

Frank Schulze  
Hans-Georg Marquardt

## Innovative Planungs-Konzepte in der Flughafen-Logistik

### Zusammenfassung

Die Gepäckförderanlagen von Luftfahrt-Drehkreuzen wie Peking oder Dubai gehören mit etwa 100 km Förderstrecke und 10.000 Transporteinheiten heute zu den größten automatisierten Logistiksystemen. Die Professur für Technische Logistik der TU Dresden ist an ihrer Planung und Simulation beteiligt und entwickelt Werkzeuge für den Systementwurf.

Der Beitrag stellt zuerst Gepäckförderanlagen und die Planungsaufgabe vor. Danach werden zwei innovative Konzepte für frühe Planungsstufen vorgestellt. Dabei wird das Anlagen-Layout in ein Knoten-Kanten-Modell überführt. So wird einerseits mit diskretisierten statistischen (Zeit-) Verteilungen das dynamische Anlagenverhalten schneller und ähnlich genau bewertet wie mit der Simulation. Andererseits werden statistische Maßzahlen aus der Theorie komplexer Netzwerke genutzt, um das Transportnetzwerk hinsichtlich Robustheit und Lastbalancierung zu optimieren.

### Abstract

Baggage handling systems of air hubs like Beijing or Dubai contain about 100 km of conveyor lines and 10,000 transport units. Thus they belong to today's largest automated logistics systems. The Chair for Logistics Engineering at TU Dresden is involved in their planning and simulation and develops system design tools.

The paper first introduces into the field and the design targets. Then two innovative concepts for early planning stages are presented which derive a node-link-model from the system's layout. Now, the system dynamic is evaluated by means of time-discrete statistic distributions more rapidly and as exactly as by simulations. Besides, statistic measures from complex network theory are used to optimise the transport with respect to robustness and load balancing.

## 1 Gepäckförderanlagen

Die Gepäckförderanlage eines Flughafens bringt das Check-in-Gepäck von den Countern zu den Gates (vgl. Bild 1), von wo sie über das Vorfeld dann weiter in das Flugzeug transportiert werden. Das Gepäck durchläuft dabei Sicherheits-Checks in bis zu drei Stufen (Röntgen, Computertomograph, manuelle Inspektion). Ist zum Check-in-Zeitpunkt das Gate für den Flug noch nicht geöffnet, wird es in Frühgepäckspeichern zwischengelagert. Transfer-Gepäck wird zu seinem Anschlussflug in analoger Weise gebracht, nur dass die Sicherheits-Checks ggf. entfallen (z.B. für innereuropäische Flüge).

