

# Planung und Berechnung der systemischen Leistungs- verfügbarkeit komplexer Logistiksysteme

Planning and calculating the performance availability of complex logistics systems

Tobias Hegmanns<sup>1</sup>, Axel Kuhn<sup>1</sup>  
Moritz Roid<sup>2</sup>, Steffen Schieweck<sup>2</sup>, Michael ten Hompel<sup>2</sup>  
Mustafa Güller<sup>3</sup>, Maximilian Austerjost<sup>3</sup>  
Jürgen Roßmann<sup>4</sup>  
Kevin Eilers<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund

<sup>3</sup>Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, TU Dortmund

<sup>4</sup>Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), RWTH Aachen

<sup>5</sup>RIF Institut für Forschung und Transfer e. V., Dortmund

**D**as Verständnis von Leistungsverfügbarkeit, wie sie in der VDI-Richtlinie 4486 definiert ist, reicht für die Planung komplexer, dynamischer und teilautonomer Systeme nicht aus. Die Definition in der VDI 4486 setzt den Fokus ausschließlich auf den Erfüllungsgrad vereinbarter Prozesse bei der Inbetriebnahme logistischer Anlagen und regelt die Messungen und Berechnungen der Leistungsverfügbarkeit zu diesem Zeitpunkt. Es bleibt die Frage, wie ein Materialflusssystem für eine spezifizierbare Leistungsverfügbarkeit geplant werden kann. Dazu werden die Wirkzusammenhänge zwischen dem logistischen System und seinen Subsystemen z.B. vertikale Integration von Wirkzusammenhängen der Instandhaltung, von Echtzeiteffekten der Kommunikationsprozesse oder Effekten der Maschinensteuerung, betrachtet.

[Schlüsselwörter: Intralogistik, Leistungsverfügbarkeit]

**T**he prevailing understanding of the term ‘performance availability’ as defined by the German guideline VDI 4486 does not appear to be sufficient for the planning of dynamic and semi-autonomous systems. The definition of VDI 4486 is intended for use when logistical systems are brought to service. This article aims to answer the question how the planning of a material flow system can be targeted to achieve a specific degree of performance availability during operations. For that purpose the interrelationships between the warehousing system and its subsystems are examined, e.g. the vertical integration of interrelationships of maintenance services, real-time effects of communication processes within a warehouse and effects of the machine controls.

[Keywords: Facility Logistics, Performance availability]

## 1 PLANBARE LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT INTRALOGISTISCHER SYSTEME

Bei der Auslegung von Logistiksystemen sieht sich der Planer mit einer stetig wachsenden Anzahl von komplexen Entscheidungen konfrontiert. Gleichzeitig steigt die Bedeutsamkeit von hochwertiger und effizienter intralogistischer Planung. Aufgrund immer kürzer werdender Produktlebenszyklen bei steigender Produktindividualisierung muss die Planung intralogistischer Systeme in immer kürzer werdenden Zyklen durchgeführt werden und zugleich gestiegenen Anforderungen bzgl. Flexibilität, Kosten und Qualität gerecht werden. Die Betreiber logistischer Anlagen geben zunehmend anspruchsvollere Leistungsversprechen an ihre Kunden, z.B. 24h Lieferservice, 8h Bestellvorlaufzeit bis zur Auslieferung und größere Produktspektren bei sinkenden Kosten [vgl. BVL13]. Dem Planer werden dadurch Zielgrößen zunächst für den Gesamtdurchlaufprozess der Auftragsabwicklung auf der Ebene des Logistiksystems vorgegeben, wie z.B. die zu erreichende Leistung und einzuhaltenden Kosten. In einem anforderungsgerecht ausgelegten Logistiksystem steht die zugesagte Leistung (des Gesamtprozesses) zu den nachgefragten Zeiten zur Verfügung. Wesentlich beeinflusst wird diese geforderte Leistungsverfügbarkeit des Systems davon, wie häufig und mit welcher Konsequenz Stau- oder Störungsfälle das Verhalten des Systems beeinträchtigen. Zwar hat der Planer im Regelfall Kenntnis über die Verfügbarkeitsdaten der verwendeten Einzelsysteme, jedoch ist eine direkte Ableitung aus diesen zur Ermittlung der Verfügbarkeit des gesamten intralogistischen Systems nicht ohne weiteres möglich. Auch ist der Einfluss veränderter Systemlasten auf die Leistungsverfügbarkeit zu prüfen und ggfs. Anpassungen vorzunehmen. Dieser Beitrag beschäftigt sich deshalb mit der Frage, wie die Leistungsverfügbarkeit vollständiger intralogistischer Systeme bestimmt und vorausgeplant werden kann. Einen

wichtigen Schritt zur Beantwortung dieser Frage liefert die neue 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. Eine entsprechende Überprüfung der vereinbarten Leistungsverfügbarkeit findet bei der Abnahme der Anlage statt [VDI4486]. Dabei wird vom konventionellen Verständnis der technischen Verfügbarkeit eines Einzelsystems abgewichen und der Begriff der Leistungsverfügbarkeit geschaffen, der die Betrachtungsweise erweitert, so dass eine aus Einzelsystemen zusammengesetzte Anlage betrachtet wird. Der vorliegende Artikel soll darauf aufbauend diese Überlegungen weiterführen, indem Leistungsverfügbarkeit eines Logistiksystems nicht nur in Form von Einzelkennwerten bei der technischen Abnahme einer Logistikanlage verstanden werden. Sie soll als dynamische Größe gemessen an der realen Lastsituation des Betreibers und im Verhältnis zu festgelegten Leistungsversprechen an dessen Kunden für den Betreiber auch in der Betriebsphase als Steuergröße dienen.

Der folgende Artikel stellt zunächst den aktuellen Stand der Forschung in Bezug auf Verfügbarkeit und Leistungsverfügbarkeit dar und beschreibt die Notwendigkeit einer Erweiterung des existierenden Verständnisses. Anschließend wird ein Überblick über den entwickelten systemischen Ansatz gegeben, welcher die vorhandenen Teilkonzepte in einem Gesamtbild zusammenfügt. Darauf folgt eine detailliertere Beschreibung der Teilkonzepte, bevor die dargestellten Ergebnisse abschließend zusammengefasst werden.

