

# Leistungsverfügbarkeit zwischen Theorie und Praxis

## Performance availability between theory and application

**Steffen Schieweck**  
**Eike-Niklas Jung**  
**Michael ten Hompel**

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

**L**leistungsverfügbarkeit als Kennwert ist in den letzten Jahren in den theoretischen sowie auch praktischen Fokus gerückt. Zielstellung eines theoretischen Ansatzes in diesem Bereich muss die Schaffung von Grundlagen für den praktischen Nutzen sein. Um die bestehende Lücke zwischen den dargestellten Parteien ein Stück weit zu schließen, erläutert der vorliegende Artikel zunächst Forderungen der Praxis aus Sicht von Anlagenplaner und -betreiber und stellt anschließend einen darauf antwortenden theoretischen Ansatz vor, der die Planbarkeit von Leistungsverfügbarkeit ermöglichen soll.

*[Leistungsverfügbarkeit, Simulation, praktische Anwendung, Intralogistik]*

**P**erformance availability has become a topic of interest in research as well as industrial application in the recent years. Any theoretical concept in the area of logistics has to aim at the building of foundations for practical application. In order to close the gap between the mentioned parties the proposed paper describes the needs of the planning and operating party of an intra-logistics system. Consequently, a theoretical concept for the forecasting of performance availability is described to answer the existing demand.

*[Performance availability, simulation, practical applicability, warehouse logistics]*

### 1 EINLEITUNG

Die anforderungsgerechte Leistungserbringung intralogistischer Systeme sichert nachhaltig den wirtschaftlichen Erfolg von Anlagenbetreibern und Anlagenlieferanten und stellt damit einen maßgeblichen Erfolgsfaktor dar. Typischerweise wird diese bei Verträgen zu Lieferung und Inbetriebnahme meist automatisierte Systeme in Form der Kenngrößen „Leistung“ (Durchsatz) und „technische Verfügbarkeit“ definiert und bei Abnahme des Systems in zwei voneinander getrennten Tests nachgewiesen (vgl.

[Mai12]). Das Konzept der Leistungsverfügbarkeit versucht diese Kenngrößen zu vereinigen und sie in den Zusammenhang zu den Geschäftsprozessen des Anlagenbetreibers zu stellen. Die VDI-Richtlinie 4486 gibt hierzu den notwendigen Rahmen vor, konzentriert sich jedoch auf die Abnahmeprozedur und die hierfür notwendigen Definitionen und Vereinbarungen (vgl. [VDI 4486]). Voraussetzung dafür ist jedoch eine zielgerichtete Planung unter Berücksichtigung der geforderten Leistungsverfügbarkeit des intralogistischen Systems. Der Planer benötigt hierfür an den Planungsfortschritt angepasste Methoden mit geeignetem Abstraktionsgrad, die ihm eine effiziente Prognose der Leistungsverfügbarkeit ermöglichen. Im Fokus des Anlagenbetreibers steht die Erfüllung und kontinuierliche Verbesserung der vereinbarten Leistungsverfügbarkeit. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich zunächst mit den Grundlagen der Leistungsverfügbarkeit und den aus den unterschiedlichen Sichtweisen von Planer bzw. Lieferant und Anlagenbetreiber resultierenden Forderungen. Im Anschluss wird exemplarisch eine Methode zur Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit dargestellt. Der Beitrag schließt mit einem kurzen Fazit und einem Ausblick.

### 2 LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Die Funktionalität und Leistung eines intralogistischen Systems sind vertraglich zwischen dessen Betreiber und Anbieter festgelegt und werden folglich abgenommen. Zu diesem Zweck liefert die VDI-Richtlinie 4486 [VDI4486] Abnahmeprozeduren. Diese sind auf Geschäftsziele und deren Erfüllung fokussiert. Hier ist Leistungsverfügbarkeit wie folgt definiert:

„Die Leistungsverfügbarkeit gibt den anforderungs- und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen an.“ [VDI4486]

Die Richtlinie beschreibt eine Methode, um Leistungsverfügbarkeit bei Abnahme des Systems zu bestimmen. Die Ermittlungsmethoden werden genauer in den folgenden Kapiteln 2.1 bis 2.3 beschrieben.