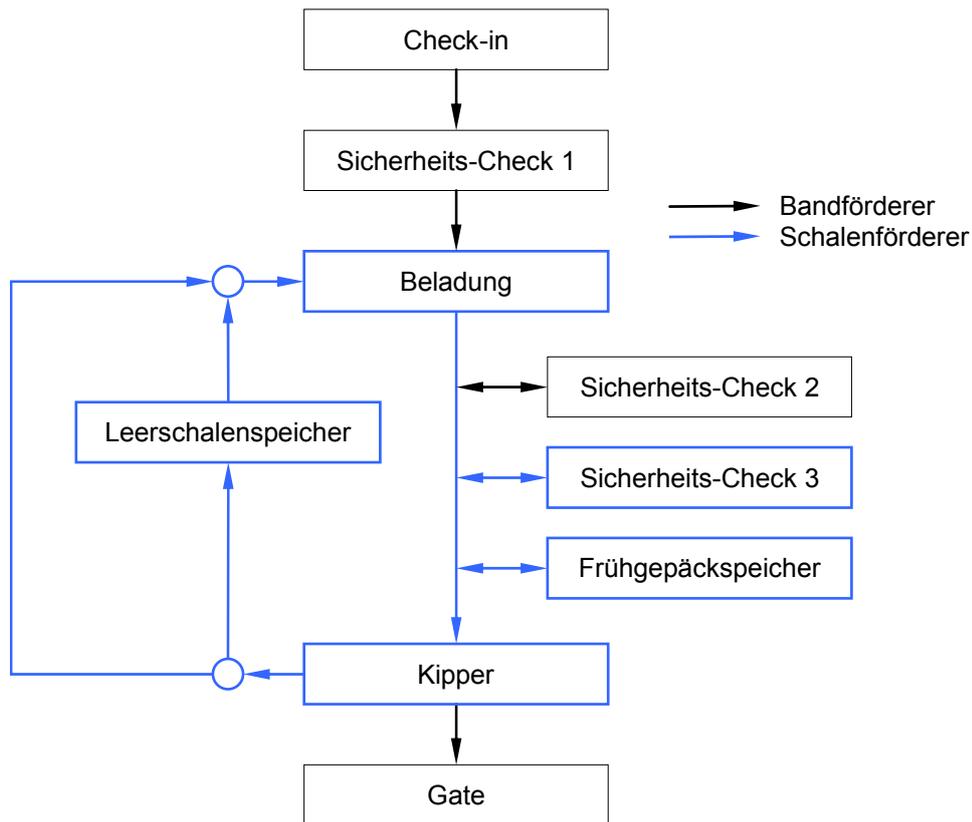


Bild 1: Funktionsschema einer Gepäckförderanlage

Die Gepäckförderanlagen größerer Flughäfen (vgl. Bild 2) werden als Tray-Systeme ausgeführt. Dabei wird das Gepäck kurz nach dem Check-in auf Schalen (sog. Trays) verladen, die eine sichere und schnelle Beförderung (mit bis zu 10 m/s) ermöglichen. Da das Transportziel und die Zwischenstationen eines Gepäckstücks auf einem RFID-Chip direkt in der Schale gespeichert sind und an Weichen dynamisch Entscheidungen über den weiteren Transportweg getroffen werden, können die Schalen als „autonome Fahrzeuge“ aufgefasst werden. Die Anlagensteuerung hat damit die Aufgabe, eine riesige „Flotte“ von beladenen und leeren Fahrzeugen zu disponieren.

