

Robustheit intralogistischer Anlagen

Robustness of Material Handling Systems

Christian Hammel
Frank Schulze
Thorsten Schmidt

*Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden*

Leistungsverfügbarkeit bewertet den Erfüllungsgrad vorgegebener Anforderungen an intralogistische Anlagen. Für die Gewährleistung der Leistungsfähigkeit bei schwankender Last und Störungen müssen die Anlagen eine hohe Robustheit aufweisen. Der Beitrag beschreibt einen Ansatz zur Bewertung der Robustheit solcher Systeme, insbesondere während verschiedener Phasen der Planung, und liefert damit Ansätze zur Steigerung der Robustheit und folglich zur planbaren Absicherung der Leistungsverfügbarkeit.

[Schlüsselwörter: Planung von Materialflusssystemen, Netzwerk, Leistungsverfügbarkeit, Störung, Lastschwankung]

Abstract: Performance availability measures the degree of fulfillment of defined requirements by a material handling system. In order to guarantee performance in case of changing transport scenarios or local failures systems must provide a high robustness. This paper describes an approach for assessing robustness of such systems, especially for different stages of the design phase. Thus, it can be used to design systems with a higher robustness providing the ability to plan for performance availability.

[Keywords: Material Handling System Design, Network, Performance Availability, Failure, Load Variation]

1 EINLEITUNG

Die Anforderungen an logistische Systeme (sowohl mengenmäßig als auch strukturell) wandeln sich immer schneller. Ihr Entwurf erfolgt unter hohem Zeitdruck und mit unsicherer Datenbasis. Die einzige sichere Annahme ist in der Regel, dass sich die tatsächlich eintretende Systemlast von der geplanten unterscheiden wird. Das Ziel, Systeme zu entwerfen, die trotz Änderungen externer Faktoren (Auftragsvolumen und -struktur) sowie interner Faktoren (Verfügbarkeit von Ressourcen, Ausfallsicherheit der Systeme) die geforderte Leistung erbringen, gewinnt zusätzliche Bedeutung. Diese Eigenschaften können unter dem Begriff der Robustheit zusammengefasst werden, welcher bisher in der Intralogistik nicht einheitlich verwendet wird.

Systeme mit einer hohen Robustheit versprechen in der Folge eine hohe Leistungsverfügbarkeit. Hingegen liefert die Leistungsverfügbarkeit kaum Anhaltspunkte für die robuste Gestaltung eines geplanten Systems, denn ihre Bewertung erfolgt explizit ohne Beachtung der inneren Struktur. Sie bewertet also lediglich, ob ein System gegebenen Anforderungen gerecht wird, nicht aber warum.

Ein Bedarf für Robustheitskenngrößen und entsprechende Berechnungsverfahren besteht fraglos, denn damit werden Messgrößen für den Vergleich von Planungsalternativen und die Identifikation von Schwachstellen geschaffen. Vorarbeiten der Professur für Technische Logistik der TU Dresden haben das Potential der Übertragung von Methoden aus der Theorie komplexer Netzwerke auf die Lösungen von Planungsaufgaben in der Logistik gezeigt. Allerdings besitzen logistische Netzwerke eine Reihe von Eigenschaften, welche eine Weiterentwicklung der verfügbaren Methoden und Algorithmen erforderlich machen. Die entstehenden Verfahren erlauben eine kritische und schnelle Bewertung intralogistischer Netzwerke sowie die einfache Identifikation robuster Alternativen.

In diesem Beitrag sollen Ansätze zur Bewertung und Verbesserung der Robustheit intralogistischer Anlagen vorgestellt werden. Dabei wird zunächst auf den Begriff der Robustheit und den Zusammenhang mit der Leistungsverfügbarkeit eingegangen (Kapitel 2). In Kapitel 3 werden die Ansätze zur Bewertung der Robustheit in verschiedenen Phasen der Planung beschrieben. Anschließend folgen Einsatzbeispiele aus der Praxis (Kapitel 4) und die Zusammenfassung (Kapitel 5).

2 ROBUSTHEIT UND LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Robustheit geht auf das lateinische „robustus“ („aus Hartholz“) zurück und lässt sich unter anderem mit den Synonymen Widerstandsfähigkeit und Stabilität umschreiben. Insbesondere ersteres impliziert die Frage „wogegen?“ und zeigt, dass der Begriff der Robustheit keineswegs eindeutig selbsterklärend ist und seine

Definition stets in Bezug auf das jeweilige Fachgebiet und den Zusammenhang erfolgen muss.

