

Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit zellularer Intralogistiksysteme mit Hilfe von Simulations- und VR-Techniken

Determining the performance availability of cellular facility logistics systems with means of simulation and VR techniques

Juergen Rossmann¹
Michael ten Hompel²
Kevin Eilers³

¹Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), RWTH Aachen

²Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund

³RIF Institut für Forschung und Transfer e. V., Dortmund

Kurzbeschreibung: Die Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit als Maß für den Erfüllungsgrad logistischer Prozesse erfolgt gewöhnlich während des Betriebes einer logistischen Anlage. Wir haben ein Simulationssystem entwickelt, um die Leistungsverfügbarkeit einer zellularen intralogistischen Anlage schon im Vorfeld ermitteln zu können. Die detailgenaue Simulation erfasst dabei nicht nur Einflüsse statischer Parameter wie Dimensionierung der Anlage sondern auch dynamische Parameter, wie Fahrzeugverhalten oder Auftragszusammensetzung. Aufgrund der Echtzeit- und VR-Fähigkeit des vorgestellten Systems, ist eine Präsentation in einer VR-Umgebung möglich. Intuitive Interaktionsmechanismen und Visualisierungs-Metaphern bieten einen intuitiven Zugang zur Leistungsverfügbarkeit des Systems und den Größen, die sie beeinflussen.

[Schlüsselwörter: Intralogistik, Simulation, VR, Leistungsverfügbarkeit]

Abstract: Performance availability as a degree of fulfillment of logistics processes is usually determined while a logistics facility is already in operation. We developed a simulation system to measure the performance availability of a cellular facility logistics system beforehand. The detailed simulation does not only consider the influence of static parameters such as the dimensioning of the facility but also dynamic ones like the vehicles' behavior or order composition. The real time and VR capabilities of the simulation system allow for the presentation in a VR environment. Intuitive means for interaction and visualization offer an insight into the performance availability of the system and the factors that influence it.

[Keywords: Facility Logistics, Simulation, VR, Performance availability]

1 EINLEITUNG

Leistungsverfügbarkeit als Maß für den Erfüllungsgrad logistischer Prozesse ist eine neuartige Methode, die Leistung logistischer Anlagen zu quantifizieren und somit Sicherheit zwischen Vertragspartnern herzustellen. Die Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit geschieht auf Basis während des Betriebs einer Anlage ermittelter Daten. Daher ist es schwierig, schon bei Vertragsabschluss eine Aussage über die Leistungsverfügbarkeit einer neuen oder einer zu modifizierenden Anlage zu treffen.

Auch wenn die Leistungsverfügbarkeit ein Maß ist, welches das Gesamtsystem beschreibt, so ist sie nicht nur von globalen Parametern wie der Dimensionierung der Anlage abhängig, sondern auch von den Einflüssen der einzelnen Bestandteile und deren dynamischem Verhalten. Dabei spielen nicht nur feste Parameter, wie die Leistung der Antriebe von fahrerlosen Transportfahrzeugen, sondern auch deren Veränderung im laufenden Betrieb eine Rolle. Auftragsbezogene Daten und Eigenschaften der zu transportierenden Güter üben genauso Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit aus, wie die Steuerung der Fahrzeuge, deren Kollisionsvermeidungsstrategien oder das Zeitverhalten an Kommissionierstationen.

Wir haben ein neuartiges Simulationssystem entwickelt, welches eine zellulare intralogistische Anlage möglichst detailgetreu nachbildet, um eine Aussage über die Leistungsverfügbarkeit der Anlage treffen zu können. Die echtzeitfähige Simulation umfasst dabei die Simulation der Fahrzeuge und aller anderen aktiven Bestandteile, wie Kommissionierstationen, Fahrzeugheber und die Auftragsvergabe. Die Fahrzeuge werden von ihrem Fahrverhalten über die Sensorik bis hinab zu den Motoren simuliert.

Das neuartige Simulationssystem wurde während der Entwicklung stetig anhand einer real existierenden Anlage auf Praxistauglichkeit überprüft. Es wurde ein Simulationsmodell geschaffen, dessen Geometrie auf Basis von Laserscanner-Daten der realen Anlage erstellt wurde. Die zur Überprüfung verwendeten Auftragsdaten entsprechen realen Daten, die aus OTD-NET exportiert und an das gewählte Szenario angepasst wurden.