## 2.1 LITERATURÜBERBLICK

Das Konzept der Leistungsverfügbarkeit wird erstmals von Wittenstein im Kontext kundenspezifischer Produktentwicklung im Bereich der Maschinen- und Anlagenplanung erwähnt. Sie beschreibt Leistungsverfügbarkeit als Zustand, in welchem ein Prozess wie vorgesehen arbeitet und dessen Ergebnis termingerecht zur Verfügung gestellt werden kann [Wit07]. Diese termingerechte Bereitstellung soll unabhängig von externen und internen Einflüssen wie Nachfrageschwankungen oder Funktionsstörungen erhalten bleiben [Wit07]. Hier beschreibt Leistungsverfügbarkeit also die Fähigkeit, einen Prozess derart auszuführen, dass das Ergebnis den Anforderungen sowohl in Menge, Zeit als auch Qualität entspricht und folglich nachfrageorientiert zu einem Ergebnis führt.

Maier beschäftigt sich mit Abgabeprozeduren intralogistischer Systeme. Dabei fokussiert sie sich zunächst auf die Analyse existierender Vorgaben und leitet Forderungen an diese ab [Mai12]. Als Schlussfolgerung wird gezogen, dass die zu diesem Zeitpunkt existierenden Methoden nicht oder nur teilweise für die korrekte Abnahme eines Systems ausreichend sind. Weiterhin wird eine Methode zur analytischen Vorhersage der Leistungsverfügbarkeit entwickelt [Mai10].

Die Grundsätze der Idee von Wittenstein und Anregungen von Maier werden in der VDI-Richtlinie 4486 „Zuverlässigkeit in der Intralogistik - Leistungsverfügbarkeit“ aufgenommen und für die Abnahmeprozedur in intralogistischen Systemen weiterentwickelt [VDI4486]. Zwar sind die Parallelen klar, deutlich erkennbar ist aber auch die Entwicklung von einem Zustand zu einer quantitativen, messbaren Größe.

Basierend auf der Entwicklung der Leistungsverfügbarkeit im Kontext der Intralogistik wird aktuell deren systemische Planbarkeit und Anforderungen fokussiert [HKR+14]. Hier wird, ausgehend von verschiedenen Planungsebenen, Leistungsverfügbarkeit für unterschiedliche Systemtypen und Eigenschaften untersucht [HKR+14]. Im Rahmen dessen werden sowohl Simulation [SDK+14] als auch analytische Berechnung [JtH13] als Werkzeuge zur Vorhersage der Leistungsverfügbarkeit diskutiert.

## 2.2 MESSMETHODEN

Die folgenden Messmethoden werden entsprechend der VDI 4486 dargestellt. Die Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit kann aufgrund von Wartezeiten oder Laufzeiten erfolgen. Der jeweilige Erfüllungsgrad wird durch das Verhältnis der Wartezeiten in einem Prozess zur gesamten Zeit oder der Anzahl der verspäteten Ladeeinheiten an einer Senke im Verhältnis zur gesamten Anzahl der Ladeeinheiten erhalten [VDI4486].

Bei Berechnung der Leistungsverfügbarkeit basierend auf Wartezeiten  $\eta_W$  werden die kumulierten Wartezeiten

$T_W$  innerhalb eines definierten Beobachtungszeitraums  $T_B$  aufgenommen [VDI4486].

$$\eta_W = \frac{T_B - T_W}{T_B} \quad (1)$$

Die Wartezeiten werden nur in dem Fall gewertet, wenn eine definierte Leistung (z.B. Durchsatz) in einer vorgegebenen Periode nicht erreicht wurde. Wird also dauerhaft die vorgegebene Leistung erreicht, liegt die Leistungsverfügbarkeit nach Wartezeit bei 100% [VDI4486].

Die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit aufgrund von Objektlaufzeiten  $\eta_L$  erfolgt durch die Aufnahme der Ankunftszeiten einzelnen Objekte und deren Pünktlichkeit an einer bestimmten Senke. Die Anzahl der unpünktlichen Objekte  $n$  wird ermittelt. Anschließend wird die Anzahl der pünktlichen Objekte  $(N-n)$  mit der Gesamtzahl der Objekte  $N$  ins Verhältnis gesetzt [VDI4486].

$$\eta_L = \frac{N - n}{N} \quad (2)$$

Auch in diesem Fall erfolgt die Wertung der verspäteten Einheiten nur, wenn die spezifizierte Leistung nicht erbracht wurde. Andernfalls wird die Leistungsverfügbarkeit als 100% gewertet [VDI4486].

## 2.3 VORAUSSETZUNGEN

Zur Abnahme der Leistungsverfügbarkeit nach VDI4486 müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllt werden. Weiterhin werden Empfehlungen bereitgestellt, wie Messpunkte zu identifizieren sind. Folgend sind einige wichtige Aspekte dargestellt.

