wie z. B. zur Auslegung von Produktionssystemen (Bergmann und Strassburger 2010). Durch die ereignisbasierte Natur von EDS kann sie mit diskreten Informationspaketen gut umgehen. Gleichzeitig können mit EDS verschiedene Modelltiefen (z. B. Fertigungslinie, Maschine, Komponente) umgesetzt und kombiniert werden. Es ist möglich, dass weitere Modellparadigmen im HDZ zum Einsatz kommen können. Sie müssen jedoch dem Prinzipalmodell untergeordnet werden. Mit dieser Vorgehensweise soll die Implementierungshürde der mangelnden Modellier- und Simulationskenntnisse nach Kuehner et al. (2021) adressiert werden.

Die Modellierung des Simulationsmodells erfolgt halbautomatisch, da eine vollautomatische Modellgenerierung signifikante zusätzliche Herausforderungen (Bergmann und Strassburger 2010) für die Implementierung bedeutet würde. Dabei werden grundsätzliche Strukturen (z. B. Maschinen, Förderbänder) manuell modelliert, während Fertigungsparameter automatisch bestimmt und entsprechend angepasst werden. Die Initialisierung des Simulationsmodells erfolgt automatisch mit den echtzeitnahen Daten, die aus dem Digitalen Schatten extrahiert werden. Diese Vorgehensweise riskiert zwar, dass das Simulationsmodell periodisch manuell angepasst werden muss, verringert jedoch den initialen Implementierungsaufwand enorm. Zudem ist zu erwarten, dass sich die manuell implementierten Strukturen nur mit sehr niedriger Frequenz verändern.

3 Prototypische Implementierung

Für die prototypische Implementierung des HDZ wird eine bestehende Produktionslinie verwendet, welche Rotoren für moderne Elektromotoren produziert. Das Produktionssystem befindet sich in Deutschland und operiert seit 2022 im Serienbetrieb.

Der HDZ wird dabei am ersten Segment der Fertigungslinie implementiert. Abbildung 1 zeigt die schematische Struktur dieses Produktionssegmentes. Es besteht aus vier Stationen (S1-S4), welche verschiedene Produktionsschritte vornehmen. Station 1 ist dabei ein manueller Prozess, während alle anderen Prozesse vollautomatisiert ablaufen. Weiterhin enthält das Segment vier Stauförderbänder (F1-F4), die den Materialtransport zwischen den Stationen durchführen. Das Material wird auf Werkstückträgern (WT) transportiert. Die Werkstückträger durchlaufen kontinuierlich die in Abbildung 1 dargestellte Schleife. Dabei wird in Station 1 Rohmaterial zugeführt und in Station 4 ein Zwischenprodukt entnommen.

Produktionsschritte, die auf dieses Segment folgen, werden zunächst nicht betrachtet.

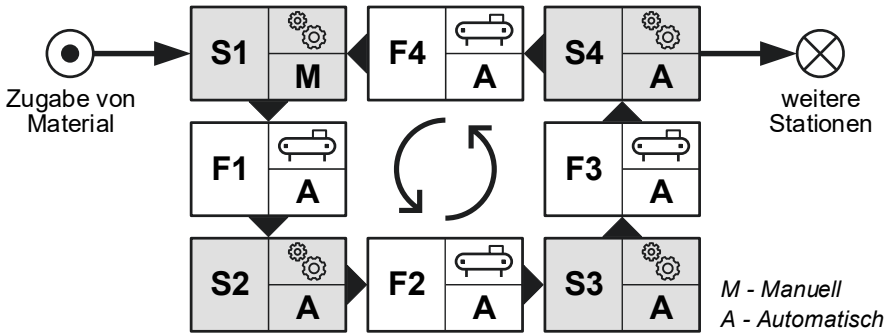


Abbildung 1: Schematische Struktur des Produktionssegments

3.1 Beschreibung der Implementierung

Die Datengrundlage des HDZ sind Kopien von Bewegungstelegrammen, die regulär zur Prozesssteuerung an das Produktionsleitsystem gesendet werden. An jeder Station (S1-S4) wird der Eintritt sowie der Austritt eines WT's registriert. Diese Informationen stehen mit einer Latenz von weniger als einer Sekunde und somit im Anwendungsfall echtzeitnah zur Verfügung. Alle anderen Materialbewegungen müssen algorithmisch abgeleitet werden.

