

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

# **Simulationsbasierte Untersuchung von Abstraktionsgraden im Kontext Digitaler Zwillinge für innerbetriebliche Transportsysteme**

## ***Simulation-based Analysis of Abstraction Degrees in the Context of Digital Twins for Intralogistics Transport Systems***

Florian Schmid, Stefan Galka, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg (Germany), [florian.schmid@oth-regensburg.de](mailto:florian.schmid@oth-regensburg.de), [stefan.galka@oth-regensburg.de](mailto:stefan.galka@oth-regensburg.de)

Minja Marinković, Sebastian Meißner, Hochschule Landshut, Landshut (Germany), [minja.marinkovic@haw-landshut.de](mailto:minja.marinkovic@haw-landshut.de), [sebastian.meissner@haw-landshut.de](mailto:sebastian.meissner@haw-landshut.de)

**Abstract:** Current challenges in the planning and control of internal logistics systems are based on permanent changes in the requirements on the system, e.g., due to fluctuating order numbers or changes in their structure. For the representation and planning of in-house logistics processes, digital twins offer the possibility to verify different operational decisions such as predictive workforce scheduling. In this context, the quality of the results and their in-time presentation plays a decisive role. However, both target criteria are influenced by the detail-level of the digital representation. Based on a case study, this paper investigates the influence of the level of detail on the simulation runtime and result divergence to provide an evaluation for detail levels in the modelling of intralogistic transport systems.

## **1 Simulationsmodelle im Kontext Digitaler Zwillinge in der Intralogistik**

In vielen Bereichen wird der Einsatz von Digitalen Zwillingen diskutiert. Die Einsatzszenarien für einen Digitalen Zwilling reichen von einer Speicherung und Analyse der Daten, einer Visualisierung des Systems, bis hin zu entscheidungsunterstützenden Systemen. Die Subsummierung der Vielzahl an unterschiedlichen Aufgabenstellungen unter dem Begriff Digitaler Zwilling führt zu zahlreichen Definitionen in der Literatur (Eramo et al. 2021; Jones et al. 2020; Tomczyk und Valk 2022). Entsprechend der ISO-Norm 23247-1(2021) ist ein Digitaler Zwilling definiert als zweckmäßige digitale Darstellung eines beobachtbaren Elements mit Synchronisation zwischen dem Element und seiner

digitalen Darstellung. Die Zweckmäßigkeit der Abbildung wird hierbei vom eigentlichen Anwendungsfall und der Zielsetzung des Digitalen Zwillings beeinflusst.

Im Bereich der Intralogistik stellen innerbetriebliche Transportsysteme einen interessanten Anwendungsfall für Digitale Zwillinge dar. Aufgrund unterschiedlicher alternativer Transportmittel und -wege sowie einer Vielzahl an Wechselwirkungen mit vor- und nachgelagerten Prozessen, wie z. B. Lager-, Kommissionier- und Produktionsprozessen, sind diese Systeme von einer hohen Komplexität geprägt. Das ganzheitliche Systemverhalten mit den Wechselwirkungen zwischen den relevanten Elementen lässt sich durch den Einsatz von Simulationsmodellen abbilden (vgl. Kühn 2006). Simulationsmodelle bieten die Möglichkeit die Planung und Steuerung von innerbetrieblichen Transportsystemen zu unterstützen. Beispielhafte Anwendungsfelder von Simulationen sind hierbei die Leistungsermittlung von Lager- und Fördermitteln oder die Dimensionierung des Transportsystems (Mestiri und Fottner, 2022, Ten Hompel et al. 2018, Eley 2012). Im Anwendungsgebiet der Steuerung intralogistischer Systeme hingegen ermöglichen Simulationen eine Entscheidungsunterstützung zur Disposition von Aufträgen, Ressourcen und des Personals (Wenzel 2018).