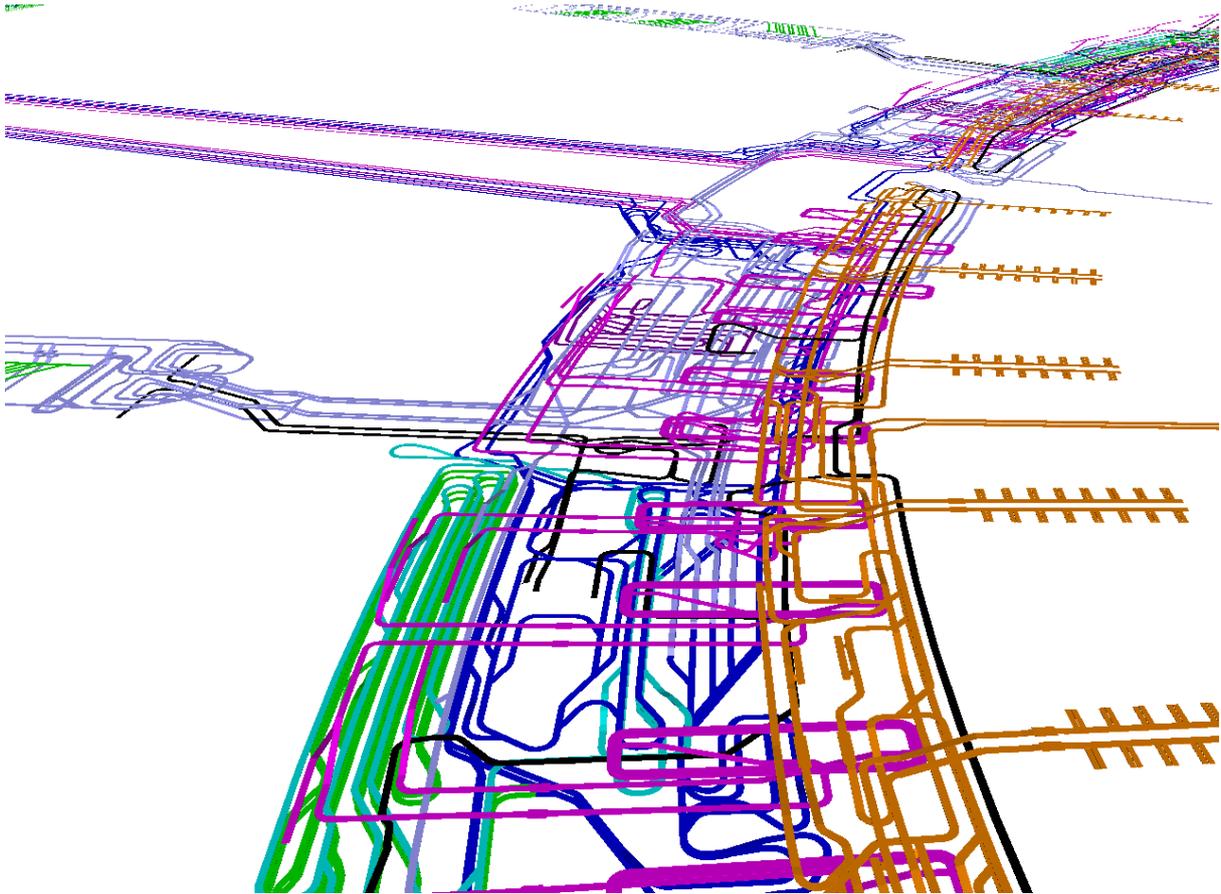


Bild 2: Gepäckförderanlage eines Großflughafens

In modernen Gepäckförderanlagen werden zwischen 3.000 und 10.000 Schalen eingesetzt. Die Förderstrecken haben eine Gesamtlänge von einigen 10 km bis über 100 km und bestehen z.T. aus mehr als 10.000 Förderersegmenten mit eigenem Antrieb und eigener Steuerungstechnik. Sie verbinden 20 bis mehrere 100 Check-in-Counter mit einer zweistelligen Anzahl Gates. Befördert werden bis über 10.000 Gepäckstücke pro Stunde. Ein solches Transportnetz verbindet oft mehrere Terminals. Diese verfügen über mindestens einen Sortierring sowie eigene Leerschalen- und Frühgepäckspeicher. Die Anlagen haben meist eine Lebenszeit von mehr als 20 Jahren und sind damit nicht nur im Tagesverlauf sondern auch über ihre Lebensdauer großen Anforderungsschwankungen unterworfen.

## 2 Anlagenplanung

Beim Entwurf einer Gepäckförderanlage besteht das Ziel darin, einen hohen Durchsatz, große Sortierleistung und kurze Transportzeiten mit möglichst geringem anlagentechnischen Aufwand zu erreichen. Weiterhin soll eine hohe Robustheit gegen Ausfälle einzelner Komponenten sowie eine hohe Flexibilität bezüglich sich ändernder Anforderungen erreicht werden.

Dabei werden die Anlagen mit zeitlich stark schwankenden und oft unsymmetrischen Belastungen konfrontiert: Fluggesellschaften planen ihre Umläufe so, dass in möglichst kurzen Zeitfenstern möglichst viele Anschlüsse für ihre Passagiere erreichbar werden. Dadurch entstehen im Tagesgang Spitzenlastzeiten (sog. Arrival- oder Departure-Peaks): innerhalb weniger Stunden werden oft über 80% des täglichen Gepäckvolumens umgeschlagen. Kommt eine Aufteilung in Terminals für internationale bzw. Inlandsflüge

hinzu oder erfolgt die Abfertigung der Passagiere (Check-in) in einem anderen Terminal als die der Flugzeuge (Gate), entstehen stark gerichtete Gepäckströme mit hohem Leerschalenbedarf einerseits und hohem Leerschalenauflkommen andererseits. Dies muss durch eine intelligente Leerschalensteuerung ausbalanciert werden, um die Anlagenleistung permanent auf hohem Niveau zu halten.