Der Beobachtungszeitraum beschreibt den Zeitraum, in welchem die benötigten Daten gesammelt werden und ist damit Basis der Leistungsverfügbarkeitsermittlung. Die Länge des Zeitraums muss aufgrund von statistischen Abschätzungen ausreichend gewählt sein, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Weiterhin ist der Zeitpunkt der Abnahme so zu wählen, dass die erzielte Leistung der im laufenden Betrieb erzielten Leistung entspricht. Angegeben wird ein Zeitraum von 3 bis 6 Monaten nach Inbetriebnahme des Systems [VDI4486]. Der Beobachtungszeitraum eines Systems kann nur als gültig bewertet werden, wenn die im Zeitraum auftretenden Störungen innerhalb der Spezifikation beseitigt werden und die Leistungsanforderungen an das System ebenfalls innerhalb der Spezifikation liegen [VDI4486].

Prozesse in intralogistischen Systemen bestehen häufig aus einer Anzahl von physischen Transformationsprozessen. Sie beinhalten sowohl entgegen den Materialfluss gerichtete als auch mit dem Materialfluss laufende Prozesse. Die Verarbeitung der Objekte an den Prozessstellen ist abhängig von der Funktionalität des mit dem Materialfluss laufenden Prozesses. Aus diesem Grund sollten

diese Prozesse bei Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit betrachtet werden.

Die Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit erfordert die Erfassung verschiedener Daten. Diese müssen an verschiedenen Punkten des intralogistischen Systems gesammelt werden. Typischerweise sind dies die letzte Ressource innerhalb eines Transformationsprozesses und der Punkt, an dem das Objekt den Prozess verlässt.

### 3 FORDERUNGEN DES ANLAGENPLANERS

Aus der oben dargestellten Definition und dem Literaturüberblick zur Leistungsverfügbarkeit wird deutlich, dass sich der derzeitige Entwicklungsstand der Leistungsverfügbarkeit in einer frühen Phase befindet. Die Definition bezieht sich auf Messprozeduren, wobei Einflussfaktoren oder Maßnahmen zur Sicherstellung einer Leistungsverfügbarkeit bis dato in offiziellen Richtlinien nicht berücksichtigt werden. Da die Leistungsverfügbarkeit als Vertragsbestandteil laut VDI4486 nur infrage kommt, wenn „die Verantwortung der Gesamtanlage in einer Hand liegt (Generalunternehmer)“ [VDI4486], wird an dieser Stelle die Rolle des Anlagenlieferanten mit der des Anlagenplaners gleich gesetzt. Der Lieferant muss in diesem Fall die Aufgabe des Planers übernehmen.

In der betrieblichen Praxis wird Leistungsverfügbarkeit derzeit bereits als Bestandteil vertraglicher Dokumente (z.B. Pflichten- und Lastenheft) angewandt. Nimmt der Planer einer logistischen Anlage oder eines logistischen Systems mit Vertragsunterzeichnung eine Planungsaufgabe an, sagt er vertraglich eine definierte Leistungsverfügbarkeit zu. Gespräche mit Industriellen weisen darauf hin, dass die tatsächliche Ausprägung des Kennwerts nur in geringem Maße fundiert und überlegt, sondern vielmehr willkürlich erfolgt. Aufgrund dessen wird die Zusage einer bestimmten Leistungsverfügbarkeit derzeit unter einem hohen Grad von Unsicherheit gegeben. Die Zielstellung, die aus Sicht eines Anlagenplaners unter diesen Gesichtspunkten erfüllt sein muss, ist jedoch die Möglichkeit, verschiedene Planungsalternativen auch unter Beachtung des

Parameters Leistungsverfügbarkeit als quantifizierbare Größe bewerten und auswählen zu können.

Die Charakteristik der Leistungsverfügbarkeit als Kennwert, der anstatt der Bewertung von Einzelkomponenten die Funktionalität eines gesamten Systems abbilden soll, gestaltet deren Vorhersage mit einfachen Abschätzungen schwierig. Problematisch sind die Unwissenheit über die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen, die bisherige Unkenntnis über die genaue Menge dieser und die für ein intralogistisches System charakteristischen Interdependenzen zwischen beteiligten Komponenten und Subsystemen. Einem Anlagenplaner obliegt die Verantwortung über die Funktionalität des Gesamtsystems. Diese ist wiederum abhängig vom Verhalten der involvierten Subsysteme, die möglicherweise von unterschiedlichen Lieferanten bereitgestellt werden. Die Lieferanten der Subsysteme sind lediglich verantwortlich für die Funktionalität innerhalb ihrer Systemgrenzen. Für die Verknüpfungsleistung und Sicherstellung eines Leistungsverfügbarkeitswerts für das System ist also der Anlagenplaner zuständig.

