

Leistungsverfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit in Systemen intelligenter Ladungsträger

Performance Availability and Real-time Capability of Smart Devices in Materials Handling Systems

Moritz Roidl, Michael ten Hompel

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund

In diesem Artikel werden **Leistungsverfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit** am Beispiel eines Lagersystems für intelligente Behälter betrachtet. Es wird dabei die **Echtzeitfähigkeit** dieses Systems anhand einer realistischen Fallstudie in einem Stetigfördersystem analysiert. Anhand dieser Analyse wird ein Konzept für die gezielte Planung eines Lagersystems für eine spezifische **Leistungsverfügbarkeit** entworfen. Kernbestandteil ist ein **Kommunikationsprotokoll**, das die **Reservierung von Fördermitteln mittels logischer Zeit** erlaubt. Über eine **veränderte Reservierungsstrategie** kann ein **geeigneter Dispositionszeitpunkt** berechnet werden, der eine **Termineinhaltung aller Aufträge** garantiert.

[Schlüsselwörter: *Intralogistik, Leistungsverfügbarkeit, Echtzeitfähigkeit, Intelligente Ladungsträger, inBin, Logische Zeit*]

This article proposes a concept for the design of storage systems including intelligent containers. The **real-time capability** of such a system is analyzed with a realistic case study. Based on the analysis, a concept for designing a storage system with a specific performance availability is presented. The concept is built upon a communications strategy which reserves logic time slots on the physical transportation devices. Using this reservation strategy, a feasible start time for all orders can be calculated in such a way that no order will miss its deadline.

[Keywords: *Facility Logistics, Performance availability, Real-time capability, Intelligent Container, inBin, Logic time*]

1 EINLEITUNG

Aufgrund immer kürzer werdender Produktlebenszyklen bei steigender Produktindividualisierung muss die Planung intralogistischer Systeme in immer kürzer werdenden Zyklen durchgeführt werden und zugleich gestiegenen Anforderungen gerecht werden. Die Betreiber logistischer Anlagen geben zunehmend anspruchsvollere, zeitkritische Leistungsversprechen an ihre Kunden. Ein 24h Lieferservice, 8h Bestellvorlaufzeit bis zur Auslieferung bei großen

Produktspektren und geringen Kosten sind mittlerweile branchenweiter Standard (vgl. [HKR14]). Die aktuelle Entwicklung geht hin bis zum 1 h oder 2 h Lieferservice (vgl. [Hei16]), der eine grundlegend andere Lagerinfrastruktur benötigt. Zur Beherrschung dieser zunehmenden Komplexität von Logistiksystemen der Zukunft ist die Entwicklung hin zu dezentral organisierten Systemen autonomer und intelligenter Agenten ein sinnvoller Lösungsweg. Der Planer sieht sich bei der Auslegung moderner Logistiksysteme mit einer stetig wachsenden Anzahl von komplexen Entscheidungen konfrontiert. Die Bedeutsamkeit hochwertiger und effizienter intralogistischer Planung steigt. Die Hersteller heutiger Anlagen stehen dem Problem fehlender Planungsmethoden für den Aufbau verlässlicherer Systeme gegenüber.

Vorliegender Artikel nimmt sich dieser Problemstellung an und stellt einen methodischen Ansatz zur verlässlichen Planung hochkomplexer Logistiksysteme der Zukunft vor. Eine Betrachtung des Verhältnisses von Echtzeitfähigkeit und Leistungsverfügbarkeit zeigt die nahe Verwandtschaft beider Begriffe auf. Daraufhin werden die gestiegenen Anforderungen dezentraler Logistiksysteme anhand des Konzeptes des intelligenten Behälters betrachtet und insbesondere die daraus folgende Zunahme der Komplexität aufgrund der Nutzung drahtloser Funkübertragung bei eingeschränktem Kommunikationsmedium und beschränkter Energieversorgung gezeigt. Im Weiteren wird ein simulationsbasiertes Werkzeug vorgestellt, das die Leistungsverfügbarkeit für Systeme intelligenter Behälter simulieren, analysieren und berechnen kann. Im Fokus stehen die Simulation der Kommunikation und des notwendigen Energy-Harvestings sowie die vollständige Steuerung des Materialflusses durch dezentrale Steuerungsalgorithmen über standardisierte Kommunikationsprotokolle. Anhand einer Fallstudie eines Kommissioniersystems mit einer großen Zahl intelligenter Behälter wird der praktische Einsatz der entwickelten Methoden demonstriert. Über eine Analyse der Echtzeitfähigkeit wird ein Konzept für die gezielte Planung eines Lagersystems auf eine spezifische Leistungsverfügbarkeit hin entworfen. Kernbestandteil ist ein Kommunikationsprotokoll, das die

Reservierung von Fördermitteln durch logische Zeit ermöglicht. Über eine veränderte Reservierungsstrategie kann ein geeigneter Dispositionszeitpunkt kommuniziert werden, der eine Termineinhaltung aller Aufträge garantiert und somit das Ziel der Planung unterstützt, eine spezifische Leistungsverfügbarkeit im laufenden Betrieb sicherzustellen.

2 ZUM VERHÄLTNISS VON ECHTZEITFÄHIGKEIT UND LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Einen wichtigen Schritt zur Beantwortung der Frage, wie die Leistungsverfügbarkeit dezentral gesteuerter intralogistischer Systeme bestimmt und vorausgeplant werden kann, liefert die Richtlinie VDI 4486. Sie definiert die Verfügbarkeit einer intralogistischen Anlage bei deren Abnahme vom Anlagenhersteller durch den späteren Betreiber. Auf Grundlage des Kennwerts Leistungsverfügbarkeit wird nach VDI 4486 eine definierte Anlagenleistung vertraglich vereinbart, die sich über die Wartezeiten einzelner Ressourcen oder die Pünktlichkeit einzelner Aufträge definiert. Der Betreiber der Anlage bekommt damit eine anforderungsgerechte Leistungserbringung durch den Hersteller zugesichert (vgl. [VDI4486], [Wit07], [Mai10]).

Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen einer technischen Verfügbarkeit, die von Systemkomponenten wie Maschinen und Fördertechnik als Grundlage ausgehen, werden bei der Betrachtung der Leistungsverfügbarkeit Geschäftsprozesse betrachtet (vgl. [VDI3581]). Eine Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist die exakte Spezifikation der Geschäftsprozesse. Die vertraglich zugesicherte Leistungsverfügbarkeit kann dann entsprechend der Richtlinie während der Inbetriebnahme am System gemessen werden und ermöglicht so einen für die Vertragspartner sicheren Abschluss der Systemübergabe.

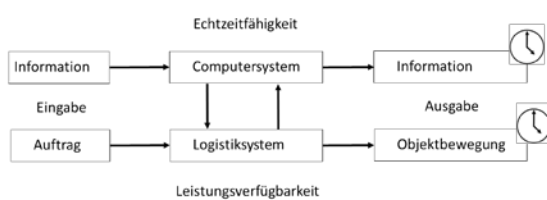


Abbildung 1. Dualität von Echtzeitfähigkeit in Computersystemen und Leistungsverfügbarkeit in Logistiksystemen

Obwohl die Richtlinie zur Leistungsverfügbarkeit Konzepte wie Pünktlichkeit und Wartezeiten verwendet, wird das Konzept der Echtzeitfähigkeit selbst nicht behandelt. Im Vergleich von echtzeitfähigen Computersystemen mit logistischen Systemen zeigt sich, dass sich die Begriffe der Echtzeitfähigkeit und Leistungsfähigkeit auf unterschiedliche Dinge beziehen (siehe Abbildung 1). In einem Computersystem handelt es sich um die Reaktion auf eine externe Informationseingabe in Form einer Informationsausgabe in vorbestimmbarer Zeit (vgl. [HLL07]). In einem logistischen System ist es eine Reaktion auf Aufträge zur

Bewegung physischer Objekte in Form von zeitlich garantierten Bewegungsabläufen. Da jedes moderne Logistiksystem ein oder mehrere Computersysteme beinhaltet und von diesen gesteuert wird, entsteht eine Dualität zwischen den Begriffen der Echtzeitfähigkeit und der Leistungsverfügbarkeit. Ein logistisches Echtzeitsystem erzeugt Echtzeitanforderungen an das steuernde Computersystem, das durch sein programmiertes Verhalten und seine Rechnerarchitektur wiederum die Leistungsverfügbarkeit beeinflusst.

In der Terminologie der VDI-Richtlinie sind die Transportaufträge die Eingangsgröße in das logistische Echtzeitsystem, während der Liefertermin als die geforderte Antwortzeit interpretiert werden kann. Der Quotient aus der planmäßigen Anzahl aller Transportaufträge N abzüglich unpünktlicher Transportaufträge n und der planmäßigen Anzahl aller Transportaufträge ergibt den Grad η der Leistungsverfügbarkeit:

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

Der Wert für die Leistungsverfügbarkeit η bewegt sich immer im Intervall $[0, 1]$, wobei 1 (oder 100%) den Grad der maximalen Erfüllung beschreibt (vgl. [VDI4486]). Aus Perspektive der Echtzeitfähigkeit wird hier der Qualitätsgrad des Antwortzeitverhaltens beschrieben. Eine Forderung nach vollständiger Leistungsverfügbarkeit ($\eta = 100\%$) bedeutet daher harte Echtzeitanforderungen und jeder unpünktliche Transportauftrag muss als Gesamtsystemfehler bewertet werden. Jeder niedrigere Grad an Leistungsverfügbarkeit beschreibt eine weiche Echtzeitanforderung.

Logistische Systeme sind daher allgemein den weichen Echtzeitsystemen zuzuordnen, da sie insbesondere eine hohe Durchschnittsleistung im täglichen Betrieb zu günstigen Kosten bereitstellen und gleichzeitig seltene Spitzenlasten zeitgerecht bearbeiten müssen. Ein logistisches System sollte immer *fail-operational* sein, so dass lokale Fehlerzustände einzelner Komponenten nicht zum Ausfall des Gesamtsystems führen. Im täglichen Betrieb und in späteren Jahren, wenn sich die äußeren Anforderungen unvorhersehbar geändert haben, wird das System jedoch als *Best-Effort*-System betrieben. Gerade die äußeren Einflüsse in Form von Lastszenarien lassen sich über eine übliche geplante Laufzeit von vielen Jahren nicht vorhersehen (vgl. [Kop11], S.17ff).

Mit dieser Definition der Leistungsverfügbarkeit als Grad der Echtzeitfähigkeit eines logistischen Systems lässt sich das einleitend beschriebene Problem der fehlenden Methoden für die vertragssichere Entwicklung von logistischen Systemen als Aufgabe beschreiben, eben diese Methoden aus dem Bereich der klassischen Echtzeitsysteme zu adaptieren.