## 2 STAND DER TECHNIK

In der Literatur bestehende Ansätze zur Verfügbarkeitsbeurteilung konzentrieren sich zumeist auf die technische Verfügbarkeit, die als „Wahrscheinlichkeit, die betrachtete Einheit zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebszeit in einem ordnungsgemäß funktionierenden Zustand anzutreffen“ definiert wird [VDI3581]. Diese Herangehensweise stößt angesichts moderner Systeme und deren komplexen Aufbaus an ihre Grenzen. Aus diesem Grund entwickelt Wittenstein erstmals das Konzept der Leistungsverfügbarkeit im Kontext der kundenspezifischen Produktentwicklung im Maschinen- und Anlagenbau. Die Leistungsverfügbarkeit wird hier als „Zustand, in dem ein Prozess anforderungsgemäß durchgeführt und das geforderte Ergebnis termingerecht fertiggestellt werden kann“ aufgefasst. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Abrufs die zur Leistungserstellung notwendigen Ressourcen verfügbar sind, und zwar unabhängig von auftretenden

Unsicherheiten, d.h. Schwankungen des Bedarfs oder von Störungen“ [Witt07]. Der Schwerpunkt ihrer Arbeit liegt auf der Sicherstellung der von ihr definierten Verfügbarkeit. Dazu wird ein strukturiertes Vorgehen, basierend auf integrierten Arbeitsblättern, zur Absicherung einer erforderlichen Leistung für kundenspezifische Entwicklungsaktivitäten vorgestellt [Witt07]. Dieser Ansatz wird in der VDI-Richtlinie 4486 um den Aspekt eines anbieterseitigen Leistungsversprechens erweitert und für den Bereich Intralogistik erarbeitet [VDI4486]. Der Begriff Leistungsverfügbarkeit wird hier als „anforderungs- und termingerechter Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen“ [VDI4486] verstanden. Die VDI definiert in ihrer Richtlinie eine Abnahmeprozedur der Leistungsverfügbarkeit. Maier versucht die nach VDI 4486 definierte Leistungsverfügbarkeit durch ein Prognosemodell bereits in der Planungsphase abschätzbar zu gestalten. Sie konzentriert sich auf die Ermittlung kritischer Ausfallzeiten für einzelne Systemkomponenten [vgl. Mai10].

Das durch Maier und die VDI-Richtlinie etablierte Verständnis von Leistungsverfügbarkeit basiert auf einem als prozentualen Wert quantifizierbaren Erfüllungsgrad. Die Bestimmung dieses Kennwertes kann über zwei verschiedene Arten erfolgen. Zum einen besteht die Möglichkeit, auf Grundlage von Wartezeiten die Auslastung einzelner Ressourcen zu ermitteln. Dabei werden definierte, unerwünschte Zeitanteile aufgenommen und auf Basis des Verhältnisses von kumulierten Wartezeiten sowie der Länge des Beobachtungsintervalls der Erfüllungsgrad bestimmt [VDI4486]. Zum anderen kann der Erfüllungsgrad als Verhältnis von der Anzahl unpünktlicher Aufträge zur Gesamtzahl der Aufträge ermittelt werden [VDI4486]. Welche der beiden Möglichkeiten gewählt und wie die unerwünschten Zeitanteile definiert werden hängt von den hauptsächlichen Geschäftszielen des Betreibers (bspw. hohe Auslastung, hoher Servicegrad) ab.

Im DFG Paketantrag 672 „Leistungsverfügbarkeit – Logistics on Demand“ wird die Betrachtungsweise um eine Stufe erweitert, wodurch diese nunmehr ein vollständiges intralogistisches System umfasst. Die Grenzen eines solchen Systems werden derart definiert, dass sämtliche Leistungen von der Bestellung bis zur Auslieferung übernommen werden. Der systemische Ansatz soll dabei horizontal, durch Verkettung der einzelnen technischen Teilsysteme, und vertikal, durch schrittweise Detaillierung der Planungsebenen, erfolgen. Ziel der Forschungsarbeiten ist es eine zuverlässige Prognose der späteren Leistungsfähigkeit der Teilsysteme und des Gesamtsystems gemessen am Kundenversprechen des Anlagenbetreibers zu ermitteln. Weiterhin soll die ausreichende Leistungsverfügbarkeit auch in der Betriebsphase sichergestellt werden. Zu diesem Zweck wird die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Systemleistung untersucht. Dadurch wird eine isolierte Festsetzung und Umsetzung von systemi-

scher Ausgestaltung und geforderter Leistung vermieden. Überdimensionierung und Ressourcenverschwendung kann reduziert werden, während die Kostentransparenz aufgrund verbesserter Güte der Planungswerte gesteigert wird.

Innerhalb des Konzeptes erfolgt vielfach der Einsatz von Simulationstools. Laut [VDI3633-1] ist Simulation „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ Der Einsatz von Simulation in logistischen Anwendungen ist weit verbreitet. Simulation eignet sich für Anwendungsfälle, in denen umfangreiche Informationen zur Verfügung stehen, eine hohe Anzahl von stochastischen Einflüssen vorhanden ist und unterschiedliche Lösungsvorschläge evaluiert werden müssen [vgl. Ele12]. Das vorgestellte Konzept nutzt eine Anzahl von verschiedenen Simulationsmodellen und –tools, die jeweils unterschiedliche Systemarten, -aspekte und Detaillierungsstufen aufweisen. Aufgrund der hohen Komplexität der Zusammenhänge in einem intralogistischen System ist Simulation als Werkzeug für das vorgestellte Konzept prädestiniert.