Abbildung 2 zeigt die schematische Struktur des implementierten HDZ. Es ist zu erkennen, dass die Telegramme, die vom physischen System produziert werden, mithilfe von Apache Kafka (einem quelloffenen System für Streaming-Verarbeitung) repliziert werden. Auf diesem Datenstrom setzt ein in Python umgesetzter Microservice auf. Dieser liest Daten ein, extrahiert Informationen und stellt sie Daten aus der Vergangenheit gegenüber. Die Daten werden schließlich in einer Datenbank gespeichert, welche das quelloffene, relationale Datenbankverwaltungssystem MySQL verwendet. Dabei handelt es sich um den Status unbeweglicher Entitäten (z. B. Maschinen), die Position von beweglichen Entitäten (z. B. WT's) und abgeleitete Parameter (z. B. errechnete Zykluszeiten).

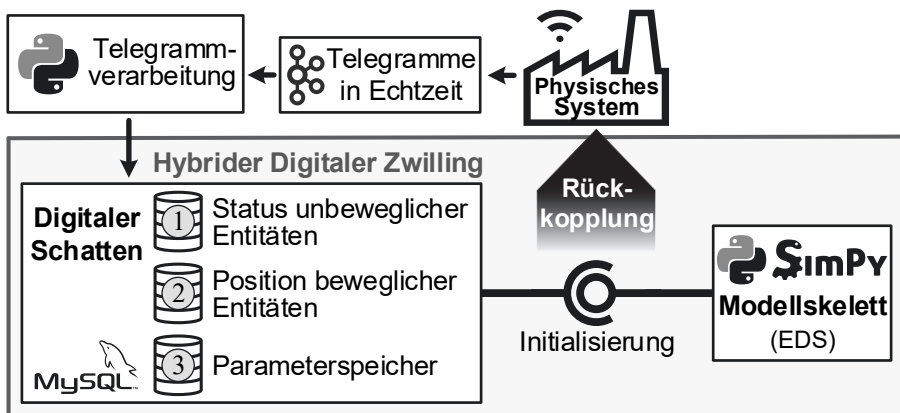


Abbildung 2: Schematische Struktur des implementierten HDZ

Die Simulationskomponente wurde ebenso in Python implementiert. Im Speziellen wurde dabei das quelloffene Paket SimPy (Grayson et al. 2023) zur Modellierung einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation verwendet. Im Moment handelt es sich bei der Simulation um eine deterministische Simulation. Es existieren keine Zufallselemente. Das Modellskelett wird im operativen Betrieb mit den Daten aus dem Digitalen Schatten (Systemparameter und Ist-Zustand des Systems) initialisiert. Ausgehend vom Moment der Initialisierung ist es dann in der Lage, die Zukunft zu simulieren. Das Simulationsergebnis kann dann als Grundlage für eine Rückkopplung zum physischen System genutzt werden.

Alle spezifischen Elemente des HDZ sind in Python implementiert und verwenden ausschließlich quelloffene Software, um möglichst niedrigschwellig auch auf andere Implementierungen übertragen werden zu können. Im Prototyp werden alle Operationen in einer Cloudumgebung ausgeführt.

3.2 Validierung und Kalibrierung

Die Validierung und Kalibrierung des HDZ hat das gleiche Ziel wie bei Offline-Simulationen: es soll bestätigt werden, dass sich keine systematischen Fehler in der Simulation befinden und dass Simulation und Wirklichkeit möglichst wenig voneinander divergieren. Der Unterschied liegt jedoch im betrachteten Zeithorizont. Im Offline-Einsatz von Materialflusssimulation werden taktische oder sogar strategische Zeithorizonte verwendet. Es wird über längere Zeiträume und Experimente versucht, dass sich bestimmte Parameter (z. B. Systemausbringung) in der Simulation mit denen aus der Wirklichkeit decken. Dabei werden auftretende Sonderereignisse (Störungen, manuelle Eingriffe, Qualitätsausfälle etc.) durch pseudozufällige Störungen oder andere Dynamiken in der Simulation approximiert. Im Mittel können so Simulationen mit langfristigem Zeithorizont ähnliche Metriken erzeugen wie ihre abgebildeten Systeme.