Für die Unterstützung bei der Steuerung des Systems müssen nicht selten Daten aus IT-Systemen oder Echtzeitsensordaten zusammengeführt und ausgewertet werden. Erfolgt diese Datensynchronisation zwischen dem realen System und dem digitalen Modell automatisiert, sind die beiden Kriterien eines Digitalen Zwillings, digitale Repräsentation des physischen Objekts und dessen Synchronisation, erfüllt, wobei das Simulationsmodell als Kontrollinstanz des realen Transportsystems fungiert (vgl. Kritzinger et al. 2018). Dementsprechend kann in diesem Kontext die Definition von Kuehner herangezogen werden: *“A Digital Twin is a virtual representation of its physical counterpart. Its components provide the basis for a simulation or are simulation models themselves. The Digital Twin has an automated bidirectional data connection with the represented physical counterpart. This connection may span across several life phases of the system.”* (Kuehner et al. 2021)

Soll der Digitale Zwilling operative Entscheidungen unterstützen, müssen wesentliche Entscheidungsgrößen fristgerecht aufgezeigt werden. Die Laufzeit des Modells korreliert jedoch in der Regel mit dem Detaillierungsgrad in der Systemmodellierung. (Vasudevan et al. 2014; Fowler und Rose 2004). Aufgrund der Komplexität von innerbetrieblichen Transportsystemen muss ein geeigneter Detaillierungsgrad für die digitale Abbildung des realen Systems gefunden werden, der die notwendige Ergebnisqualität sicherstellt. So führt ein hohes Detailniveau in der Regel zu genaueren Ergebnissen, während eine niedrige Detailgenauigkeit zu ungeeigneten Resultaten führen kann (Holtewert et al. 2014). Im Fokus dieses Beitrags liegt daher die Evaluation eines geeigneten Detaillierungsgrades für Simulationsmodelle von innerbetrieblichen Transportsystemen, die im Rahmen von Entscheidungsunterstützenden Systemen (Digitaler Zwilling) eingesetzt werden sollen. Hierfür wurden generische Modellbausteine in unterschiedlichen Detaillierungsstufen entwickelt. Mit diesen kann das innerbetriebliche Transportsystem in verschiedenen Genauigkeiten abgebildet und die Unterschiede in den Simulationsergebnissen und den Rechenzeiten untersucht werden.

## 2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Als eine der größten Herausforderungen im Bereich der Simulation wird von Fowler und Rose die Komplexität der Modelle und in diesem Zusammenhang die Dauer der Modellbildung und Simulation genannt (Fowler und Rose 2004). Die Problematik wird von Brooks weiter vertieft. Nach Brooks ist die Beziehung zwischen Modelperformance und Detailgenauigkeit wenig bekannt und die Wechselwirkung der beiden Faktoren bedarf weiterer Untersuchungen - so würde ein niedrigerer Detailgrad ebenso zielführend sein, da ab einem gewissen Punkt der Mehrwert zusätzlicher Details auf die Genauigkeit der Resultate abnimmt (Brooks 2010).

Holtewert beschreibt diesen Aspekt mit Blick auf den Nutzen und Aufwand bei der Erstellung von unterschiedlich detaillierten Simulationsmodellen. Mit steigenden Detaillierungsgrad würde der Aufwand und dementsprechend die Kosten des Simulationsprojekts überproportional zunehmen, während für den Nutzer nicht unbedingt ein Mehrwert generiert wird (Holtewert et al. 2014). Dass eine möglichst detaillierte Abbildung des Systems nicht sinnvoll ist, wird ebenfalls in der VDI 3633-1 beschrieben. Stattdessen sollte bei der Modellierung die Möglichkeit bestehen einzelne Bereiche des Systems mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abzubilden (VDI 3633-1 2014).

Dieser Ansatz wird beispielsweise von Nachtigall et al. angewandt. In seinem Beitrag werden Simulationsmodelle eines Eisenbahnstreckenabschnitts mit steigender detailtreue in der Topografie und den zulässigen Geschwindigkeitsprofilen analysiert. Im Vergleich zum realen System zeigt sich, dass eine höhere Detailgenauigkeit in den topographischen Daten kaum Einfluss auf die Genauigkeit der simulierten Fahrzeit im Vergleich zur Realität hat. Die höhere Detaillierung des Geschwindigkeitsprofils hingegen führt zu genaueren Simulationsergebnissen, weswegen in diesem Fall die Topografie weitestgehend vernachlässigt werden kann (Nachtigall et al. 2021).