3 VON ZENTRAL GESTEUERTEN ECHTZEITSYSTEMEN ZU DEZENTRAL GESTEUERTEN SYSTEMEN DER INDUSTRIE 4.0

Ein klassisches, zentral gesteuertes Intralogistiksystem in produktionsnahe Einsatz ist gut mit einem Fabrikautomatisierungssystem zu vergleichen, das zu den frühesten Einsatzgebieten für Echtzeitsysteme zählt. In einem heutigen Produktionssystem steuern echtzeitfähige SCADA-Systeme die einzelnen den Gewerken zugehörigen speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS). Charakteristisch für diese dem Produkt angepassten Systeme ist eine hochindividuelle, kostenaufwändige Entwicklung. Dies hat zur Folge, dass SCADA-basierte Fabrikautomatisierungssysteme nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen die erzielbare Wertschöpfung hohe Entwicklungskosten rechtfertigt (vgl. [Kop11], S.17ff).

Abbildung 2 zeigt die hierarchisch aufgebaute Architektur eines solchen Systems mit individuellen, festgelegten Prozessabläufen. Die mobilen, logistischen Geschäftsobjekte (z.B. Artikelbehälter, Auftragsbehälter usw.) stehen in einer unidirektionalen, passiven Beziehung zum Steuerungssystem und sind nicht Teil des Softwaresystems. Die Betrachtung der Echtzeitfähigkeit fokussiert auf hochverfügbare Systemkomponenten, deren individuelle, fest spezifizierte Funktionen die zeitlichen Anforderungen garantieren. Viele logistische Prozesse sind jedoch hochgradig flexibel ausgelegt, so dass es schwer und entsprechend kostenaufwändig ist, diesen typischen, starren SCADA-Ansatz vollständig umzusetzen. Die wesentlich geringere Wertschöpfung logistischer Systeme im Vergleich zu Produktionssystemen kann den Kosten einer hochindividuellen Entwicklung nicht in gleicher Weise gerecht werden.

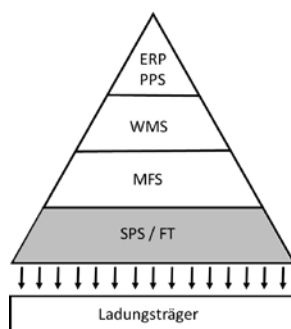


Abbildung 2. Architektur eines Intralogistiksystems mit zentraler Steuerung (Enterprise Resource Planning ERP, Produktionsplanungssystem PPS, Warehousemanagementsystem WMS, Materialflusssteuerung MFS, speicherprogrammierbare Steuerungen SPS, Fördertechnik FT)

Ein weiteres klassisches Einsatzgebiet für Echtzeitfähigkeit sind eingebettete Systeme, die in einen technischen Kontext eingebunden sind (z.B. Flugzeug, Auto oder Unterhaltungselektronik). Sie übernehmen dort Überwachungs-, Regelungs- und Steuerungsfunktionen für zeitkritische Prozesse. Im Gegensatz zu SCADA-Systemen

unterliegen eingebettete Systeme jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Kosten, des Energie- und Platzverbrauchs, die sich aus dem Anwendungskontext ergeben. Sie sind relativ günstig und werden in der Logistik zunehmend verwendet, um hochflexible Systeme zu entwickeln. Die Intelligenz wird in Form des eingebetteten Systems am einzelnen logistischen Objekt installiert. Über eine standardisierte Funkkommunikation werden die Prozesse autonom koordiniert. Es entsteht ein cyberphysisches System, das mit einer Vielzahl von intelligenten Objekten die Steuerung der Produktion übernimmt. Diese intelligenten Objekte greifen dabei, wenn erforderlich, auf stationäre und mobile Dienste zu.

Mit der Einführung von solchen autonomen, intelligenten Objekten kann eine vollständig dezentrale und verteilte Steuerung entwickelt werden (siehe Abbildung 3). Die vierte industrielle Revolution kann daher auf technischer Ebene als Verschmelzung von Fabrikautomatisierungssystemen mit verteilten, eingebetteten Systemen beschrieben werden.

Mit der Definition von Leistungsverfügbarkeit auf Basis von Geschäftsprozessen beschreibt die VDI-Richtlinie 4486 einen Wechsel der Sichtweise von inneren Einflüssen, wie der auf Systemkomponenten basierenden technischen Verfügbarkeit, hin zu den äußeren Einflüssen eines logistischen Systems.

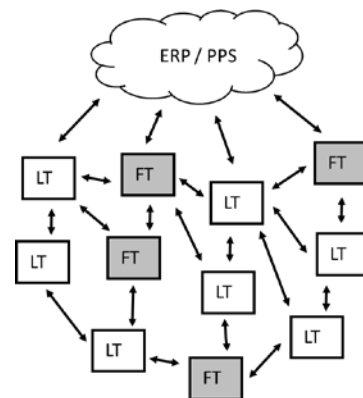


Abbildung 3. Architektur eines dezentral gesteuerten, cyberphysischen Intralogistiksystems (Ladungsträger LT, Fördertechnik FT)

Es reicht bei der Planung logistischer Systeme nicht aus, den klassischen SCADA-Ansatz auf logistische Systeme zu übertragen, da hier mangelnde Flexibilität zu hohen Kosten führen würde. Es bedarf zusätzlich der Einführung von eingebetteten Systemen in den Materialfluss im Sinne eines Internet-der-Dinge. Die Entwicklung eines Logistiksystems auf Basis intelligenter Behälter wird im folgenden Abschnitt beschrieben und dient als Grundlage für die Planungsmethoden bezüglich Echtzeitfähigkeit und Leistungsverfügbarkeit.

4 KONZEPT EINES LOGISTIKSYSTEMS AUF BASIS INTELLIGENTER LADUNGSTRÄGER

Das Konzept für intelligente Behälter baut auf der Annahme auf, dass jedes logistische Objekt mit einem eingebetteten System ausgestattet wird (vgl. [REM14]). Ein intelligenter Behälter kann mit dem Menschen über eine Benutzerschnittstelle kommunizieren, welche aus Tastern und Bildschirm besteht. Seine Funktionalität ist auf den Einsatz in Intralogistiksystemen ausgerichtet, er besitzt alle notwendigen Informationen über seinen Inhalt, seine Aufgabe sowie seine Position im Netzwerk. In einem industriellen Einsatzszenario wird eine große Anzahl von intelligenten Behältern gleichzeitig auf engem Raum zusammenarbeiten. Die Kommunikation zu anderen intelligenten, logistischen Objekten oder Maschinen wird über ein Funksystem realisiert. Das eingebettete System verfügt über ausreichend Rechenleistung, um über interne Berechnungen und Kommunikationsprotokolle die Ausführung von dezentralen Algorithmen zu steuern. Wie alle eingebetteten Systeme verfügt ein intelligenter Behälter über Sensoren und kann so autonom seine lokale Umgebung überwachen. Die Besonderheit im Vergleich zu ähnlichen Ansätzen ist der vollständig energieneutrale Betrieb. Batterien werden nur in Form von Zwischenspeichern für die Energie verwendet, welche das System kontinuierlich über eine Solarzelle erhält. Aus Sicht der logistischen Anwendung ist dieses System damit über seine gesamte Lebensdauer wartungsfrei: eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz.

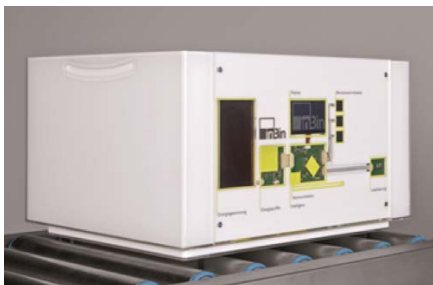


Abbildung 4. Der intelligente Behälter inBin

Die größte Herausforderung für die Umsetzung des Konzepts besteht daher in der Entwicklung von geeigneten mobilen, eingebetteten Systemen. Insbesondere durch die erforderliche Mobilität ist die Energieversorgung ein wichtiger Forschungsaspekt. Hier ist idealerweise ein energieneutraler Betrieb oder zumindest eine sehr lange Laufzeit wünschenswert. Der inBin (intelligent bin, siehe Abbildung 4) ist das erste vollkommen energieneutrale, intelligente Logistikobjekt, das konsequent mit aktuellen Ultra-Low-Power-Komponenten entwickelt wurde. Daher kann dieses Entwicklungskonzept als Grundlage für andere Anwendungsbereiche gelten.

Wie bereits beschrieben setzt die Mobilität eines inBins voraus, dass sowohl Energieversorgung als auch die Kommunikation drahtlos erfolgen. Dies gelingt mit

Energy-Harvesting, jedoch ist der Energieertrag sehr gering, so dass der Einsatz von Ultra-Low-Energy-Funkhardware notwendig wird. Dennoch ist der Energieverbrauch bei Send- und Empfangsvorgängen um ein Vielfaches höher, als der Energieertrag. Das bedeutet, dass ein kontinuierliches Empfangen unmöglich wird, welches jedoch Voraussetzung für den Einsatz weit verbreiteter, drahtloser Funkprotokolle wie z. B. bei WLAN, Bluetooth oder auch GSM und LTE wäre. Als Folge dieser starken Ressourcenbeschränkung müssen neue Funkprotokolle entwickelt werden, die eine gemeinsame Charakteristik haben: sie spezifizieren längere Send- und Empfangspausen, die zum Sammeln neuer Energie genutzt werden können.

Der Energieverbrauch wird maßgeblich durch drahtlose Kommunikationsaktivitäten beeinflusst. Dieser Umstand verstärkt sich auf der Ebene des Gesamtsystems, da sich die Kommunikationsaktivitäten aller intelligenten Objekte maßgeblich auf dieses System auswirken. Ein solches System ähnelt in dieser Hinsicht einem drahtlosen Sensornetzwerk. Im Unterschied zu den meisten reinen Sensornetzwerken, die lediglich Daten erfassen und an ein übergeordnetes System senden, handelt es sich hier um ein Steuerungssystem. Dies bedeutet die Notwendigkeit einer zuverlässigen bidirektionalen Kommunikation, so dass die Steuerungsaufgaben des Gesamtsystems durchgeführt werden können (siehe Abbildung 5).

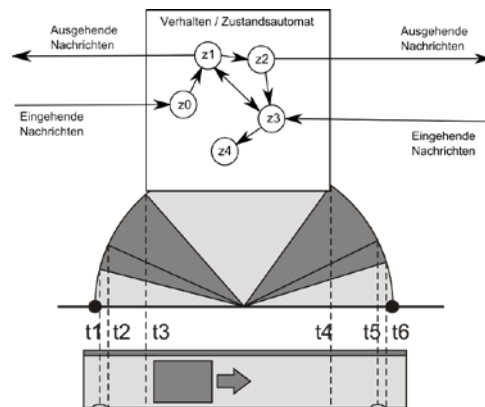


Abbildung 5. Modell eines intelligenten Behälters auf einem Stetigfördererelement

Zu solchen Aufgaben gehören auf der untersten Granularitätsebene das regelmäßige Senden von Zustandsberichten der einzelnen Objekte an das übergeordnete Verwaltungssystem, ebenso die Fähigkeit des Systems, zeitnah auf spezifische Anfragen reagieren zu können und dezentrale Steuerungsstrategien für die Disposition und den selbstgesteuerten Transport der intelligenten Objekte. Im Vergleich zu Sensornetzwerken mit unidirektionaler Kommunikation, die häufig in nicht-kontrollierbaren Umgebungen eingesetzt werden, kann den höheren Anforderungen der bidirektionalen Kommunikation in den kontrollierbaren Umgebungen von Materialflusssystemen durch die Sicherstellung ausreichender Energie begegnet werden.

