

Strukturuntersuchungen zur Entstehung und Fortpflanzung von Verspätungen in Verkehrsnetzen

Wiederholte Verspätungen von Zügen und Flugzeugen haben eine Verringerung der Akzeptanz des jeweiligen Verkehrsmittels durch die Kunden sowie Produktivitätsverluste durch unnötige Belegungen knapper Ressourcen wie Bahnsteige bzw. Rollbahnen zur Folge. Daher haben Verspätungen unmittelbar negative wirtschaftliche Auswirkungen auf die jeweilige Betreibergesellschaft.

Einzelne Verspätungen entstehen durch externe Störungen wie z.B. besondere Wetterereignisse, technische Störungen, Verzögerungen beim Be- und Entladen bzw. beim Ein- und Aussteigen. Diese Verspätungen übertragen sich durch umsteigende Passagiere sowie Züge bzw. Flugzeuge, die eine bestimmte Ressource wie z.B. einen Streckenabschnitt oder eine Rollbahn länger als geplant benötigen, auf weitere Züge oder Flugzeuge, so dass eine einzelne Verspätung zu einer ganzen Kaskade von Folgeverspätungen in dem betrachteten Netzwerk führen kann. Diesen Folgeverspätungen kann unter anderem durch das Einplanen von Zeitpuffern in die Fahrpläne, die Entkoppelung der Prozessketten (z.B. kein Warten auf die Passagiere verspäteter Zubringer), die Verbesserung bestimmter Prozessglieder etwa durch eine Stabilisierung der tatsächlich notwendigen Zeitdauern, die Berücksichtigung der beschränkten Kapazitäten schon bei der Linienplanung und die Erhöhung der Kapazitäten durch Verbesserung der Infrastruktur entgegengewirkt werden.

Besondere Schwierigkeiten ergeben sich daraus, dass es sich bei der Bewertung von Fahrplänen um eine multikriterielle Fragestellung mit teilweise zuwiderlaufenden Zielen handelt: Zusätzliche Wartezeiten aufgrund von Verspätungen (z.B. bedingt durch verpasste Anschlüsse) lassen sich durch eine Erhöhung der Pufferzeiten (z.B. längere geplante Haltezeiten) verringern, dies erhöht jedoch die fahrplanmäßige Reisezeit. Umgekehrt führt eine Verringerung der Puffer von einem gewissen Punkt an dazu, dass das System sehr empfindlich auch auf kleinere Verspätungen reagiert und sich diese sofort im gesamten Netz ausbreiten. Mögliche Gegenmaßnahmen erfordern oft umfangreiche Investitionen, die gegen die Vorteile der Verspätungsverringerung abgewogen werden müssen.

Eine Modellierung der Verspätungen muss insbesondere die Verzahnung der Verkehrsbewegungen auf den verschiedenen Ebenen angemessen berücksichtigen: Im Bahnverkehr können sich Verspätungen u.a. durch das Warten auf verspätete Zubringerzüge oder durch das Einhalten von Mindestabständen zu anderen Zügen in dem gesamten Netz fortpflanzen. Hinzu kommen die Kapazitätsengpässe an den Bahnhöfen und in Bezug auf die Gleise sowie die eventuell nur beschränkte Verfügbarkeit von Fahrzeugen (Umlauf). Noch komplexer sind die Abhängigkeiten im Flugverkehr, wo zusätzlich auf individuelle Passagiere und umsteigende Crews gewartet werden muss und Maßnahmen der Flugsicherung sowohl in Bezug auf den Flughafen als auch in Bezug auf die Flugrouten ebenso wie die komplexen Bodenprozesse weitere Quellen für Verspätung darstellen.

Szenarien-basierte und stochastische Ansätze

Um die die Auswirkungen von Verspätungen sowohl auf langfristiger, infrastruktureller Ebene als auch kurzfristig, operational reduzieren zu können, mussten verschiedene Ansätze verwendet und gegebenenfalls geeignet kombiniert werden. Für die langfristige Optimierung, die im Wesentlichen durch die Veränderung von Linien- und Fahrplänen realisiert wird, werden Methoden der stochastischen Modellierung eingesetzt. Für die operationale Optimierung wird mit Hilfe einer Szenarien-basierten Herangehensweise eine geeignete Disposition für den Fall verspäteter Züge gesucht.