Der Ansatz von Nachtigall et. al beruht hierbei auf der modularen Modellbildung, die mehrere Vorteile bieten kann. Nach Jones besteht zum Beispiel die Möglichkeit, Modelle miteinander vergleichen zu können, indem Teilmodelle einer identischen Systemkomponente ausgetauscht werden. Durch die Modularisierung erhöht sich zudem die Flexibilität bei der Modellpflege, da lediglich einzelne Komponenten überarbeitet werden müssen (Jones et al. 2001).

Im Kontext der Intralogistik stellt sich hierbei jedoch eine Problematik ein, da aufgrund unterschiedlichster Varianten des Transportsystems und der verknüpften Teilprozesse, Simulationsstudien in der Regel projektspezifisch sind. Einen generischen Ansatz hierfür stellt Staab et al. vor. Hierin werden relevante Elemente eines Routenzug Transportsystems wie Kreuzungen, Haltestellen sowie Be- und Entladestellen als eigenständige Simulationsbausteine modelliert. Durch die Verknüpfung der Bausteine über definierte Schnittstellen können schließlich verschiedene Systemausprägungen modelliert werden (Staab et al. 2013).

Generell lässt sich aus der Literatur ableiten, dass die Bestimmung eines zweckmäßigen Abstraktionsgrades eine zentrale Herausforderung darstellt (vgl. Fowler und Rose 2004.; Brooks 2010; Vasudevan und Devikar 2011). Die modulare Modellbildung nach Staab et al. bietet in diesem Kontext einen Lösungsansatz an, da durch den Vergleich von Modellen mit unterschiedlich detaillierten Bausteinen, ein geeigneter Detaillierungsgrad für das System bestimmt werden kann.

### 3 Modellbeschreibung

Im Forschungsprojekt „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) werden Konzepte für den Einsatz von Digitalen Zwillingen erforscht. Die Digitalen Zwillinge weisen dabei die von Marinković beschriebene Systemarchitektur auf und sollen operative Entscheidungen wie beispielsweise die vorausschauende Personaleinsatzplanung unterstützen (Marinković et al., 2023).

In den Anwendungsfällen des Forschungsprojekts werden unterschiedliche Transportsysteme betrachtet. Daher wird bei der Modellierung der von Staab et al. beschriebene Ansatz genutzt und relevante Systemelemente als generische Simulationsbausteine abgebildet. Zur Definition dieser Bausteine werden die Elemente des Transportsystems nach Tabelle 1 gegliedert. Hierfür werden sie einer der Gruppen Wegenetz, Funktionsbaustein oder Ressource zugeordnet. In der Modellierung der Bausteine werden schließlich die relevanten Funktionen und Logiken abgebildet. Dies kann in unterschiedlichen Detaillierungsgraden erfolgen.

*Tabelle 1: Kategorisierung der Simulationsbausteine*

<b>Wegenetz</b>	<b>Funktionsbausteine</b>	<b>Ressourcen</b>
Kreuzungen	Lagerzonen	Gabelstapler
Wege	Bereitstellungsflächen	Fahrerlose Transportfahrzeuge
Warteanlagen	Versandspuren	Routenzüge
Haltestellen	Pufferzonen	Personal

Im Kontext dieses Beitrags wird der Detaillierungsgrad von Simulationsbausteinen für Lagerzonen untersucht. Die Simulationsbausteine lassen sich hierbei in Block- und Regallager differenzieren. Als Bewertungsgrundlage wird die Spielzeit für die Durchführung von Transportaufträgen herangezogen.

Die Spielzeit bildet sich hierbei aus der Summe der Zeitanteile für die Fahrt auf dem Wegenetz, der Verfahrzeit innerhalb einer Lagerzone und dem Zeitbedarf für die Aufnahme bzw. Abgabe eines Transportguts. Die Simulationsbausteine dienen in diesem Zusammenhang der Abbildung der Verfahrzeit. Sie entspricht dem Zeitbedarf für die horizontale Fahrt und der Hubbewegung eines Transportmittels vom Gassen- bzw. Spuranfang bis zum Stellplatz des Transportguts und zurück.