Resultierend aus dem dargestellten Status Quo und den vorhandenen Problemfeldern soll der hier vorgestellte Ansatz die Etablierung des Begriffs und Instrumentariums „Leistungsverfügbarkeit“ weiter vorantreiben. Dabei werden sowohl Systeme mit klassischer Stetigförderertechnik betrachtet, als auch zellulare Unstetigfördersysteme. Die Planung, Bewertung und Anpassung dieser soll durch Schaffung von analytischen und simulativen Ermittlungsmodellen unterstützt werden. Dabei wird den gesteigerten Anpassungserfordernissen durch Einführung von Flexibilitätskorridoren bereits in der Planung Rechnung getragen. Zur bedarfsgerechten Planung von Instandhaltungsmaßnahmen eines intralogistischen Systems im Betrieb wird der Begriff der Leistungsverfügbarkeit mit dem der Nutzungseffizienz in Verbindung gebracht. Die Betrachtung und Vorausplanung neuartiger Systeme wird zudem durch die Ergänzung der Bewertung und Ermittlung der Echtzeitfähigkeit der Steuerungen vervollständigt. Ziel des Konzeptes ist es, alle Planungsphasen eines intralogistischen Systems durch die Bereitstellung von Konzepten und Werkzeugen der Bewertung, Planung und Erhaltung der Leistungsverfügbarkeit abzudecken. Dadurch soll erreicht werden, das Leistungsversprechen bezüglich der Leistungsverfügbarkeit an einen Kunden sowohl in der Planung als auch im Betrieb möglichst zuverlässig und kostengünstig einhalten zu können.

### 3 SYSTEMISCHER ANSATZ

Das Ziel eine planbare Leistungsverfügbarkeit zu ermöglichen erfordert einen Ansatz, der sowohl die unterschiedlichen organisatorischen Betrachtungsebenen eines

intralogistischen Systems berücksichtigt, als auch die zeitlichen Projektphasen Planung, Entwicklung und Betrieb. Insofern besteht der Lösungsansatz aus einzelnen Lösungsbausteinen, die jeweils einen Analyseschritt zur Bewertung der Leistungsverfügbarkeit beitragen. Die Analyseschritte betreffen einerseits die Betriebs- und Auftragsdurchlaufebene des Intralogistiksystems, und teils detaillierte Analysen von Teilsystemen oder einzelnen Gewerken.

Der systemische Ansatz entsteht durch die Synthese der einzelnen Analysemethoden und -werkzeuge sowohl konzeptionell als Aussage über die (prognostizierte) Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems als auch auf der Ebene der technischen Schnittstellen zwischen den entwickelten Softwarewerkzeugen. In Abbildung 1 sind die jeweiligen Schnittstellen zwischen den Analysebausteinen abgebildet.

Dieser systemische Analyse- und Werkzeugansatz kann zu allen Phasen von der Planung bis zum Betrieb von Logistiksystemen beitragen. In jede Phase fallen spezifische Aufgabenstellungen in der Planung, Auslegung und Steuerung des Logistiksystems, welche auf Herstellerseite wie auf Betreiberseite durch eine verbesserte Prognose und Planbarkeit der realistischen Leistungsverfügbarkeit unterstützt werden können.

#### Planungsphase

Die Geschäftsprozesse, die für eine gewünschte Leistungsverfügbarkeit von Bedeutung sind, müssen bereits im Lastenheft vom Auftraggeber beschrieben werden. Für eine automatisierte Verarbeitung im Sinne eines systemischen und werkzeuggestützten Ansatzes sollte dies in einer maschinenlesbaren Form geschehen. Vom Hersteller kommen aufbauend auf diesen Anforderungen Simulationsmodelle zum Einsatz, die eine Abschätzung der prinzipiellen Tauglichkeit von möglichen Lösungskonzepten unterstützen. Das Konzept einer planbaren Leistungsverfügbarkeit setzt genau an dieser Stelle an und verbessert die Aussage darüber, welche tatsächliche Leistungsverfügbarkeit im realen Betrieb zu erwarten ist.

#### Realisierungsphase

Die ausreichende Leistungsverfügbarkeit der technischen Teilsysteme wie auch deren Rückwirkung mit dem Gesamtauftragsdurchlaufprozess des Logistiksystems sind in der Realisierungsphase fortlaufend zu prüfen. Dies betrifft insbesondere die Materialfluss- und Lagerstrategien (z.B. Auftragsdisposition, Wegplanung, Betriebsstrategien von Regalbediengeräten, Einlagerungskonzepte), die einen wesentlichen Einfluss auf die Auswirkung auf die Leistungsverfügbarkeit nehmen. Zudem muss bei der Auswahl der Systemhardware (Leitrechner, Materialflussrechner, Automatisierungsgeräte) strikt auf die Einhaltung der Anforderungen aus den Leistungsverfügbarkeitsanalysen geachtet werden. Dabei sind

hochstandardisierte Systeme und dezentrale Systeme mit einfach zu analysierenden autonomen Modulen vorteilhaft im Sinne eines zügigen Projektfortschritts, da hier das relevante Verhalten bereits frühzeitig und projektunabhängig validiert werden kann. Eine laufende, technisch automatisierte Überprüfung der Leistungsverfügbarkeit schon in Inhouse-Tests ist bei veränderten Softwarebausteinen ist an dieser Stelle von zentraler Bedeutung, wenn ein kundenspezifisches „Customizing“ benötigt wird.

Überprüfung eines fehlerfreien Nachrichtenaustausches innerhalb der Anlage zum Ziel hat, validiert. Die in der Planungsphase verwendeten Szenarien zur Systemlast werden im Online-Funktionstest schließlich als detaillierte Testszenerarien im Realbetrieb gefahren. Gegen Ende dieser Phase sollte anschließend einer erfolgreichen Abnahme der Leistungsverfügbarkeit nach VDI 4486 nichts mehr im Wege stehen.