Damit die Zusammenhänge zwischen den Vorgängen in der Simulation und der Leistungsverfügbarkeit intuitiv und unmittelbar visualisiert werden können, kommen Metaphern zum Einsatz, die die inneren Zustände der Simulation sichtbar machen. Des Weiteren ist es möglich, im laufenden Betrieb in die Simulation einzugreifen, um die Auswirkungen von Veränderungen an den Parametern der Fahrzeuge oder den anderen aktiven Bestandteilen des Modells zu studieren.

Die grundsätzliche Möglichkeit, eine externe Steuerung über eine TCP-Verbindung an das Simulationssystem anzuschließen, erlaubt es, Befehle realer Steuerungssysteme an die virtuellen Komponenten zu senden.

Das verwendete Simulationssystem kann in VR-Umgebungen, wie z.B. einer Panoramaprojektion, eingesetzt werden, wodurch sich die Möglichkeit ergibt, Simulationsdurchläufe und -Ergebnisse mit potenziellen Geschäftspartnern eindrucksvoll und leicht nachvollziehbar zu kommunizieren.

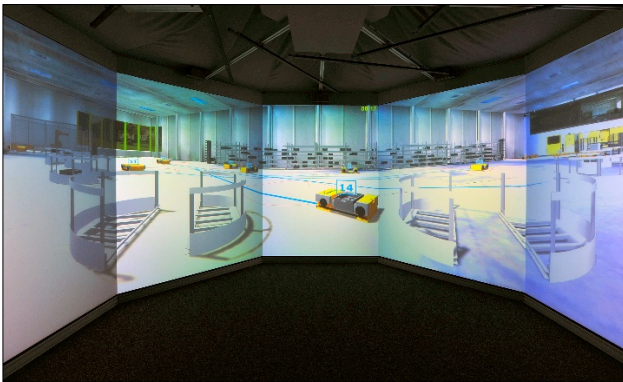


Abbildung 1. Darstellung der Simulation in einer Panoramaprojektionsanlage

2 STAND DER TECHNIK

Der Begriff der Leistungsverfügbarkeit ist noch sehr jung, so dass praktisch keine Arbeiten existieren, die den gesamten Bereich von der echtzeitfähigen Simulation über die virtuelle Realität bis hin zur Leistungsverfügbarkeit abdecken. Das Thema Modellierung und Simulation wird in den im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1083 „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“ entstandenen Publikationen behandelt [GLR01, Raf05, RW01, RF07], wobei

aber der Aspekt der virtuellen Realität nicht betrachtet wird.

Eine nicht echtzeit- und somit auch nicht VR-fähige, dynamisch-kinematische Simulation von Fahrzeugen und Sensoren ist in [GtHt10, GT11 und GtHt12] beschrieben.

Einen Überblick über eine Reihe kommerzieller Simulationssysteme, deren Fokus ebenfalls auf einer dynamischen Simulation von Fahrzeugen liegt, gibt [CMB07]. Auch hier verhindert die Rechenintensivität die Verwendung als Basis für eine echtzeitfähige Simulation in der VR.

[PBW98] und [SRH04] behandeln Metaphern für den Bereich der Intralogistik, haben aber keinen Bezug zur Leistungsverfügbarkeit.

3 LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Leistungsverfügbarkeit gibt nach der VDI-Richtlinie 4486 „den anforderungs- und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen“ an.

Im Gegensatz zum Begriff der technischen Verfügbarkeit steht hier nicht die Verfügbarkeit einer Einzelkomponente im Fokus der Betrachtung, sondern ein Gesamtsystem. Aufgrund dessen wird die Leistungsverfügbarkeit nicht an Parametern einzelner Komponenten festgemacht, sondern an Messdaten, die während des Betriebs einer Anlage erhoben werden. Diese Daten sind aufgrund der hohen Dynamik von Materialflusssystemen – insbesondere agentenbasierten – abhängig vom Verhalten und Zusammenspiel der einzelnen Bestandteile sowie der aktuellen Auftragslage und Auftragszusammensetzung. Schwierigkeiten dabei, die Leistungsverfügbarkeit schon bei der Planung einer Anlage zu beziffern, beziehungsweise eine Anlage gezielt auf eine bestimmte Leistungsverfügbarkeit hin zu planen, sind unter diesen Umständen kaum zu vermeiden.