Im Rahmen des Beitrags werden vier Detaillierungsstufen der Simulationsbausteine untersucht. In der ersten Detaillierungsstufe (S1) erfolgt eine stellplatzgenaue Abbildung. Der Gabelstapler fährt den im Auftrag vorgegebenen Lagerplatz an. Dabei werden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in der Horizontalen und Vertikalen berücksichtigt.

Bei der zweiten Detaillierungsstufe (S2) werden im Rahmen der Initialisierung des Simulationsmodells die Fahrzeiten für alle Stellplätze einer Gasse berechnet und in einer Tabelle gespeichert. Bei der Berechnung der Fahrzeit wird zwischen einer Standardfahrrampe, bei der das Fahrzeug seine maximale Geschwindigkeit erreicht, und einer Dreiecksfahrt, bei der die volle Geschwindigkeit nicht erreicht wird, unterschieden. Während der Simulation wird die Fahrt zur Lagergasse analog zu der Detaillierungsstufe S1 abgebildet. Für die Fahrzeit innerhalb der Gasse wird zufällig eine der vorab berechneten Verfahrzeiten ausgewählt.

In der dritten Detaillierungsstufe (S3) werden die Fahrzeiten entsprechend des dargestellten Ansatzes der zweiten Detaillierungsstufe bestimmt. Der Unterschied zur zweiten Stufe besteht darin, dass vier Gassen bzw. zehn Spuren zu einer Zone zusammengefasst und durch einen einzelnen Simulationsbaustein repräsentiert werden. Dies beeinflusst auch das übergeordnete Wegenetz im Simulationsmodell, da der Fahrweg bis zu jeder einzelnen Gasse/Spur abgebildet werden muss.

Eine rein analytische Betrachtung der Spielzeiten steht im Mittelpunkt der vierten Detaillierungsstufe (S4). Im Rahmen der Modellinitialisierung werden analog zu Stufe 2 die Fahrzeiten innerhalb der Gasse berechnet. Für das Wegenetz, welches die einzelnen Gassen miteinander verbindet, wird zuerst eine Entfernungsmatrix erzeugt, die die Distanzen zwischen allen Lagergassen/Spuren und Funktionsflächen enthält. Diese wird in einem zweiten Schritt in eine Transportzeitmatrix überführt. Im Rahmen der eigentlichen Simulation werden für alle Transportaufträge die Spielzeiten berechnet. Weiterhin wird auch die notwendige Zeit für die Leerfahrt betrachtet, die sich durch die Fahrt vom letzten Abgabepunkt zum nächsten Aufnahmeort eines Transportgutes ergibt. Die Zeit für die Leerfahrt wird ebenfalls mithilfe der Transportzeitmatrix berechnet. Zur Übersicht sind in Tabelle 2 die Eigenschaften der Simulationsbausteine nochmals zusammengefasst.

Tabelle 2: Eigenschaften der Detaillierungsstufen

	Stufe 1 (S1)	Stufe 2 (S2)	Stufe 3 (S3)	Stufe 4 (S4)
Abbildungsniveau	Stellplatzgenau	Gassengenau	Zonengenau	Analytische Berechnung
Belegungssituation	Wird berücksichtigt	Nicht abgebildet	Nicht abgebildet	Nicht abgebildet
Lagerstrategie	Chaotisch	Chaotisch	Chaotisch	Chaotisch
Zugriffsverteilung	gleichverteilt	gleichverteilt	gleichverteilt	gleichverteilt
Verfahrwege in der Gasse / Spur	Abbildung der Verfahrwege	Berechnung	Berechnung	Berechnung

Um den Einfluss der Lagergröße auf Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Detaillierungsstufe zu untersuchen, wurden für jeden Lagertyp drei unterschiedlich große Lagersysteme definiert. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Lagerkennwerte zusammengefasst.