Die Planung einer Gepäckförderanlage erfolgt in drei Phasen:

- (1) Konzeption: Hier wird anhand eines Flussdiagramms die Gliederung der Anlage in Funktionsbereiche, deren Ausstattung und die Topologie des Transportnetzwerks (Anzahl und Verknüpfung von Transportstrecken) entworfen.
- (2) Layoutplanung: Hier wird im CAD-System die Geometrie der Anlage entworfen. Nach diesen technischen Zeichnungen wird die Anlage später gebaut.
- (3) Steuerungsentwicklung: Hier wird mithilfe eines Simulationssystems für das gegebene Layout eine Steuerung entworfen und am Computermodell der Gesamtanlage erprobt. Die Strategien und Algorithmen werden später im Leitreechner implementiert.

In der ersten, der Konzeptionsphase, werden alle grundlegenden Entscheidungen zur Gestalt einer Anlage getroffen. Einerseits sind weitreichende Änderungen an dieser Stelle noch am einfachsten möglich – andererseits haben auch nur kleine Planungsfehler in diesem Stadium später dramatische Konsequenzen. Erschwerend kommt hinzu, dass erst viel später – durch die Simulation in der dritten Planungsphase – verlässliche Informationen über das dynamische Anlagenverhalten verfügbar werden.

An dieser Stelle setzen die Forschungsarbeiten der Professur für Technische Logistik an: Es werden Verfahren entwickelt, die es schon in der frühen Konzeptionsphase – selbst bei unzulänglicher und unsicherer Datenlage – erlauben, relativ genaue Angaben zur Anlagenleistung zu machen. Ziel ist es, dem Planer die bestmögliche Unterstützung bei der Bewertung seiner Planungsentscheidungen zu geben. Ihm sollen schon bei der Konzeption Abschätzungen zum dynamischen Anlagenverhalten verfügbar gemacht werden, die traditionell erst viel später die Simulation liefert.

### **3 Netzwerk Betrachtung**

Die Netzwerk Betrachtung baut auf das Flussdiagramm der Gepäckförderanlage auf, das in der Konzeptionsphase entsteht. Dieses wird in ein Knoten-Kanten-Modell überführt. Kanten sind dabei einfache, gerichtete Transportstrecken. Knoten repräsentieren Quellen (z.B. Check-in-Counter), Senken (z.B. Gates), Bearbeitungsstationen (z.B. Sicherheits-Checks) und Weichen (Verzweigungen und Zusammenführungen) im Transportnetzwerk.

#### **3.1 Durchsatzermittlung**

Bereits auf Basis weniger Daten zum Gepäckaufkommen (z.B. Anzahl von Gepäckstücken je Stunde und ihre Verteilung auf Terminals) und einfacher Annahmen (z.B. Gepäckrouting und Leerschalenausgleich nach dem Prinzip des kürzesten Weges und Gleichverteilung auf parallele Förderstrecken bzw. gleichwertige Ziele) lässt sich die mittlere Belastung einzelner Knoten und Kanten leicht ermitteln. Die Kapazität der Knoten und Kanten (möglicher Durchsatz in Gepäckstücken je Stunde) ist bekannt, sie leitet sich aus ihrer Bauform ab. Setzt man Belastung und Kapazität zueinander ins Verhältnis, erhält man den Auslastungsgrad der Komponenten.

Entsprechend wurde ein Werkzeug entwickelt, das dem Planer beim Entwurf eines Netzwerks z.B. durch auslastungsabhängige Einfärbung der Komponenten hilft, kritisch belastete Bereiche zu identifizieren und Alternativen (z.B. Einsatz leistungsfähigerer Komponenten oder Definition alternativer Routen) zu bewerten. Es ist bereits jetzt im professionellen Einsatz in der Flughafenplanung.

Bis hier hin ist die Betrachtung jedoch rein statisch. Berechnet werden mittlere Durchsätze und mittlere Durchlaufzeiten. Dynamische Effekte (z.B. zeitliche Schwankungen im Lastverlauf) und stochastische Effekte (z.B. Staus und Blockierungen) werden nicht betrachtet. Statistisch abgesicherte Aussagen können so nicht getroffen werden – so z.B. die Aussage, dass 95% aller Gepäckstücke in einem bestimmten Zeitraum die Anlage durchlaufen haben; obwohl gerade das ein wichtiges Planungsziel ist, denn der Flughafen muss den Fluggesellschaften die Einhaltung gewisser Transferzeiten zusichern. Dies wird in der Praxis erst im letzten Planungsschritt durch die Simulation möglich. Für grundlegende Korrekturen ist es in diesem Planungsstadium dann aber schon zu spät. Hinzu kommt, dass die Simulation zu unflexibel ist, um schnell grundsätzlich verschiedene Layoutalternativen zu entwerfen und zu bewerten.