Je nach Zweck der Anlage dienen entweder die Laufzeiten einzelner Objekte innerhalb der Anlage oder aber Wartezeiten an Knotenpunkten als Grundlage für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit. Diese Daten werden ermittelt, indem über einen oder mehrere definierte Betrachtungszeiträume hinweg die entsprechenden Werte im laufenden Betrieb gemessen werden. Diese Daten ergeben sich nach einer der beiden folgenden Formeln zur Leistungsverfügbarkeit.

Wird die Leistungsverfügbarkeit auf Basis von Wartezeiten berechnet, kommt die Formel

$$\eta_w = \frac{T_B - T_w}{T_B}$$

zum Einsatz, wobei η_w für die Leistungsverfügbarkeit steht, während T_B und T_w den Betrachtungszeitraum beziehungsweise die Summe der gemessenen Wartezeiten repräsentieren.

Ist die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit auf Grundlage von Wartezeiten nicht praktikabel oder dem Szenario nicht angemessen, kann sie stattdessen auf Basis von Laufzeiten berechnet werden. Hierbei kommt die Formel

$$\eta_L = \frac{N - n}{N}$$

zum Tragen, bei der η_L für die Leistungsverfügbarkeit, N für die Anzahl verspäteter und n für die Anzahl innerhalb des Betrachtungszeitraums geplanter Fördergüter steht.

Der Wert für die Leistungsverfügbarkeit η bewegt sich immer in dem Intervall zwischen 0 und 1, wobei 1 (oder 100%) den Grad der maximalen Erfüllung beschreibt.

Die Formeln, beziehungsweise die Daten, die in sie eingehen, machen deutlich, dass weder Störfälle oder Wartungsintervalle noch geplante Redundanzen direkt in die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit mit einfließen. Vielmehr üben sie ihren Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit nur dann aus, wenn sie die Lauf- oder Wartezeiten positiv beziehungsweise negativ beeinflussen. Die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit ist somit von den Werten der technischen Verfügbarkeit entkoppelt, ohne dabei die Einflüsse dieser auf das Gesamtsystem zu vernachlässigen. Vielmehr gibt sie einen der praktischen Realität näheren Wert an.

4 DAS REFERENZSYSTEM

Für das Simulationssystem wurde eine reale Anlage als Referenzsystem betrachtet. Diese Anlage ist ein zellulares intralogistisches System des Fraunhofer Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund. Sie besteht aus einer 17 x 58 m großen Halle, in der sich ein Regallager mit einer Kapazität von 520 Behältern befindet. Die Behälter sind auf insgesamt fünf Regalebenen verteilt, welche von autonom agierenden Fahrzeugen über zwei an den Regalenden befindliche Fahrzeugheber erreicht werden können. Insgesamt sieben Kommissionierstationen und eine Roboterzelle verarbeiten die von den Fahrzeugen angelieferten Behälter. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen einen Übersichtsplan der Halle und eine Innenaufnahme.

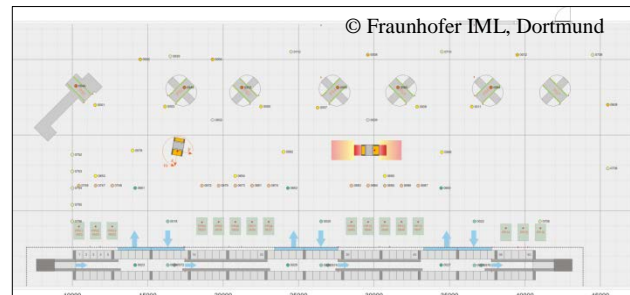


Abbildung 2. Layout des Referenzsystems.