Die dargestellten Problematiken lassen derzeit zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit eines nicht existenten oder lauffähigen Systems lediglich Simulation zu. Analytische Ansätze werden von Maier [Mai10] und Jung [JtH13] entwickelt, befinden sich derzeit jedoch in noch keinem anwendungsfähigen Status. Typische Herausforderungen bei der Anwendung von Simulation sind der hohe Aufwand der Modellgenerierung sowie die Unsicherheit der Datenbasen, die zumeist auf Prognosen oder Vergangenheitsdaten beruhen. Als Forschungslücke ist für einen Planer die Entwicklung einer schnellen, einfachen Methode zur Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit in ihren unterschiedlichen Ausprägungen zu identifizieren.

Als weitere Schwierigkeit im derzeitigen Stand der Forschung und Definition der Leistungsverfügbarkeit ist die Vieldeutigkeit der VDI 4486. Diese erlaubt die Verfolgung unterschiedlicher Geschäftsziele. In [SDK+14] wird gezeigt, dass der Wert der Leistungsverfügbarkeit für unterschiedliche Messpunkte und Geschäftsziele in hohem Maße differiert. Für die betriebliche Praxis muss folgen,



Abbildung 1. Gegenüberstellung Excel® (links) und Demo3D (rechts)

dass diese bereits in der Lasten- und Pflichtenheftphase definiert werden. In einem offenen, ungeplanten System ergeben sich hier jedoch weitere Problematiken aufgrund der Unwissenheit über die Struktur sowie verwendete Subsysteme und Komponenten.

#### 4 FORDERUNGEN DES ANLAGENBETREIBERS

Die Forderungen des Anlagenbetreibers sind in vielen Punkten übereinstimmend mit denen des Anlagenplaners bzw. ergänzen sich zu diesen. Komplexe, automatisierte Intralogistiksysteme werden häufig gemeinsam von beiden Parteien geplant und entwickelt. Aus Sicht des Anlagenbetreibers ist der Betrieb kein Selbstzweck, sondern dient in erster Linie zur Erreichung der übergeordneten Geschäftsziele des Unternehmens. Dies kann beispielsweise die mengen- und zeitgerechte Belieferung von Verkaufsstellen oder Endkunden sein. Entscheidend ist hier, dass das intralogistische System anforderungsgerecht seine Leistung erbringt.

Die Forderungen des Anlagenbetreibers lassen sich anhand des Planungs- bzw. Lebenszyklus des intralogistischen Systems strukturieren. Im ersten Schritt gilt es bei Abschluss des Liefervertrages verschiedene Planungsalternativen, ggf. auch von verschiedenen Planern zu bewerten und hieraus eine zu realisierende Vorzugsvariante auszuwählen. Die in dieser Phase zu prognostizierende Leistungsverfügbarkeit dient als Grundlage für den Leitungs- bzw. Liefervertrag. Für den Betreiber stellt der Prognosewert sicher, dass seine aus den übergeordneten Geschäftszielen abgeleiteten Anforderungen in der Planung ausreichend berücksichtigt wurden. Dazu werden die Geschäftsprozesse in abgeleitete Materialflussprozesse übersetzt. Dieser Schritt fördert wesentlich das Verständnis des Betreibers und macht das Planungsergebnis für ihn besser nachvollziehbar. Eine solide Prognose bietet auf der anderen Seite Sicherheit für den Planer bzw. Lieferanten, dass das geplante System später den prognostizierten Wert erreichen kann. Die notwendigen Randbedingungen sind hier explizit zu definieren, um spätere Diskussionen und Auslegungsspielräume von vorneherein möglichst zu minimieren. Konkret bedeutet dies, dass die Schnittstellen, an denen die Messungen erfolgen, klar definiert und sonstige, von beiden Seiten einzuhaltende Randbedingungen genau festgelegt werden.