5 EINHEITLICHES MODELL ZUR ABBILDUNG VON STEUERUNGSVERHALTEN, MATERIAL- UND INFORMATIONSFLUSS

Ein einheitliches Modell zur Abbildung von Steuerungsverhalten, Material- und Informationsfluss bildet die Grundlage für eine Analyse der Leistungsverfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit. Der Fokus liegt auf einer korrekten Modellierung der Protokolle auf der Applikationsebene, die das Materialflusssystem und die Lagerverwaltung auf Basis der Prinzipien eines Multiagentensystems steuern. Bisherige Modelle von Logistiksystemen beschreiben die Systemstruktur wie das Layout der Fördertechnik und die Steuerung des Systems. Die Herausforderung bei der Modellierung cyberphysischer Logistiksysteme besteht in der Integration von Energie- und Kommunikationsaspekten (siehe Abbildung 6).

Das Modell definiert zwei unterschiedliche logistische Objektklassen in cyberphysischen Logistiksystemen: mobile, intelligente Ladungsträger und stationäre oder mobile Infrastrukturobjekte. Alle Steuerungsaktionen gehen von den mobilen Ladungsträgern aus, da sie als Geschäftsobjekte Gegenstand wertschöpfender Prozesse sind. Durch ihre Mobilität sind sie auf drahtlose Kommunikation angewiesen und besitzen beschränkte Energieressourcen. Die Infrastrukturobjekte bilden die Systemstruktur ab. Ihre Anzahl, Kopplung und Anordnung im Gesamtlayout bestimmen die grundsätzliche logistische Charakteristik des Systems. Die stationären Infrastrukturobjekte sind nicht in ihren Energieressourcen beschränkt, während dies für die mobilen Infrastrukturobjekte der Fall sein kann.

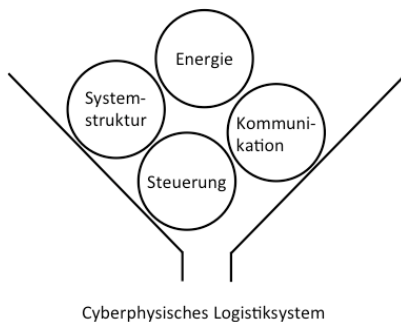


Abbildung 6. Neue Anforderungen an die Modellierung bei der Abbildung cyberphysischer Logistiksysteme

Die Abbildung zeitlicher Aspekte ist Teil der Modellierung des Gesamtsystems und ermöglicht die Analyse der Echtzeitfähigkeit des Systems sowie die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit. Abbildung 7 zeigt die drei untergeordneten Modellebenen, aus denen das Gesamtmodell besteht. Das Logistikmodell orientiert sich an existierenden logistischen Simulationswerkzeugen, so dass eine spätere Validierung und praktische Nutzung ermöglicht wird. Die betrachteten zeitlichen Aspekte sind Transportzeiten und Wartezeiten. Das Energiemodell bezieht sich auf die mobilen Objekte im Logistikmodell, die eingeschränkte Energieressourcen besitzen und bildet Energieverbrauch und -

ertrag sowie notwendige Ladezeiten ab. Dem Kommunikationsmodell kommt eine besondere Bedeutung zu, da die gesamte Steuerung des Systems durch Nachrichtenübertragungen geregelt wird. Die Lagerverwaltung und die Materialflusssteuerung sind durch standardisierte Protokolle abgebildet und ermöglichen eine vollständige Dezentralität. Das Netzwerkmodell bildet die technische Grundlage der Kommunikationsübertragungen und bildet die zeitlichen Aspekte wie Latenzzeiten und Timeouts ab.

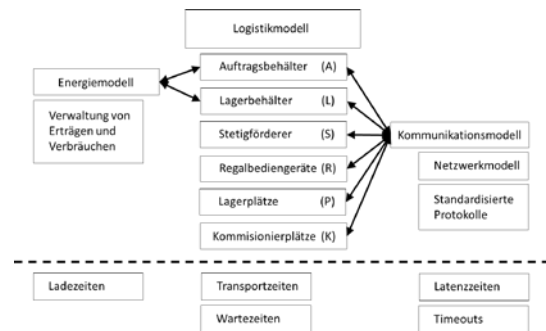


Abbildung 7. Elemente des Modells zur Abbildung von Steuerungsverhalten, Material- und Informationsfluss und die zeitlichen Einflussfaktoren

Exemplarisch wird in diesem Artikel ein System intelligenter Behälter als Kommissioniersystem auf Basis des inBin modelliert. Es gibt zwei Klassen von Behältern. Der Auftragsbehälter hat eine Liste von Artikeln gespeichert, die kommissioniert werden müssen, damit der Auftrag erfolgreich abgeschlossen werden kann. Die Lagerbehälter halten entsprechende Artikel vor. Der Kommissionierprozess sieht vor, dass Auftragsbehälter sowie die passenden Lagerbehälter zu einem Kommissionierplatz transportiert werden und dort die Artikel den Behälter wechseln und der Auftrag vervollständigt wird. Anschließend werden der Auftragsbehälter zum Warenausgang und die Lagerbehälter zurück ins Lager transportiert. Die fördernde und lagernde Infrastruktur wird von Stetigförderern, Regalbediengeräten, Lagerplätzen und Kommissionierplätzen gebildet. Alle Objekte sind mit eingebetteten Systemen ausgestattet, auf denen Agentenprogramme die Steuerung übernehmen.

Die Agenten nutzen einen gemeinsamen Funkkanal als beschränkte Ressource. Auf der Serverseite kann ein einzelnes Send- und Empfangsmodul alle intelligenten Behälter erreichen. Das Netzwerkmodell basiert auf Zeitslots mit einheitlicher Dauer. Die Dauer der Slots ist so gewählt, dass ein einzelner Kommunikationsvorgang zwischen inBin und Server abgebildet wird. Es werden von beiden Seiten Statusinformationen gesendet und empfangen.

Die hauptsächlichen Fehlerquellen bei drahtlosen Kommunikationstechniken in Bezug auf das Zeitverhalten sind unzuverlässige Kommunikationsvorgänge. Der Funk-

kanal bildet eine beschränkte Ressource, was zu Latenzzeiten bei der Übertragung von Nachrichten führen kann, die durch Sendeaktivitäten anderer inBins verstärkt werden.

Das Energiemodell verwaltet die Erträge und Verbräuche des intelligenten Behälters. Im Fall des inBins wird die Energie über Solarzellen gesammelt und zwischengespeichert. Der Energieverbrauch der Funkkommunikation dominiert alle anderen Verbräuche und führt bei der Modellierung des Energiemodells zu einer Ausrichtung auf den Energieverbrauch versendeter und empfangener Nachrichten. Durch die Energieverwaltung kann es zusätzlich zu der Beschränkung des Kommunikationsmediums und zu Verzögerungen durch eine fehlende Energieversorgung kommen. Diese Verzögerungen können sich gegenseitig verstärken, wenn die Nachrichten Teil eines multiagentenbasierten Kommunikationsprotokolls sind, welches die Systementscheidungen durch Nachrichtenbeziehungen zwischen inBins steuert. In einem solchen Fall kann es passieren, dass ein inBin auf eine Antwort wartet, die durch Kommunikationsnachrichten einer unbestimmten Anzahl weiterer inBins beeinflusst wird. Eine Möglichkeit, dieses unbestimmte Verhalten zu steuern, ist der Einsatz von Timeouts, welche die Wartezeit beschränken, in der Nachrichten von einem inBin empfangen werden. Ein Timeout muss so gewählt werden, dass genug Nachrichten den inBin erreichen können.

Auf Basis der Architektur dieses Modells können alle logistischen Prozesse dezentral durch standardisierte Kommunikationsprotokolle abgebildet werden. Diese werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.1 DEZENTRALE STEUERUNG ÜBER STANDARDISIERTE KOMMUNIKATIONSPROTOKOLLE

Die Prozesssteuerung geht von den Auftragsbehältern und Lagerbehältern aus, die sich in zwei getrennten Teilsystemen befinden und an deren Schnittstellen Kommissionierstationen positioniert sind. Die dezentrale Steuerung bedeutet, dass das exakte Layout des Logistiksystems für die Behälter nicht bekannt sein muss. Es reicht aus, dass beide Teilsysteme einem Systemstrukturmuster entsprechen. Dieses Muster gibt die Reihenfolge der Elementklassen vor, die der Behälterprozess erwartet. Insbesondere können in jedem Systemstrukturmusterschritt beliebig viele Elementinstanzen vorhanden sein. Dieses Grundprinzip der dezentralen Steuerung ermöglicht eine hochskalierbare Systemstruktur, die eine große Zahl von Layoutvarianten und Systemveränderungen ohne Neuprogrammierung ermöglicht.

Abbildung 8 zeigt das Systemstrukturmuster für den Auftragsbehälterprozess. Dieser startet in einem Lagerplatz für Auftragsbehälter (LA) und führt über Stetigfördertechnik (S) zu einem Kommissionierplatz (K), bevor der Behälter über eine weitere Stetigfördertechnik in Richtung des Ausgangs für Auftragsbehälter (AA) transportiert wird. Der Start- und der Endpunkt werden in diesem abstrakten

Muster nur als besondere Adressen für die Stetigförderelemente angenommen, an denen die Auftragsbehälter aufgegeben oder abgenommen werden.

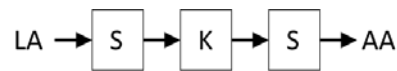


Abbildung 8. Systemstrukturmuster für den Auftragsbehälterprozess

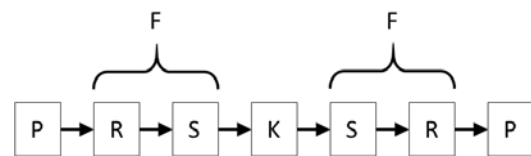


Abbildung 9. Systemstrukturmuster für den Lagerbehälterprozess

Das Systemstrukturmuster für den Lagerbehälterprozess ist in Abbildung 9 dargestellt. Ein Lagerbehälter (L) startet immer auf einem Lagerplatz (P), wird dann über Fördertechnik zum Kommissionierplatz (K) transportiert und anschließend wieder zurück auf einen Lagerplatz gebracht. Das hier beispielhaft gezeigte Systemstrukturmuster spezifiziert eine genaue Reihenfolge zwischen Regalbediengeräten (R) und Stetigfördertechnik (S). Aus Sicht der dezentralen Steuerung sind beide Elemente vollkommen gleich zu betrachten, so dass sie auch als Förderelemente (F) zusammengefasst werden könnten.