2.1 ROBUSTHEITSBEGRIFF

Robustheit wird in vielen Bereichen zur Beschreibung einer Eigenschaft von Systemen herangezogen, die Definitionen variieren jedoch. In der Netzwerktheorie wird unter der Robustheit eines Netzwerks dessen Funktionsfähigkeit bei Ausfällen von Kanten oder Knoten verstanden (vgl. [AB02]). Die genaue Quantifizierung ist jedoch abhängig vom jeweiligen Hintergrund und daher nicht eindeutig definiert. Rein auf die Topologie bezogen werden hierfür bspw. der Grad der Erhaltung von Verbindungen zwischen allen Knotenpaaren oder die Entwicklung der kürzesten Wege bei Ausfällen herangezogen (vgl. [SSY10]). Bei Einbeziehung von Flüssen wird in letztgenannter Publikation schließlich die Elastizität als Maß der Robustheit vorgeschlagen. Diese wird definiert als "the area under the curve of throughput versus the percentage of nodes removed", also die normierte Summe der normierten Restdurchsätze bei schrittweisem Ausfall von Knoten. Sie ist damit, wie alle flussbezogenen Ansätze, von der gewählten Routingstrategie abhängig. Insgesamt bietet die Netzwerktheorie eine Vielzahl interessanter Ansätze. In der Regel wird jedoch die Abnahme der Funktionsfähigkeit bei einer Zunahme von Ausfällen untersucht. In der Intralogistik liegt der Fokus jedoch auf einem Entwurf, welcher gegenüber wenigen gleichzeitigen Ausfällen sehr robust ist, während die Auswirkungen von Ausfällen größerer Systemteile aufgrund des Verhältnisses von Kosten zu Eintrittswahrscheinlichkeit in Kauf genommen werden.

In der Logistik (das Supply Chain Management eingeschlossen) gibt es zwar keine eindeutige Definition des Begriffes „Robustheit“, seine verschiedenen Deutungen erscheinen jedoch nur auf den ersten Blick widersprüchlich. Tatsächlich unterscheiden sie sich nur insofern, als dass ein System als robust gilt, wenn es seine Leistung (in Grenzen) auch dann aufrechterhalten kann,

- wenn Auftragsvolumen oder -struktur sich verändern (vgl. [BZZ05], [SSR03]) oder
- wenn einzelne seiner Komponenten ausfallen (vgl. [HFP⁺08], [MS07], [AJB00]) oder
- wenn beides gleichzeitig geschieht (vgl. [KMG10], [Hau10], [GL09]).

Einigkeit herrscht aber darüber, dass die Robustheit eine Eigenschaft ist, welche ein System per se besitzt. Um sie aufrechtzuerhalten, sind keine Strukturanpassungen erforderlich.

Die Robustheit eines intralogistischen Systems kann also zusammenfassend (qualitativ) definiert werden als Grad der systemimmanenten Fähigkeit, in einem

bestimmten Rahmen abweichende bzw. sich mit der Zeit ändernde Leistungsanforderungen zu erfüllen und auch bei Komponentenausfällen einen möglichst hohen Anteil der geforderten Leistung zu erbringen. Im Gegensatz zu Flexibilität und Wandelbarkeit sind innerhalb dieses Rahmens keine Systemanpassungen nötig.

Dieser Robustheitsbegriff erscheint auch im Hinblick auf die heute verbreitete Bauweise (intra-) logistischer Systeme als besonders geeignet. Zwar gibt es umfangreiche Bestrebungen zur Gestaltung wandelbarer logistischer Systeme durch den Einsatz modularer, autonomer Komponenten, welche die Fähigkeit zur selbstständigen Organisation bzw. Rekonfiguration besitzen. Gleichwohl werden auf absehbare Zeit intralogistische Systeme zu erheblichen Teilen aus fest installierten Komponenten (zum Beispiel Stetigförderer und Stahlbau) bestehen. Für die Planung und den Betrieb solcher Anlagen bleibt die Frage, welche „strukturelle Robustheit“ sie mitbringen, mithin von entscheidender Bedeutung.