Die Abnahme erfolgt während der Inbetriebnahme des Systems auf Basis des vertraglich festgehaltenen Prognosewerts. Hierzu werden die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methoden angewandt. Aus Sicht des Anlagenbetreibers ist es hier wichtig, dass die Messung methodisch klar strukturiert und eindeutig erfolgt. Sofern der vereinbarte Wert erreicht wird, gilt das System als abgenommen. Sollte der Wert nicht erreicht werden, gilt es die Ursache hierfür zu finden. Diese kann sowohl struktureller als auch technischer Natur sein. Für diesen Schritt benötigt der Betreiber

Methoden, die ihn hierbei unterstützen. Strukturelle Analysen können beispielsweise mit Hilfe der in [Jth11] vorgestellten, graph-basierten Methode erfolgen. In Systemen mit komplexer Struktur und/ oder mit hohem Durchsatz erfolgt die Messung idealer Weise mit Unterstützung der Steuerungssysteme. Hierzu können Daten auf verschiedenen Ebenen der Steuerungshierarchie (z.B. Belegungssituationen von Sensoren von Speicherprogrammierbaren Steuerungen oder Statusänderungen von Transportaufträgen im Materialflussrechner) erhoben werden. Diese Daten erleichtern die Messung, ersetzen aber nicht die Beobachtung der Anlage während der Messung. Sollte der Nachweis der vereinbarten Leistungsverfügbarkeit scheitern, können die für diesen Fall üblicherweise vereinbarten Vertragsstrafen fehlerhafte Planung oder Inbetriebnahme des Systems nicht kompensieren. Sie können allenfalls kurzfristig helfen, zusätzliche Aufwände für notwendige Sonderprozesse (oft durch manuelles Handling) zu finanzieren. Aufgrund der Höhe der getätigten Investition ist ein solcher Zustand dauerhaft nicht akzeptabel und kann das Geschäft des Anlagenbetreibers ernsthaft bedrohen.

Nach erfolgreicher Abnahme begleitet die Leistungsverfügbarkeit das intralogistische System auch während der Betriebsphase. In diesem Zeitraum gilt es für den Anlagenbetreiber kontinuierlich nach Verbesserungen zu suchen und damit seinen Unternehmenserfolg nachhaltig zu sichern. Die Leistungsverfügbarkeit kann hierfür als Indikator genutzt werden, sofern der Betreiber über geeignete Methoden verfügt, mit deren Hilfe er die Schwachstellen bzw. deren Ursachen erkennen kann. Im Idealfall entwickeln Planer und Betreiber schon in frühen Phasen der Planung ein Modell der Leistungsverfügbarkeit, das im Planungsfortschritt stetig weiterentwickelt und verfeinert und bis zum Nutzungsende der Anlage weiterverwendet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl Planer als auch Betreiber während des gesamten Planungs- bzw. Lebenszyklus des Systems auf geeignete Methoden zur Prognose, Berechnung und zum Nachweis der Leistungsverfügbarkeit benötigen. Der Abstraktionsgrad richtet sich dabei ebenfalls nach dem Planungsfortschritt: je weiter der Prozess fortschreitet, umso geringer der Abstraktionsgrad bzw. detaillierter die Modelle.

#### 5 ERMITTLUNG DER LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Mit speziellem Fokus auf die Bedürfnisse des Anlagenplaners wird folgend eine Methode vorgestellt, die die Vorausplanung der Leistungsverfügbarkeit von Systemen mit Stetigfördertechnik mit geringem Zeitaufwand ermöglicht. Zunächst wird dazu die zugrundeliegende Basismethode identifiziert. Anschließend wird die Funktionalität dargestellt, wonach die Potenziale der Methode genannt werden.

## 5.1 AUSWAHL DER BASISMETHODE

Zunächst werden als Basismethoden die analytische Berechnung der Leistungsverfügbarkeit und deren Ermittlung durch Simulation gegenüber gestellt. Die Forderungen, die an dieser Stelle an eine Ermittlungsmethode gestellt werden, sind folgend aufgezählt. Die entwickelte Methode soll sich in die vorhandenen Abläufe der Materialfluss- und Lagerplanung eingliedern. Das heißt, im idealen Fall werden die Ergebnisse der Leistungsverfügbarkeit als Nebenprodukt einer ohnehin zu erfüllenden Aufgabe ermittelt. Zudem sollen bekannte Werkzeuge der Materialflussplanung Verwendung finden, zu welchen sowohl die einfache analytische Berechnung als auch die Simulation zählen. Ein eigens für die Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit erstelltes Simulationsmodell scheint diesbezüglich nicht akzeptabel. Weiterhin soll der Aufwand der Ermittlung gering gehalten werden, um eine schnelle und effiziente Planung zu ermöglichen. Zuletzt ist zur Argumentation der Ergebnisse und Entscheidungen deren Nachvollziehbarkeit und Interpretierbarkeit von hoher Wichtigkeit.