Im HDZ, einer Online-Simulation, handelt es sich jedoch um operative Zeithorizonte (Minuten bis maximal Stunden). Es muss an dieser Stelle eine Abwägung getroffen werden. Es stellt sich die Frage, ob auch bei kurzfristigen Zeithorizonten zufällige Sonderereignisse in der Realität durch systematische Anpassung der Simulation Beachtung finden sollten.

Zur Validierung und Kalibrierung wurden die besten 100 Produktionsfenster aus den vergangenen zwei Monaten gewählt. Ein Produktionsfenster hat dabei eine Länge von 100 Zyklen. Ein Zyklus entspricht dabei der erwarteten Zykluszeit der Flaschenhalsstation im System. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der unkalibrierten Simulation. Im oberen Teil der Abbildung (A) ist für jedes Produktionsfenster die relative Abweichung vom maximal gemessenen Produktionsvolumen abgebildet. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass die Simulation für jedes Produktionsfenster ein größeres Produktionsvolumen prognostiziert.

Im unteren Teil der Abbildung (B) wurde für jedes Produktionsfenster nach jedem Zyklus die Position jedes WTs überprüft. Befand sich ein WT in der Simulation auf der gleichen Position (S1-S4 bzw. F1-F4) wie in der Realität, so galt dieses WT als übereinstimmend. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Übereinstimmung in den 100 Zyklen des Produktionsfensters, gemittelt über alle 100 Produktionsfenster.

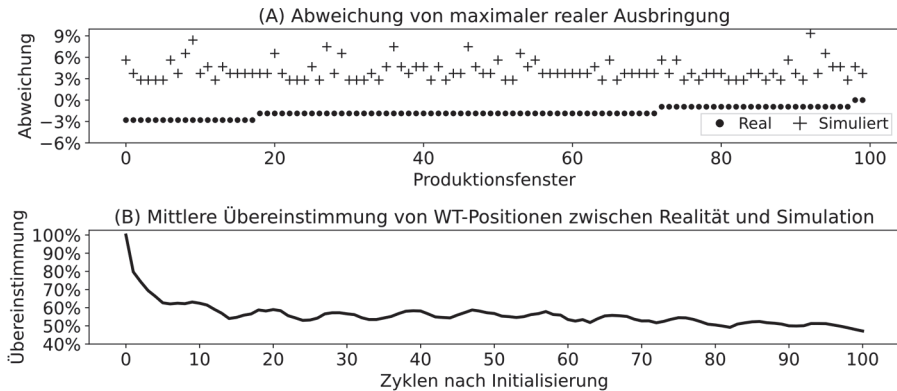


Abbildung 3: Vergleich von Simulation und Realität (unkalibriert)

Es muss nun festgestellt werden, ob diese Simulationsergebnisse ausreichen, um die Simulationskomponente als valide zu klassifizieren. Die Abweichung zwischen Realität und Simulation beträgt je nach Experiment zwischen ca. 4 und 11% (im Mittel über 100 Produktionsfenster ca. 6%). Der einzige Faktor, der die Ausbringung der Simulation in einem Produktionsfenster senken kann, ist ein unvorteilhafter Initialisierungszustand. In der Realität hingegen kann es dafür einige Erklärungen geben: unregelmäßige manuelle Prozesse, Maschinenstörungen, Versorgungsengpässe, Nacharbeit oder Störung vom Materialabfluss durch Flaschenhalse, die sich stromabwärts befinden. Folglich ist zu erwarten, dass die Ausbringung der Simulation mit der des besten Produktionsfensters übereinstimmt oder diese leicht übersteigt. In Abbildung 3 (A) ist dies bei den besten Produktionsfenstern (Nr. 99 und 100) zu erkennen. Damit soll die Simulation zunächst als valide gelten. Die unkalibrierte Simulation repliziert an dieser Stelle das Systemverhalten im Optimum.

Es ist zu erwarten, dass die Übereinstimmung zwischen simuliertem und realem System mit fortschreitender Zeit nach der letzten Initialisierung abnimmt. Im Teil B von Abbildung 3 ist dies zu erkennen. Es ist jedoch auffällig, dass bereits nach ca. 6 Zyklen kein größerer Genauigkeitsgewinn durch eine Initialisierung festzustellen ist.