Die autonom agierenden Fahrzeuge sind mit einem Differentialantrieb ausgestattet, welcher sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsfahrten erlaubt. Lokalisierung und Kollisionsvermeidung basieren auf den Daten von zwei an den Enden angebrachten Laserscannern mit einem Blickwinkel von jeweils 180° [KSNtH11].

Behälter können von den Fahrzeugen jeweils auf der rechten oder auf der linken Seite aufgenommen und abgelegt werden.

Die Softwarearchitektur der Anlage umfasst ein Agentensystem, in dem jede Komponente (Fahrzeuge, Kommissionierstationen, Fahrzeugheber) durch einen Agenten repräsentiert wird. Das Warehousemanagementsystem als oberstes Glied in der Hierarchie veröffentlicht die eingehenden Aufträge innerhalb des Agentensystems. Die einzelnen Fahrzeuge bieten auf diese Aufträge und setzen sich, sobald sie einen Zuschlag erhalten haben, in Bewegung, um die gewünschten Behälter an den richtigen Ort zu liefern. Die Bewegung in der Halle und im Regal findet dabei autonom statt.



Abbildung 3. Foto des Referenzsystems.

5 AUFBAU UND ABLAUF DER SIMULATION

In den folgenden Abschnitten werden das Simulationssystem, der Aufbau des Modells, ein exemplarischer Auftrag und die Zeiterfassung beschrieben.

5.1 DAS SIMULATIONSSYSTEM

Die für dieses Projekt als Basis verwendete, selbst entwickelte Simulationssoftware enthält einen zeitdiskreten Simulationskern und wird bereits in zahlreichen Forschungsprojekten angewendet.

Die zentrale Datenstruktur des Simulationssystems bildet ein erweiterbarer Szenegraph. Dort sind nicht nur die Objekte untergebracht, die in der 3-D-Ansicht sichtbar sind, sondern auch alle anderen für die Simulation relevanten Objekte, wie beispielsweise die Auftragsverwaltung.

Neben der Möglichkeit, Simulationsdurchgänge in der VR durchzuführen, bietet das Simulationssystem eine petri-netz-basierte Skriptsprache an, mit der das Verhalten aktiver Komponenten nachgebildet werden kann [Schl02]. Aufgrund der Natur von Petri-Netzen, können somit nebenläufige Prozesse, wie sie bei der Fahrzeugsteuerung vorkommen, direkt abgebildet werden. Kommunikationskanäle können je nach Einsatzzweck über E/A-Verbindungen [RSSER12] oder aber über direkte Funktionsaufrufe innerhalb der Skriptsprache realisiert werden.

Es besteht die Möglichkeit, einen Simulationsdurchlauf aufzuzeichnen und wieder abzuspielen, um relevante Ergebnisse für eine spätere, detaillierte Analyse oder eine Präsentation wieder zu verwenden. Dabei werden sämtliche internen Veränderungen des Systems bis hin zur untersten Ebene protokolliert, so dass das Simulationssystem den abgespeicherten Simulationsdurchgang identisch wiedergeben kann. Dabei unterstehen für das Simulationsergebnis unkritische Daten, wie die aktuelle Kameraposition, weiterhin der Kontrolle des Benutzers. Somit kann ein und derselbe Ablauf aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und analysiert werden. Ab Aufzeichnungsende wird die Simulation nahtlos fortgesetzt.

Die Interaktion in der VR wird durch zahlreiche Schnittstellen zu verschiedenen Eingabegeräten wie 3-D-Maus, Gamepad oder Datenhandschuh ermöglicht.

5.2 AUFBAU DES SIMULATIONSMODELLS

Um die Geometrie für das Simulationsmodell zu erstellen, wurde zunächst ein Laserscan der realen Halle durchgeführt. Das Ergebnis dieses Scans – vier Punktwolken, aufgenommen von verschiedenen Standpunkten aus entlang der Längsachse der Halle und eine Punktwolke aufgenommen im Innern des Regals – diente als Grundlage für die Erstellung der Polygonmodelle. Parallel zu den Laserscans erstellte Fotos zum Einfärben der Punktwolken lieferten die Farbinformation für die Erstellung der Texturen.