#### Inbetriebnahme-/Hochlaufphase

Die Teilsystemanalyse des Kommunikationssystems wird hier durch den klassischen Kopplungstest, der die

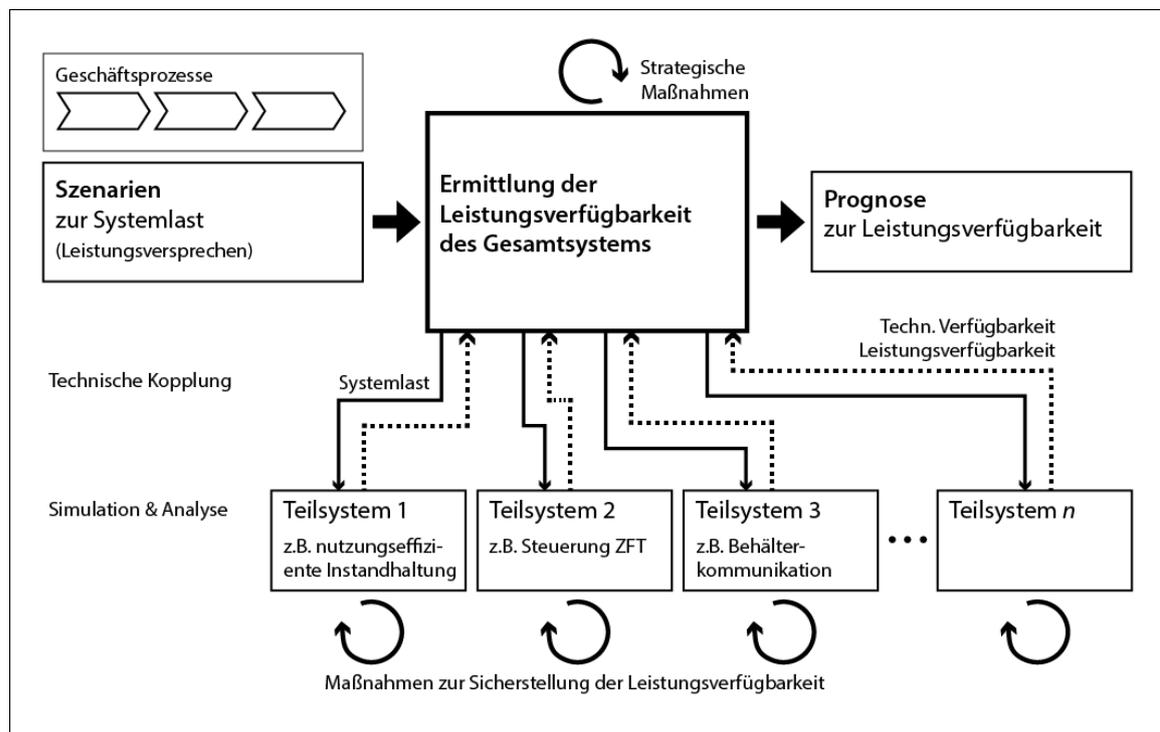


Abbildung 1. Konzept für eine Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit komplexer Logistiksysteme

#### 4 ERMITTLUNG DER LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Die Erarbeitung von Lösungskonzepten in der Planungsphase bedarf einer einfachen und schnellen Abschätzbarkeit der Charakteristika einer Planungsvariante, so auch der Leistungsverfügbarkeit. Für diese Anwendung sind analytische Modelle prädestiniert. Die tiefere Verifikation und Validierung der Konzepte kann anschließend nur durch Simulation erfolgen. Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Ansatz der analytischen Ermittlung von einer Komponente der Leistungsverfügbarkeit genannt. Anschließend folgen die Darstellung des Nutzens und der Implementierung von Simulationsmodellen, die die standardisierte Ermittlung von Leistungsver-

fähigkeit ermöglichen. Zuletzt wird ein Ansatz der simulativen Ermittlung beschrieben.

Im Rahmen des DFG Paketantrags 672 befassen sich [JtH13] mit der analytischen Stauprognose in Stetigfördersystemen. Sie untersuchen den Einfluss stochastischer Staus, um diesen bereits in der Planung berücksichtigen zu können. Im Speziellen soll die Vereinbarkeit der Gestaltung von Intralogistiksystemen mit der VDI-Richtlinie 4486 verbessert werden. Schwerpunktmäßig werden Verzweigungselemente der Stetigförderertechnik untersucht. Im analytischen Modell wird die Anzahl der sich stauenden Objekte in einem bestimmten Zeitintervall an einem Verzweigungselement ermittelt.

Der Ansatz von Jung legt die Basis für Untersuchungen weiterer Elemente unterschiedlicher Fördertechniken. Er gibt Hinweise auf Möglichkeiten und Schwierigkeiten der analytischen Ermittlung von Stauwirkungen in realen Systemen. Die Frage nach der Validierung der Ergebnisse wirft weiterführende Fragen auf. Um einen Berechnungsansatz zur Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit bewerten und verschiedene Ansätze vergleichen zu können, ist es erforderlich, simulative Studien durchzuführen. Diese müssen in ihrem Aufbau und der Abnahmeart der Leistungsverfügbarkeit den Vorgaben der [VDI4486] entsprechen und möglichst unabhängige Ergebnisse liefern [JH13].

Ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt soll entsprechend auf der Entwicklung eines Verfahrens liegen, das der [VDI4486] entsprechend Leistungsverfügbarkeit in einem Simulationsmodell abnimmt und bewertet. Teile dieser Arbeit sind die Erarbeitung eines standardisierten Aufbaus, der sinnvollen Erzeugung von Systemlasten und derer Einflüssen und die genaue Definition von Messpunkten und –vorgehen. Der Bedarf derartiger Simulationsmodelle, die die Leistungsverfügbarkeit eines Systems „zertifiziert“ quantifizieren können, ist ohnehin aufgrund vorherrschender Praxis gegeben. Ein anerkannter und verbreiteter Standard existiert derzeit nicht und führt somit zu starken Abweichungen im Vorgehen der Modellbildung und derer Ergebnisse. Zunächst steht dabei die Entwicklung von Modellen im Vordergrund, die die Systeme prozessual abbilden und eine grundsätzliche Aussage über deren Tauglichkeit ermöglichen. Die generierten Ergebnisse und Erkenntnisse werden in weiteren Planungsstadien an detailliertere Modelltypen übergeben.