2.2 BISHERIGE BEWERTUNGSMÖGLICHKEITEN

Die VDI-Richtlinien 4001-2, 3581 und 3649 (vgl. [VDI4001-2], [VDI2581] und [VDI3649]) definieren Verfügbarkeit praktisch gleichlautend als „Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen erfüllen zu können.“ Hervorzuheben ist, dass der Verfügbarkeitsbegriff damit (a) explizit auf eine (technische) Einheit Bezug nimmt und (b) rein binär („geht oder geht nicht“) verstanden wird. Dieser klassische Verfügbarkeitsbegriff mag für viele technische Systeme praktikabel sein (ein Fahrzeug fährt oder es fährt nicht, nur selten wird man meinen, dass es „etwas“ oder „teilweise“ fährt) für logistische Systeme ist diese binäre Sichtweise aber unangemessen.

Die VDI-Richtlinie 4486 (vgl. [VDI4486]) schafft für den Fall von Systemabnahmen mit dem Kennwert der Leistungsverfügbarkeit eine Möglichkeit der Bewertung der Systemparameter in definierten Lastfällen. In diese fließen alle Störungen ein, die während der Messung auftreten. Der Begriff bezieht sich unabhängig von der Systemstruktur auf die Fähigkeit, die geforderte Leistung zu erbringen (bspw. Ent- und Versorgung von Quellen und Senken innerhalb definierter Zeiten) und basiert auf der Messung von Durchlauf- bzw. Wartezeiten. Er berücksichtigt zum Beispiel Pufferkapazitäten und Lieferzeitreserven, ist jedoch primär für die Bewertung bestehender Anlagen bzw. von Simulationsmodellen bestimmt, blendet die innere Struktur des Transportsystems bewusst aus und ist auf Informationen angewiesen, die in frühen Planungsphasen nicht in der nötigen Detailtiefe verfügbar sind. Nach [FMM12] hat er gegenüber bisher üblichen Verfahren zur Bestimmung der

(technischen) Verfügbarkeit „den Vorteil, dass er die tatsächliche Nutzbarkeit der Anlage wiedergibt, unabhängig von der inneren Struktur.“ Damit zeigt er zwar *ob* eine Anlage gegen Störungen (die im Beobachtungszeitraum auftreten) robust ist, nicht aber *warum*.

Ausfallszenarien und wechselnde Lastszenarien werden meist mittels dynamischer Simulationen analysiert. Dafür werden beispielsweise einzelne Strecken kurzzeitig gesperrt oder definierte alternative Lastszenarien eingespielt und die Auswirkungen auf Durchsatz und Transportzeiten untersucht. Aufgrund des erforderlichen Aufwands für diese Simulationen werden die Ausfälle und Alternativlasten in der Regel lediglich punktuell getestet, die Auswahl beruht dabei auf dem Know-how und der Einschätzung der beteiligten Experten.

3 ANALYSEANSATZ

Für die Analyse der Robustheit von Materialflusssystemen während der Planung erfolgt die Modellierung des Transportnetzwerks als Knoten-Kanten-Modell. Dabei werden Kreuzungs- sowie Start- und Endpunkte als Knoten und ihre Verbindungen, die Transportstrecken, als Kanten abgebildet. Diese Modellierung hat den Vorteil, dass sie auf unterschiedlichste Materialflusssysteme übertragbar ist. Voraussetzung ist allein, dass es sich um pfadbasierte Systeme handelt (z.B. Stetigfördersysteme, Elektrohängebahnen und Fahrzeugsysteme, soweit sie spurgeführt sind). Damit ist die vorgestellte generische Methode auf eine Vielzahl von Systemen anwendbar. So wurden auf diese Weise unter anderem bereits Gepäckförderanlagen von Großflughäfen und Wafer-Transportsysteme in Halbleiterfabriken betrachtet.

Die hierarchische Gliederung der Robustheitsbetrachtung (siehe folgende Tabelle) orientiert sich an der Planung von Materialflusssystemen und der Verfügbarkeit von Planungsdaten in aufeinanderfolgenden Planungsschritten. Im ersten Schritt wird lediglich die Topologie des Systems untersucht, ohne dass technische Parameter wie der Durchsatz oder die Kapazität von Verbindungen in Betracht gezogen werden. Der zweite Schritt bezieht eben diese mit ein. Im dritten Schritt wird schließlich das System einzelnen Lastszenarien ausgesetzt. Mit dieser wachsenden Informationsdichte vergrößert sich gleichzeitig die Genauigkeit der zugrundeliegenden Annahmen und die Planungssicherheit steigt. Andererseits sinkt die Planungsflexibilität. Dies macht noch einmal die Bedeutung der Optimierung in den frühen Planungsphasen deutlich.