Die auf Basis der Scans entstandenen Polygonmodelle wurden mit Hilfe von Standardkomponenten des Simulationssystems wie Linearmotoren und Differentialantrie-

ben erweitert, um die beweglichen Teile des Modells – Fahrzeugheber, Kommissionierstationen, Roboter und Fahrzeuge – nachzubilden. Die Ansteuerung sämtlicher im Modell befindlicher Motoren erfolgt über konfigurierbare PID-Regler, die über das E/A-Framework des Simulationssystems mit den Motoren verbunden sind.

Die eigentliche Steuerungslogik sowohl der Fahrzeuge als auch der Kommissionierstationen und der gesamten Auftragsverwaltung wurde mit Hilfe der im vorigen Abschnitt erwähnten petri-netz-basierten Skriptsprache realisiert. Auf diese Art und Weise lassen sich sowohl die Nebenläufigkeit der verschiedenen Prozesse innerhalb der Fahrzeuglogik, wie Kollisionsvermeidung und Navigation, als auch das als Zustandsautomat abbildbare Verhalten der Kommissionierstationen beschreiben.

Sämtliche Bestandteile des Modells haben Einzug in die Modellbibliotheken des Simulationssystems gefunden, so dass das Modell problemlos um zusätzliche Komponenten erweitert werden kann.

Fahrzeuge, Kommissionierstationen, Regale und das übergeordnete Auftragsvergabesystem werden jeweils durch einzelne Knoten im Szenegraphen repräsentiert. Ihr aktueller Zustand („WARTEN AUF AUFTRAG“, „BELEGT“, „AUßER BETRIEB“, „DEFEKT“) ist allen anderen Komponenten jederzeit bekannt und kann vom Benutzer beeinflusst werden.

5.3 BEISPIEL ZUR VERARBEITUNG EINES AUFTRAGS

Aufträge liegen mit Zeitstempeln versehen als Ausgabe eines mit Daten aus OTD-Net initialisierten Lastgenerators in Form einer Excel-Tabelle vor. Ein spezielles Modul liest ab Simulationsstart diese Daten ein und generiert zu den jeweiligen Zeitpunkten Kundenaufträge, die als Objekte des Szenegraphen zunächst der übergeordneten Auftragsverwaltung (im Folgenden als WMS bezeichnet) zugeordnet werden.

Ein solcher Kundenauftrag besteht aus einer eindeutigen ID und einer Liste von Unteraufträgen. Die Unteraufträge wiederum bestehen aus einer Artikelnummer und einer Stückmenge, wobei die Artikelnummer mit der eindeutigen ID eines der Behälter korrespondiert. Behälter selbst kennen die Anzahl der enthaltenen Objekte, deren Gewicht und Volumen, sowie einen Wert für die Handhabungskomplexität der Artikel. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über diese Eigenschaften.

Objekt	Eigenschaften
BEHÄLTER	ARTIKELNUMMER MENGE GEWICHT VOLUMEN HANDHABUNGSKOMPLEXITÄT

KUNDENAUFTRAG	ID LISTE VON UNTERAUFTRÄGEN
UNTERAUFTRAG	ARTIKELNUMMER MENGE

Tabelle 1. *Eigenschaften der an der Auftragsverteilung beteiligten Objekte.*

Das WMS ermittelt die nächste freie Kommissionierstation und weist ihr den nächsten Kundenauftrag zu. Die Funktion, die diese Auswahl trifft, kann dabei beliebig erweitert werden, um das Verhalten eines realen agentenbasierten Systems nachzubilden, in dem zum Beispiel die Kommissionierstationen selbst auf die Aufträge bieten. Im vorliegenden Fall sind die Kommissionierstationen mit einer festen Priorität versehen, die kombiniert mit dem momentanen Belegungsstatus der Stationen das Ziel für den gegenwärtigen Auftrag definiert.

Sobald eine Kommissionierstation einen Auftrag erhält, werden die einzelnen Unteraufträge des Kundenauftrags nach dem gleichen Verfahren, mit dem die Kundenaufträge verteilt werden, auf die momentan freien Fahrzeuge verteilt. Auch hier ist eine individuelle Anpassung der Vergabefunktion an das Verhalten eines realen Agentensystems möglich. Stehen nicht genügend freie Fahrzeuge zur Verfügung, verbleiben die restlichen Aufträge in der Warteschlange, bis ein Fahrzeug seine momentane Warteschlange abgearbeitet hat.