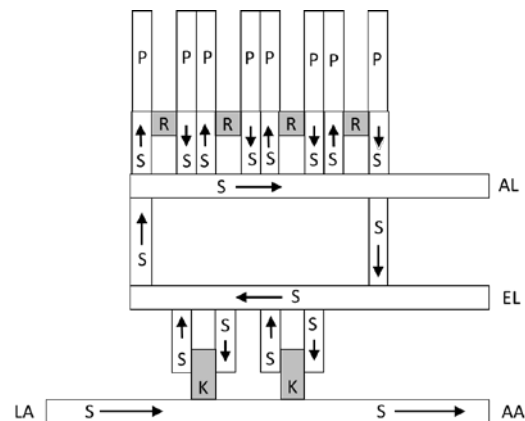


Abbildung 10. Exemplarisches Layout des betrachteten Kommissioniersystems, das die Systemstrukturmuster für Auftrags- und Lagerbehälter erfüllt (vgl. Abbildung 7 für die Legende).

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 10 ein vereinfachtes, abstraktes Logistiksystem, das die Systemstrukturmuster für Auftrags- und Lagerbehälter erfüllt. Das größere Teilsystem beinhaltet die Lagerbehälter in Lagergassen, die von Regalbediengeräten bedient werden. Eine Loop bestehend aus Stetigförderern bildet die Vorzone zur Beschickung der Kommissionierplätze. An diese Loop sind ein Eingang für neue Artikelbehälter (EL) und ein Ausgang für leere Lagerbehälter (AL) angeschlossen.

Die Auftragsbehälter steuern den Gesamtprozess, der über Auftragsanfragen von Auftragsbehälterlagerplätzen als externes Ereignis gestartet wird. Diese Lagerplätze für Auftragsbehälter dienen als Ausgangspunkt für alle weiteren Prozessschritte. Da es sich um ein dezentrales System handelt, wird der Prozessablauf durch verschiedene Kommunikationsprotokolle gesteuert, die im Folgenden beschrieben werden.

Die Diagramme orientieren sich an SysML-Sequenzdiagrammen und beschreiben die Reihenfolge der Nachrichten zwischen den intelligenten, physischen Objekten. Dabei muss beachtet werden, dass in einem dezentralen System die einzelnen Instanzen in den Sequenzdiagrammen meist mehrfach vorkommen und die Protokolle auf einfache Skalierbarkeit ausgelegt sind.

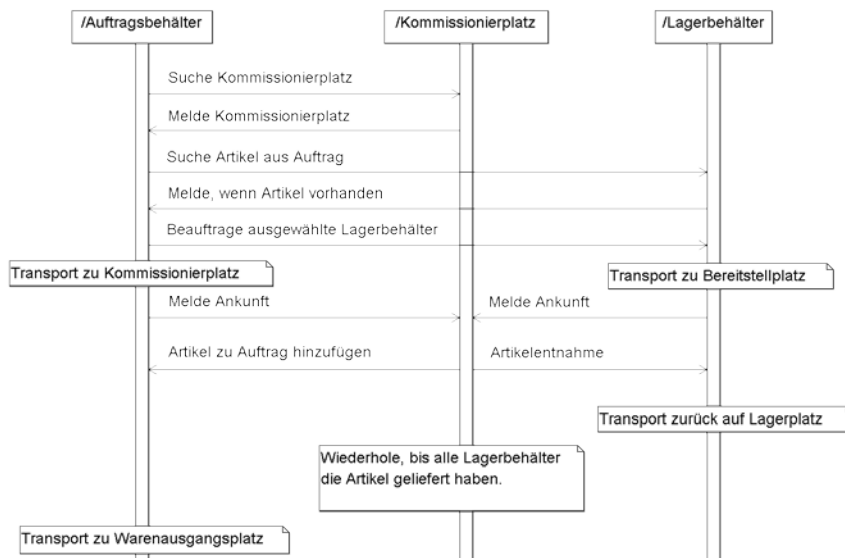


Abbildung 11. Dezentral gesteuerter Kommissionierprozess

Der Kommissionierprozess startet mit einem Broadcast des Auftragsbehälters an alle verfügbaren Kommissionierplätze (siehe Abbildung 11). Diese melden sich, sofern sie verfügbar sind, zurück und der Behälter wählt einen Zielplatz aus. Anschließend versendet er eine Anfrage an alle Lagerbehälter mit den gewünschten Artikeln und deren erforderliche Anzahl sowie dem ausgewählten Kommissionierplatz. Jeder Lagerbehälter mit einem gesuchten Artikel schickt, sofern er verfügbar ist, eine Rückmeldung an den Auftragsbehälter. Dieses Protokoll bildet eine dezentrale Lagerverwaltung nach (vgl. [JLA14]). Auf

diese Weise erhält der Auftragsbehälter eine Liste von Lagerbehältern mit den gewünschten Artikeln. Aus dieser Liste wählt er gemäß Auftragsvolumen Behälter aus und informiert diese über die Auswahl. Anschließend führen der Auftragsbehälter und alle ausgewählten Lagerbehälter den Transport zum Kommissionierplatz durch. Der Auftragsbehälter wartet so lange, bis alle Artikel kommissioniert wurden. Anschließend initiiert er den Transport zum Warenausgang.

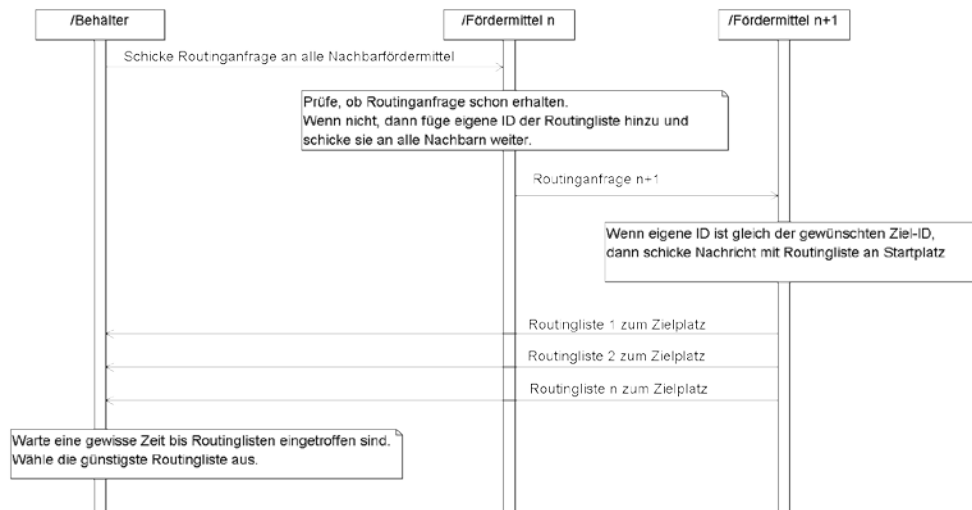


Abbildung 12. Dezentraler Routingprozess über Kommunikation zwischen benachbarten Fördermitteln

Abbildung 12 beschreibt den Ablauf des dezentralen Routingprozesses, wie er von einem intelligenten Behälter aus initiiert wird. Dazu schickt dieser eine Routinganfrage an alle Nachbarfördermittel. Diese schicken die Anfrage an die jeweils nächsten Nachbarn weiter, so dass das gesamte Materialflusssystem erkundet wird. Jedes Fördermittel erweitert die Routinganfrage, indem es seine eindeutige Identifikation an eine Liste anfügt. Diese Routingliste beschreibt zu jedem Zeitpunkt den Pfad im Materialflusssystem, welchen diese bestimmte Routinganfrage erkundet hat. Zur Vermeidung von endlosen Routinganfragen in Systemen mit zirkulären Pfaden, prüft jedes Fördermittel bei Erhalt einer Nachricht, ob es diese Routinganfrage bereits kennt. Sollte dies der Fall sein, so wird die Anfrage verworfen. Wenn eine Routinganfrage das Ziel-Fördermittel erreicht, schickt dieses eine Nachricht an den Auftragsbehälter. Dieser kann nun anhand der gespeicherten Routingliste den weiteren Transport planen. Da es sich um ein dezentral organisiertes System handelt, hat der Behälter nur unvollständiges Wissen über das Gesamtsystem. Er kann nicht wissen, ob es eine gültige Route zum Zielplatz gibt. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass mehrere Routen vorhanden sind. Aus Sicht des Behälters stellt sich dieses Problem folgendermaßen dar: Er muss zunächst auf die Rückantworten zu seiner Routinganfrage

warten. Dies kann er jedoch nicht beliebig lange beibehalten, zumal er die Anzahl der maximal möglichen Antworten nicht kennt. Er legt daher ein festes Zeitintervall fest, innerhalb dessen er auf Rückantworten wartet. Anschließend wählt er die günstigste Route aus.

Abbildung 13 zeigt die Vorbereitung des Transports durch die Reservierung von logischen Zeitslots auf den Fördermitteln der ausgewählten Route. Die Verwendung von logischer Zeit ermöglicht den deadlockfreien Transport, auch in sehr stark belasteten Materialflusssystemen (vgl. [FSF16], [SF14]). Der Behälter sendet eine Reservierungsanfrage auf Basis der ausgewählten Routingliste an das erste Fördermittel auf der geplanten Route. Dieses verwaltet eine Liste mit seiner Belegung in logischer Zeit. Es sucht den ersten freien Zeitslot und reserviert ihn für den Behälter. Anschließend sendet es die Reservierungsanfrage an das nächste Fördermittel in der Liste. Dieses sucht einen freien Zeitslot, der zeitlich hinter dem des vorhergehenden Fördermittels liegt. Somit ist sichergestellt, dass der Transport in logischer Zeit sicher stattfinden kann. Wenn der Zielplatz erreicht ist, schickt dieser die Reservierungsliste mit dem ausgewählten logischen Zeitslot zum Behälter zurück.