Tabelle 3: Systemgrößen der Lagertypen

	<b>Blocklager (B)</b>	<b>Regallager (R)</b>
(K) System 1 (klein)	40 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	8 Gassen ca. 10.000 Stellplätze
(M) System 2 (mittel)	100 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	18 Gassen ca. 23.000 Stellplätze
(G) System 2 (groß)	200 Spuren max. 4 Paletten pro Stapel	38 Gassen ca. 49.000 Stellplätze

Für die Untersuchung wurden die Simulationsbausteine der jeweiligen Lagerbereiche in den vier Detaillierungsstufen mit Hilfe der Software Technomatix Plant Simulation erstellt. Neben den Lagerbausteinen umfasst jedes Modell ein Wegenetz. Über repräsentative Wegpunkte werden die Lagerbausteine und die Auf- bzw. Abgabestationen (Funktionsflächen) mit dem Wegenetz verbunden. In Abbildung 1 ist exemplarisch das Modell des Blocklagers (Systemgröße K) in den Detaillierungsstufen eins bis drei dargestellt.

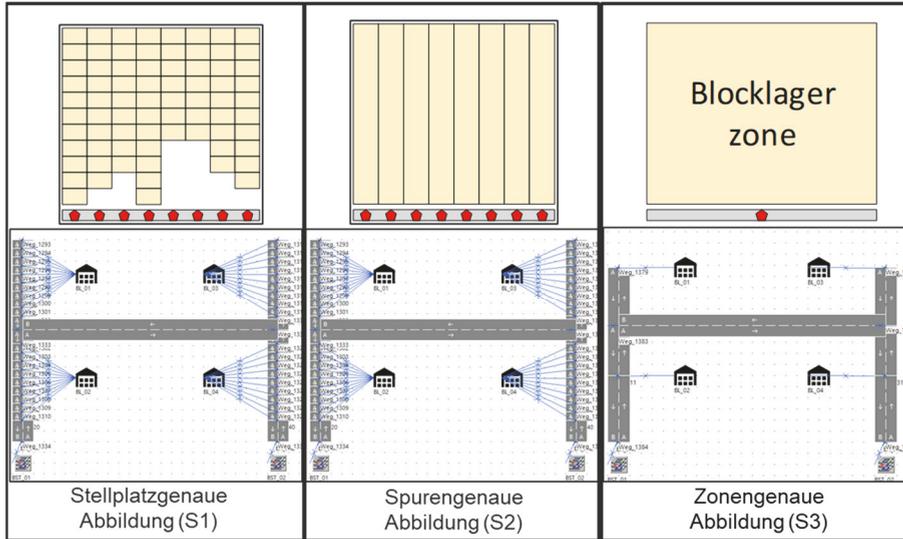


Abbildung 1: Modell des Blocklagers (Systemgröße K) in den Detaillierungsstufen S1, S2 und S3

Neben den Strukturdaten werden für die Simulation auch Lastdaten benötigt. Im Kontext des Beitrags werden darunter Transportaufträge verstanden. Hierfür müssen Transportaufträge definierte Informationen beinhalten. Grundlegend sind eine eindeutige Identifikationsbezeichnung sowie eine Quelle-Senke-Beziehung. Auf Fälligkeits- bzw. Freigabeterminen wurde im Rahmen der Untersuchung verzichtet, da lediglich die Spielzeit der Aufträge betrachtet wird. Je nach Detaillierungsgrad ist jedoch eine Spezifizierung der Auftragsdaten nötig. So muss für die erste und vierte Detaillierungsstufe eine eindeutige Lagerplatzzuordnung vorliegen. In der zweiten Stufe kann eine Datenreduktion der Stellplätze zu Spuren bzw. Gassen erfolgen. Für die dritte Detaillierungsstufe müssen hingegen Zonen gebildet werden. Abhängig vom Detaillierungsgrad der bestimmt wird, würde dies somit ebenfalls einen Mehraufwand in der Datenvorbereitung der Lastdaten für die Digitalen Zwillinge bedeuten.