Bekommt ein Fahrzeug einen Auftrag zugewiesen, wird zunächst die Position des Zielbehälters ermittelt und anschließend eine Route zu diesem Behälter geplant. Gewöhnlich führt diese zum Eingang des Regals und von dort über den Fahrzeugheber zu der entsprechenden Parzelle im Regal, wo der Behälter aufgenommen wird. Nach Aufnahme des Behälters wird dieser über den Fahrzeugheber und den Ausgang des Regals zur Auftrag gebenden Kommissionierstation transportiert und dort dem Verarbeitungskreislauf zugeführt. Ein eventuell in der Kommissionierstation befindlicher, schon verarbeiteter Behälter kann von dem Fahrzeug direkt aufgenommen und in das Regal zu der von der Lagerungsstrategie vorgegebenen Parzelle zurück transportiert werden.

Der in der Kommissionierstation eingetroffene Behälter durchläuft den vom Petri-Netz und Aufbau der Station vorgegebenen Verarbeitungszyklus. Dabei wird sein Inhalt um den dem Unterauftrag entsprechenden Betrag verringert. Die Verarbeitungszeit innerhalb der Station kann dabei von diesem Betrag sowie artikelspezifischen Parametern wie Ausmaß, Gewicht, einem direkten Komplexitätsfaktor und statistischen Größen beeinflusst werden. Ebenso können stations- bzw. arbeiterspezifische Parameter in diese Verarbeitungszeit mit eingehen. Nach Verarbeitung des Behälters wird dieser dem Ausgang der Kommissionierstation zugeführt, sowie ein neuer Abhol-

auftrag generiert und nach dem vormals beschriebenen Verfahren an ein Fahrzeug vergeben.

Sind alle Unteraufträge eines Kundenauftrags abgeschlossen, gilt der gesamte Kundenauftrag als bearbeitet und wird aus dem Verarbeitungszyklus entfernt.

5.4 ZEITERFASSUNG

Jedem Objekt, das in der beschriebenen Prozesskette vorkommt, ist ein Petri-Netz zugeordnet, welches die Zustandswechsel, die durch die Vorgänge im System ausgelöst werden, registriert. Aufträgen wird mitgeteilt, wenn sie an eine Kommissionierstation oder ein Fahrzeug weiter gereicht werden, Behälter bemerken, wenn sie von einem Fahrzeug aufgenommen oder in einer Station beziehungsweise dem Regal abgelegt werden. Ebenso registrieren Stationen und Fahrzeuge Zeiträume, in denen die Auftragswarteschlange leer ist. Auf Basis der Zeitstempel all dieser kritischen Zeitpunkte und der Beträge der Wartezeiten kann das genaue Zeitverhalten des Systems von der Auftragseinlastung bis hin zur Auftragsbefüllung protokolliert und zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit herangezogen werden.

Soll die Leistungsverfügbarkeit anhand von Wartezeiten an den Kommissionierstationen ermittelt werden, so können die Zeiträume, in denen sich gerade kein Behälter im Verarbeitungszyklus der Station befindet, aufsummiert werden, sofern sie einen definierten Betrag überschreiten, um kontinuierlich einen Wert für die aktuelle Leistungsverfügbarkeit anzugeben.



Abbildung 4. *Berechnung der Leistungsverfügbarkeit auf Basis von Laufzeiten.*

Soll die Leistungsverfügbarkeit hingegen auf Basis der unpünktlichen Fördergüter berechnet werden, so werden die Zeiten zu Rate gezogen, die während des Betriebs bei jedem Statuswechsel eines Objekts protokolliert wurden. Dies erfolgt je nach System entweder auftragsbasiert oder aber ab Aufnahme eines Behälters. Eine definierte, maximale Laufzeit bestimmt somit, welche Fördergüter

als verspätet anzusehen sind, so dass die aktuelle Leistungsverfügbarkeit über deren Anzahl ermittelt werden kann. Abbildung 4 zeigt die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit auf Basis von Laufzeiten.