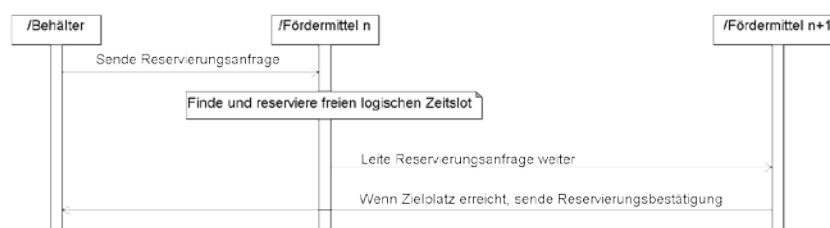


Abbildung 13. Reservierung einer ausgewählten Route mit logischer Zeit

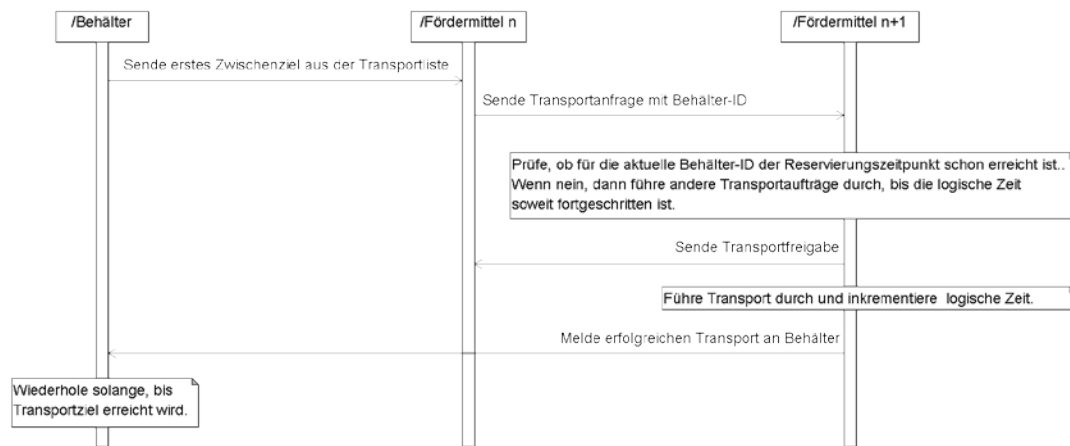


Abbildung 14. Transportprozess unter Berücksichtigung der Reservierungen und der Reihenfolgesteuerung durch logische Zeit

Damit kann der eigentliche physikalische Transport sicher durchgeführt werden. Dieser wird durch den Behälter gestartet (siehe Abbildung 14), indem er eine Transportanfrage an das nächste Ziel auf der Reservierungsliste schickt. Jedes Fördermittel verwaltet zusätzlich zu seiner Belegungsliste eine logische Uhr, deren Zeitfortschritt über die Durchführung von Transporten gesteuert wird. Erst wenn die logische Zeit des nächsten Fördermittels bis zum Reservierungszeitpunkt fortgeschritten ist, wird der Behälter weiterbefördert. Damit wird sichergestellt, dass die Reihenfolge aller Transportaufträge eingehalten wird. Sollte der benötigte logische Zeitpunkt noch nicht erreicht worden sein, werden zunächst andere Transportanfragen bearbeitet. Anschließend sendet das nächste Fördermittel eine Freigabe und der Transportschritt wird physisch durchgeführt. Danach wird erneut die logische Zeituhr inkrementiert und der erfolgreiche Transport dem Behälter gemeldet. Dieser kann nun den nächsten Transport auf der Reservierungsliste anstoßen, bis der Zielplatz erreicht wurde.

6 AUSWIRKUNG DER KOMMUNIKATION AUF DIE LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Wie aus den Sequenzdiagrammen des vorherigen Abschnitts zu erkennen, bildet jede einzelne Auftragsabwicklung eine exakt spezifizierte Folge von Kommunikations- und Transportvorgängen, die verschiedene Ressourcen, das Netzwerk und die Fördererlemente, exklusiv für ein bestimmtes Zeitintervall verwenden. Für die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit sind die genauen Leistungswerte der einzelnen Fördererlemente und des Netzwerks nicht relevant. Ausschlaggebend sind die relativen, zeitlichen Unterschiede zwischen Kommunikationszeiten und Transportzeiten. Erst wenn die relativ kurzen Kommunikationszeiten einen Einfluss auf die Transportzeiten ausüben, wird auch die Leistungsverfügbarkeit maßgeblich beeinflusst (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Wenn von einem generellen Verhältnis von Kommunikationszeit pro Nachricht zu Transportzeit pro Fördererlement von 1:10 ausgegangen wird, bedeutet dies, dass das Gesamtzeitverhalten von der physischen Transportzeit dominiert wird (vgl. [REM14], [MLA14]). Es sind daher die Ereignisse und Umstände zu betrachten, welche die Kommunikation soweit verzögern, dass sie die physische Transportzeit beeinflussen. Dazu gehören:

- Verzögerungen durch Überlastung des Kommunikationsmediums bzw. der Kommunikationsinfrastruktur
- Verzögerungen durch Ausfall der Energieversorgung der intelligenten Behälter und dem dabei einhergehenden Ausfall der Kommunikationsfähigkeit
- Verzögerungen durch dezentrale Kommunikationsprotokolle.

Die Verzögerungen durch die Überlastung des Kommunikationsmediums werden durch eine große Anzahl an aktiv kommunizierenden Logistikobjekten verursacht. Die verwendete Infrastruktur bestimmt die Leistungsfähigkeit des Kommunikationssystems, d. h. wie leistungsfähig sind Sender und Empfänger, wie viele Kanäle stehen zur Verfügung und wird eine zentrale Sende- und Empfangseinrichtung verwendet oder dezentral von Lagerbehälter zu Lagerbehälter kommuniziert?

Die Funkkommunikation macht bei intelligenten Behältern den Hauptteil des Energieverbrauchs aus. Ein Ausfall der Energieversorgung bedeutet auch den Wegfall der Kommunikationsfähigkeit und in der Folge eine Verzögerung des Logistikprozesses. Durch Energy-Harvesting kann erneut Energie gewonnen werden, was jedoch weitere Zeit kostet. Insbesondere führt eine Verzögerung während des Transportprozesses zu einer Blockade des Fördererlementes und damit zu einer potenziellen Verzögerung für

eine große Anzahl an anderen Transportvorgängen. Es sollte daher bereits vor Start des Transportprozesses sichergestellt werden, dass ein Behälter genug Energie für die Durchführung des vollständigen Prozesses zur Verfügung hat.

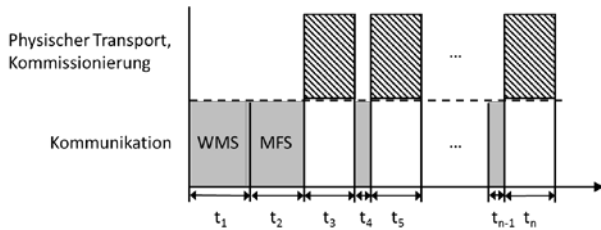


Abbildung 15. Zeitlicher Ablauf eines Auftragsprozesses

Die Verzögerung durch dezentrale Kommunikationsprotokolle lässt sich gut am Beispiel des dezentralen Kommissionierprozesses (siehe Abbildung 11) beschreiben. Der Auftragsbehälter fragt hier in einem Broadcast nach verfügbaren Artikeln im Lager. Er muss dann aber für eine Zeit lang auf Antworten warten, da er kein weiteres Wissen über die Lagerbehälter hat. Daher ist es aus Sicht des Auftragsbehälters unmöglich zu bestimmen, wann genau dieser Abfrageprozess vollständig abgeschlossen ist. Diese unbestimmte Wartezeit ist ein Beispiel für eine zeitliche Verzögerung, die auch den gesamten Logistikprozess verzögern kann, insbesondere, wenn eine große Zahl von Lagerbehältern befragt wird.

Von den drei genannten Verzögerungsarten lässt sich die letztere nur bedingt verhindern, wenn eine vollkommen flexible Steuerung erwartet wird, die mit jeglicher Art von Änderung im System zurechtkommt. In der Realität gibt es jedoch eine Obergrenze im physischen Bereich des Lagerlayouts. Im Fall der Artikelabfrage kann der Timeout so gewählt werden, dass die maximal mögliche Anzahl an antwortenden Lagerbehältern berücksichtigt wird. Zusätzlich könnte das Timeout weiter reduziert werden, wenn aufgrund der zu erwartenden Artikelstruktur ein statistischer Wert für die zu erwartende Anzahl an Antworten berechnet wird.

Die Verzögerung durch Überlastung der Kommunikationsinfrastruktur lässt sich am schwierigsten bestimmen, da hier eine Vielzahl von internen wie externen Parametern eine Rolle spielt. Sie beeinflusst jedoch die beiden anderen Verzögerungsarten, insbesondere den Energieverbrauch der mobilen Behälter.

Die Kommunikationslast, die ein einzelner Auftragsprozess erzeugt, wird im folgenden Abschnitt abgeschätzt. Über eine Analyse der Systemstruktur kann die maximale Anzahl an Auftragsbehältern, die sich gleichzeitig in der Auftragsbearbeitung befinden, bestimmt werden. So wird eine Bestimmung der maximalen Kommunikationslast im System möglich. Über das Netzwerkmodell kann die technische Auswirkung analysiert werden. Die Leistungsver-

fügarkeit des Systems kann durch eine anforderungsge- rechte Auslegung der technischen Netzwerk- und Energie- komponenten beeinflusst werden.

6.1 BERECHNUNG DER KOMMUNIKATIONSVORGÄNGE EINES AUFTRAGSPROZESSES

Die Objektklassen des bereits beschriebenen einheitlichen Modells werden in der folgenden Betrachtung als Mengen angesehen: die Auftragsbehälter A, die Lagerbehälter L, die Stetigförderer S, die Regalbediengeräte R, die Kommissionierplätze K sowie die Lagerplätze P. Die Anzahl von Nachrichten, die ein Auftragsprozess generiert, kann als Zählung aller Nachrichten n_{gesamt} für die Kommunikationssteuerung des Warehousemanagementsystems WMS und der Materialflusssteuerung MFS dargestellt werden:

$$n_{gesamt} = n_{WMS} + n_{MFS}$$

Die Anzahl n_{WMS} aller Nachrichten für die Steuerung des WMS ergibt sich aus den Sequenzdiagrammen in Abbildung 21 und Abbildung 11:

$$n_{WMS} = n_{Kommplatzauswahl} + n_{Lager} + n_{Kommissionierung}$$

Die Auswahl eines Kommissionierplatzes hängt von der Anzahl der Kommissionierplätze s_K ab und ergibt sich durch:

$$n_{Kommplatz} = 1 + s_K$$

Die Anzahl n_{Lager} der Nachrichten zur Auswahl der Lagerbehälter hängt von der Artikelstruktur im Lager und der Zusammensetzung der Picklisten ab:

$$n_{Lager} = 1 + n_L + n_{L_{gewählt}}$$

Für die Anzahl n_L aller Lagerbehälter, die sich auf eine Pickposition zurückmelden, da sie den Artikel beinhalten, sowie für die Anzahl $n_{L_{gewählt}}$ der ausgewählten Lagerbehälter gilt:

$$n_{L_{gewählt}} \leq n_L \leq s_L$$

mit s_L als Gesamtzahl aller Lagerbehälter. Im theoretisch ungünstigsten Fall melden sich alle Lagerbehälter und es werden alle Lagerbehälter ausgewählt. Eine präzisere Bestimmung kann durch die Spezifikation logistischer Rahmenbedingungen erfolgen (siehe Tabelle 1). Das maximale Fassungsvermögen eines Auftragsbehälters bestimmt die maximale Zahl von Lagerbehältern, die pro Pickposition ausgewählt werden. Genauso wichtig ist die maximale Zahl von Pickpositionen pro Auftrag, die bestimmt, wie viele Lagerbehälter mindestens benötigt werden.