Zur analytischen Berechnung der Leistungsverfügbarkeit wurde ein Ansatz von [JtH13] erarbeitet. Dieser beschränkt sich zunächst auf die Beschreibung der technischen Prozesse in stetigen Verzweigungselementen bei getakteten Eingangsströmen. Trotz der vergleichsweise eng gesteckten Systemgrenzen ist die Komplexität der Berechnung im Vergleich zu vorherrschenden logistischen Anwendungen hoch. Die Erweiterung auf Systeme realer Größe steht zudem noch aus. Auf der anderen Seite ist das Werkzeug der Simulation prädestiniert für die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens komplexer Systeme [MKR+11]. Die im Regelfall vorhandene Visualisierbarkeit der ablaufenden Prozesse führt zu guter Nachvollziehbarkeit des Modells und Akzeptanz eines Projektpartners. Weiterhin findet Simulation in der Materialflussplanung bereits heute häufige Verwendung. Dem gegenüber steht der in den meisten Fällen hohe Aufwand der Modellgenerierung, der einen erheblichen Kostenfaktor darstellt. Die dargestellten Charakteristiken legen offen, dass keine der Basismethoden die gestellten Forderungen in ihrer Gänze erfüllt. Simulation scheint dennoch die vielversprechendste zu sein, weshalb sie unter der Prämisse der Verringerung des Modellierungsaufwandes ausgewählt wird.

## 5.2 FUNKTIONALITÄT

Die entwickelte Methode zur Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit stellt eine Möglichkeit dar, Simulationsmodelle mit minimalem Aufwand zu erstellen, die benötigten Tests durchzuführen und automatisch generierte Ergebnisberichte abzurufen. Die Definition des 2-dimensionalen Layouts erfolgt dabei auf einfache Art und Weise in Microsoft Excel®. Das Layout kann anschließend in die 3-dimensionale Umgebung von Demo3D importiert werden. Hier ist das Modell, unter der Voraussetzung, dass

prozessuale sowie kausale Grundvoraussetzungen gelten und Daten vorhanden sind, ohne weitere Maßnahmen lauffähig. In Abbildung 1 ist eine Gegenüberstellung der Layouts in Excel® und Demo3D dargestellt. Die Anzahl der Lagerebenen und somit die 3-dimensionale Komponente wird durch einen gesonderten Parameter definiert. Die Messung der Leistungsverfügbarkeit in ihren unterschiedlichen Ausprägungen erfolgt durch unmittelbar in die Komponenten integrierte Funktionen. Die Software Demo3D findet bis dato eher Verwendung bei der Animation und Darstellung von Intralogistiksystemen. Die Entwicklung der Software bewegt sich jedoch rapide in Richtung von Simulationsanwendungen. Beispiele hierfür sind die entwickelte Sim3D-Umgebung und ein erheblicher Effizienzgewinn durch die Möglichkeit, Skripte in C# zu kodieren. Die hohe Darstellungsqualität bleibt nach wie vor erhalten.

Der Umfang der Modellierung beträgt grundsätzlich ein vollständiges Warenhaus oder Lager vom Wareneingang bis Warenausgang. Gegenwärtig besteht eine Beschränkung auf Systeme mit Stetigfördertechnik. Der Detaillierungsgrad der Simulation ist vergleichsweise niedrig, was einer frühen Projektphase entspricht. Eine detailliertere Modellierung ist jedoch ohne weiteres umsetzbar. Zum einfachen Testen und dem Vergleich verschiedener Layouts besteht eine Experimentierumgebung, in welcher definierte Layouts nacheinander für einen bestimmten Zeitraum simuliert werden. Die Auswahl der Messungen erfolgt aufgrund der Definition und den Beispielen der [VDI4486]. Es bestehen Funktionen für die Messung der Auslastung einer Ressource, deren Blockieren durch die Belegung der ihr nachgelagerten Ressource entstehenden Wartezeiten, das Überprüfen der Laufzeit der Aufträge sowie der Taktzeit einer Ressource.