Die Simulation soll nun kalibriert werden, um ihre Genauigkeit zu erhöhen. Dafür sollen Simulationsparameter (Zyklus- und Transferzeiten) mit Faktoren versehen werden. Ziel ist es dabei, die Übereinstimmung von Simulation und Realität für einen bestimmten Zeitraum zu erhöhen und die Ausbringungsdifferenz zu vermindern.

Für die Kalibrierung wird ein genetischer Algorithmus als metaheuristisches Optimierungsverfahren verwendet. Der Algorithmus wurde mithilfe des quelloffenen Pakets PyGAD (Gad 2021) in der Programmiersprache Python umgesetzt. Dabei soll ein Maß der Abweichung X (berechnet in Gleichung (1)) minimiert werden. Dabei wird für jedes Produktionsfenster (p), jeden Zyklus im Produktionsfenster (z) im Kalibrierungshorizont (z_{kal}) und aus der gesamten Anzahl von WTs (n_{WT}) für jedes WT (wt) geprüft, ob dessen Position (Pos) in Simulation und Realität übereinstimmen. In die Berechnung fließt dabei auch ein Faktor (F) ein (berechnet in Gleichung (2)), der auf Basis der mittleren relativen Ausbringungsabweichung ($\overline{\Delta A_{rel}}$) das Maß der

Abweichung X skaliert. Der Faktor beschreibt, inwieweit sich die simulierte mittlere relative Ausbringung der kalibrierten gegenüber der unkalibrierten Simulation (ca. 6%) verändert hat. Die mittlere relative Ausbringungsabweichung (Gleichung (3)) errechnet sich aus der absoluten Ausbringung (A) jeden Produktionsfensters.

$$X = F \cdot \sum_{p=1}^{100} \sum_{z=1}^{z_{kal}} \frac{1}{n_{WT,p,z}} \cdot \sum_{wt=1}^{n_{WT,p,z}} \begin{cases} 0, POS_{sim,p,z,wt} = POS_{real,p,z,wt} \\ 1, POS_{sim,p,z,wt} \neq POS_{real,p,z,wt} \end{cases} \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} 1 - 0.5 \cdot (0.06 - \overline{\Delta A_{rel}}), \overline{\Delta A_{rel}} < 0.06 \\ 1 + \overline{\Delta A_{rel}} - 0.06, \overline{\Delta A_{rel}} \geq 0.06 \end{cases} \quad (2)$$

$$\overline{\Delta A_{rel}} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{p=1}^{100} \frac{|A_{sim,p} - A_{real,p}|}{A_{real,p}} \quad (3)$$

Der Kalibrierungshorizont (z_{kal}) ist ein gewählter Parameter, um den Fokus der Kalibrierung zu verschieben. So kann eine Kalibrierung zum Ziel haben, dass die Simulation für einen längerfristigen Zeitraum (z. B. $z_{kal}=100$) möglichst präzise ist. Es ist aber auch möglich, die Simulation so zu kalibrieren, dass sie für wenige Zyklen nach der Initialisierung (z. B. $z_{kal}=10$) präziser ist, auch wenn sie langfristig an Qualität verliert. Abbildung 4 (B) zeigt dieses Ergebnis. In Teil A der Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Ausbringungsabweichung gegenüber der unkalibrierten Simulation (vgl. Abbildung 3, A) verringern kann. Jedoch ist auch zu sehen, dass die Simulation für bestimmte Produktionsfenster weniger Ausbringung vorhersagt, als in der Realität gemessen wurden. Da die Kalibrierung an den besten 100 Produktionsfenstern durchgeführt wurde, handelt es sich dennoch um eine optimistische Kalibrierung.

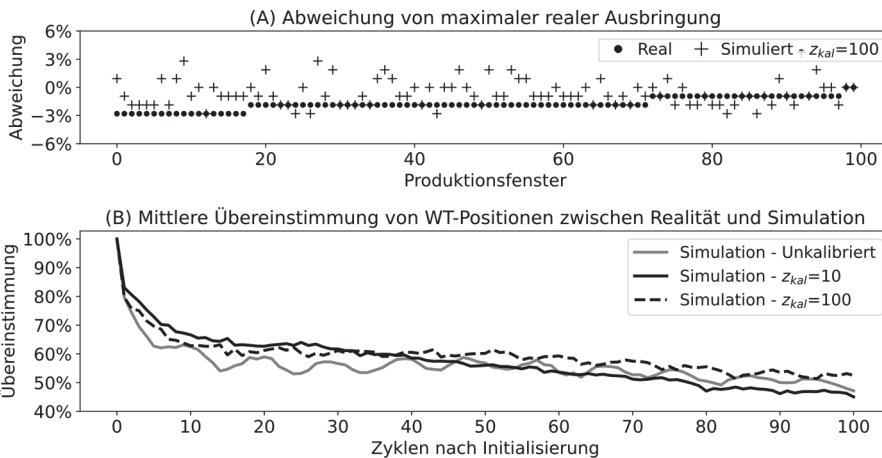


Abbildung 4: Vergleich von Simulation und Realität (kalibriert)