Tabelle 1. Einflussfaktoren auf die Anzahl an Lagerbehältern n_L , die sich auf eine Artikelabfrage zurückmelden und ausgewählt werden

Einflussfaktor	Beschreibung
Artikelreichweite	Die maximale Reichweite eines Artikels im Lager bestimmt Anzahl von Artikeln in Lagerbehältern, die zur Auswahl stehen.
Lagerbehältervolumen	Beeinflusst die mögliche Zahl von Artikeln pro Behälter
Artikelvolumen	Beeinflusst die mögliche Zahl von Artikeln pro Behälter
Anzahl Pickpositionen pro Auftrag	Bestimmt die Anzahl von Lagerbehälter unterschiedlicher Artikel, die ausgelagert werden.
Stückzahl pro Pickposition	Beeinflusst die maximale Zahl von Lagerbehältern, die pro Artikel ausgelagert werden

Der letzte Teil der Berechnung des Kommunikationsaufwands für das WMS bezieht sich auf den Kommissionierungsvorgang. Hier wird den Lagerbehältern mitgeteilt, wie viele Artikel entnommen und dem Auftragsbehälter gutgeschrieben wurden:

$$n_{\text{Kommissionierung}} = 3n_{L_{\text{gewählt}}}$$

Damit ist die Bestimmung des Kommunikationsaufwands für das dezentrale WMS abgeschlossen. Es folgt die Betrachtung des Kommunikationsaufwands der MFS:

$$n_{\text{MFS}} = 2n_{\text{Transport}} + 2n_{L_{\text{gewählt}}}n_{\text{Transport}}$$

Der Transportvorgang wird für beide Teilsysteme gleich berechnet, jedoch müssen die jeweils korrekten Teilmengen der Fördertechnik eingesetzt werden:

$$n_{\text{Transport}} = n_{\text{Routing}} + n_{\text{Reservierung}} + n_{\text{Bewegung}}$$

Das Routing ist ein grundlegender Bestandteil dezentraler Steuerung, da es kein Vorwissen über das Transportnetzwerk erfordert. Durch ein Fluten der Systemstruktur entlang der Fördertechnik wird die aktuelle Struktur des Systems zur Laufzeit erkundet. Das Routing orientiert sich an einer dezentralen Version des Dijkstra-Algorithmus zum Finden der kürzesten Wege. Die komplexen Interaktionen werden als Funktion dargestellt, die von der Anzahl der Infrastrukturobjekte und deren Layout abhängt:

$$n_{\text{Routing}} = f(S_S, S_R, S_P, S_K)$$

Der minimale Rückgabewert der Funktion besteht in der Anzahl aller Förderelemente im Teilsystem, da durch das Fluten jedes Förderelement garantiert eine Nachricht empfängt.

Wenn es aufgrund des Layouts mehr als einen Weg zum Ziel gibt, kann es vorkommen, dass durch ungünstige Kommunikationssequenzen weitaus mehr Nachrichten versendet werden. Eine obere Grenze für den Rückgabewert der Funktion kann für ein gegebenes Layout statisch berechnet werden. Am Ende des Routingprozesses steht die ausgewählte Route mit einer Anzahl n_{Route} an Förderelementen fest.

Entlang der Route werden die Förderelemente reserviert:

$$n_{\text{Reservierung}} = n_{\text{Route}}$$

Anschließend wird die physische Bewegung des Behälters durchgeführt:

$$n_{\text{Bewegung}} = 4n_{\text{Route}}$$

Die für den eigentlichen Transportvorgang benötigten Nachrichten werden lokal zwischen dem Behälter und den beteiligten Förderelementen ausgetauscht (siehe Abbildung 14).

Die beschriebene Berechnungsvorschrift kann als Grundlage für die Auslegung der Netzwerkinfrastruktur verwendet werden, so dass eine echtzeitfähige Kommunikation möglich wird. Für die notwendige Worst-Case-Betrachtung der Kommunikationslast ist damit keine Simulation des betrachteten Systems erforderlich. Für die Funkkommunikation kann heuristisch so geplant werden, dass relevante Verzögerungen sehr unwahrscheinlich werden.

6.2 EINFLUSS DER ENERGIEVERSORGUNG AUF DIE KOMMUNIKATIONSFÄHIGKEIT

Die Pünktlichkeit eines einzelnen Auftrags wird maßgeblich dadurch bestimmt, ob alle Behälter genug Energie zur Durchführung des gesamten Transportprozesses haben, da die Kommunikationsvorgänge den Energieverbrauch dominieren. Wenn aufgrund von Energiemangel die Kommunikationsfähigkeit nicht mehr gegeben ist, stoppt einerseits der Transportprozess eines einzelnen Behälters, aber auch der aller weiteren Behälter, die dasselbe Förderelement befahren. Erst wenn genug Energie aufgenommen wurde, so dass wieder kommuniziert werden kann, läuft der Prozess für alle Behälter weiter. Dies bedeutet, dass unter ungünstigen Bedingungen die Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems stark beeinflusst wird, da die Termine mehrerer Aufträge betroffen sein können.

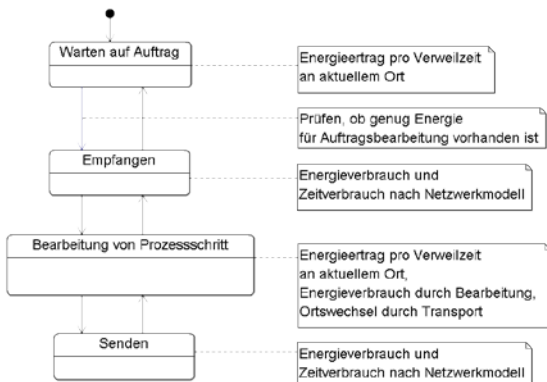


Abbildung 16. Auftragsbezogenes Energiemodell für intelligente Behälter

Eine Analyse lässt sich anhand der verwendeten Kommunikationsprotokolle gut durchführen, da durch diese genau bekannt ist, wie viele Nachrichten ein Behälter senden und empfangen muss. In der betrachteten Fallstudie kann durch die Reservierung der Route mit Hilfe von logischen Uhren der Gesamtverbrauch an Energie prinzipiell auch im laufenden Betrieb bestimmt werden.

Über die Verwendung des Kommunikations- und Energiemodells im Steuerungsprogramm kann der Behälter während des Routing- und Reservierungsprozesses eine Energieverbrauchsabschätzung erstellen (siehe Abbildung 16). Durch die Reservierung mit logischen Uhren wird der Energieertrag durch den jeweiligen Standort des Behälters sowie die Verweilzeit bestimmt. Je länger ein Behälter in Realzeit warten muss, desto mehr Energieertrag ergibt sich. Die Echtzeitfähigkeit eines Transportauftrags kann somit von einem Behälter nach der Auswahl einer geeigneten Route vorherbestimmt werden, wenn den einzelnen Transportschritten, die in logischer Zeit reserviert worden sind, geeignete Realzeiten zugeordnet werden. Solange der Behälter genug Energiereserven für den Transportauftrag bereitstellen kann, ist ein vorhersehbarer Ausfall der Energieversorgung ausgeschlossen.

7 ALGORITHMUS ZUR ECHTZEITFÄHIGEN AUFTRAGSDISPOSITION UND SICHERSTELLUNG DER SPEZIFIZIERTEN LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Wenn die Kommunikationsinfrastruktur echtzeitfähig ausgelegt wurde, bestimmt der physische Transportprozess maßgeblich das zeitliche Verhalten des Auftrags. Zu betrachten ist die maximale Anzahl an gleichzeitigen Transportaufträgen, da die Wartezeit auf andere Auftragsprozesse die Pünktlichkeit des Auftrags bestimmt. Im ungünstigsten Fall muss ein Behälter auf jeden zeitgleichen Transportauftrag auf seiner Route warten, bevor er weiterfahren kann. Dies ist die maximal mögliche Verzögerung für den Behälter.

Das hier vorgestellte Konzept für eine echtzeitfähige Auftragsdisposition ermöglicht eine Planung für ein Lager-system mit einer vorher spezifizierten Leistungsverfügbarkeit. Es basiert auf der Grundannahme, dass eine Einhaltung sämtlicher Termine aller Aufträge nur dann erreicht werden kann, wenn für jede einzelne Teiloperation einer Auftragsdurchführung die jeweils schlechteste, aber dafür garantierte Laufzeit angesetzt wird. So kann die notwendige Dispositionszeit kalkuliert werden, die eine rechtzeitige Ausführung des Auftrags in jedem Fall garantiert.

Kern des Konzeptes ist eine Änderung der Reservierungsstrategie für Fördererelemente. Anstatt die Reservierung erst durchzuführen, wenn ein Auftrag bereits disponiert wurde, wird die Reservierung vom Zielort aus rückwärts zur Quelle durchgeführt, sobald der Auftrag dem System bekannt ist. Hierbei wird der Transportprozess rückwärts durchlaufen und der Weg über die logischen Zeitslots auf den Fördererelementen reserviert. Dies ermöglicht eine garantierte Reihenfolge beim späteren physischen Transport zum Zielort. Gleichzeitig zur Reservierung mit logischer Zeit werden laufend alle realen Zeiten, wie etwa Förderzeiten und Wartezeiten, aufaddiert, so dass am Ende der Reservierung eine garantierte Route mit realer Zeitverbrauch als Ergebnis geliefert wird. Mit dieser Information kann für jeden Auftrag ein geeigneter Dispositionszeitpunkt festgelegt werden.

Das grundlegende Problem, welches durch dieses Konzept gelöst wird, ist der Umgang mit Unwägbarkeiten in den Wartezeiten, die durch Interdependenzen zwischen mehreren Aufträgen verursacht werden. Durch die Reservierung mit logischer Zeit können die gegenseitigen Störungen während des physischen Transports sowie bei der Kommunikation genauer bestimmt werden. Für jeden Auftrag wird so die Gesamtbelastung des Systems mit Aufträgen berücksichtigt.

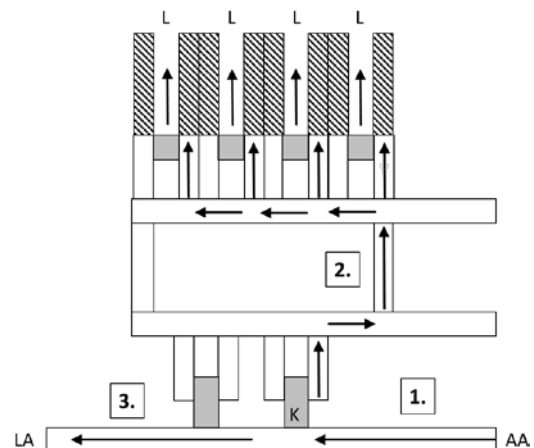


Abbildung 17. Ablauf der Kommunikationsprozesse für eine rückwärtsgerichtete Reservierung der Fördererelemente zur Bestimmung des korrekten Dispositionszeitpunkts

Durch die Aufnahme sämtlicher Funktionen, die für den Transportauftrag benötigt werden, ist nicht nur eine

zeitlich garantierte Erfüllung möglich, sondern ein Behälter kann auch den benötigten maximalen Energieverbrauch berechnen. So ist es möglich, dass ein Behälter Aufträge ablehnen kann, wenn der Energieverbrauch höher ist als die aktuell gespeicherte Energie. Dies verhindert eine Blockade des Systems durch Ausfall der Energieversorgung eines Behälters während des Transports.