Folgend wird ein Ansatz beschrieben, in welchem Leistungsverfügbarkeit in der Intralogistikplanung simulativ untersucht wird. Dieser fokussiert sich auf antizipative Veränderungsplanung bezüglich der Leistungsverfügbarkeit. Antizipative Systeme beziehen mögliche, zukünftige Konsequenzen infolge von heutigen, durchgeführten Handlungen unter dynamischen Bedingungen in die Planung ein [All00]. Der Ansatz sieht vor, quantitative Bewertungen auf Basis der Simulation von definierten Szenarien zu integrieren. Die Tauglichkeit des Ansatzes wird mit Hilfe eines Modells zellulärer Fördertechnik überprüft.

Als erster Ansatz in Bezug auf das simulationsbasierte Veränderungsplanungsrahmenkonzept für Intralogistiksysteme werden verschiedene Veränderungstreiber (bspw. Zeit, Quantität, Produkt, Qualität, Kosten) in Bezug auf zukünftige Szenarien innerhalb des Unternehmens und im Unternehmensumfeld analysiert. Anschließend werden die erstellten, zukünftigen Szenarien in Inputdaten transformiert. Zur Bestimmung, ob Veränderungen notwendig sind, um adäquat auf die gegebene Situation reagieren zu können, kommen im Simulationsmodell verschiedene Inputdatensätze zum Tragen. Falls die Systemflexibilität

nicht ausreichend ist, um auf die Veränderungstreiber zu reagieren, müssen notwendige Anpassungen in der zweiten Phase identifiziert werden. In dieser Phase werden die notwendige Flexibilität sowie die Maßnahmen zur Anpassung entsprechend des Prozesskettenelements festgelegt. Die grundlegenden Schritte der zweiten Phase sind in Abbildung 2 dargestellt. Die finale Phase umschließt die Analyse der Simulationsergebnisse, die auf den vom Simulationsmodell erstellten Informationen basieren.

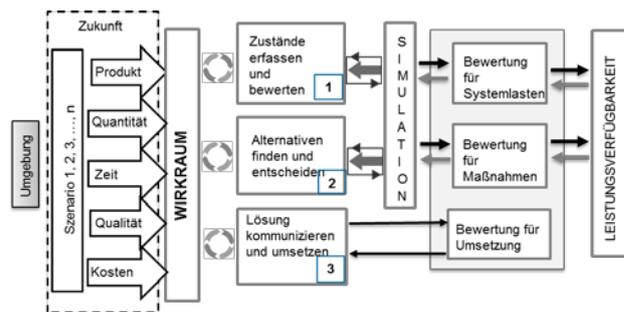


Abbildung 2. Simulationsbasiertes antizipatives Planungsrahmenkonzept für Intralogistiksysteme

Der dargestellte Ansatz liefert eine erste Idee für die Verwirklichung der „zertifizierten“ Untersuchung von Leistungsverfügbarkeit durch simulative Studien. Er erweitert dabei die Betrachtungsweise der VDI 4486, die von einer gleichmäßigen Lastverteilung ausgeht, um eine dynamische Komponente. Der Bedarf nach einer Festlegung der Modellentwicklung und dessen Aufbaus bleibt bestehen.

#### 4.1 NUTZUNGSABHÄNGIGE INSTANDHALTUNG VON LOGISTIKSYSTEMEN

Eine weitere Betrachtungsebene auf die Leistungsverfügbarkeit intralogistischer Systeme im Sinne eines gemäß Abbildung 1 zu betrachtenden Teilsystems ist die Instandhaltung und Anlagennutzungseffizienz. Instandhaltung soll dazu dienen die Anlage betriebsfähig zu halten und Ausfälle zu vermeiden. Gleichzeitig reduziert die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen in vielen Fällen die Einsatzzeit der Anlagen. Es entsteht also in beiden Sichtweisen eine Wechselwirkung mit der Leistungsverfügbarkeit der Anlagen. Ziel der Untersuchung an einem Teilsystem ist es deshalb die Anlagennutzung und Instandhaltung optimiert zu planen. Eine hilfreiche Kenngröße ist dafür die Kennzahl Nutzungseffizienz. Vor dem Hintergrund, zukünftige Intralogistiksysteme nicht nur verfügbar und zuverlässig sondern auch ressourcen- und folglich nutzungsgerecht zu gestalten, besteht die Notwendigkeit eines adäquaten Planungsinstruments [vgl. Ban12]. Eine besondere Herausforderung ergibt sich durch ein hohes Maß an Überdimensionierung, welches einer Vielzahl von intralogistischen Systemen inhärent ist. Es fehlt an nutzungsgerechter Auslegung durch die Hersteller. Hinzu kommt, dass Ausfälle aufgrund der Über-

dimensionierung erst sehr spät auftreten, wobei die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen dann ausfallorientiert oder zeitbasiert erfolgen [vgl. KBK<sup>+</sup>08]. Es liegen somit verschiedene Ausprägungen von Ressourcenverschwendung vor. Zum einen ermöglichen die etablierten Instandhaltungsstrategien keine adäquate Ressourcenausnutzung. Bei der ausfallorientierten Instandhaltung ist mit Folgekosten zu rechnen, die dem vier- bis fünffachen der Instandhaltungskosten entsprechen. Bei der zeitorientierten Instandhaltung wird der systeminhärente Abnutzungsvorrat nur unzureichend ausgeschöpft [vgl. KSS06]. Auf der anderen Seite erreichen verbaute Komponenten aufgrund einer Auslastung unterhalb des Nennwirkungsgrades nicht ihre bestmögliche Effizienz. Ein unsachgemäßer Energieverbrauch und höhere Anschaffungskosten gehen daher mit nicht bedarfsgerecht eingesetzten Komponenten einher. (vgl. Kuhn et al. 2008, S.273) Beide Verschwendungsausprägungen sollen vor dem Hintergrund des tatsächlichen Leistungsbedarfs untersucht werden, um ein ressourcenorientiertes, integriertes Planungs-, Betriebs- und Instandhaltungskonzept für Intralogistiksysteme zu realisieren.