Um diese beiden, auf verschiedene Zielsetzungen hin ausgerichtete Modelle vergleichen zu können, wurden die gemeinsamen Elemente sowohl der stochastischen als auch der Szenarien-basierten Modelle identifiziert und in einem Ereignis-Aktivitäts-Netzwerk festgehalten. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Ansätzen bestehen in der Art, wie zufällige Quell-Verspätungen dargestellt werden. In dem Szenarien-basierten Modell geschieht dies durch unterschiedliche Szenarien fester Verspätungswerte, in dem stochastischen Modell werden dafür Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen eingesetzt. Entsprechend unterschiedlich sind die Ergebnisse, die sich für die resultierenden übertragenen Verspätungen ergeben: Szenarien auf der einen, Verteilungen auf der anderen Seite.

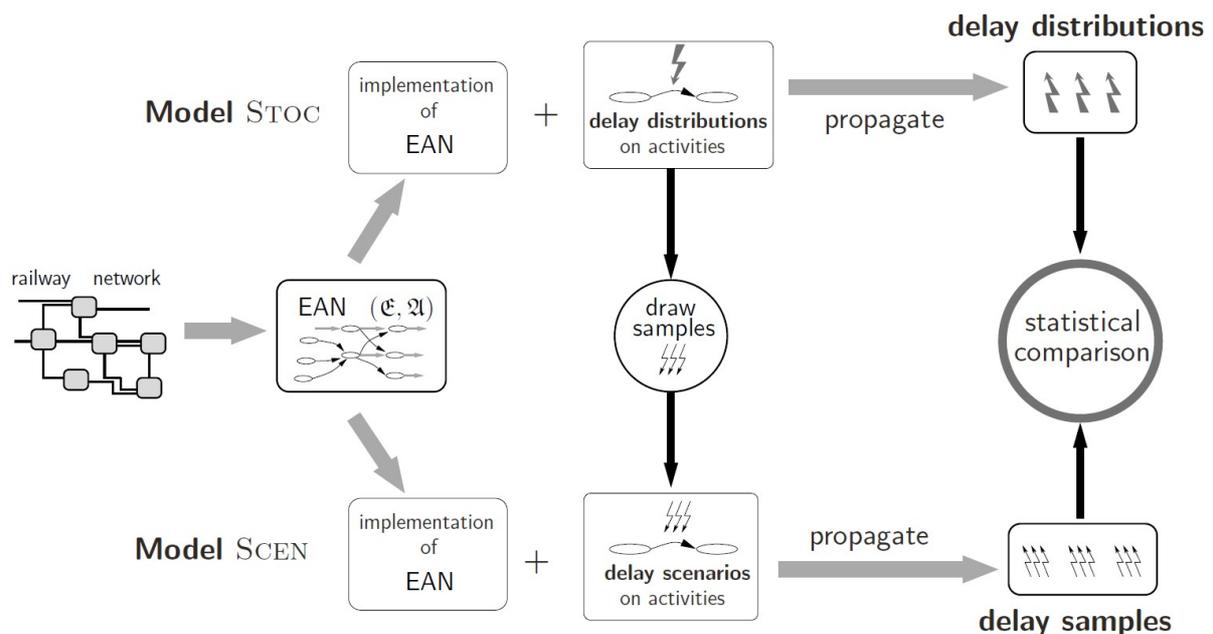


Abbildung 1: Vorgehensweise beim Vergleich des Szenarien-basierten mit dem stochastischen Modell

Es konnte nachgewiesen werden, dass die beiden Modelle im Wesentlichen zu denselben Resultaten führen. Für diesen Nachweis wurden Verspätungsszenarien für das Szenarien-basierte Modell mit den Verteilungen simuliert, die die Eingangsgrößen für das stochastische Modell bilden. Die resultierenden Verspätungsszenarien wurden dann mit den errechneten Verteilungen des stochastischen Modells verglichen, siehe Abbildung 1. Es ergab sich eine sehr hohe Übereinstimmung, die anhand eines typischen Beispiels in Abbildung 2 dargestellt ist. Damit ist im Kern die Gleichwertigkeit beider Herangehensweisen in Bezug auf die Verspätungsmodellierung gezeigt. Je nach konkretem Anwendungsfall kann das Modell, welches die spezifischen Eigenschaften der konkreten Fragestellung besser erfasst, gewählt werden. Gleichzeitig sind dadurch beide Modelle und Implementierungen validiert worden

und die Angemessenheit der Modellierung ist durch das Ereignis-Aktivitäts-Netzwerk belegt worden, siehe auch [10].