Analyseebene (Einbezogene Informationen)	Inform.- dichte	Planungs- flexibilität	Planungs- sicherheit
Topologiebezogen (Verbindungsstruktur)			
Flussbezogen (Verbindungskapazität)			
Lastbezogen (Lastszenarien)			

Die benötigten Informationen für die drei genannten Sichtweisen entsprechen in der Praxis in der Regel dem verfügbaren Informationslevel während einzelner Phasen eines Planungsprozesses. Daher können diese Sichtweisen über die Bewertung hinaus zur systematischen Optimierung genutzt werden. Dabei wird beispielsweise ermittelt, ob durch zusätzliche Verbindungen die Robustheit verbessert wird beziehungsweise welche Kanten eingespart werden können, weil ihr Verlust keine oder lediglich eine geringe Verschlechterung der Robustheit bewirkt.

Für die Einbeziehung der strukturellen Robustheit in die Systemplanung kann auf vielversprechende Erfahrungen mit dem Einsatz von Methoden aus der Theorie komplexer Netzwerke zur Bewertung von Materialflusssystemen aufgebaut werden. Die vorliegenden Verfahren liefern topologiebezogene Kenngrößen zur Bewertung der Systeme (ihre Struktur wird ohne Annahme von Lastszenarien bewertet). Sie können passend zur verfügbaren Informationsbasis für die Robustheitsbewertung und -optimierung in der ersten Planungsphase angepasst werden. Zur Einbeziehung in den weiteren Phasen bedarf es entsprechender Verfahren zur Ermittlung fluss- und lastbezogener Kenngrößen, um dem jeweiligen Stand der Informationsverfügbarkeit gerecht zu werden.

3.1 TOPOLOGIEBEZOGENE EBENE

Abbildung 1 stellt die Ergebnisse zweier grundsätzlich verschiedener Ansätze zur Bewertung eines Transportnetzwerks gegenüber. Im linken Bild ist nach einer formalen Topologieanalyse an allen Verzweigungen und Zusammenführungen die sogenannte Knotenzentralität (vgl. „Point Centrality“ in [Fre77]), eingeschränkt auf Quelle-Senke-Relationen dargestellt. Sie gibt den Anteil der kürzesten Wege zwischen allen Quellen und allen Senken (in der ursprünglichen Definition zwischen allen Knotenpaaren) an, welche diesen Knoten nutzen. Im rechten Bild sind die Gutströme dargestellt, welche in einer Simulation entsprechend der implementierten Steuerung die Knoten tatsächlich passieren. Obwohl die beiden Ansätze zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchführbar sind und entsprechend auf deutlich anderen Informations-