Zur Identifikation und Bewertung gestalterischer Ineffizienzen und deren Folgeaufwänden wird die Kennzahl „Nutzungseffizienz“ entwickelt und ihr Beitrag zur Planung von intralogistischer Leistungsverfügbarkeit untersucht. Für die Herleitung der Kennzahl werden sämtliche Leistungen und Ressourcen intralogistischer Systeme korrelierend betrachtet. Nutzungseffizienz ist ein Maß für das Verhältnis von Systemlastfüllung sowie entsprechendem Realisierungsaufwand und gibt damit an, zu welchem Grad die Systemkosten in verfügbare Leistung umgesetzt werden. Mithilfe der Kennzahl können dann Aussagen zur Bedarfsgerechtigkeit und zur Dimensionierung eines Systems getroffen werden [vgl. BW12].

Die Kennzahl Nutzungseffizienz unterstützt bei der Analyse, Planung und Prognose der systemischen Leistungsverfügbarkeit. Der Grad der Nutzungseffizienz kann dabei als essentieller Einflussfaktor auf die Leistungsverfügbarkeit verstanden werden. So ist zu untersuchen, welche Auswirkungen eine exakt an den Bedarf angepasste Systemauslegung auf die Leistungsverfügbarkeit hat. Grenz- bzw. Problemlasten, bei denen die Leistungsverfügbarkeit nicht mehr gegeben ist, können bestimmt werden. Darüber hinaus kann der Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsmaßnahmen auf die Leistungsverfügbarkeit untersucht werden, um Handlungsvorgaben abzuleiten. Im Hinblick auf den systemischen Ansatz nimmt die Nutzungseffizienz eine Funktion als iterativ zu prüfender Parameter ein. Aus gegebenen Systemlasten der übergeordneten Simulationsdomänen wird unter Berücksichtigung der eingesetzten Ressourcen die Nutzungseffizienz für Teilsysteme bestimmt. Ausgehend vom Grad der Nutzungseffizienz können somit Empfehlungen hinsichtlich einer Anpassung (Erhöhung bzw. Verringerung) von Systemlast und Ressourceneinsatz zurückgegeben werden.

## 4.2 LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT UND ECHTZEITFÄHIGKEIT

Steuerungsalgorithmen und Dispositionsverfahren benötigen Ereignisse in den Materialflusssystemen, ausgelöst durch Aktoren und Sensoren oder auch Zustandssituationen, auf die sie reagieren. Diese Reaktionen „kosten“ Zeit, welche die Echtzeitfähigkeit eines Systems in Frage stellt. Solche Verzögerungen auf der Feldebene wirken sich direkt auf die Einhaltung der Termine der Transportaufträge aus und stellen so auch die Leistungsverfügbarkeit in Frage. Es ergibt sich also eine Notwendigkeit zur Betrachtung der Steuerungen in einem einheitlichen Modell von physikalischer Topologie, Informationsinfrastruktur und Steuerungslogik, das alle echtzeitrelevanten Aspekte intralogistischer Systeme abbildet.

Erst so können algorithmische Verfahren zum Nachweis der Echtzeitfähigkeit verwendet werden, die auf der Analyse von Netzen aus kommunizierenden Teilsystemkomponenten basieren. Eine algorithmische und simulative Analyse dieser Modelle kann den Nachweis der Echtzeitfähigkeit erbringen und somit eine Bewertung der Steuerung in ihrem Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit liefern.

Alle solche Einflüsse müssen in einem Modell mit Hilfe einer geeigneten, formalen Beschreibungssprache systematisch erfasst werden. Ein solches Modell kann als erweitertes Real-Time-Logistics-Modell (RTL) bezeichnet werden, das natürlich auch alle relevanten statischen Strukturen erfasst.

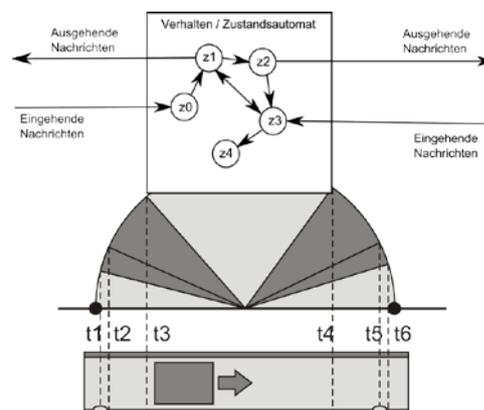


Abbildung 3. Darstellung des erweiterten RTL-Modells

Eine solche Analyse ist vor allem bei dezentral organisierten Systemen notwendig. Die räumlich verteilten Steuerungseinheiten bilden hier ein Netzwerk, das der physikalischen Topologie entspricht. Die Einheiten kommunizieren mit ihren physikalischen Nachbarn und bilden das Verhalten der Steuerungsstrategien durch Nachrichtenaustausch ab. Im Unterschied zum zentralen Fall bilden die Kanten des Graphen nunmehr Kommunikationsbeziehungen ab, denen neben der physischen Transportzeit

auch eine Nachrichtenübertragungszeit zugeordnet ist. Diese Erweiterung im Sinne einer Integration von Material- und Informationsfluss hat drastische Auswirkungen auf die Analyse der Echtzeitfähigkeit.

Ein Beispiel ist der Förderer aus Abbildung 3. Dessen Steuerungseinheit muss innerhalb des Zeitintervalls [t3, t4] eine Entscheidung treffen. Diese ist aber von dem zeitlichen Verhalten und der Kommunikation aller erreichbaren Knoten zwischen Quelle und Ziel abhängig. Damit hängt z.B. die Echtzeitanforderung eines Knoten bei einer Routinganfrage im Prinzip auch von den Echtzeitanforderungen anderer Knoten ab. Es eröffnen sich folgende Fragestellungen: Wie viele Routenvorschläge kann die Quelle maximal erwarten? Wie wirkt sich die schnelle Wahl einer schlechteren Route auf die Echtzeitanforderung auf Systemebene ab, auch wenn so die Echtzeitanforderung des einzelnen Knoten erfüllt wird? Dieses Beispiel veranschaulicht die Notwendigkeit neben den Echtzeitanforderungen aus dem Verhalten einzelner Knoten auch die Echtzeitanforderungen zu berücksichtigen, die sich aus der Interaktion mehrerer Knoten ergeben.