Der Kommunikationsprozess wird für einen Auftragsbehälter dahingehend geändert, dass dieser zuerst einen Warenausgang sucht und auswählt und dort zum Zieltermin in Realzeit bucht. Diese Buchung wird in die Liste aller Buchungen in logischer Zeit am Warenausgangsort eingeordnet, anschließend wird von dort aus der Reservierungsprozess gestartet. Damit später ein koordinierter Transport möglich wird, muss in logischer Zeit mit absteigenden Zeitstempeln reserviert werden. Der anschließende Transport kann dann wie bislang mit aufsteigenden Zeitstempeln durchgeführt werden. Dazu wird der logische Zielzeitstempel soweit in die Zukunft gelegt, dass bei absteigender Reservierung ein geeigneter logischer Startzeitpunkt möglich ist.

Das verwendete Kommunikationsprotokoll setzt im existierenden Protokoll bei dem Prozessschritt an, an dem bereits die Lagerbehälter und der Kommissionierplatz bestimmt worden sind (siehe Abschnitt 5.1, insbesondere Abbildung 11). Der Prozess startet am Warenausgang mit einem rückwärtsgerichteten Routing des Auftragsbehälters zum Kommissionierplatz. Von dort aus werden mehrere Routings zu den Lagerbehältern durchgeführt und anschließend ein Routing vom Kommissionierplatz zum Leerbehälterlagerplatz vollzogen. Alle Routingdurchläufe speichern in der Routingliste auch den aktuellen Wert der logischen Uhr der jeweiligen Fördererlemente. Die kürzesten Strecken werden anschließend zum Warenausgang gesendet, der nun die Gesamtanzahl an Fördererlementen bestimmen kann, die reserviert werden müssen und er erhält Auskunft über den Stand aller beteiligten logischen Uhren.

Mit dieser Information ist nun eine Bestimmung einer geeigneten logischen Zeit möglich, mit welcher der rückwärtsgerichtete Reservierungsprozess am Warenausgang starten kann. Dieser arbeitet die geplante Route rückwärts Schritt-für-Schritt an den Fördererlementen entlang und reserviert diese mit absteigender logischer Zeit so, dass später eine gültige Reservierung entlang der Route entsteht. Es wird daher immer sichergestellt, dass der bereits reservierte Teil der Route aktualisiert wird, wenn ein Konsistenzproblem entsteht, wie zum Beispiel unmögliche Reservierungsanfragen. In diesem Fall werden alle logischen Reservierungen vom Konfliktpunkt bis zum Warenausgang neu reserviert. Dies garantiert eine jederzeit gültige Reservierung von Aufträgen.

8 ANALYSE- UND SIMULATIONSWERKZEUGE

Die Analyse der Echtzeitfähigkeit wird über zwei Wege verfolgt. Zum einen kann die Leistungsverfügbarkeit mit Hilfe von Simulationsexperimenten für verschiedene Systemvarianten bestimmt werden, indem die Pünktlichkeit der Aufträge gemessen wird. Zum anderen ermöglicht die Analyse des Logistik-, Energie- und Netzwerkmodells eine Aussage über das Worst-Case-Verhalten des abgebildeten Systems.

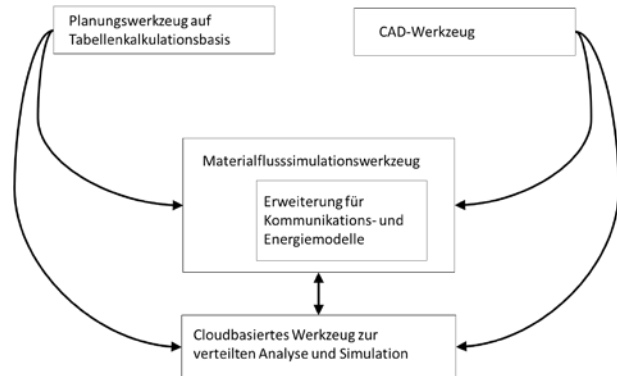


Abbildung 18. Übersicht der Simulations- und Analysewerkzeuge

Es werden mehrere Werkzeuge verwendet, die miteinander verkettet sind. Abbildung 18 zeigt den Zusammenhang der Werkzeugkette. Das Planungswerkzeug auf Tabellenkalkulationsbasis ermöglicht eine einfache Erstellung eines Groblayouts des zu planenden Systems (siehe Abbildung 19). Über Eintragungen in die Zellen lassen sich Struktur und Typ der Fördertechnik auf einfachste Weise verändern. Ein so erstelltes Layout wird anschließend automatisch in das Simulationswerkzeug geladen und als 3D-Modell generiert (siehe Abbildung 20). Als Simulationswerkzeug ist eine auf Materialflusssimulationen spezialisierte Software vorgesehen, die um die Abbildung der Kommunikations- und Energiemodelle erweitert wurde (vgl. [Ele12], [VDI3633-1]). Im Rahmen der Arbeiten wurde das Programm Demo3D verwendet.

Jeder Zelle in der Tabellenkalkulation wird ein Typ zugewiesen, der eine eigene logistische Funktion bereitstellt. Die Modellierung in einer Tabellenkalkulation hat den Vorteil, dass sehr schnell Änderungen und Varianten von Systemlayouts generiert werden können. Anschließend werden die Layouts in ein Dateiformat für das eigentliche Simulationswerkzeug generiert. Während der Generierung werden die einzelnen Module mit vollständiger Intelligenz ausgestattet. Die Logik wird in Form von vernetzten Zustandsautomaten generiert, die als Multiagentensystem den Logistikprozess steuern.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
7	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
8	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
9	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
10	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
11	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
12	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
13	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
14	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
15	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
16	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
17	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
18	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P	G	P	P						
19		RGB	v		RGB	v		RGB	v		RGB	v							
20	>																		
21	>																		
22	>																		
23	>																		
24	>																		
25	>																		
26	>																		
27	>																		
28	>																		
29	<																		
30	<																		
31	<																		
32	<																		
33	<																		
34																			
35	LA	>																	AA
36																			
37																			

Abbildung 19. Planungswerkzeug auf Tabellenkalkulationsbasis (Legende: P = Lagerplatz, G = Gasse, RGB = Regalbediengerät, LA = Lager für Auftragsbehälter, KA = Kommissionierplatz für Auftragsbehälter, KE = Kommissionierplatz für die Entnahme, KR = Kommissionierroboter, K = Kommissionierer, E = Eingang, A = Ausgang, L = Leerbehälterausgang, ><^v = Stetigförderer)

Das Hochregal mit den Regalbediengeräten besteht aus den Typen P für Lagerplatz, G für Gasse und RGB für Regalbediengerät (siehe Bereich A7:M19). Die Vorzone besteht aus gerichteten Stetigförderern, sowie dem Lagerbehältereingang EL und den Kommissionier-Entnahmestellen KE (siehe Abbildung 19, Bereich A19:R33). Das kleinere System, welches vom Lagerplatz für Auftragsbehälter LA über zwei Kommissionierauftragsplätze KA zum Auftragsausgang AA führt, befindet sich in Zeile 35.

Abbildung 20 zeigt das aus der Tabellenkalkulation generierte 3D-Modell des Logistiksystems. Die Kombination aus abstrakten Elementen (farbige Quader) und detaillierten, animierten 3D-Modellen demonstriert die Substitutionsfähigkeit der Werkzeuge. Es können jederzeit ohne Aufwand Elemente getauscht werden, sowohl im Planungswerkzeug, als auch im Simulationswerkzeug.

Als weitere Möglichkeit ein Grundlayout zu importieren, ist vorgesehen CAD-Zeichnungen zu unterstützen. Im Gegensatz zur schnellen Layout-Grobplanung mit einer Tabellenkalkulation, die in ihrer Layoutflexibilität durch die Matrixanordnung beschränkt ist, kann über das CAD-Programm ein wirklichkeitsgetreues Abbild eines Logistiksystems erzeugt werden. Grundsätzlich gilt für beide Importmethoden, dass autonome Module und ihre Nachbarschaftbeziehungen beschrieben sowie die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Systemstrukturmuster eingehalten werden müssen, damit ein neues Layout ohne Neuprogrammierung simuliert werden kann.

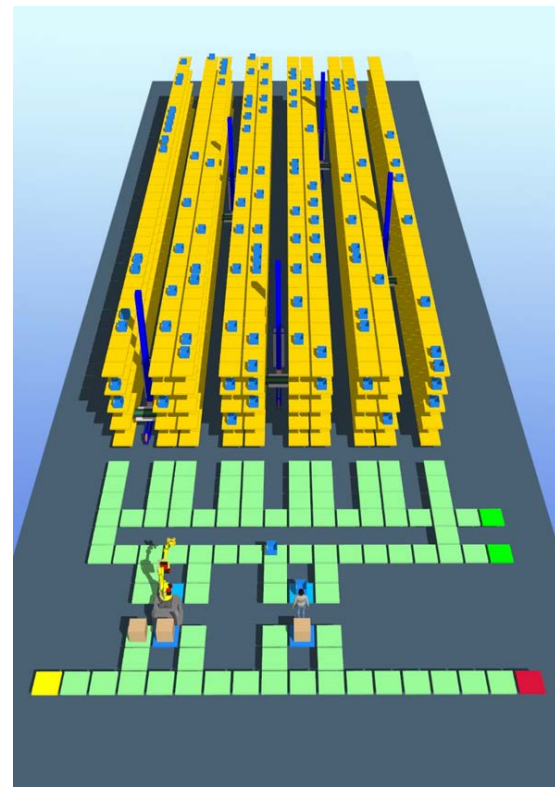


Abbildung 20. Automatische Generierung des 3D-Simulationsmodells aus den Eingabedaten des Planungswerkzeugs

Das Demo3D-Werkzeug ist um die zuvor beschriebene Netzwerkarchitektur erweitert worden. Zur Abbildung der Multiagentenkommunikation wird ein Netzwerkobjekt erstellt, durch das alle Nachrichten verteilt werden (z. B. zwischen inBins und Förderern). Die Nachrichten sind als Property-Maps modelliert, die Sender und Empfänger sowie den Nachrichtentyp enthalten. Dazu können beliebige weitere Nutzdaten gespeichert werden. Das Netzwerk verwendet einen Lookup-Table mit allen registrierten Agenten und bietet zwei Dienste zur Kommunikation über Skriptfunktionen an: das einfache Senden einer Nachricht zwischen zwei Agenten (one-to-one) und einen Broadcast (one-to-many). Diese Funktionen können von den Agenten in einer nicht-blockierenden Weise aufgerufen werden, so dass die Nachrichten unabhängig vom Netzwerk verarbeitet werden können, während das Agentenprogramm weiterläuft. Das Netzwerkobjekt kann davon unabhängig eine Latenzzeit hinzufügen, nach der die Nachricht an den Empfänger zugestellt wird. Während der Latenzzeit wird der Property-Table im Netzwerkobjekt gespeichert. Die Zustellung erfolgt über einen Skriptaufruf beim Empfängerobjekt.