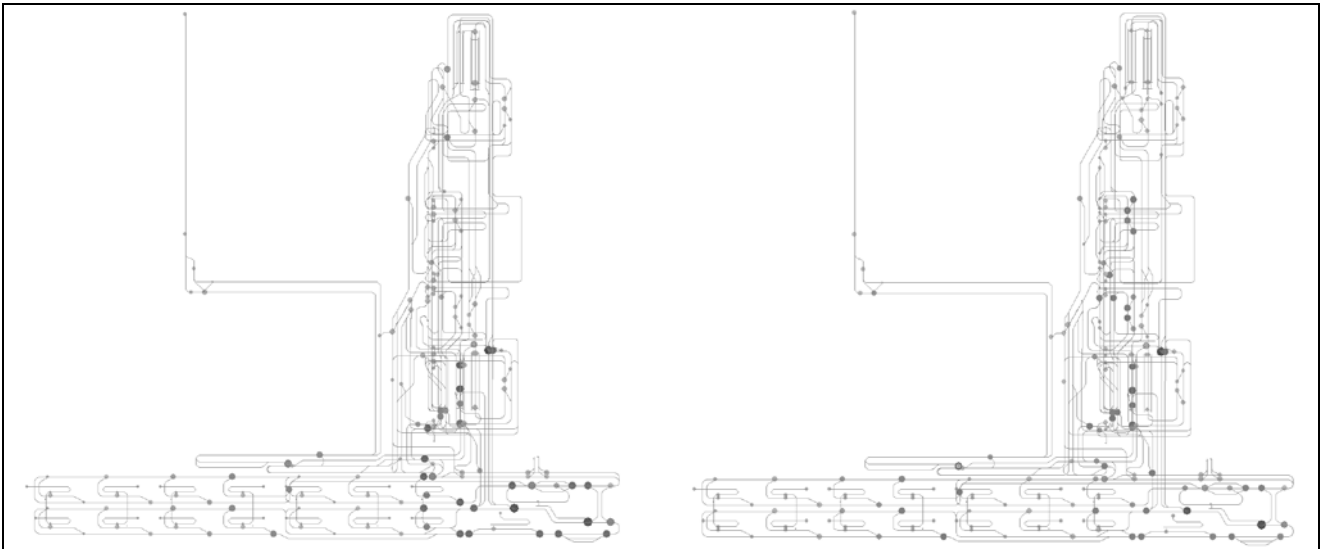


Abbildung 1. Gegenüberstellung der ermittelten Knotenbelastungen der Gepäckförderanlage eines Flughafens (links: nach einer Topologieanalyse – rechts: nach einer Simulationsrechnung; hohe Belastung: große/dunkle Punkte – niedrige Belastung: kleine/helle Punkte)

grundlagen basieren, ergibt sich eine bemerkenswerte Ähnlichkeit der Ergebnisse.

Aus einer solchen Betrachtung lassen sich aber vor allem weitere Erkenntnisse ableiten, indem z.B. für jeden Knoten- oder Kantenausfall ermittelt wird, welcher Anteil an Quelle-Senke-Relationen dadurch unterbrochen wird (siehe als Beispiel Abbildung 2) und in welchem Maß sich die kürzesten Wege verlängern. Auch die umgekehrte Fragestellung ist möglich: Durch welche zusätzlichen Knoten oder Kanten lässt sich der Ausfall oder die Verlängerung von Quelle-Senke-Relationen bei Störungen vermeiden oder verringern, d.h., wie kann die Robustheit des Entwurfs am einfachsten verbessert werden?

Gleichwohl ist eine solche topologiebezogene Bewertung nur die größte Form der Betrachtung, denn unter Hinzunahme weiterer Daten lässt sich die Bewertung noch verfeinern.

3.2 FLUSSBEZOGENE EBENE

Sind Angaben zur Knoten- und Kanten-Kapazität (d.h. Durchsatzzahlen) verfügbar, wird eine *flussbezogene Bewertung* des Transportnetzwerks möglich. Hierzu sind Algorithmen verfügbar, mit denen der sog. maximale Fluss ermittelt wird (vgl. [FF56] und [FF62]). Er beschreibt den Gesamtdurchsatz, welchen das Netzwerk zwischen beliebigen Quellen und Senken überhaupt erreichen kann. Dieser Wert ist für Versorgungsnetze (z.B. Wasser, Energie) besonders relevant; auf Transportnetze ist eine solche Betrachtungsweise jedoch nicht direkt übertragbar, denn hier ist ein konkretes Gut über eine bestimmte Quelle-Senke-Relation zu transportieren.

Mit einem solchen Ansatz lässt sich jedoch der theoretisch mögliche Durchsatz des Systems berechnen, ohne die mengenmäßigen Verhältnisse der Quelle-Senke-Relationen untereinander zu beachten (bzw. zu kennen). Diese theoretische Grenze kann naturgemäß in tatsächlichen Lastszenarien nicht erreicht werden, gibt aber eine Obergrenze vor, welche als Bewertungsmöglichkeit der Leistungsfähigkeit herangezogen werden kann und damit als Vergleichsfall für Störungsszenarien dient.

3.3 LASTBEZOGENE EBENE

Für die *lastbezogene Analyse* werden schließlich einzelne (geplante) Lastszenarien, also die genutzten Quelle-Senke-Relationen und ihre jeweilige Intensität zugrunde gelegt. Dadurch kann das praktische Durchsatzmaximum bestimmt werden. Dieses Maximum bildet das strukturelle Limit, welches von keiner Steuerung auf diesem Layout übertroffen werden kann. Die bei der entsprechenden Störungsuntersuchung entstehenden Informationen liefern Informationen zur Wichtigkeit einzelner Elemente für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Darüber hinaus können sie für die übliche Simulation hilfreich sein, da sie kritische Ausfallszenarien aufzeigen, wodurch die simulative Untersuchung weniger auf die Erfahrung und das richtige Gespür des Simulationsexperten setzt.