Hier bietet die Betrachtung diskretisierter statistischer (Zeit-) Verteilungen einen Ausweg. Dabei wird die statistische Verteilung der Gesamtdurchlaufzeit durch das Netzwerk aus der Verknüpfung der statistischen Verteilungen der Durchlaufzeiten durch die einzelnen Komponenten ermittelt. Dies erfolgt analog zur analytischen Berechnung in numerischen Algorithmen, die mit diskretisierten Verteilungen arbeiten. Das folgende Beispiel zeigt das exemplarisch für eine Reihen- und eine Parallelschaltung von Operationen (Bild 3, für weitere Konfigurationen wie Nebenläufigkeiten und Rekursionen s. [10]).

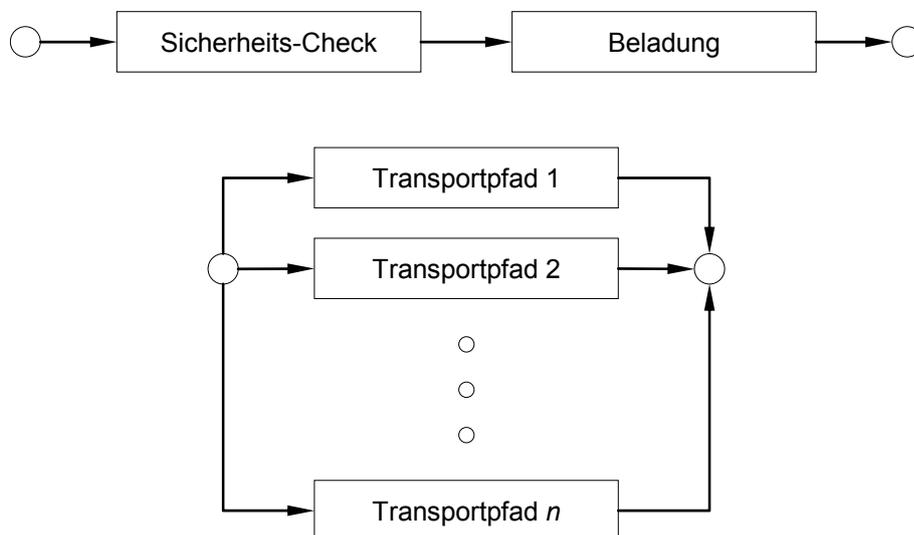


Bild 3: Sequentielle (oben) und parallele (unten) Ausführung von Operationen

Die Gesamtdurchlaufzeit durch die Reihenschaltung von Sicherheits-Check und Beladung ergibt sich aus der Summe zweier unabhängiger Zufallsgrößen, den Durchlaufzeiten durch den Sicherheits-Check einerseits und die Beladung andererseits. Die Dichtefunktion der statistischen Verteilung der Gesamtdurchlaufzeit  $g_R(\cdot)$  wird nicht kontinuierlich beschrieben, sondern diskretisiert als Histogramm. Sie wird aus der diskreten Faltung der Dichtefunktionen

der Summanden ermittelt. So errechnet sich die Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit) der Gesamtdurchlaufzeit  $x_i$  der Klasse  $i$  als

$$g_R(x_i) = \sum_{k=a}^b (f_S(x_{i-k}) \cdot f_B(x_k))$$

wobei  $f_S(\cdot)$  bzw.  $f_B(\cdot)$  die Dichtefunktion der Durchlaufzeit von Sicherheits-Check bzw. Beladung bezeichnen. Die Summationsgrenzen  $a$  und  $b$  werden so gezogen, dass die außerhalb liegenden Bereiche der Verteilung eine vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit (z.B.  $P(X < a) < 0,0001$ ) besitzen.