Die dargestellte Funktionalität wird durch dezentrale Steuerung im Stil agentenbasierter Systeme erreicht. Lokale Agenten wie Förderstreckenabschnitte, Lagerplätze, Regalbediengeräte und Kommissionierarbeiter werden zu Beginn eines Simulationslaufs inklusive jeweils standardisierter Scripts von einem globalen Agenten erstellt. Weitere globale Agenten sind zuständig für die Lagerplatzverwaltung, das Routing der Objekte, den Auftragseingang oder die Datensammlung. Zustandsabfragen und -änderungen werden durch Nachrichten innerhalb des Netzwerkes übermittelt.

Die Leistungsverfügbarkeitsmessung erfordert aufgrund ihrer Charakteristik durch die Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen und Parameter besondere Aufmerksamkeit. Generell werden alle Wartezeiten der zu beobachteten Ressourcen aufgenommen. Nach Abschluss eines Zeitintervalls (nach [VDI 4486] sind 60 min üblich) wird überprüft, ob der Durchsatz innerhalb der Spezifikationen lag. Ist dies der Fall, wird die Leistungsverfügbarkeit für diesen Zeitabschnitt als 100% gewertet. Ist dies nicht

der Fall, wird die Leistungsverfügbarkeit für den Zeitabschnitt entsprechend Formel (1) berechnet. Nach Abschluss des Simulationslaufs wird die gesamte Leistungsverfügbarkeit als arithmetisches Mittel der Zeitabschnitte berechnet. Die Aufnahme der Wartezeiten und des Durchsatzes erfolgt durch die jeweiligen lokalen Agenten. Die Überprüfung eines Zeitabschnitts, des Durchsatzes und die Aufnahme sowie Berechnung der Leistungsverfügbarkeit der verschiedenen Zeitabschnitte erfolgt ebenfalls durch lokale Agenten. Die Überprüfung der Leistungsverfügbarkeit nach Laufzeit erfolgt auf ähnliche Art und Weise. Die Zählung der verspäteten Ladeeinheiten erfolgt an der definierten Senke, die durch den entsprechenden Standardbaustein bestimmt wird. Dieser überprüft wie oben beschrieben auch die Zeitintervalle und die Einhaltung des geforderten Durchsatzes.

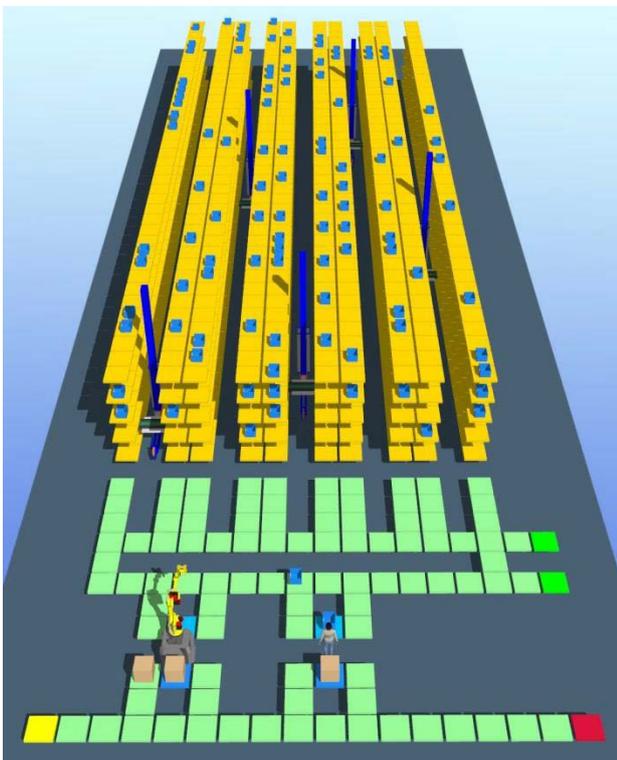


Abbildung 2. Beispielhaftes Modell in Demo3D

### 5.3 POTENZIAL

Die dargestellte Methode wurde in Hinblick auf deren Potenzial sowohl zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit als auch der Verwendbarkeit in einer Reihe weiterer Anwendungsgebiete entwickelt. Die Vorteile bezüglich der Effizienz der Modellgenerierung werden schnell deutlich. Die Definition des Layouts in Microsoft Excel® durch einfache Symbole sowie Kopier- und Verschiebevorgänge ist intuitiv und von geringem Zeitaufwand. Mit der Trennung der Softwaretools für die Modellgenerierung und die Simulation wird sowohl eine hohe Effizienz als auch ein großer Funktionsumfang erreicht. Durch die Möglichkeit, unterschiedliche Layouts automatisiert nacheinander testen zu