## 4 Experimente und Resultate

In den Simulationsexperimenten wurde der Einfluss der Systemgröße und Detaillierung auf die Ergebniskennwerte untersucht, wobei jeweils das Modell in der

detailliertesten Darstellung (Stufe 1) als Referenz genutzt wird. Für die Untersuchung wurden 24 Experimente mit jeweils 10 Replikationen durchgeführt. In den ersten zwölf Experimenten wird das Regallager (R) in den drei beschriebenen Systemgrößen (K, M, F) und in den vier unterschiedlichen Detaillierungsgraden (S1, S2, S3, S4) simuliert. In den weiteren 12 Experimenten wird das Blocklager (B) untersucht. Für jede Systemgröße wurden 10 Datensätze mit je 10.000 Transportaufträgen generiert. Die Datensätze wurden für sämtliche Detaillierungsstufen eingesetzt. Jeder Datensatz enthält Ein- und Auslagerungen, wobei von einer chaotischen Lagerplatzvergabe ausgegangen wird. Die nachfolgend dargestellten Ergebniswerte stellen den Mittelwert über alle Replikationen dar.

In einer ersten Betrachtung werden die resultierenden Auftragsspielzeiten in Relation mit der Systemgröße (K, M, G) betrachtet. Es zeigt sich, wie in Tabelle 4 dargestellt, dass die Auftragsspielzeiten aufgrund der größeren Wegdistanzen proportional mit der Größe des Systems steigen. Der proportionale Anstieg ist hierbei unabhängig vom Lagertyp in sämtlichen Detaillierungsgraden erkennbar.

Für den Detaillierungsgrad lässt sich ein ähnliches Verhalten beobachten. In der vierten Detaillierungsstufe entstehen stets die höchsten Abweichungen von der Referenzspielzeit. In der zweiten und dritten Detaillierungsstufe treten hingegen geringere Abweichungen auf. Die Unterschiede zwischen den Stufen S2 und S3 sind allerdings nur geringfügig und lassen sich auf die ungenauere Abbildung der Fahrt auf dem übergeordneten Wegenetz zurückführen. In der ersten und zweiten Detaillierungsstufe ist hingegen das übergeordnete Wegenetz identisch. Folglich resultieren hier die Abweichungen lediglich auf der Abbildungsgenauigkeit der Lagergassen bzw. Blocklagerspuren.

*Tabelle 4: Resultierende Spielzeiten in Sekunden (Mittelwert über alle Replikationen)*

Lagertyp	Systemgröße	S1 (sek.)	S2 (sek.)	S3 (sek.)	S4 (sek.)
R	K	98,32 (ref.)	93,20 <b>(-5,21%)</b>	93,11 (-5,30%)	92,17 (-6,25%)
	M	106,12 (ref.)	101,08 (-4,75%)	101,32 <b>(-4,52%)</b>	100,19 (-5,59%)
	G	113,68 (ref.)	113,50 <b>(-0,15%)</b>	112,86 (-0,72%)	112,15 (-1,35%)
B	K	42,62 (ref.)	42,79 (+0,42%)	42,75 <b>(+0,34%)</b>	43,51 (+2,14%)
	M	45,38 (ref.)	46,64 <b>(+2,79%)</b>	46,70 (+2,90)	47,37 (+4,39%)
	G	48,8 (ref.)	50,24 <b>(+2,95%)</b>	50,31 (+3,11%)	50,94 (+4,37%)

Für die Laufzeitbetrachtung wurde die Simulationslaufzeit bis zum Abschluss des letzten Transportauftrags herangezogen. Die Dauer der Modellinitialisierung wurde hierbei nicht miteinbezogen.

Wie in Tabelle 5 dargestellt, treten unabhängig von der Systemgröße mit absteigendem Detaillierungsgrad geringere Laufzeiten auf. Das jeweilige Minimum wird in der vierten Detaillierungsstufe erreicht. Es zeigt sich, dass zwar die Laufzeit

mit der Systemgröße korreliert, doch mit steigender Systemgröße tritt bei niedrigeren Detaillierungsgraden eine höhere Reduktion der Laufzeiten auf. Eine Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Berechnungszeit eintretender Ereignisse während des Simulationslaufs. In größeren Simulationsmodellen ist die Anzahl an Ereignissen, die berechnet werden müssen und somit die Rechenzeit höher. Wird das Modell in niedrigeren Detaillierungsgraden abgebildet, treten jedoch im Vergleich weniger Ereignisse auf, wodurch sich kürzere Berechnungszeiten ergeben.