Es besteht keine Notwendigkeit, sich im Vorfeld für eine der beiden Berechnungsvarianten zu entscheiden. Sofern es im Rahmen des betrachteten Systems sinnvoll erscheint, können beide Ansätze gleichermaßen verfolgt werden, da sämtliche relevanten Zeiten unabhängig vom System protokolliert und zeitgleich ausgewertet werden können (vgl. Abbildung 5).

Das gesamte protokollierte Zeitverhalten kann später in der Analyse zu Rate gezogen werden, um die Aufträge oder Situationen ausfindig zu machen, die den stärksten Einfluss auf eine potenziell geringe Leistungsverfügbarkeit hatten.



Abbildung 5. Übersicht über die Leistungsverfügbarkeit einer aktuellen Simulation

6 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Es wurde ein System zur Simulation zellulärer intralogistischer Anlagen vorgestellt, welches die für die Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit auf Basis verschiedener Modelle relevanten Daten sowie weitere, für die Analyse des Systems nützliche, Werte erfassen und protokollieren kann.

Der modulare Aufbau erlaubt es, das Verhalten des Systems an verschiedene Szenarien anzupassen. Schnittstellen nach Außen ermöglichen zudem das Ersetzen der Verhaltensbeschreibungen einzelner Komponenten durch deren Entsprechungen in einem realen Steuerungssystem, wie vormals in [RtHE13] beschrieben.

Die Möglichkeit, jederzeit in das System eingreifen zu können und zudem die inneren Zustände (vgl. Abbildung 6), sowie die ermittelten Zeiten unmittelbar zu visualisieren (vgl. Abbildung 4), bietet einen intuitiven Zu-

gang zu den Vorgängen im System und deren Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit.

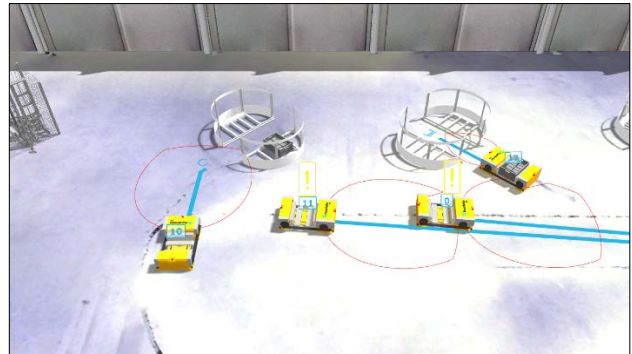


Abbildung 6. Visualisierung von Zielpositionen, Aktionen und Erfassungsbereichen

Die Beeinflussung der Zustände der Kommissionierstationen und Fahrzeuge erlaubt es, den Betrieb mit einer verringerten Menge an Ressourcen zu simulieren, um Ausfälle zu testen oder Kapazitätsgrenzen auszuloten. Ebenso ist die Erweiterung des Systems um zusätzliche Komponenten möglich, um zukünftige Umbaumaßnahmen und deren Effekte zu bewerten.

7 DANKSAGUNG

Teile dieser Veröffentlichung entstanden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Simulation zellulärer Intralogistiksysteme zur Analyse der Leistungsverfügbarkeit in der Virtuellen Realität“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Geschäftszeichen RO 4064/1-1 gefördert wird.