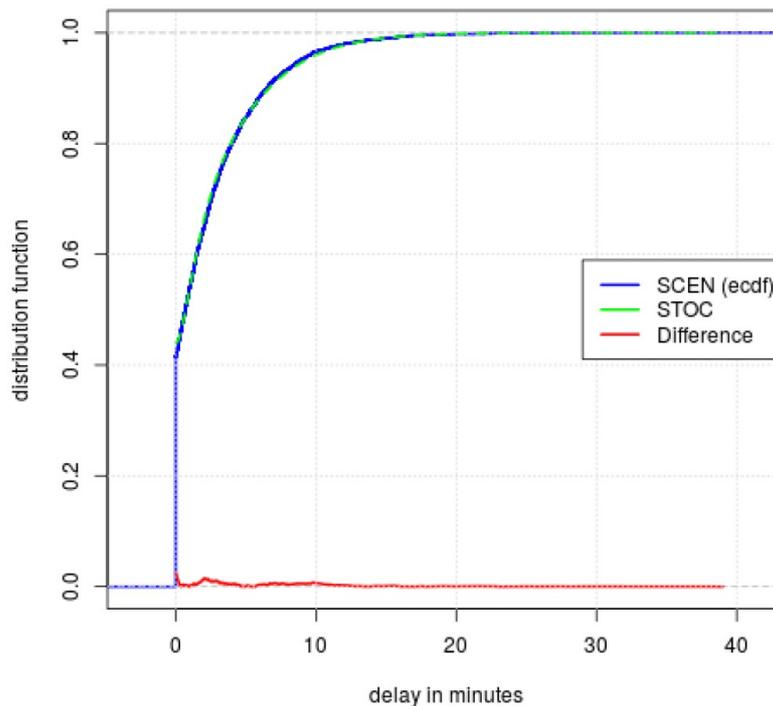


Abbildung 2: Vergleich der errechneten Verspätungsverteilungsfunktion und der empirischen Verteilungsfunktion für übertragene Verspätungen.

Schätzung und Verknüpfung von Verspätungsverteilungen

In dem zur Netzplanung eingesetzten stochastischen Modell werden Quell-Verspätungen mit Zufallsvariablen und Verteilungen modelliert. Zur Berechnung der von einem Zug auf den nächsten übertragenen Verspätungen müssen diese Verteilungen verknüpft werden. Wenn man voraussetzt, dass alle zu verknüpfenden Verspätungen näherungsweise unabhängig sind, werden Faltungen (zur Addition von Verspätungen), Multiplikationen (zur Maximumbildung, wenn z.B. ein Zug auf Passagiere aus zwei Zubringerzügen wartet) und Verschiebeoperationen benötigt. Basierend auf einer Herangehensweise in [4] wurden Verteilungsfamilien verwendet, die unter diesen Verknüpfungen abgeschlossen sind, d.h. dass sich bei der Verknüpfung von zwei Verteilungen aus der jeweiligen Familie wieder eine Verteilung aus der gewählten Verteilungsfamilie ergibt. Gleichzeitig erlauben die gewählten Verteilungsfamilien eine Anpassung an vorgefundene empirische Quellverspätungen. Hierzu sind besonders Erweiterungen der Hyper-Erlangverteilungen und allgemeiner die mit Thetaexponentialpolynomen darstellbaren Verteilungen geeignet. Die Anpassung und Schätzung von Verteilungen wurde in [18] untersucht.

Die Berechnungen allein mit Hilfe der Thetaexponentialpolynomen führen aber nach wenigen Schritten zu sehr komplexen Ausdrücken und numerischen Problemen. Es wurde daher eine auf Momentenanpassung beruhende Approximation der resultierenden Verteilungen mit Hilfen von (erweiterten) Hyper-Erlangverteilungen zwischengeschaltet. Damit sind Berechnungen von übertragenen Verspätungsverteilungen in kreisfreien Netzen möglich.

In Kreisen gibt es keine topologische Sortierung und damit keine eindeutige Berechnungsreihenfolge für die Bestimmung der resultierenden Verspätungen. In [12] wurde daher eine iterative Approximation der langfristigen Verspätungsverteilung verwendet, die die tatsächliche Übertragung der Verspätungen nachvollzieht. Mit Hilfe klassischer Resultate der Warteschlangentheorie konnte gezeigt werden, dass die Verspätungen in dieser Approximation nach Verteilung konvergieren, falls die Summe der Zeitpuffer größer als die Summe der mittleren Quell-Verspätungen ist und die Höhe der übertragenen Verspätungen beschränkt ist. Dies ist gleichzeitig eine praktisch überprüfbare Voraussetzung für den stabilen Betrieb des Netzwerks (vgl. auch [11] und [13]).