Die Dichtefunktion der statistischen Verteilung der Durchlaufzeit durch  $n$  parallele, alternative Transportpfade  $g_P(\cdot)$  wird ähnlich beschrieben. So errechnet sich die Wahrscheinlichkeit der Gesamtdurchlaufzeit  $x_i$  hier als

$$g_P(x_i) = \sum_{k=1}^n (p_k \cdot f_k(x_i))$$

wobei  $p_k$  die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit welcher der Pfad  $k$  genutzt wird, und  $f_k(\cdot)$  die Dichtefunktion der Durchlaufzeit durch den Pfad  $k$ .

Die Durchlaufzeitverteilungen können für alle Komponenten einer Gepäckförderanlage a priori ermittelt werden, weil sie bauformspezifisch, nicht aber projektspezifisch sind. Im konkreten Planungsprojekt wiederum entscheidet der Planer dann, welche Komponenten aus seinem Katalog er konkret einsetzt und in welcher Weise sie zum gesamten Transportnetzwerk verbunden werden. Für die Berechnung der daraus erwachsenden dynamischen und stochastischen Netzwerkeigenschaften (z.B. der Gesamtdurchlaufzeitverteilung) sind bereits jetzt entsprechende Berechnungsmodule verfügbar [11]. Mittelfristig ist geplant, diese auch in das bereits erwähnte Werkzeug zur Flughafenplanung einzubauen.

### 3.2 Topologiebewertung

Die Untersuchung komplexer Netzwerke ist ein neueres, interdisziplinäres Forschungsgebiet, welches in letzter Zeit in vielen Bereichen große Beachtung findet [3, 8]. So entwickelte sich ein deutlich besseres Verständnis komplexer Systeme – unter anderem durch die statistische Analyse komplexer Netzwerke [1, 5, 12], z.B. hinsichtlich ihrer Robustheit und Verwundbarkeit [2, 4]. Im folgenden werden die Ergebnisse von Untersuchungen der Topologie der Gepäckförderanlagen von vier unterschiedlichen Flughäfen (vgl. Tabelle 1, s.a. [7]) vorgestellt:

Flughafen	A	B	C	D
Förderstreckenlänge [km]	15,9	35,9	79,1	88,9
Förderersegmente	4.447	5.959	11.342	15.027
Knoten	300	622	1.218	1.700
Kanten	402	817	1.733	2.329
Quellen	30	54	56	135
Senken	18	62	38	98
Zusammenführungen	132	249	571	768
Verzweigungen	120	257	553	667
Knoten in kürzesten Pfaden	244	573	979	1.090

Tabelle 1: Kennzahlen der analysierten Flughäfen

Zur Bewertung der Relevanz einzelner Knoten für die Funktionalität des Gesamtsystems wurde zunächst untersucht, wie groß der Anteil der kürzesten Pfade aller Quelle-Senke-Relationen ist, die über jeden einzelnen Knoten verlaufen. Die so definierte Knoten-Zentralität [6, 13] ist ein Maß für die Wichtigkeit eines Knotens. Die Verteilung der Knoten-Zentralität liefert Informationen über die Robustheit des Netzes und wird durch eine LORENZ-Kurve (Bild 4) veranschaulicht. Dies ist die monoton wachsende, konvexe Kurve, welche die Punkte  $(K, P)$  verbindet, wobei  $K$  der Anteil der Knoten ist, durch die der Anteil  $P$  der kürzesten Pfade läuft [9].

In den untersuchten Gepäckförderanlagen tauchen bis zu 20% der Knoten überhaupt nicht in kürzesten Pfaden auf, während einige wenige Knoten in fast allen kürzesten Pfaden enthalten sind. Letztere sind die wichtigsten Teile des Netzwerks: Sie erzwingen bei einer Störung die meisten Umwege.