Eine Kalibrierung kann im laufenden Betrieb des HDZ periodisch (z.B. wöchentlich) nach den gewünschten Parametern vollautomatisch durchgeführt werden.

3.3 Initialisierungsfrequenz

An dieser Stelle ist deutlich, dass die Simulation im Rahmen des HDZ nach der Initialisierung an Genauigkeit verliert. Es entsteht dabei ein Dilemma. Abbildung 5 zeigt den Vergleich von Initialisierungsfrequenzen (t) mit 10 bzw. 100 Zyklen.

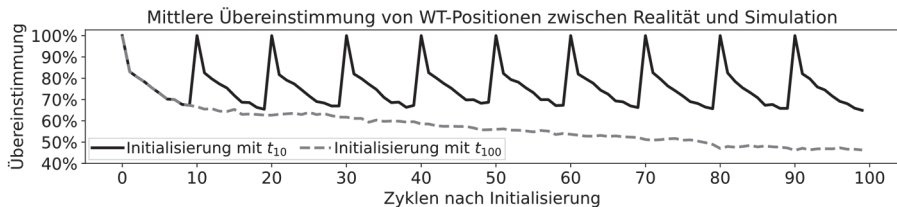


Abbildung 5: Vergleich von Initialisierungsfrequenz t_{10} und t_{100} (kalibriert $z_{kal}=10$)

Wird eine Simulation zu häufig initialisiert, so kann sie nur kurzfristige Prognosen liefern und ihr Nutzen ist reduziert. Wird eine Simulation allerdings nicht häufig genug initialisiert, so verringert sich ihre Genauigkeit und ihr Nutzen ist ebenso reduziert. Da die Simulation auf $z_{kal}=10$ kalibriert wurde und Abbildung 4 zeigt, dass nach ca. 10 Zyklen die Abweichung der Simulation von der Realität nur noch langsam sinkt, wird in diesem Prototyp eine Initialisierungsfrequenz von 10 Zyklen eingesetzt.

4 Nutzbringender Einsatz

Der Nutzen des HDZ lässt sich in drei zeitliche Aspekte gliedern: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Grundsätzlich soll über einen Nutzer mittelbar eine Rückkopplung von Modell zum physischen System erfolgen.

Der HDZ verwendet den Digitalen Schatten des physischen Systems. Somit sind vergangene Zustände, Probleme und Parameter bekannt. Diese können einem Nutzer zur Verfügung gestellt werden. Alternativ kann mithilfe von Diagnosealgorithmen ein Rückschluss auf eventuelle Probleme gezogen werden.

Der HDZ wird mit dem gegenwärtigen Systemzustand initialisiert. Dieser Zustand kann dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden, um eventuelle Probleme direkt lösen zu können. So können bspw. Trends in qualitätsrelevanten Kriterien erkannt werden.

Die Simulationskomponente des HDZ ermöglicht eine Prognose der Zukunft. Ein Nutzer kann auf Basis dieser Prognose Maßnahmen ergreifen, um ein gewünschtes Systemverhalten zu erzeugen. Möglich wären bspw. die Erkennung von Stauszenarien, die Bewertung von Störungen oder das operative Testen von Fertigungsstrategien. Ebenso denkbar ist eine algorithmische Präskription, bei welcher ein Algorithmus auf Basis der Systemprognose kurzfristige Maßnahmen vorschlägt, um bspw. die Systemausbringung zu maximieren. Eine Zukunftsvision ist dabei eine vollautomatische Präskription, die unmittelbar in ein Produktionssystem eingreifen kann. Auf diese Weise würde ein vollautonomes System entstehen.