*Tabelle 5: Resultierende Laufzeiten in Sekunden (Mittelwert über alle Replikationen)*

Lagertyp	Systemgröße	S1	S2	S3	S4
R	K	33,95 (ref.)	29,55 (-12,94%)	29,01 (-14,55%)	21,78 <b>(-35,84%)</b>
	M	36,01 (ref.)	31,27 (-13,37%)	29,12 (-19,33%)	22,36 <b>(-38,05%)</b>
	G	41,19 (ref.)	35,19 (-14,56%)	30,22 (-26,63%)	23,20 <b>(-43,67%)</b>
B	K	39,20 (ref.)	38,74 (-1,17%)	33,99 (-13,27%)	24,47 <b>(-37,56%)</b>
	M	44,65 (ref.)	40,39 (-9,58%)	34,12 (-23,59%)	24,7 <b>(-44,70%)</b>
	G	50,72 (ref.)	47,45 (-6,44%)	36,48,90 (-28,07%)	24,66 <b>(-51,37%)</b>

Es zeigt sich, dass abhängig vom Lagertyp, der Systemgröße und des Detaillierungsgrades unterschiedliche Lauf- und Spielzeiten erreicht werden. In der vierten Detaillierungsstufe werden zwar die geringsten Laufzeiten erzielt, allerdings resultieren hier auch die höchsten Abweichungen von der Referenzspielzeit. Die zweite und dritte Stufe weisen hingegen sowohl beim Block- als auch beim Regallager ähnliche Resultate auf. Hierbei werden zwar in der zweiten im Schnitt genauere Ergebnisse erzielt, doch die dritte Stufe führt zu geringeren Laufzeiten.

In Anbetracht der Resultate muss demnach ein Kompromiss getroffen werden, indem beide Aspekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die zweite Detaillierungsstufe als künftiges Abbildungsniveau für die Modellierung der weiteren Simulationsbausteine festgelegt. In diesem Detaillierungsniveau treten insgesamt die geringsten Abweichungen von der Referenzspielzeit (S1) auf und die Simulationslaufzeiten unterscheiden sich teils nur geringfügig von der dritten Detaillierungsstufe. Für die Datenvorbereitung würde dies bedeuten, dass genaue Stellplatzinformationen vernachlässigt werden können und eine Reduktion der Daten auf Spuren bzw. Gassen erfolgen kann.

## 5 Fazit

Bei der Entwicklung von simulationsbasierten Digitalen Zwillingen muss ein geeigneter Detaillierungsgrad für die Abbildung des realen Systems bestimmt werden. Dabei ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und Rechenzeit zu finden. Die in diesem Beitrag dargestellte Fallstudie untersucht verschiedene

Abstraktionsgrade von Lagersystemen und deren Einfluss auf die mittlere Spielzeit für Ein- und Auslagerungen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Unterschied in den Spielzeiten mehr als sechs Prozent betragen kann. Größere Unterschiede lassen sich bei den Rechenzeiten identifizieren, so konnte die benötigte Zeit für die Simulation in einzelnen Beispielen mehr als halbiert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts TwinTraSys bietet die Arbeit somit eine Basis zur Entwicklung der weiteren Simulationsbausteine. Hierbei wird eine Modellierung in der Detaillierungsstufe S2 angestrebt. Dennoch sollten weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden, da der Detaillierungsgrad auch in Wechselwirkung mit anderen Systemkomponenten befinden kann. So kann es in Lagersystemen mit einer großen Anzahl von Flurförderzeugen häufiger zu Behinderungen zwischen den Fahrzeugen kommen. Dieser Aspekt wurde im vorgestellten Fallspeispiel nicht betrachtet. Die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fahrzeugen lassen sich bei einem höheren Detaillierungsniveau besser berücksichtigen. Vor allem die Detaillierungsstufen S1 und S2 bieten sich hierfür an.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Digitale Zwillinge zur dynamischen Simulation für die Planung und Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme im Rahmen der digitalen Fabrik“ (TwInTraSys) durchgeführt. Das Projekt wird durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Verbundförderprogramms – Förderlinie Digitalisierung, Förderbereich Informations- und Kommunikationstechnik gefördert.