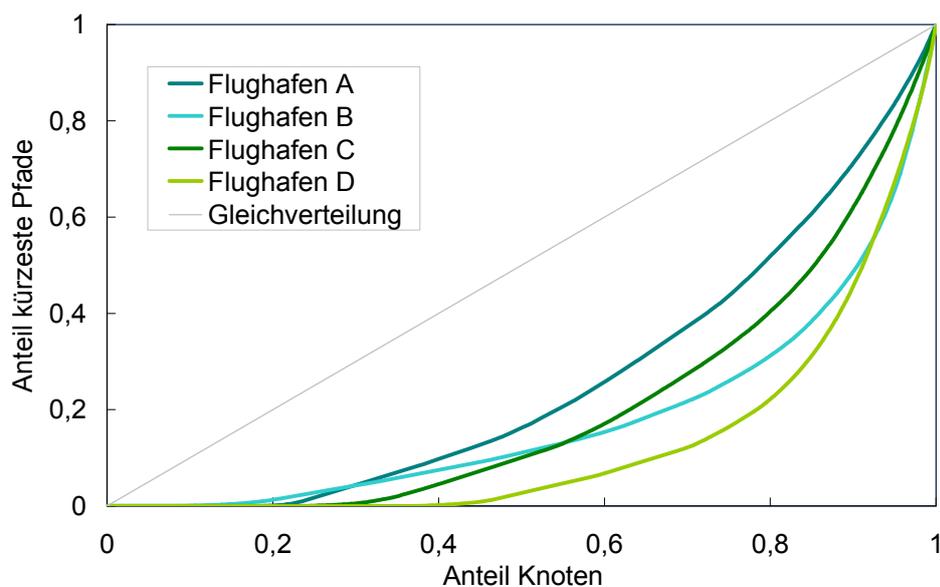


Bild 4: LORENZ-Kurven der vier Gepäckförder-Netzwerke

Neben der Relevanz einzelner Knoten wurden die Auswirkungen des Ausfalls einzelner Kanten auf die Netzwerkfunktion untersucht. Hierfür wurde ausgewertet, wie viele Quelle-Senke-Relationen überhaupt (nicht nur kürzeste Pfade) unterbrochen werden, wenn einzelne Kanten ausfallen. So kann jeder Kante ein Verwundbarkeits-Index zugewiesen werden: der Anteil der Quelle-Senke-Relationen, die durch ihren Ausfall verloren gehen. Er gibt an, wie wichtig ihre Funktion für das Gesamtsystem ist. Dadurch wird eine Aussage zur Verwundbarkeit des Gesamtsystems möglich. Sortiert man die Kanten absteigend nach ihrem Verwundbarkeits-Index und trägt diesen über der relativen Position der Kante in der geordneten Gruppe ab, ergibt sich Bild 5. Es zeigt, dass schon ein kleiner Teil der Kanten essentiell für einen großen Teil der Quelle-Senke-Relationen ist.

In den untersuchten Gepäckförderanlagen konnte die Blockierung einer einzelnen Kante den Ausfall von bis zu 35% aller Quelle-Senke-Relationen bewirken. Der Planer sollte natürlich versuchen, die Entstehung derart kritischer Netzwerkbereiche zu vermeiden.