5 Kritische Würdigung und Weiterentwicklung

Der HDZ stellt einen ersten Schritt in Richtung eines echten praxistauglichen DZ dar. Das Konzept des HDZ konnte hier vorgestellt und anhand eines realen, operativen Produktionssystems prototypisch implementiert werden. Dabei wurde im Speziellen eine mögliche Kalibrierungsstrategie aufgezeigt. Auf diese Weise wurde demonstriert, dass der HDZ bestehende Implementierungshürden überwinden und prinzipiell als taugliche Strategie in der industriellen Praxis eingesetzt werden kann.

Es ist jedoch evident, dass die Entwicklung des Prototyps noch nicht abgeschlossen ist und somit nicht alle Elemente des HDZ überprüft werden konnten. So konnte der praktische Nutzen zunächst nur als Potenzial ausgewiesen werden. Es bedarf weiterer Studien, die sich mit dem praktischen Nutzen des HDZ sowie der Interaktion zwischen Menschen und dem DZ auseinandersetzen.

Gleichzeitig muss der HDZ auf das gesamte Produktionssystem erweitert werden, um alle Gegebenheiten und Wechselwirkungen in der Simulation abbilden zu können. Außerdem muss untersucht werden, wie sich die Genauigkeit der Simulationskomponente weiter erhöhen lässt, damit die Initialisierungsfrequenz reduziert werden kann.

Die Frage nach geeigneten Kalibrierungsstrategien für Online-Simulationen, die in dieser Abhandlung zwar angerissen, aber nicht lückenlos beantwortet werden konnten, müssen in Zukunft weiter behandelt werden. Besonders wichtig ist dabei die Entwicklung einer fundierten Messmethode, um zu überprüfen, wie schnell Simulation und das Verhalten des physischen Systems innerhalb eines operativen Zeithorizonts divergieren.

Literatur

- Bergmann, S.; Strassburger, S.: Challenges for the automatic generation of simulation models for production systems. In: Bruzzone, A.; Vakilzadian, H. (Hrsg.): Proceedings of the 2010 Summer Computer Simulation Conference, Ottawa (Kanada), 11.-14. Juli 2010, S. 545-549.
- Grayson, P.; Scherfke, S.; Luensdorf, O.: SimPy GitLab repository, 2023, <https://gitlab.com/team-simpy/simpy>, letzter Zugriff: 12.05.2023
- Guo, D.; Zhong, R. Y.; Lin, P.; Lyu, Z.; Rong, Y.; Hong, G. Q.: Digital twin-enabled Graduation Intelligent Manufacturing System for fixed-position assembly islands. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 63 (2020) 101917
- Gad, A. F.: PyGAD: An Intuitive Genetic Algorithm Python Library, arXiv 2106.06158 (2021), Ohne Review
- Kuehner, J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. In: Mourtzis, D. (Hrsg.): Procedia CIRP 104 – Proceedings of the 54th Conference on Manufacturing Systems, Patras (Griechenland), 22. - 24. September 2021, S. 1227-1232.
- Matulis, M.; Harvey, C.: A robot arm digital twin utilizing reinforcement learning. Computers & Graphics 95 (2021), S. 106-114.

- Mustafee, N.; Powell, J.: From Hybrid Simulation To Hybrid Systems Modelling. In: Rabe, M.; Juan, A.; Mustafee, N.; Skoogh, A.; Jain, S.; Johansson, B. (Hrsg.): Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Gothenburg (Schweden), 9. - 12. Dezember 2018, S. 1430-1439.
- Roy, R.; Mishara, D.; Pal, S.; Chakavarty, T.; Panda, S.; Chandra, M.; Pal, A.; Misra, P.; Chakravarty, D.; Misra, S.: Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107 (2020), S. 3691-3714.
- Scheer, R.; Strassburger, S.; Knapp, M.: Digital-physische Verbundkonzepte: Gegenüberstellung, Nutzeffekte und kritische Hürden. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): Tagungsband 19. ASIM Fachtagung - Simulation in Produktion und Logistik 2021, Erlangen (Deutschland), 15. - 17. September 2021, S. 11-20.
- Scheer, R.; Strassburger, S.; Knapp, M.: Hybridization of the Digital Twin – Overcoming Implementation Challenges. In: Bui T. (Hrsg.): Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Science, Lahaina (USA), 03. - 06. Januar 2023, S. 1438-1447.
- Zhuang, C.; Liu, J.; Xiong, H.: Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96 (2018) 1, S. 1149-1163.