Ermittlung verspätungsresistenter Fahrpläne

Zur Bestimmung von Fahrplänen wurden die beiden schon existierenden Systeme (HiTT in Clausthal, LinTim in Göttingen) weiter entwickelt. HiTT wurde um eine neue Komponente zur ereignisorientierten Simulation von Verspätungen erweitert, deren Genauigkeit sich mit Hilfe von Konfidenzintervallen abschätzen lässt. Die ermittelten durchschnittlichen Verspätungen wurden mit den analytisch berechneten Werten verglichen, um so eine Verifizierung der analytischen Berechnung und den dabei vorgenommenen Approximationen zu erhalten. Neben dem Abgleich mit dem Szenarien-basierten Modell konnte so auch ein interner Vergleich mit einer ereignisorientierten Simulation vorgenommen werden.

Im System HiTT werden Fahrpläne mit Hilfe genetischer Algorithmen iterativ verbessert. Es wird dabei ein multikriterieller Ansatz verfolgt, der neben der fahrplanmäßigen Gesamtreisezeit auch die mittlere simulierte Verspätung und die analytisch berechnete mittlere Reiseverspätung miteinbeziehen kann, siehe Abbildung 3. Eine Einbeziehung der mittleren Verspätung in die heuristische Optimierung wird dabei erst durch die schnelle analytische Bestimmung der Verspätungsverteilungen sinnvoll möglich.

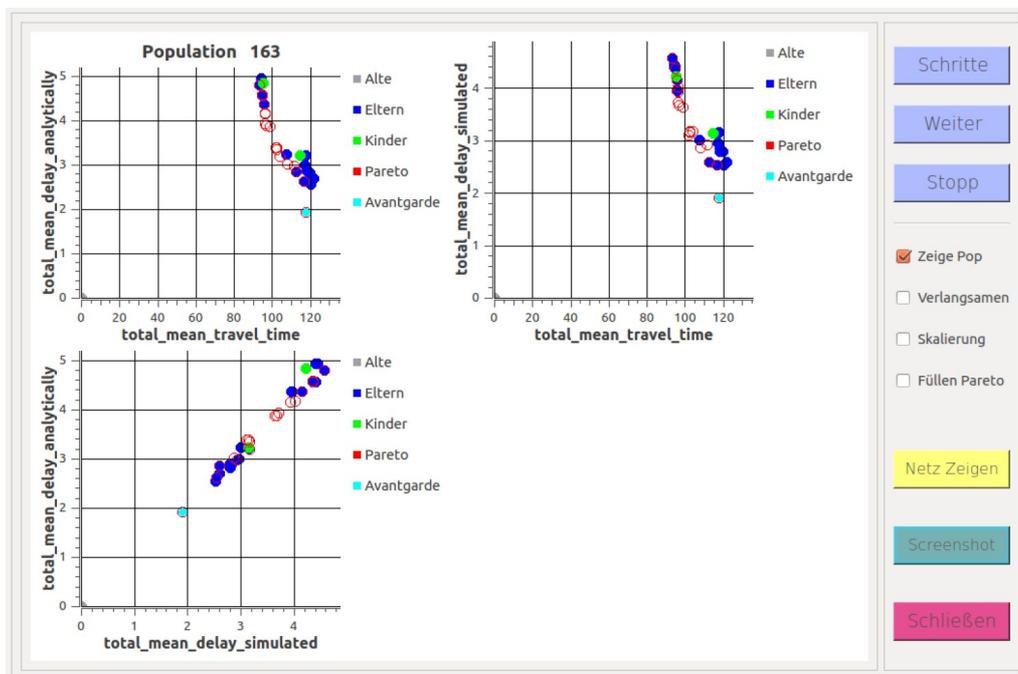


Abbildung 3: Die Entwicklung der Population von Fahrplänen im 3-dimensionalen Kostenraum

Des Weiteren wurden in dem Projekt Ansätze zur Optimierung simulierter Zielfunktionen weiterentwickelt sowie das langfristige Verhalten heuristischer, sogenannter modellbasierter Optimierungsverfahren untersucht (vgl. [16] und [17]). In [8] wird ein Verfahren zur Verringerung der Anzahl an Simulationen, die erforderlich ist, um die besten Lösungen aufgrund einer simulierten Zielfunktion mit einer vorgegebenen Fehlerwahrscheinlichkeit erkennen zu können, entwickelt. Beide Ansätze haben das Potential, in Zukunft zur Optimierung robuster Fahrpläne eingesetzt werden zu können.