LITERATUR

- [VDI12] VDI Richtlinie 4486: *Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit*, Berlin, Beuth Verlag.
- [GLR01] Günther, H.-O.; Lehmann, M.; Raffel, W.-U.; Wagner, G.: *Modellierung und Simulation von Fahrerlosen Transportsystemen als Multiagentensysteme*. 4. Kolloquium „SPP Agenten“, FU Berlin, Oktober 2001.
- [Raf05] Raffel, W.-U.: *Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels Fahrerloser Transportsysteme*. Dissertation, FU Berlin, Institut für Informatik, März 2005.
- [RW01] Raffel, W.-U.; Wagner, G.: *Agentenorientierte Modellierung von Fahrerlosen Transportsystemen*. Technical Report B 01 05, FU Berlin, Institut für Informatik, Juli 2001.
- [RF07] Roidl, M.; Follert, G.: *Simulation von multiagentenbasierten Materialflusssteuerungen*. Informatik 2007 – Informatik trifft Logistik. Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Proceedings 109, Band 1, Bremen, 24.-27. September 2007.
- [GtHt10] Günthner, W. A.; ten Hompel, M.; Tenerowicz, P.; Büchter, H.: *Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik – Fördern im Schwarm*. Hebezeuge und Fördermittel, S. 78-79, Ausgabe 3, 2010.
- [GT11] Günthner, W. A.; Tenerowicz, P.: *Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik – Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik*. Industrie Management, S. 25-29, Ausgabe 1/2011.
- [CMB07] Craighead J.; Murphy R.; Burke J.; Goldiez, B.: *A Survey of Commercial & Open Source Unmanned Vehicle Simulators*. Proceedings of the Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA); S. 852-857, Rom, Italien, April 2007.
- [PBW98] Popyrev, I.; Billingham, M.; Weghorst, S.; Ischikawa, T.: *Egocentric object manipulation in virtual environments: Empirical evaluation of interaction techniques*. Computer Graphics Forum, Jahrgang 17, Band 3, S. 41-52, 1998.
- [SRH04] Steinicke, F.; Ropinski, T.; Hinrichs, K. H.: *Selektion von Objekten in Virtuellen Umgebungen mit der Improved Virtual Pointer Metapher*. Tagungsband zum 1. Workshop Virtuelle und Erweiterte Realität der GI-Fachgruppe VR/AR, S. 59-67, Chemnitz, 27.-28. September 2004.
- [GtHt12] Günthner, W. A.; ten Hompel, M.; Tenerowicz-Wirth, P.; Büchter, H.; Schipplack, M.: *Forschungsbericht - Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik*. München, Dortmund, 2012.
- [KSNtH11] Kamagaew, A.; Stenzel, J.; Nettsträter, A.; ten Hompel, M.: *Concept of cellular transport systems in facility logistics*. Proceedings of ICARA 2011, 5th IEEE Int. Conf. on Automation, Robotics and Applications, S. 40-45. Wellington, Neuseeland, 6.-8. Dez. 2011.
- [Schl02] Schluse, M.: *Zustandsorientierte Modellierung in Virtueller Realität und Kollisionsvermeidung*. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 968, 2002.
- [RSSER12] Roßmann, J.; Schluse, M.; Sondermann, B.; Emde, M.; Rast, M.: *Advanced Mobile Robot Engineering with Virtual Testbeds*. Proceedings of the ROBOTIK 2012, 7th German Conf. on Robotics, München, S. 331-336, VDE Verlag Berlin, 21.-22. Mai 2012.
- [RSES10] Roßmann, J.; Schlette, C.; Emde, M.; Sondermann, B.: *Discussion of a Self-Localization and Navigation Unit for Mobile Robots in Extraterrestrial Environments*, Proc. of 10th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS), Sapporo, Japan, 2010.
- [RtHE13] Rossman, J.; ten Hompel, M.; Eilers, K.: *Simulations- und VR-basierte Steuerungsverifikation zellulärer Intralogistiksysteme*. 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL): Tagungsband, 17. und 18. September 2013.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann leitet den Lehrstuhl und das Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen. Der Schwerpunkt seiner Arbeit liegt in der Verknüpfung von Forschungsergebnissen aus den Bereichen Robotik, Simulationstechnik und Virtuelle Realität zur Entwicklung neuer Konzepte der Mensch-Maschine-Kommunikation.

Adresse: Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, RWTH Aachen, Ahornstr. 55, 52074 Aachen, Tel.: +49 241 80-26101, E-Mail: rossmann@mmi.rwth-aachen.de

Prof. Dr. Michael ten Hompel ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen an der Universität Dortmund und geschäftsführender Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und promovierte an der Universität Witten/Herdecke.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 97 43-600, E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de

Dipl.-Inf. Kevin Eilers ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am RIF Institut für Forschung und Transfer e.V. Er studierte Informatik an der Technischen Universität Braunschweig.

Adresse: Institut für Forschung und Transfer (RIF e.V.), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 9700-776, E-Mail: kevin.eilers@rt.rif-ev.de