### 4.3 ERFASSUNG DER LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT MIT HILFE EINER VR-BASIERTEN SIMULATION

Mit Hilfe einer von uns entwickelten, VR-basierten (Virtual-Reality-basierten) Simulation ist es möglich, die für die Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit nach VDI 4486 notwendigen Größen eines zellularen intralogistischen Systems zu ermitteln und intuitiv zu visualisieren. Somit kann schon während der Planung der Anlage, oder einer Modifikation dieser, eine Aussage über die Leistungsverfügbarkeit getroffen werden.

Dabei wird zwar auch der Einfluss statischer Größen, wie zum Beispiel der Dimensionierung der Anlage, betrachtet, der Fokus liegt aber vielmehr auf der detaillierten Betrachtung dynamischer, teilweise auch im laufenden Betrieb wechselnder Größen, wie Lagerungs- und Steuerungsstrategien, das Systemverhalten, Auftragszusammensetzung und Eigenschaften der zu transportierenden Güter. Insbesondere die hohe Dynamik beim Systemverhalten zellulärer Intralogistiksysteme hat einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit und erfordert daher eine detaillierte Simulation des Fahrzeugverhaltens inklusive der Motorenansteuerung, der Sensorik und der Kollisionsvermeidungsstrategien.

Das hier dargestellte Simulationsmodell weist einen hohen Detailgrad auf und ist daher aufgrund seiner Geschwindigkeit (Ablauf in Echtzeit) nicht dazu geeignet, längere Zeiträume oder eine große Menge an Durchläufen für kurze Betrachtungszeiträume in kurzer Zeit zu simulieren. Stattdessen kann die Simulation genutzt werden, um die Leistungsverfügbarkeit unter bestimmten Bedingungen beziehungsweise Ausnahmbedingungen zu ermitteln und somit potenzielle Engpässe und Probleme, die nur bei diesem Detailgrad sichtbar werden, rechtzeitig zu

entdecken und zu beheben. Erkenntnisse aus diesen Simulationsdurchläufen können als statistische Größen in die niedriger aufgelösten Simulationssysteme einfließen und dort genutzt werden, um eventuelle, nur auf tiefen Ebenen erkennbare Einflüsse mit betrachten zu können. Dadurch können genauere Aussagen über die Leistungsverfügbarkeit für lange Zeiträume getroffen werden.



Abbildung 4. Berechnung der Leistungsverfügbarkeit auf Basis von Laufzeiten

Simulationssysteme, die den Bogen spannen von einer echtzeitfähigen, VR-basierten Simulation einer zellularen intralogistischen Anlage, bis hin zur Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit, wurden bisher nicht veröffentlicht [vgl. RHE13]. Daher wurde auf die Erweiterung eines vorhandenen Simulationssystems und die Erstellung eines geeigneten Simulationsmodells gesetzt.

Das vollständige Simulationsmodell bildet ein zelluläres intralogistisches System inklusive Kommissionierstationen, Regallager, Fahrzeugheber und autonomen Fahrzeugen sowie deren Verhalten ab. Die Steuerung und Sensorik der Fahrzeuge wird ebenso betrachtet wie die Regelung der Motoren, so dass das Verhalten einzelner Fahrzeuge und dessen Auswirkung auf die Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems beobachtet werden kann. Das Zeitverhalten der Kommissionierstationen und die Funktionsweise der Auftragsvergabe sind ebenfalls Bestandteile des Modells. Ausfälle und Defekte an einzelnen Komponenten der Fahrzeuge sowie an den Kommissionierstationen können abgebildet und gegebenenfalls während eines Simulationsdurchgangs herbeigeführt werden. Eine vorhandene TCP-Schnittstelle (Transmission Control Protocol) erlaubt es, externe Quellen zur Steuerung des Verhaltens einzelner Bestandteile anzubinden, um simulierte Steuerungssysteme durch ihre realen Äquivalente zu ersetzen.

Die Aufträge, denen ein Simulationsdurchgang zugrunde liegt, basieren auf realen Daten, die aus OTD-NET extrahiert wurden. Die für die Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit notwendigen Werte wie Wartezeiten und Laufzeiten werden während der Simulation kontinuierlich

gemessen und visualisiert, sowie am Ende des Betrachtungszeitraumes für eine Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit herangezogen (vgl. Abbildung 4).

Die internen Zustände des Systems und der einzelnen Bestandteile sowie deren Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit werden durch intuitive Metaphern visualisiert. Mit Hilfe geeigneter Interaktionsmechanismen ist es möglich, das Geschehen direkt zu beeinflussen und die Auswirkungen von Veränderungen am System, der Systemlast oder einzelnen Komponenten zu beobachten.

Auf Basis der Visualisierungs- und Interaktionsmechanismen ist es möglich, die Simulation in einer VR-Umgebung zu präsentieren und zu analysieren. Dies bietet einen detaillierten und intuitiven Zugang zur Leistungsverfügbarkeit des Systems und den Größen, die diese beeinflussen, um die Anlage gemeinsam mit Geschäftspartnern zu betrachten und optimal planen zu können.