## Literatur

- Brooks, R.J.: Complexity, Level of Detail and Model Performance. In: Robinson, S.; Brooks, R.J.; Kotiadis, K.; Zee, D.J. (Hrsg.): *Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation*, Boca Raton (USA): CRC Press 2010.
- Eley M.: *Simulation in der Logistik, Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*, Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Eramo, R.; Bordeleau, F.; Combemale, B.; Brand, M.; Wimmer, M.; Wortmann, A.: *Conceptualizing Digital Twins*. In: *IEE-Software 99*, 2021, pp. 39-46.
- Fowler W.; Rose O.: *Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems*. In: *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International* 80, 2004, pp.469-476.
- Holtewert P.; Oesterle J.; Bruns A.; Wirts H.: *Detaillierungsgrad von Simulationsmodellen*. In: *Productivity Management* 19, 2014, pp.31-34.
- ISO 23247-1. (2021a, October 1).: *Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing: Part 1: Overview and general principles (ISO 23247-1:2021)*.
- Jones, D.; Snider, C.; Nassehi, A.; Yon, J.; Hicks, B.: *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29, 2020, pp. 36-52.
- Jones, J.W.; Keating, B.A.; Porter, C.H.: *Approaches to modular model development*. In: *Agricultural Systems*, Volume 70, Issues 2-3, 2001, pp. 421-443.

- Kritzinger W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihm, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: IFAC-PapersOnLine Volume 51, Issue 11, 2018, pp.1016-1022.
- Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2006.
- Kuehner, K. J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review, In: Mourtzis, D. (Hrsg): Procedia CIRP, Volume 104, 2021, pp. 1227-1232.
- Marinkovic, M.; Galka, S.; Meißner, S.: Digital Twins for Internal Transport Systems: Use Cases, Functions, and System Architecture. IN: Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS): January 3-6, 2023, Maui, Hawaii, USA, pp. 1195-1204.
- Mestiri S.; Fottner J.: Simulationsbasierte Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme: Einsatz von ereignisdiskreter Materialflusssimulation zur Dimensionierung heterogener Transportsysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2022; 117(4): pp. 229-233.
- Nachtigal, P.; Šourek, D.; Tischer E.: Level of Detail of the Simulation Model and its influence on the Result Accuracy. In: Gasparik, J., Zitricky, V., Bartuska, L. (Hrsg.): Transportation Research Procedia Volume 53, Zilina (Slovakia), 22-24. April 2021, pp. 91-97.
- Staab, T.; Galka, S.; Klenk, E.; Günther, W.A.: Effizienzsteigerung für Routenzüge – Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität, IN: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A.; (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik, Paderborn, 2013.
- Ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme-Förder- und Lagertechnik, Berlin, Heidelberg: Springer 2018.
- Tomczyk, M.; Valk, H.: Digital Twin Paradigm Shift: The Journey of the Digital Twin Definition. In: Filipe, J.; Smialek, M.; Brodsky, A.; Hammoudi, S. (Hrsg.): Proceedings of the 24th International Conference on Enterprise Information Systems, Volume 2 (ICEIS), Online, 25-27. April 2022, pp.90-97.
- Vasudevan K.; Devikar A.: Selecting Simulation abstraction levels in Simulation models of complex manufacturing systems. In: Jain S.; Creasey R.R.; Himmelspace, J.; White, K.P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix (USA), 11.-14. Dezember 2011, pp. 2273-2282.
- VDI 3633-1 (2014, Dezember): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Blatt 1: Grundlagen (VDI 3633-1:2014).
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg): Modellierung logistischer Systeme, Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.