Aus der Theorie komplexer Netzwerke stehen für diese Untersuchungen (Maximum Concurrent Flow) bislang nur Algorithmen zur Verfügung, mit denen relativ kleine Netzwerke bewertet werden können, welche aber vollständig (jeder Knoten ist mit jedem verbunden) sein dürfen (vgl. [GK98], [SM87] und [SM90]). Ähnliche Ansätze finden beispielsweise im Bereich der Analyse von Telekommunikationsnetzwerken Anwendung, aufgrund der NP-Schwere jedoch ebenfalls auf kleine

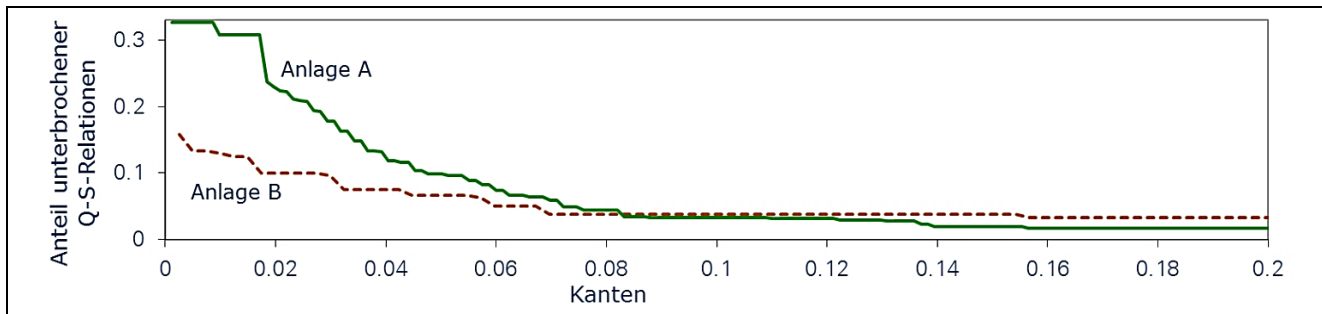


Abbildung 2. Normierte Auswertung der Folgen einzelner Kantenausfälle zweier Gepäckförderanlagen, sortiert nach absteigender Auswirkung von Einzelausfällen je einer Kante

Netzwerke begrenzt (vgl. [PM04]). Für die systematische Bewertung von Netzwerken einer relevanten Größe müssen diese Algorithmen unter Ausnutzung der speziellen Netzwerkcharakteristiken in der Intralogistik (z.B. geringe Anzahl von ein- und ausgehenden Kanten, geringe Anzahl der Knoten fungieren als Quellen oder Senken) entsprechend weiterentwickelt werden.

4 PRAXISEINSATZ

Das in Abbildung 1 vorgestellte Beispiel zeigt bereits den praktischen Nutzen sowohl des Netzwerkansatzes als auch der Robustheitsbewertung. Sind zu Beginn der Planungen eines solchen Systems noch keine belastbaren Annahmen zur technischen Auslegung der Strecken und zur erwarteten Belastung verfügbar, kann sich eine Bewertung lediglich an der Struktur des Netzwerkentwurfs orientieren. Während dieses ersten Planungsschritts lassen sich insbesondere die generelle Existenz von Verbindungen für alle Quelle-Senke-Relationen und die Längen der kürzesten Wege bei einzelnen und kombinierten Störungen auswerten. Für kombinierte Ausfälle ist dabei speziell die Synergie (vgl. [JJ08]) von Interesse, das heißt die über die Summe der Folgen der Einzelfälle hinausgehenden Auswirkungen.

In Abbildung 2 sind die Auswirkungen einzelner Kantenausfälle auf die Verfügbarkeit von Verbindungen zwischen Quellen und Senken dargestellt. Die Kanten sind dabei nach absteigendem Ausmaß eines Ausfalls geordnet. Es zeigt sich, dass es in Anlage A einige Kanten gibt, deren Einzelausfall die Nichtverfügbarkeit eines großen Anteils der Quelle-Senke-Relationen nach sich zieht (bis zu einem Drittel aller Relationen). Gleichzeitig beschränken sich deutliche Folgen aber auf rund 15% der Kanten. In Anlage B hingegen sind die größten Auswirkungen von Einzelausfällen deutlich geringer, dafür führt der Einzelausfall bei deutlich mehr Kanten zu spürbaren Einschränkungen.