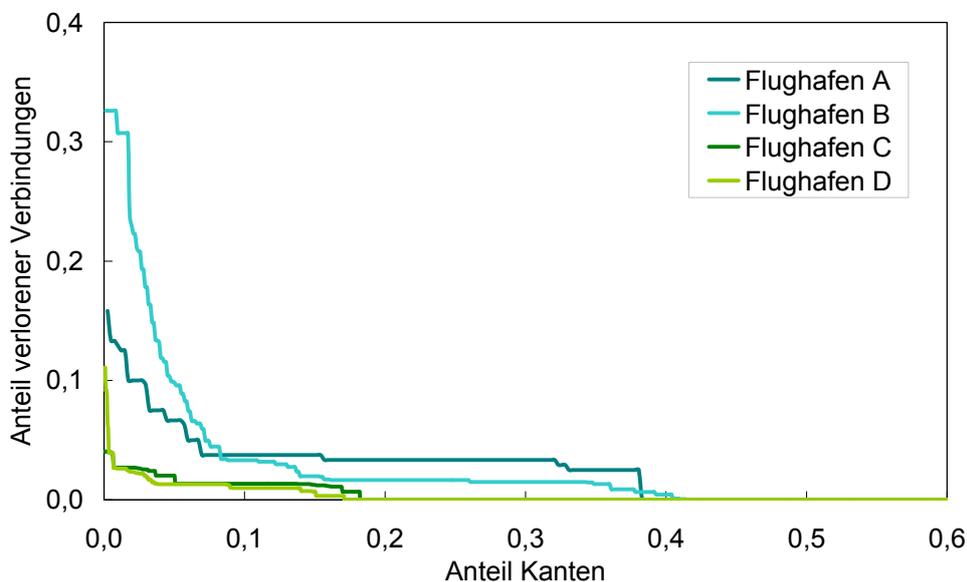


Bild 5: Verwundbarkeits-Indizes der vier Gepäckförder-Netzwerke

Mit den eingeführten Netzwerkkenngrößen ist eine einfache und schnelle Bewertung des Entwurfs einer Gepäckförderanlage auf Grundlage eines Knoten-Kanten-Modells bereits in der Konzeptionsphase möglich. Für derartige Analysen verfügt die Professur für Technische Logistik bereits jetzt über entsprechende Berechnungsmodule. Es ist geplant, auch diese in das bereits erwähnte Werkzeug zur Flughafenplanung einzubauen.

Neben der Bewertung der Topologie einer Gepäckförderanlage (in der Planung) können die hier vorgestellten Netzwerkkenngrößen aber auch als Richtwerte für die Steuerung (im Betrieb) dienen: Bei niedriger Last sollte die Knotenbelastung proportional zur Knoten-Zentralität sein. Bei hoher Last sollten Knoten bzw. Kanten mit einem hohen Verwundbarkeits-Index entlastet werden. Dies umreißt grob das Konzept einer einfachen, last-adaptiven Steuerung.

## Literatur

- [1] *Albert, R.; Barabasi, A.L.*: Statistical mechanics of complex networks. In: *Reviews of Modern Physics* **74** (2002), S. 47–97
- [2] *Boccaletti, S.; Latora, V.; Moreno Y.; Chavez, M.; Hwang, D.-U.*: Complex networks : Structure and dynamics. In: *Physics Reports* **424** (2006) 4-5, S. 175–308
- [3] *Bornholdt, S.; Schuster, H.G. (Eds.)*: Handbook of graphs and networks. Wiley VCH, 2002
- [4] *Crucitti, P.; Latora, V.; Marchiori, M.; Rapisarda, A.*: Efficiency of scale-free networks: error and attack tolerance. In: *Physica A* **320** (2003), S. 622–642
- [5] *Dorogovtsev, S.N.; Mendes, J.F.F.*: Evolution of networks. Oxford University Press, 2003
- [6] *Freeman, L.C.*: A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. In: *Sociometry* **40** (1977), S. 35–41
- [7] *Hammel, C.; Flemming, A.; Peters, K.; Schulze, F.*: Application of methods from complex network theory to MHS layout optimization. Erscheint in: *Progress in material handling research*. Charlotte: Material Handling Institute, 2008
- [8] *Helbing, D. (Ed.)*: Managing Complexity : Insights, Concepts, Applications. (Understanding Complex Systems) Berlin: Springer, 2008
- [9] *Lorenz, M.O.*: Methods of Measuring the Concentration of Wealth. In: *Publications of the American Statistical Association* **9** (1905) 70, S. 209–219
- [10] *Meinhardt, I.; Sunarjo, F.; Marquardt, H.-G.*: Bestimmung des stochastischen Zeitverhaltens in Supply Chains. In: *Lasch, R.; Janker, C. (Hrsg.)*: Logistik Management : Innovative Logistikkonzepte. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag / GWV Fachverlage GmbH, 2005
- [11] *Meinhardt, I.; Marquardt, H.-G.*: Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen. In: *Tagungsband zum 2. WGTL-Fachkolloquium am 08.-09.06.2006 in Dresden*
- [12] *Newman, M.E.J.*: The structure and function of complex networks. In: *SIAM Review* **45** (2003) 2, S. 167–256
- [13] *Newman, M.E.J.*: Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. In: *Physical Review E* **64** (2001), 016131