## 5 FAZIT

Der Artikel macht deutlich, warum es anzustreben ist das Verständnis und die Berechnungsgrundlagen für Leistungsverfügbarkeit über die aktuelle Diskussion und den Stand der Technik der VDI 4486 zu erweitern. Leistungsverfügbarkeit nach dem in diesem Artikel verwendeten Verständnis ist eine wesentliche Grundlage für eine arbeitsteilige Leistungserbringung in einer Dienstleistungsgesellschaft. Leistungsvereinbarungen zwischen Auftraggeber und Dienstleister müssen auch die Leistungsverfügbarkeit ihrer Leistung definieren. Dafür benötigen sie eine branchenweit etablierte Grundlage, auf der sie das Dienstleister-Kunden-Versprechen festlegen. Leistungsverfügbarkeit muss dazu auf der Ebene des Kundenversprechens, z.B. 24h Lieferzeit, definiert und überwacht werden. Es werden standardisierte Methoden und Berechnungsvorschriften zur Festlegung und Prüfung der Leistungsverfügbarkeit notwendig. Das Ziel der Arbeiten soll daher eine Zertifizierung nicht nur der begrifflichen Grundlagen und Berechnungsmethoden sein, sondern auch eine Zertifizierung der eingesetzten Werkzeuge und Experimentdesigns. Der zukünftige Einsatz autonomer Systeme stellt für die Analyse des Systemverhaltens bezüglich Leistungsverfügbarkeit zusätzlich Herausforderungen dar. Um diesen Anforderungen zu entsprechen ist ein systemischer Ansatz notwendig, der das Gesamtsystem in sinnvolle Untersuchungsebenen und -abschnitte wie beschrieben vertikal und horizontal gliedert. Der Artikel zeigt verschiedene Betrachtungsdimensionen von Leistungsverfügbarkeit anhand ausgewählter Teilsysteme, wie der Untersuchung der Instandhaltung und Anlagenutzungseffizienz, der Echtzeitfähigkeit und Steuerungssimulation auf.

Weiterführendes Ziel für die Arbeiten wird die Definition der Schnittstellen zwischen den Teiluntersuchungen und der übergeordneten Planungsebene sein und die Syn-

these aller Befunde zu einer Aussage über die Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems.

## 6 DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung entstand als Kollaboration aller Teilprojekte im Rahmen des Paketantrags PAK 672 „Leistungsverfügbarkeit - Logistics on Demand“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

## LITERATUR

- [All00] Allgood, Glenn O.: *Mapping function and structure for an anticipatory system: what impact will it have and is it computationally feasible, today?* In: Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics. Nashville, TN, 2000, S. 2198 - 2203.
- [Ban12] Bandow, Gerhard: *Paketantrag 672 – Werkzeuge zur nutzungsabhängigen Planung und Durchführung der Instandhaltung von Intralogistiksystemen (Nutzungsabhängiges Instandhaltungsmanagement)*. Forschungsantrag DFG, 2012.
- [BW12] Bandow, Gerhard; Wötzel, André: *Visualisierungscockpit – Transparenz für die Instandhaltung von intralogistischen Systemen*. In: Tagungsband zum 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung (AKIDA) 2012, S.317-326.
- [Ele12] Eley, Michael: *Simulation in der Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer Gabler Verlag, 2012.
- [JtH11] Jung, Eike; ten Hompel, Michael: *Analytische Stauprognose in Stetigfördersystemen im Rahmen der Systemplanung*. In: 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Tagungsband, 2013, S. 119-131.
- [KBK<sup>+</sup>08] Kuhn, Axel; Bandow, Gerhard; Kohlmann, Britta; Wenzel, Sebastian: *Zuverlässigkeit von Intralogistiksystemen – Überdimensionierung vs. Nutzungsabhängige Instandhaltung*. In: Tagungsband zum 7 Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagen-

überwachung (AKIDA), 2008, S.269-276.

- [KSS06] Kuhn, Axel; Schuh, Günter; Stahl, Beate: *Nachhaltige Instandhaltung – Trends, Potenziale und Handlungsfelder Nachhaltiger Instandhaltung*. Frankfurt: VDMA Verlag, 2006.
- [Mai10] Maier, Martina M.: *Prognose der Leistungsverfügbarkeit während der Planung*. In: 6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Tagungsband, 2010, S. 233-244.
- [RtHE13] Rossman, J.; ten Hompel, M.; Eilers, K.: *Simulations- und VR-basierte Steuerungsverifikation zellularer Intralogistiksysteme*. In: 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL). Tagungsband, 2013.
- [VDI3581] VDI Richtlinie 3581: *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [VDI3633-1] VDI Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik- Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [VDI4486] VDI Richtlinie 4486: *Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit*, Berlin, Beuth Verlag, 2012.
- [Wit07] Wittenstein, Anna-Katharina: *Bedarfs-synchrone Leistungsverfügbarkeit der kundespezifischen Produktentwicklung*. Dissertation, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2007.

---

**Dr.-Ing. Tobias Hegmanns** ist stellvertretender Leiter des Lehrstuhls für Unternehmenslogistik der Technischen Universität Dortmund und akademischer Direktor des Institutsbereichs Unternehmenslogistik am Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik in Dortmund.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 9743-417, E-Mail: hegmanns@lfo.tu-dortmund.de

**Prof. Dr.-Ing. Axel Kuhn** ist nach langjähriger Tätigkeit als Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Fabrikorganisati-

on (jetzt: Unternehmenslogistik) im Juli 2012 aus seinem aktiven Dienst nach 19 Jahren Lehrstuhlleitung und insgesamt 39 Jahren Tätigkeit an der Technischen Universität Dortmund in den Ruhestand übergegangen.

**Dipl.-Inf. Moritz Roidl** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Universität Dortmund. Er studierte Informatik an der Technischen Universität Dortmund. Tel.: +49 231 755-3092, E-Mail: moro@flw.mb.tu-dortmund.de<sup>1)</sup>

**Steffen Schieweck, M.Sc., MS SCE (USA)** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Universität Dortmund. Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Dortmund sowie Supply Chain Engineering am Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA. Tel.: +49 231 755-4832, E-Mail: stsc@flw.mb.tu-dortmund.de<sup>1)</sup>

**Prof. Dr. Michael ten Hompel** ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen 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.de<sup>1)</sup>

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

**Maximilian Austerjost, M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Unternehmenslogistik an der Technischen Universität Dortmund. Tel.: +49 231 755 5765, E-Mail: austerjost@lfo.tu dortmund.de<sup>2)</sup>

**Mustafa Guller, M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Unternehmenslogistik an der Technischen Universität Dortmund. Tel.: +49 231 755 3092, E-Mail: gueller@lfo.tu dortmund.de<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup>Adresse: Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, Leonhard-Euler-Str. 5, 44227 Dortmund.

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

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

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

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