lassen, ist der Nutzer in der Lage, mit einem minimalen Maß von Interaktion und Konfiguration aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Durch Verwendung der ursprünglichen Funktionalitäten des Programms Demo3D besteht zudem die Möglichkeit, die rudimentären Blockformen durch detailliertere Entitäten zu ersetzen, welche eine entsprechend genauere Modellierung und Simulation ermöglichen. Zudem wird die Qualität der Darstellung erheblich verbessert. Die Simulation des Lagers ist umfassend gestaltet, so dass sich das Modell durch Einbeziehung weiterer Messmethoden ohne weiteres in der weiteren Materialflussplanung verwenden lässt. Entsprechend gliedert es sich in hohem Maß in die vorhandenen Planungsabläufe ein.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Artikel liefert einen Überblick über den aktuellen Stand im Bereich der Forschung zur Leistungsverfügbarkeit intralogistischer Systeme. Er verbindet diesen mit den Anforderungen an Modelle und Methoden aus Sicht von Anlagenplanern und Anlagenbetreibern. Außerdem wird eine simulative Methode zur Prognose der Leistungsverfügbarkeit vorgestellt. Diese ermöglicht schon in frühen Phasen der Planung die effiziente Ermittlung des Kennwerts zum Vergleich verschiedener Planungsalternativen. Je größer und komplexer (verzweigter) die zu vergleichenden Alternativen sind, umso schneller erreichen simulative Methoden ihre Grenzen. Insofern gilt es einerseits diese Methoden effizienter zu gestalten, andererseits durch weitere analytische Methoden zu ergänzen. Insbesondere im Bereich der Analytik besteht dazu weiterer Forschungsbedarf. Dies gilt auch für Methoden zur Zerlegung des Systems und Festlegung von Messpunkten und Schnittstellen.

### FÖRDERHINWEIS

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Teilprojekts C1 „Analytische Methoden für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit komplexer Materialflusssysteme“ des Paketantrags 672 erarbeitet, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG unter Kennzeichen (HO 2403/8-1) gefördert wird.

### LITERATUR

- [HKR+14] 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.

- [JtH11] Jung, Eike-Niklas; ten Hompel, Michael; Sadowsky, Volker; Mosblech, Christian: *Verfügbarkeit und Leistung – Synthese zweier Kennwerte für die anforderungsgerechte Planung intralogistischer Systeme*. In: Logistics Journal: Proceedings, Vol. 07. (urn:nbn:de:0009-14-31053) , 2011.
- [JtH13] Jung, E.-N.; ten Hompel, M.: *Analytische Stauprognose in Stetigfördersystemen im Rahmen der Systemplanung*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2013.
- [Mai10] Maier, M.: *Prognose der Leistungsverfügbarkeit während der Planung*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2010.
- [Mai12] Maier, M.: *Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeits-Theorie*. Dissertation, Tübingen University, 2012.
- [MKR+11] März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [SDK+14] Schieweck, S.; Dregger, J.; Kaczmarek, S.; ten Hompel, M.: *Reliability of Intra-Logistics Systems – Simulating Performance Availability*. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, Architectural and Environmental Engineering (2014), Vol. 2, No. 1, 182.
- [VDI4486] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Zuverlässigkeit in der Logistik - Leistungsverfügbarkeit*. VDI 4486, Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [Wit07] Wittenstein, A.-K.: *Bedarfssynchrone Leistungsverfügbarkeit in der kundenspezifischen Produktentwicklung*. Dissertation, Stuttgart University, 2007.

Address: Chair of Materials Handling and Warehousing, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany, Phone: +49 231 755-4832, Fax: +49 231 755-4768, E-Mail: steffen.schieweck@tu-dortmund.de

**Dipl.-Logist. Eike-Niklas Jung** Former Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University of Dortmund (2006-2013). Eike-Niklas Jung was born 1980 in Bonn, Germany. Between 2001 and 2006 he earned a diploma in logistics at TU Dortmund. Now he works at dm-drogeriemarkt GmbH + Co. KG and is responsible for intralogistics projects.

Address: Chair of Materials Handling and Warehousing, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany, E-Mail: eike.jung@tu-dortmund.de

---

**Steffen Schieweck, M.Sc. MS SCE (USA)**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University of Dortmund. Steffen Schieweck was born 1989 in Erlenbach a.M., Germany. Between 2007 and 2014 he earned M.Sc. in Industrial Engineering at TU Dortmund. Between 2011 and 2012 he earned M.Sc. in Supply Chain Engineering at Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.