Eine Gegenüberstellung von netzwerkbasierter Analyse und dynamischer Simulation anhand einer praktischen Aufgabenstellung verdeutlicht das Einsatzpotential weiter: Im Rahmen der Planung einer neuen Halbleiterfabrik wurden beide Wege beschritten. In

[GCH⁺12] zeigt ein Vergleich der Untersuchungsansätze, dass – soweit bestimmte Charakteristiken oder Restriktionen eines Systems bekannt sind – die Prognosen des maximalen Durchsatzes aus der netzwerkbasierter Analyse kaum Abweichungen von denen der Simulation aufweisen und die Prognosen für die durchschnittliche Transportzeit lediglich um 10 bis 20 % abweichen. Die Güte dieser Ergebnisse wird durch den zusätzlichen Vergleich des jeweiligen Aufwands unterstrichen: Für die Erstellung des Simulationsmodells waren mehrere Mannmonate nötig, die Laufzeit lag aufgrund der Systemgröße (mehrere Tausend Kreuzungen, mehrere Zehntausend Transporte pro Stunde) beim bis zu 1,7-fachen der Realzeit. Dagegen konnten mit dem Netzwerkansatz unterschiedlichste Layoutvarianten innerhalb von Tagen untersucht, bewertet, optimiert und einer selektiven Robustheitsanalyse unterzogen werden. Dies zeigt die generelle Machbarkeit und den Nutzen einer Analyse auf Basis eines abstrakten Netzwerkmodells.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die gebräuchlichen Verfügbarkeitsmaße aus dem Normenwerk sind für den Einsatz gerade in frühen Planungsstadien nicht praktikabel. Über die strukturimmanente Fähigkeit eines Systems, auch bei Änderungen des Lastszenarios die geforderte Leistung zu erbringen, geben sie definitionsgemäß keine Auskunft. Der Robustheitsbegriff stellt dafür eine sinnvolle Ergänzung dar, allerdings erfolgt die Bewertung der Robustheit logistischer Systeme bislang interpretativ und auf den jeweiligen Anwendungsfall bezogen. Der vorliegende Beitrag zeigt, dass ein verallgemeinerter, Systemübergreifender Ansatz auf der Grundlage von Robustheits-Kennzahlen aus dem Bereich der Theorie komplexer Netzwerke entwickelt werden kann.

Mit der Bestimmung von Robustheits-Kennzahlen wird eine systematische Bewertung von Störungen und Laständerungen möglich. Außerdem bieten sie Einblick in den Zusammenhang zwischen innerer Struktur und den Auswirkungen von Laständerungen und Störungen, mithin der Leistungsverfügbarkeit. Dadurch wird wiederum die Planung unter unsicheren Annahmen erleichtert, wobei die Bewertung anhand der in der

jeweiligen Planungsphase verfügbaren Daten geschieht. Für die Nutzbarkeit durch den praktischen Anwender bietet sich eine Umsetzung im Rahmen eines Software-Tools mit intuitiv bedienbarer Oberfläche an.

Der Einsatz der Materialflusssimulation erübrigt sich mit dem vorgestellten Ansatz nicht, Simulationsuntersuchungen können aber besser auf die wirklich kritischen Systembereiche fokussiert werden. Der Robustheitsbegriff im hier vorgestellten Sinne bietet folglich ein Zugang zur gezielten Optimierung der Systeme und Prozesse, wodurch wiederum die Leistungsverfügbarkeit der späteren Anlage planbar gesichert wird.