Der Vorteil, ein zentrales Netzwerkobjekt in der Simulation zu verwenden, liegt in der Möglichkeit, die Kommunikation zu visualisieren und damit die Kombination aus Materialfluss und Informationsfluss sichtbar zu machen. Dies kann bei der Fehlersuche Unterstützung bieten, um

die korrekten Interaktionen zwischen physischen und virtuellen Agenten abzubilden.

In Abbildung 21 wird der Auftragsbearbeitungsprozess gezeigt, der als übergeordnetes System die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit durchführt. Diese wird über die Bearbeitung von Aufträgen, die mit einer Startzeit und geplanten Endzeit in das System eingehen, durchgeführt. Eine Besonderheit ist die Auftragsverwaltung, die ein einziges Mal im System existiert.

Beim Start der Simulation werden die Aufträge aus einer Datenbank eingelesen. Anschließend wartet die Auftragsverwaltung auf Anfragen von Leerbehälterlagerplätzen. Auf eine Auftragsanfrage antwortet die Verwaltung

mit einem eindeutigen Kommissionierauftrag. Daraufhin erzeugt der Leerbehälterlagerplatz einen intelligenten Behälter, der initialisiert wird und den Auftrag selbst weiterführt. Der Behälter wartet auf die Startzeit, führt den Kommissionierauftrag durch und lässt sich zum Warenausgang transportieren. Dort meldet er sich ab und die Ankunftszeit wird gespeichert, so dass die Pünktlichkeit des Auftrags berechnet werden kann. Die Leistungsverfügbarkeit entspricht dem Grad der Aufträge, deren Durchlaufzeit innerhalb des geplanten Zeitintervalls liegt. Anschließend wird der Behälter aus dem Simulationsmodell entfernt.

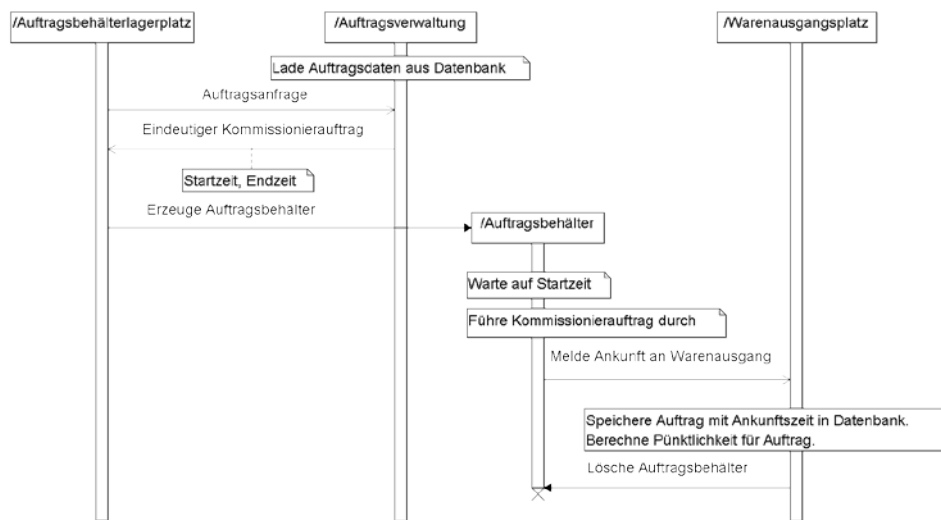


Abbildung 21. Auftragsbearbeitungsprozess im Simulationswerkzeug mit Aufnahme der Pünktlichkeit zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit

Das Energiemodell wird pro Förderelement verwaltet. Im Tabellenkalkulationswerkzeug kann für jeden Förderertyp ein Wert für die Umgebungslichtstärke in Lux definiert werden. Dieser wird anschließend von der Energieverwaltung der intelligenten Behälter für die Berechnung des Energieertrags verwendet. Die Parameter für typische Energieertragswerte und Lichtstärken wurden durch Versuche mit dem inBin-Demonstrator in realistischen Lagerumgebungen gemessen.

Die analytischen Methoden werden im Simulationswerkzeug implementiert. Sie nutzen die internen Datenstrukturen des entwickelten Modells ohne eine Simulation, d.h. einen Zeitfortschritt, durchzuführen. Der Grund liegt in dem Vorteil der Verwendung des gemeinsamen Datenmodells. Jede Änderung des Modells hat direkte Auswirkungen auf die simulativen und analytischen Funktionen. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist gewährleistet.

9 FAZIT UND AUSBLICK

Der Artikel macht deutlich, warum es anzustreben ist das Verständnis und die Berechnungsgrundlagen für Leistungsverfügbarkeit über den Stand der Technik der VDI 4486 zu erweitern. Das Beispiel der Planungsaufgabe eines Lagersystems für intelligente Behälter zeigt die Notwendigkeit der Betrachtung der Echtzeitfähigkeit auf Komponentenebene sowie auf der Auftragsebene moderner Intra-logistiksysteme. Eine Betrachtung des Verhältnisses von Echtzeitfähigkeit und Leistungsverfügbarkeit zeigt die nahe Verwandtschaft beider Begriffe auf. Mit Hilfe von standardisierten Kommunikationsprotokollen für eine dezentrale Lagerverwaltung und Materialflusssteuerung wird gezeigt, dass ein hochflexibles und hochskalierbares Intra-logistiksystem umsetzbar ist. Die Verwendung von logischer Zeit in der Reservierungsstrategie ermöglicht eine verlässliche dezentrale Koordination der nebenläufigen Logistikprozesse. Auf Basis dieser dezentralen Architektur wird ein Algorithmus beschrieben, der eine dezentrale Bestimmung des Dispositionszeitpunktes ermöglicht, der so

gewählt wird, dass eine Termineinhaltung aller Aufträge garantiert ist. Damit wird die vertragssichere Planung eines dezentral gesteuerten Lagersystems auf eine spezifische Leistungsverfügbarkeit hin ermöglicht.

Die gestiegenen Anforderungen dezentraler Logistiksysteme werden anhand des Konzeptes des intelligenten Behälters betrachtet und insbesondere die daraus folgende Zunahme der Komplexität aufgrund der Nutzung drahtloser Funkübertragung bei eingeschränktem Kommunikationsmedium und beschränkter Energieversorgung gezeigt. Im Weiteren wird ein simulationsbasiertes Werkzeug vorgestellt, das die Leistungsverfügbarkeit für Systeme intelligenter Behälter simulieren, analysieren und berechnen kann. Im Fokus stehen die Simulation der Kommunikation und des notwendigen Energy-Harvestings sowie die vollständige Steuerung des Materialflusses durch dezentrale Steuerungsalgorithmen über standardisierte Kommunikationsprotokolle.

Ein erweitertes Konzept sieht vor, dass die Analyse- und Simulationsfunktionen in eine Cloud-Architektur übertragen werden (siehe Abbildung 18). Dies eröffnet eine weitere Nutzungsmöglichkeit für die entwickelten Methoden im laufenden Betrieb und in größeren vernetzten Supply-Chain-Systemen. Das Ziel ist die Integration der Planungsmethoden in die Soft- und Hardwarearchitektur von Industrie 4.0-Systemen. Somit wird die kontinuierliche Simulation verschiedener Szenarien eines laufenden Systems auf Basis von eingehenden Echtzeitdaten ermöglicht. Prinzipiell eignet sich die dezentrale Steuerungsarchitektur gut für den Einsatz in hochskalierten, verteilten Ausführungsumgebungen von modernen Rechenzentren (z.B. Amazon AWS, Microsoft Azure, oder ähnliche Cloud-Architekturen).

10 DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung entstand im Teilprojekt C5 „Realtime Logistics“ im Rahmen des Paketantrags PAK 672 „Leistungsverfügbarkeit - Logistics on Demand“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

LITERATUR

- [Ele12] Eley, M.: *Simulation in der Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer Gabler Verlag, 2012.
- [FSF16] Fuß, B.; Seibold, Z.; Furmans, K.: *Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit eines modularen Sorters*. Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2016.
- [Hei16] Bager, Jo.: *Prime Now: Amazon startet 1-Stunden-Lieferung in Berlin*.

<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Prime-Now-Amazon-startet-1-Stunden-Lieferung-in-Berlin-3203174.html>

Abgerufen am: 29.05.2016

- [HKR14] Hegmanns, T.; Kuhn, A.; Roidl, M.; Schieweck, S.; ten Hompel, M.; Güller, M.; Austerjost, M.; Roßmann, J.; Eilers, K.: *Planung und Berechnung der systemischen Leistungsverfügbarkeit komplexer Logistiksysteme*. Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2014.
- [HLL07] ten Hompel, M.; Libert, S.; Liekenbrock, D.: Analyse der Echtzeitproblematik bei der Steuerung von Stetigfördersystemen. In: Crostack, H.-A.; ten Hompel, M. (Hrsg. Bd.): *Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen - 1. Kolloquium des Sonderforschungsbereich 696*, Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2007, S. 235 - 255.
- [JLA14] Jung, M.; Le, T. T.; Atz, T.; Günthner, W. A.: *Entwicklung, Umsetzung und Evaluierung eines dezentralen Lagerverwaltungssystems*. Logistics Journal, Vol. 2014.
- [Kop11] Kopetz, H.: *Real-Time Systems – Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, 2011.
- [Mai10] Maier, M.: *Prognose der Leistungsverfügbarkeit während der Planung*. In: 6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Tagungsband, 2010, S. 233-244.
- [MLA14] Mirlach, M.; Le, T. T.; Jung, M.; Atz, T.; Günthner, W. A.: *Lagerverwaltung und Bestandsmanagement in dezentral gesteuerten Systemen*. Logistics Journal, Vol. 2014.
- [REM14] Roidl, M.; Emmerich, J.; Masoudinejad, M.; Riesner, A.; ten Hompel, M.: *Entwicklung eines Versuchsfelds für große Systeme intelligenter Behälter*. Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2014.
- [SF14] Seibold, Z.; Furmans, K.: *GridSorter – Logische Zeit in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen*. Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2014.

- [VDI3581] VDI Richtlinie 3581: *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*. Berlin: Beuth Verlag, 2004-12.
- [VDI3633-1] VDI Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 2014-12.
- [VDI4486] VDI Richtlinie 4486: *Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit*, Berlin, Beuth Verlag, 2012-03.
- [Wit07] Wittenstein, A.-K.: *Bedarfssynchrone Leistungsverfügbarkeit der kundenspezifischen Produktentwicklung*. Dissertation, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2007.

Dipl.-Inform. Moritz Roidl ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW an der Technischen Universität Dortmund. Er studierte Informatik an der Technischen Universität Dortmund. Tel.: +49 231 755-3092, E-Mail: moritz.roidl@tu-dortmund.de¹⁾

Prof. Dr. Michael ten Hompel ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen FLW an der Technischen 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. Tel.: +49 231 97 43-600, E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de¹⁾

¹⁾Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, LogistikCampus, 44227 Dortmund.