LinTim beschäftigt sich nicht nur mit der Konstruktion von Fahrplänen sondern setzt schon bei der Planung des Netzwerkes und enthält außerdem Routinen zur Umlaufplanung sowie zum Erzeugen von Verspätungen und Optimierungsverfahren für das Verspätungsmanagement. Im Rahmen des Projektes wurde an der konkreten Erzeugung robuster Fahrpläne gearbeitet. Das grundlegende Modell der strengen Robustheit verlangt von einem Fahrplan, dass er beim Auftreten jeder Quell-Verspätung zulässig bleibt. Um dies zu gewährleisten, müssten große Mengen an Pufferzeiten in Form von Fahrzeitzuschlägen eingeplant werden, die den resultierenden Fahrplan wegen der sich daraus ergebenden langen Fahrtzeiten unattraktiv machen würde. Daher wird diese strenge Anforderung in der Praxis meist relaxiert. Zur Verteilung der verfügbaren Pufferzeiten in dem Fahrplan werden dabei zwei Verfahren (siehe auch [2] und [14]) angewandt:

- Um Verspätungen zu begegnen, die früh in der Fahrt einer Linie auftauchen und somit starke Auswirkungen auf den weiteren Fahrtverlauf hätten, ist es sinnvoll, Puffer eher am Anfang einer Fahrt einzuplanen (*exponentielle Verteilung*).
- Um Verspätungen, die erst im späteren Verlauf der Fahrt einer Linie auftreten, begegnen zu können, ist es sinnvoll, ebenfalls Puffer eher am Ende einer Linienfahrt einzuplanen (*reverse-exponential*).

Diese beiden Methoden wurden in LinTim implementiert und getestet. Zum Vergleich wurden noch zwei weitere Ansätze implementiert, in denen die Pufferzeiten gleichverteilt auf jeder Kante eingeplant wurden. Dabei wurde zwischen einer absoluten Gleichverteilung (*uniform-random*) und einer prozentualen Gleichverteilung (*proportional*) auf jeder Kante unterschieden.

Die Ergebnisse der mit diesen Verteilungen erstellten Fahrpläne wurden bezüglich der planmäßigen (also im störungsfreien Fall realisierten) Fahrtzeit und der Fahrtzeit unter simulierten Störungen verglichen. Als Referenz wurde außerdem ein Fahrplan ohne zusätzlichen Puffer (*none*) beurteilt. Abbildung 4 zeigt, dass die absolute Höhe der eingeplanten Pufferzeiten eine viel größere Auswirkung hat als ihre Verteilung.

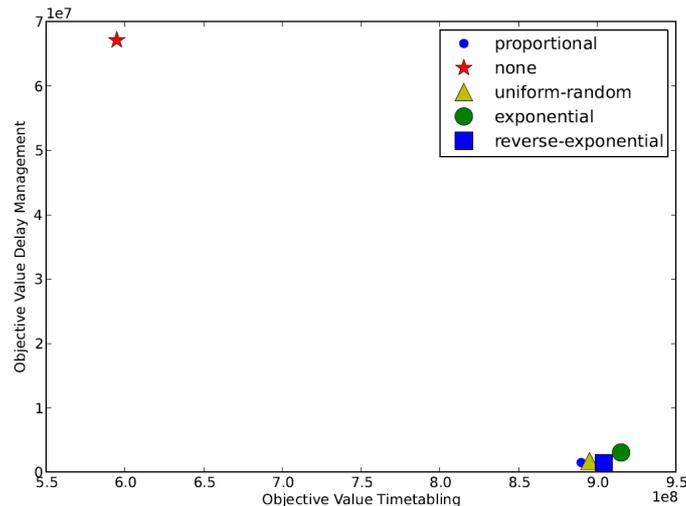


Abbildung 4: Verschiedene Möglichkeiten, Puffer zu verteilen. Aufgetragen ist die simulierte Fahrtzeit im Verspätungsfall gegen die planmäßige Fahrtzeit des jeweiligen Fahrplans.

Generell geht es bei der *Recovery-Robustheit* um die Entwicklung von Fahrplänen, die zwar nicht jede Verspätung abfangen können, deren Qualität sich aber im Verspätungsfall einfach wiederherstellen lässt (vgl. [7]). Das Problem kann bei Vorliegen einer endlichen Menge an wahrscheinlichen Verspätungsszenarien als Standortproblem im Raum aller Fahrpläne angesehen werden: Für jedes Verspätungsszenario berechnet man einen optimalen Fahrplan und sucht im Raum aller zulässigen Fahrpläne anschließend denjenigen, der möglichst dicht an der Menge der optimalen Fahrpläne für die einzelnen Szenarien liegt. Es lässt sich zeigen, dass ein so gewonnener Fahrplan recovery-robust ist. Derartige Fahrpläne lassen sich mit Hilfe linearer Programmierung im aperiodischen Fall verhältnismäßig schnell auffinden

Untersuchung von Stabilisierungsmaßnahmen

Im Fall einer Verspätung im Zugverkehr muss ein Disponent schnell Entscheidungen treffen. Diese beinhalten, ob auf einen verspäteten Zubringer gewartet werden soll, und welcher Zug bei Konflikten zuerst fahren darf. Die in der Literatur bisher untersuchten Stabilisierungsmaßnahmen vernachlässigen dabei den online-Charakter des Problems: Neue Verspätungen können jederzeit auftreten, ohne dass man das vorher weiß. In der Arbeit [1] wurde dieser Aspekt aufgegriffen und verschiedene Regeln mittels einer Simulation in LinTim getestet. Als besonders viel versprechend hat sich ein auf einem maschinellen Lernverfahren beruhender Ansatz gezeigt.

Weiterhin wurde in [5] 2013 das erste Mal die Kapazitäten der Bahnhöfe mit bei diesen Entscheidungen berücksichtigt und experimentell anhand von Daten der holländischen Bahn getestet. Außerdem wurden die Verfahren zur Evaluation der Passagierzufriedenheit verfeinert (siehe [6]) und in LinTim implementiert.

Integration mit anderen Planungsschritten

Um die bei der Analyse der Entstehung und Fortpflanzung von Verspätungen in einem Netzwerk gewonnenen Erkenntnisse für die strategische Planung und für operative

Reaktionen sinnvoll nutzen zu können, ist eine integrierte Netzwerk-, Linien- und Umlaufplanung notwendig. In Abbildung 5 ist der schematische Einfluss dieser Planungsschritte auf die Fahrplan Erstellung und die Behandlung von Verspätungen dargestellt, wie er in dem Simulationstool LinTim verwendet wird.

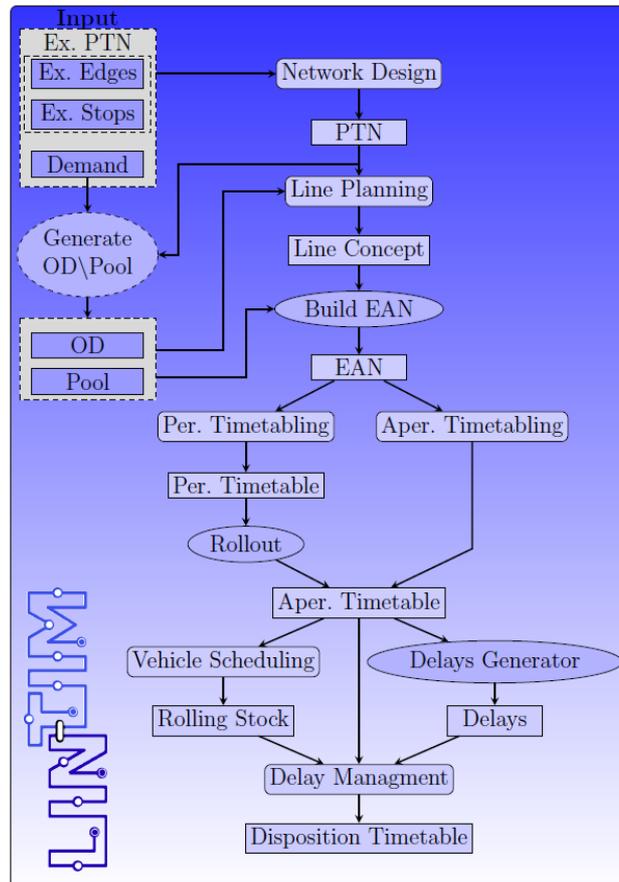


Abbildung 5: Schematischer Zusammenhang der Daten und Planungsschritte im ÖPNV

Bei dem Aus- und Umbau von Infrastruktur muss einerseits die Planung von Bahnhöfen unter realistischen Fahrzeitbedingungen (vgl. [3]), aber andererseits auch ein optimierter Streckenausbau, um mehr Kapazitäten und dadurch weniger Verspätungen zu erzielen, berücksichtigt werden. Für die Wege der Passagiere und damit auch für das Verspätungsmanagement spielt die Linienplanung eine grundlegende Rolle. So führt eine Linienplanung mit ausgeglichenen Auslastungen der Gleise zu geringeren Verspätungsverbreitungen, da die Zugfolgezeiten zwischen aufeinander folgenden Fahrten mehr Puffer enthalten können. Eine ausgeglichene Auslastung der Gleise lässt sich mit einem spieltheoretischen Ansatz erreichen. Die daraus folgenden positiven Auswirkungen auf die Verspätungen konnten mit Hilfe von Simulationen mit LinTim experimentell bestätigt werden (siehe [15]). Darüber hinaus erscheint es auch sinnvoll, die Linien bereits so zu planen, dass die Passagiere auf den von ihnen gewählten Wegen möglichst wenig umsteigen müssen (vgl. [9]). Als Konsequenz von weniger notwendigen Umstiegen ergibt sich in Bezug auf die Stabilisierung des Netzes, dass auch weniger Umstiege gesichert werden müssen und eine und die Ausbreitung von Verspätungen daher unwahrscheinlicher ist. Außerdem kann das sich ergebende Optimierungsproblem zum Auffinden der besten Stabilisierungsmaßnahmen schneller gelöst werden, weil weniger Entscheidungsvariablen

(für jeden Umstieg eine) zu betrachten sind. Linienpläne mit minimaler Anzahl an Umstiegen lassen sich effizient mit der Methode der Spaltengenerierung (vgl. [9]) bestimmen. Dieser Ansatz erlaubt es auch, die Fahrten der Passagiere inklusive ihrer Umstiege in realitätsnahen Instanzen integriert in der Optimierung mit zu berücksichtigen. Simulative Ergebnisse mit LinTim bestätigen auch hier, dass bei Berücksichtigung der Passagierwege bei der Linienplanung die Verspätungsresistenz von Fahrplänen erhöht werden kann, dies mitunter aber zulasten höherer Kosten.

In Abbildung 6 werden die Rechenzeit und der Zielfunktionswertes des IPs und des Spaltengenerierungsansatzes aus [9] verglichen. Dabei ist festzustellen, dass je komplexer die Testinstanz ist, desto weiter liegen die Zielfunktionswerte der beiden Algorithmen auseinander, wobei der Spaltengenerierungsansatz schlechtere Zielfunktionswerte liefert. Ebenfalls nimmt aber auch die Rechenzeit zur Berechnung des IPs stark zu, so dass größere Instanzen nicht mehr berechenbar sind.

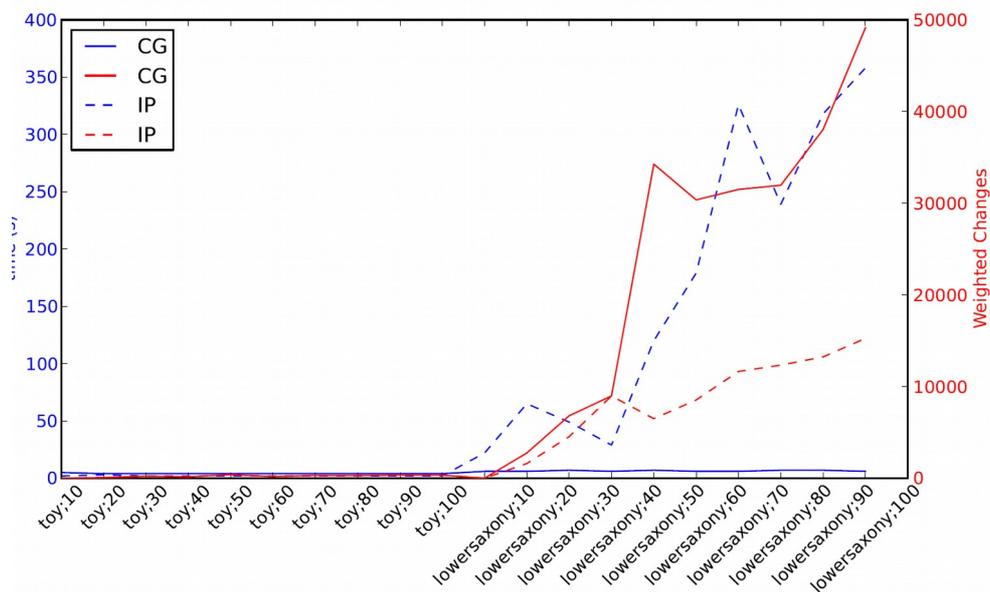


Abbildung 6: Vergleich der Rechenzeit und der Qualität des IPs und des Spaltengenerierungsverfahrens zur Minimierung der Umstiege in der Linienplanung

Literatur

- [1] R. Bauer and A. Schöbel. Rules of thumb -practical online strategies for delay management. *Public Transport*, 6(1):85-105, 2014.
- [2] V. Cacchiani, A. Caprara, and M. Fischetti. A lagrangian heuristic for robustness, with an application to train timetabling. *Transportation Science*, 46(1):124-133, 2012.
- [3] E. Carrizosa, J. Harbering, and A. Schöbel. The Stop Location Problem with Realistic Traveling Time. In Daniele Frigioni and Sebastian Stiller, editors, 13th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems, volume 33 of OpenAccess Series in Informatics (OASICs), pages 80-93, Dagstuhl, Germany, 2013. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik.

- [4] B. Fuhr. Robuste Flugplanung mittels stochastischer Modellierung. PhD thesis, TU Clausthal, 2007.
- [5] T. Dollevoet, D. Huisman, L. Kroon, M. Schmidt, and A. Schöbel. Delay management including capacities of stations. *Transportation Science*, 2013. Available online before print, <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.2013.0506>.
- [6] T. Dollevoet, D. Huisman, M. Schmidt, and A. Schöbel. Delay management with rerouting of passengers. *Transportation Science*, 46(1):74-89, 2012.
- [7] M. Goerigk and A. Schöbel. Recovery-to-optimality: A new two-stage approach to robustness with an application to aperiodic timetabling. *Computers and Operations Research*, 2014. to appear.
- [8] B. Görder and M. Kolonko. Ranking and selection: A new sequential Bayesian procedure for use with common random numbers. 2014. submitted, <http://arxiv.org/abs/1410.6782>.
- [9] J. Harbering. A Line Planning Model for Delay Resistance. Technical report, University of Göttingen, 2014.
- [10] J. Harbering, F. Kirchhoff, M. Kolonko, and A. Schöbel. Delay propagation in public transport - stochastic modeling meets scenario approach. Technical report, 2014. zur Veröffentlichung vorgesehen.
- [11] F. Kirchhoff. Modelling delay propagation in railway networks. In *Operations Research Proceedings 2013*, pages 237 - 242, 2014.
- [12] F. Kirchhoff. Verspätungsförpflanzung in Bahnnetzen, Modellierung und Berechnung mit abgeschlossenen Familien von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. PhD thesis, University of Technology Claustal, Germany, to be submitted Jan. 2015.
- [13] F. Kirchhoff and M. Kolonko. Modeling delay propagation in railway networks with closed families of distributions. submitted, 2014.
- [14] Leo Kroon, Gabor Maroti, Mathijn Retel Helmrich, Michiel Vromans, and Rommert Dekker. Stochastic improvement of cyclic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6):553-570, 2008.
- [15] A. Schöbel and S. Schwarze. Finding delay-resistant line concepts using a game-theoretic approach. *Netnomics*, 14(3):95-117, 2013.
- [16] Z. Wu and M. Kolonko. Asymptotic properties of a generalized cross entropy optimization algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18:1-16, 2014.
- [17] Zijun Wu and Michael Kolonko. Absorption in model-based search algorithms for combinatorial optimization. In *Evolutionary Computation (CEC), 2014 IEEE Congress on*, pages 1744-1751. IEEE, 2014.
- [18] Z. Yang. Modellierung und Simulation von Verspätungsdaten mit PH-Verteilungen. Masterarbeit, TU Clausthal, 2012.