LITERATUR

- [AB02] Albert, R.; Barabási, A. L.: *Statistical mechanics of complex networks*. In: *Reviews of Modern Physics*, Bd. 74 (30. Januar 2002), Nr. 1, S. 47-97. – DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47
- [AJB00] Albert, R.; Jeong, H.; Barabási, A. L.: *Error and attack tolerance of complex networks*. In: *Nature*, Bd. 406 (27. Juli 2000), S. 378-382. – DOI: 10.1038/35019019
- [BZZ05] Braglia, M.; Zaroni, S.; Zavanella, L.: *Layout design in dynamic environments: analytical issues*. In: *Int. Transactions in Operational Research*, Bd. 12 (2005), Nr. 1, S. 1-19. – DOI: 10.1111/j.1475-3995.2005.00487.x
- [FF56] Ford, L. R.; Fulkerson, D. R.: *Maximal flow through a network*. In: *Canadian journal of Mathematics*, Bd. 8 (1956), 399-404. – DOI: 10.4153/CJM-1956-045-5
- [FF62] Ford, L. R.; Fulkerson, D. R.: *Flows in networks*. Vol. 1962. Princeton University Press: Princeton, 1962.
- [FMM12] Follert, G.; Maier, M.; Meurer, C.: *Die neue Richtlinie VDI 4486: Leistungsverfügbarkeit – Endlich kann Verfügbarkeit gemessen werden!* In: *Tagungsband des 21. Deutschen Materialflusssymposiums* (29. März 2012), S. 15-27. – ISBN: 978-3-18-092174-7
- [Fre77] Freeman, L. C.: *A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness*. In: *Sociometry*, Bd. 40 (März 1977), Nr. 1, S. 35-41
- [GCH⁺12] Gaxiola, G.; Christensen, E.; Hammel, C.; Stachura, P.: *Methodology to best extend AMHS for site expansion*. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference* (Berlin, 9.-12. Dezember 2012), S. 1967-1976. – DOI: 10.1109/WSC.2012.6465317
- [GK98] Garg, N.; Könemann, J.: *Faster and Simpler Algorithms for Multicommodity Flow and other Fractional Packing Problems*. In: *Proceedings of the 39th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (Palo Alto, CA, USA, 8. November 1998), S. 300-309. – ISBN: 0-8186-9172-7. – DOI: 10.1109/SFCS.1998.743463
- [GL09] Gronau, N.; Lindemann, M.: *Wandlungsfähigkeit der Produktion - von der Flexibilität zur Zukunftsfähigkeit*. In: *Industrie Management* (2009), Nr. 3, S. 20-24
- [Hau10] Haueisen, J.: *Robustheitsuntersuchung von Transportnetzwerken, insbesondere von Materialflusssystemen und Lieferketten*. Diplomarbeit, Dresden, 2010: Technische Universität Dresden
- [HFP⁺08] Hammel, C.; Flemming, A.; Peters, K.; Schulze, F.: *Application of methods from complex network theory to MHS layout optimization*. In: *Progress in Material Handling Research: 2008* (Charlotte, NC, USA, 2008), hrsg v. Kimberly u.a., S. 526-542. – ISBN: 978-1-882780-15-0
- [JJJ08] Jönsson, H.; Johansson, J.; Johansson, H.: *Identifying critical components in technical infrastructure networks*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2008, S. 235-243. DOI: 10.1243/1748006XJRR138.
- [KMG10] Klibi, W.; Martel, A.; Guitouni, A.: *The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review*. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 203 (2010), Nr. 2, S. 283-293. – DOI: 10.1016/j.ejor.2009.06.011
- [MS07] Meepetchdee, Y.; Shah, N.: *Logistical network design with robustness and complexity considerations*. In: *International Journal of Physical*

Distribution and Logistics Management, Bd. 37 (2007), Nr. 3, S. 201-222. – DOI: 10.1108/09600030710742425

- [PM04] Pióro, M; Medhi, D.: *Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. San Francisco, CA, 2004. Morgan Kaufmann. – ISBN 0-12-557189-5
- [SM87] Shahrokhi, F.; Matula, D. W.: *On solving large maximum concurrent flow problems*. In: *Proceedings of the 15th ACM Annual Conference on Computer Science* (St. Louis, MO, USA, 16. Februar 1987), S. 205-209. – ISBN: 0-89791-218-7. – DOI: 10.1145/322917.322949
- [SM90] Shahrokhi, F.; Matula, D. W.: *The maximum concurrent flow problem*. In: *Journal of the Association for Computing Machinery*, Bd. 37 (April 1990), Nr. 2, S. 318-334. – DOI: 10.1145/77600.77620
- [SSR03] Sturm, R.; Seidelmann, J.; Reddig, K.: *Materialflussautomatisierung in der Mikrochipfertigung: Simulationsbasierte Robustheitsanalyse der Transport- und Lagerautomatisierung*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 93 (2003), Nr. 3, S. 157-163
- [SSY+10] Sydney, A.; Scoglio, C.; Youssef, M.; Schumm, P: *Characterising the robustness of complex networks*. In: *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions* 2, Nr. 3 (1. Januar 2010): 291–320. DOI: 10.1504/IJITST.2010.037406.
- [VDI3581] Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. Dezember 2004. – Berichtigung im Oktober 2006
- [VDI3649] Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lager-systeme. Januar 1992
- [VDI4001-2] Terminologie der Zuverlässigkeit. Juli 2006
- [VDI4486] Zuverlässigkeit in der Logistik – Leistungsverfügbarkeit. März 2012

Dipl.-Math. Christian Hammel, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden.
Telefon: +49 351 463-34176, Fax: +49 351 463 35499,
E-Mail: christian.hammel@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Frank Schulze, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden.
Telefon: +49 351 463-34861, Fax: +49 351 463 35499,
E-Mail: frank.schulze2@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Inhaber der Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden.
Telefon: +49 351 463- 32538, Fax: +49 351 463 35499,
E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Anschrift: Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden.