

Simulation und Optimierung zur Dispositionsunterstützung: Forschungsbericht

Ein aktuelles Forschungsprojekt der ETH Zürich zielt darauf ab, einen nächsten Schritt in der algorithmischen Unterstützung der Disposition zu gehen. Experimentelle Studien zeigen vielversprechende Ergebnisse für die Anwendung der Algorithmen zur lokalen Unterstützung der Disposition, welche im Rahmen der laufenden und von früheren Forschungsarbeiten entwickelt wurden. Jetzt fokussiert die Forschung auf die Methoden, um die Disposition in benachbarten Netzbereichen zu koordinieren.

1. EINLEITUNG

Pünktlichkeit und Kapazität zählen zu den wichtigsten Erfolgsfaktoren der Eisenbahn bezüglich der anderen Verkehrsarten (v.a. Strassenverkehr). Allerdings kann mit den heutigen Betriebssteuerungssystemen die Kapazität nur durch den Abbau der Zeitreserven, welche die Pünktlichkeit gewährleisten, erhöht werden (und umgekehrt). Durch Automatisierung gewisser Betriebsprozesse können diese Zeitreserven ohne negative Auswirkungen auf die Pünktlichkeit verkleinert werden, womit die Kapazität dynamisch erhöht wird [1]. Mit diesem Konzept setzt sich eine aktuelle Forschungsarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich auseinander. Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die algorithmische

Unterstützung von Disponenten, um kleine Störungen (v.a. Verspätungen und Ausfälle von einzelnen Komponenten der Infrastruktur) zu behandeln. Frühere Forschungsarbeiten an der ETH Zürich definierten mathematische Modelle für die Fahrplangenerierung [2] und die Unterstützung der Disposition in komplexen Bahnhofsbereichen [3]. Die aktuelle Forschung zielt darauf ab, Unterstützungsmethoden für Bereiche ausserhalb der Bahnhöfe und für die Koordination benachbarter Netzteile zu entwickeln. Die gewählte Methodik kombiniert mathematische Optimierungsmodelle mit Simulationen: Die Ersteren erlauben, die bestgeeigneten Dispositionsmaßnahmen für jeden spezifischen Störfall zu identifizieren, benötigen aber eine sehr detaillierte Modellierung des Bahnbetriebs, um wertvolle, anwend-



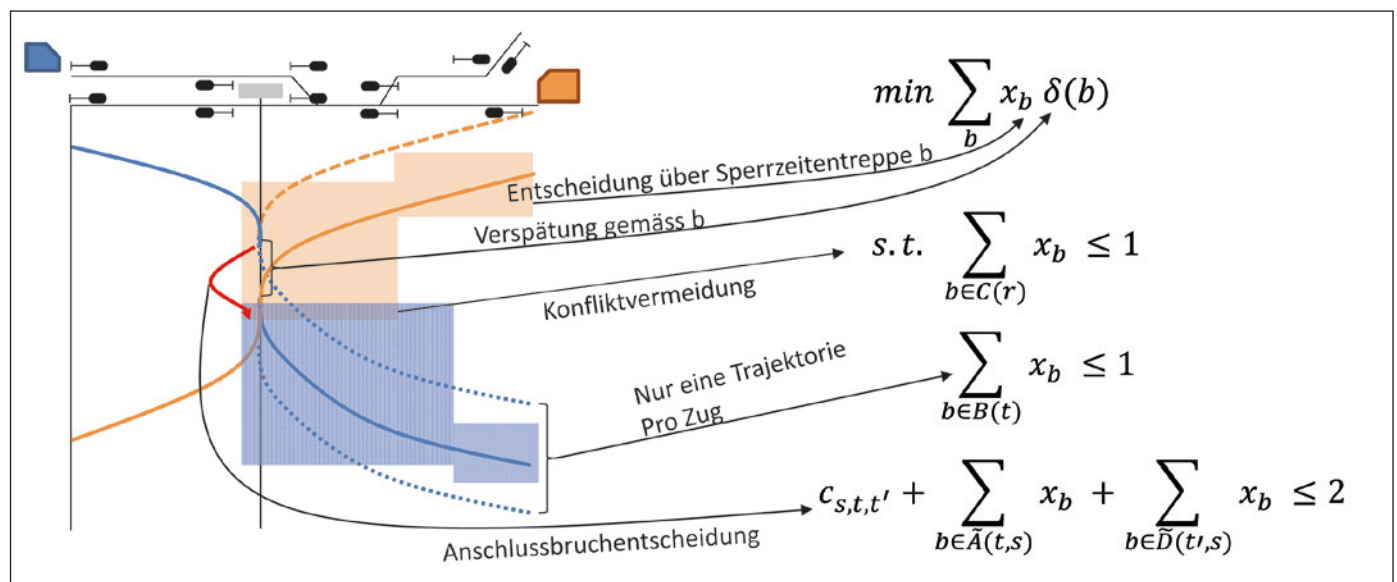
Ambra Toletti, MSc ETH
Wissenschaftliche Assistentin,
Institut für Verkehrsplanung und
Transportsysteme, ETH Zürich
ambra.toletti@ivt.baug.ethz.ch



Prof. Dr. Ulrich Weidmann
Professor für Verkehrssysteme,
Institut für Verkehrsplanung und
Transportsysteme, ETH Zürich
weidmann@ivt.baug.ethz.ch

bare Resultate zu liefern. Letztere liefern genau diese detaillierte Modellierung und sind auch in der Lage, stochastische Faktoren (v.a. Fahr- und Haltezeitabweichungen) zu berücksichtigen, was die Evaluation der

BILD 1: Vereinfachtes Optimierungsmodell für die Dispositionsunterstützung



von den Optimierungsmodellen generierten Dispositionsmaßnahmen erlaubt. Im Folgenden werden die Methodik, die ersten Forschungsergebnisse und die noch offenen Fragen dargestellt.

2. LOKALE UNTERSTÜTZUNG DER DISPOSITION

2.1. OPTIMIERUNGSMODELL

In jedem Störfall wird die bestgeeignete Dispositionsstrategie durch das Lösen eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems identifiziert (siehe [4] für eine tiefgehende Beschreibung). Die Entscheidungsvariablen entsprechen Anschlussbrüchen sowie Sperrzeitentrepfen, welche mit Zugstrajektorien entlang unterschiedlicher Pfade, mit unterschiedlichen Abfahrtszeiten und Geschwindigkeitsprofilen übereinstimmen. Die Randbedingungen des Eisenbahnbetriebs, z. B. Konfliktvermeidung, und die Ziele der Betriebssteuerung, z. B. Verspätungsminimierung, werden durch lineare Funktionen dieser Entscheidungsvariablen abgebildet. Bild 1 stellt die wesentlichen Variablen und Bedingungen des Modells dar: Die x_b sind Entscheidungsvariablen über die Zugstrajektorien und die $c_{s,t,r}$ jene über die Anschlüsse. Die vier mathematischen Ausdrücke können folgendermassen gelesen werden (von oben nach unten): Die Minimierung der Ankunftsverspätungen wird durch eine gewichtete Summe von Entscheidungen betreffend der Zugstrajektorien (x_b) modelliert, wobei die Gewichte mit den Verspätungen gemäss den jeweiligen Trajektorien übereinstimmen; von jeder Gruppe $C(r)$ überschneidender Sperrzeitentrepfen kann maximal eine ausgewählt werden (Konfliktvermeidung); zu jedem Zug t wird maximal eine Trajektorie pro Strecke zugeordnet; Anschlüsse werden gebrochen, wenn die Zeit zwischen der Abfahrt des Anschlusszuges $\tilde{D}_{t,s}$ und der Ankunft des Zubringerzuges $\tilde{A}_{t,s}$ nicht ausreicht.

Die Lösung des Problems wird mittels der kommerziellen Optimierungssoftware CPLEX identifiziert und entspricht einem neuen, konfliktfreien Fahrplan, der aus der Kombination der Entscheidungsvariablen entsteht.

2.2. DATENVORBEREITUNG MITTELS SIMULATIONEN

Da die Zeit für Dispositionsentscheidungen im realen Bahnbetrieb sehr gering ist, wurde in früheren Arbeiten ([2], [3]) vorgeschlagen, eine Datenbank von Sperrzeitentrepfen,

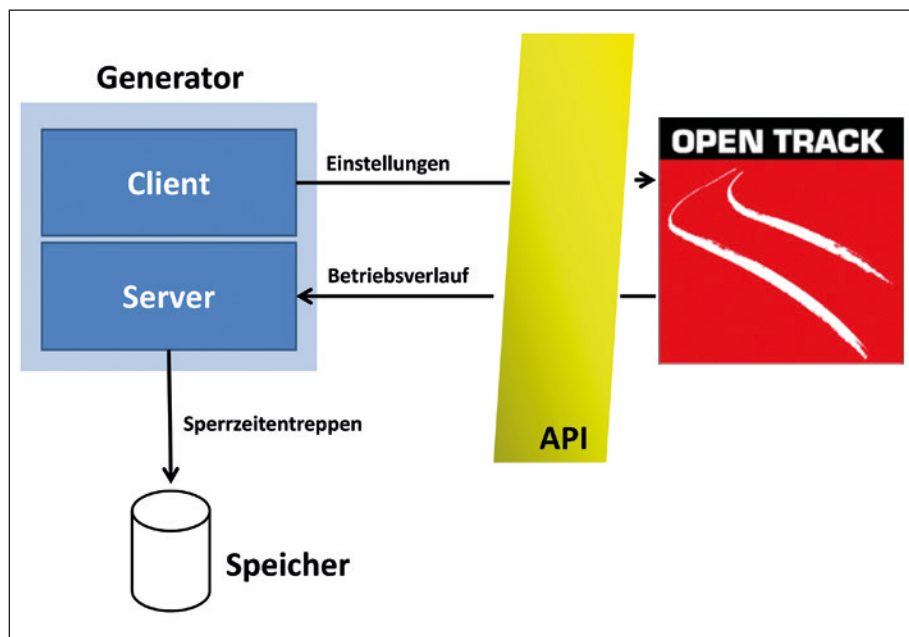


BILD 2: Datenvorbereitung mittels Simulationen

pen, welche als Entscheidungsvariablen im Optimierungsmodell angewandt werden können, vorzubereiten. So kann der Algorithmus auf diese schon vorhandenen Daten zugreifen und damit Zeit sparen. Die innovative Idee der aktuellen Forschung ist, diese Datenbank mittels Simulationen zu erzeugen.

Die Eisenbahnsimulationssoftware OpenTrack bietet eine Programmierschnittstelle (im folgenden API „Application Programming Interface“ genannt), welche die Interaktion der Simulationen mit dritten Programmen erlaubt [5]. Die API wurde schon im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten erfolgreich angewandt, z. B. für die Analyse der Haltezeitabweichungen in Bahnsystemen mit dichten Fahrplänen [6]. Das Grundprinzip ist Folgendes: OpenTrack sendet kontinuierlich Zustandsnachrichten über den Betriebsverlauf der Simulation zu einem vom Anwender definierten Server, empfängt gleichzeitig Befehle von anwenderdefinierten Clients und setzt sie im Rahmen der laufenden Simulation um. Die von OpenTrack gesendeten Nachrichten enthalten Ankunft-, Abfahrt-, Durchfahrt-, Sperr- und Freigabezeiten, Ortungs- und Geschwindigkeitsangaben sowie Informationen zu den Zugsausfällen. Die eingehenden Befehle enthalten Fahrplanänderungen, v. a. Abfahrtszeitänderungen, Anschlussbrüche, Zugsausfälle und Definitionen von ausserplanmässigen Fahrten, Zugsumleitungen über alternative Routen, Geschwindigkeits- und Traktionsinstruktionen sowie Signal-schaltungen.

Für die automatisierte Erzeugung der Sperrzeitentrepfendatenbank wurde ein

„Generator“ entwickelt, welcher aus einem Server und einem Client besteht. Der Client legt die Simulationseinstellungen durch die API in OpenTrack (aktive Züge, Pfade, Geschwindigkeitsgrenzen) fest: Grundsätzlich wird jeder Zug allein auf der Infrastruktur laufen gelassen, entlang aller möglichen Pfade und mit allen sinnvollen Geschwindigkeitsprofilen. Der Server empfängt die Betriebsverlaufsinformationen (Abfahrts- und Ankunftszeiten und Fahrgeschwindigkeiten, Blockzeiten, Energieverbrauch) von OpenTrack durch die API, erzeugt die Sperrzeitentrepfen und speichert sie zusammen mit den entsprechenden Abfahrts-, Ankunfts- und Energieverbrauchsdaten in der Datenbank. Bild 2 zeigt die Datenvorbereitungsmethodik und die entsprechenden Informationsflüsse.

3. GLOBALE DISPOSITIONS-UNTERSTÜTZUNG

3.1. RÄUMLICHE ZERLEGUNG

Aus rein optimierungsorientierter Sicht sollte das ganze Eisenbahnnetz für den ganzen Tag mittels eines einzigen Optimierungsmodells disponiert werden. Dies ist aufgrund des riesigen rechnerischen und informatorischen Aufwands nicht zu empfehlen. Während die Rechenzeit dank IT-Entwicklungen nur kurzfristig als Entscheidungskriterium gelten würde, wird die benötigte Energie für die Berechnung auch langfristig entscheidend für die Wahl einer Dekompositionsstrategie sein. Eine Problemzerlegung kann zu suboptimalen »

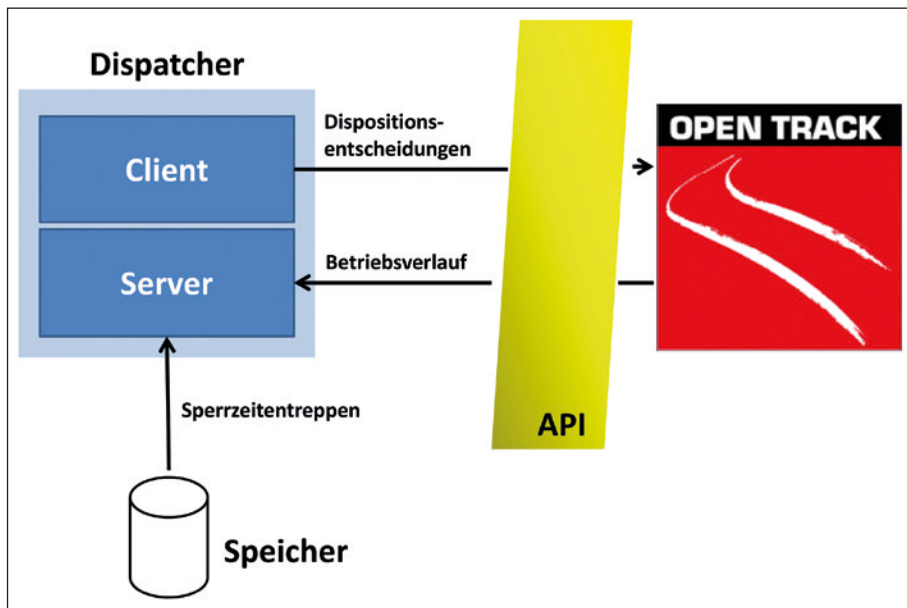


BILD 3: Validierung der Algorithmen mittels Simulationen

globalen Lösungen führen, aber zeigt neben den rein rechnerischen Gründen auch weitere Vorteile. Einerseits sind bei zerlegten IT-Systemen die Fehlertoleranz und die Verlässlichkeit oft höher. Andererseits ist auch die Anwendbarkeit bei der Industrie direkter: Das SBB-Netz wird schon heute zerlegt disponiert und dies ermöglicht auch, Abweichungen ohne Einfluss auf andere Regionen lokal zu beheben.

Die Komplexität und die Grösse des Optimierungsproblems hängen von der Ausdehnung des betrachteten Netzbereiches sowie der Anzahl der berücksichtigten Züge ab. Aus diesem Grund wird das Dispositionsproblem zeitlich und räumlich zer-

legt. Die zeitliche Zerlegung erfolgt durch einen rollierenden Planungshorizont: In jedem Schritt wird nur der Verkehr in der unmittelbar folgenden Periode berücksichtigt, normalerweise die nächsten dreissig oder sechzig Minuten. Dies beeinträchtigt die Lösungsqualität nur leicht, weil Vorhersagen zur Verkehrslage über längere Dispositionshorizonte kaum möglich wären. Die räumliche Zerlegung hängt von der Verkehrsdichte ab [7]: Sogenannte Verdichtungsbereiche entsprechen den Kapazitäts-Engpasszonen, wo das einzige Ziel der Disposition die Konfliktbeseitigung mit minimalen Auswirkungen auf den Kunden ist [3]. Umgekehrt sind die Fahrpläne in Aus-

gleichsbereichen weniger dicht, und die dort vorgesehenen Zeitreserven ermöglichen es auch, weitere Ziele zu berücksichtigen (z.B. Energieersparnis [2], [8]). Da die Verkehrsdichte von Tag zu Tag und auch im Laufe eines einzelnen Tages variiert, sollte die Zerlegung dynamisch sein. Allerdings wurde wegen der schon hohen Komplexität des Systems noch während der laufenden Arbeit entschieden, eine fixe statische Zerlegung anzunehmen.

3.2. KOORDINATION VON BENACHBARTEN DISPOSITIONSZONEN

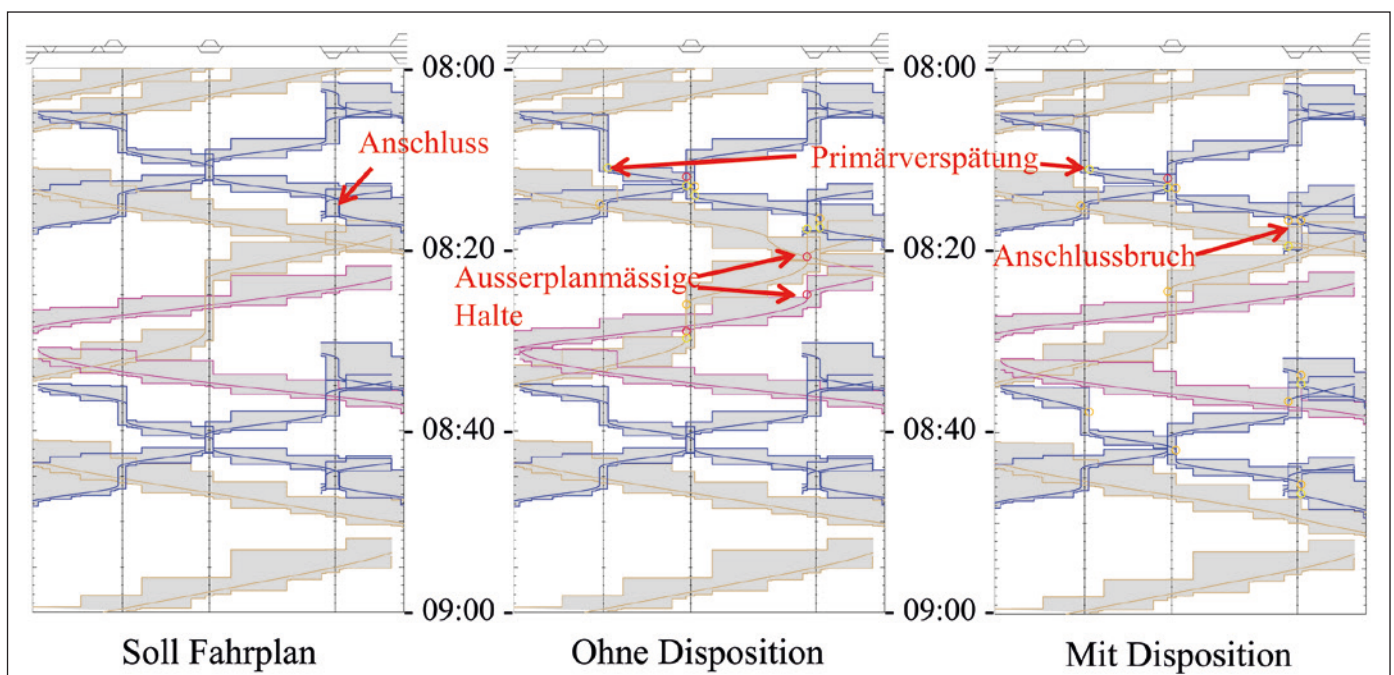
Die Koordination benachbarter Dispositionszonen erfolgt durch das Festlegen von Durchfahrtsgleisen, -zeiten und -geschwindigkeiten der Züge durch die Punkte, welche auf den Grenzen zwischen den Dispositionszonen liegen. Diese Werte sollen mit einer intelligenten Methodik gewählt werden, um die Qualität der resultierenden globalen Disposition nicht zu beeinträchtigen. Eine zielführende Idee ist, diese Werte auf Basis der Resultate der lokalen Dispositionsprobleme im vorigen Planungshorizont festzulegen.

4. VALIDIERUNG DER ALGORITHMEN

4.1. VALIDIERUNG MITTELS SIMULATIONEN

Idealerweise testet man Forschungsergebnisse direkt auf dem Forschungsobjekt, aber oft ist dies wegen der Sicherheitsrisiken und der unangenehmen Auswirkungen, welche mit einem Testversagen verbunden

BILD 4: Fallstudie



wären, nicht empfehlenswert. Aus diesem Grund wurden die Forschungsergebnisse anhand simulierter Fälle getestet. In diesem Fall agiert die Eisenbahnsimulationssoftware OpenTrack als Realitätssubstitut: Der simulierte Betrieb widerspiegelt den realen Betrieb im betrachteten Netzbereich. Hinterlegt sind die aktuelle Gleistopologie, das Rollmaterial und der offizielle Fahrplan. Betriebsstörungen werden mittels anwenderdefinierter Regeln generiert und die Aufgabe der Disposition ist, die Situation wieder in Ordnung zu bringen.

Die Validierung der entwickelten Algorithmen erfolgt dank der Kommunikation zwischen OpenTrack und einem sogenannten „Dispatcher“, welcher aus einem Server und einem Client besteht. Der Server erhält die Zustandsnachrichten des (simulierten) Betriebs durch die API und erarbeitet einen neuen, konfliktfreien Fahrplan mit dem Optimierungsmodell. Die Sperrzeitentreppen, welche als Entscheidungsvariablen dienen, werden aus der gespeicherten Datenbank (siehe Abschnitt 2.2) abgerufen. Der Client sendet den (simulierten) Zügen und Infrastruktur die ausgewählten Dispositionsmaßnahmen. Bild 3 zeigt schematisch die Validierungsmethodik.

4.2. FALLBEISPIEL

Der Algorithmus für die lokale Dispositionsunterstützung (Abschnitt 2) wurde mittels einer Fallstudie gemäss der beschriebenen Validierungsmethodik (Abschnitt 4.1) getestet. Die zugrundeliegende Infrastruktur bildet das Netz des Eisenbahnbetriebslabors der ETH Zürich ab. Bild 4 zeigt den geplanten Bahnbetrieb, denjenigen, welcher aus einer Abfahrtsverspätung resultiert (ohne Dispositionsmaßnahmen) und das Resultat des Dispositionsunterstützungsalgorithmus.

Alternative Trajektorien für alle Züge wurden gemäss der im Abschnitt 2.2 beschriebenen Methodik (OpenTrack Version 1.8.3) generiert. Das Optimierungsmodell wurde in C++ definiert und mittels CPLEX Optimization Studio (Version 12.63) gelöst, mit dem Ziel, die Zugsverspätungen zu minimieren.

Die Zeit-Weg-Diagramme im Bild 4 zeigen, dass die vom Modell ausgewählten Dispositionsentscheidungen die Auswirkungen der Primärverspätung auf die Folgefahrten reduzieren. Ausserplanmässige Halte können vermieden werden, die Ankunftsverspätungen der unmittelbar folgenden Züge sind geringer und werden in kürzerer Zeit abgebaut. Diese Ergebnisse sprechen für die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik für die lokale Dispositionsunterstützung und ihre Einbindung in eine globale, koordinationsbasierte Methodik.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Die laufende Forschungsarbeit kombiniert Optimierungsmodelle und Simulationen, um algorithmische Unterstützungsmethoden für Disponenten zu entwickeln und zu validieren. Die Ergebnisse der präsentierten und weiterer Fallstudien ([4], [8]) zeigen, dass die entwickelten Algorithmen die Eisenbahnbetriebsdisposition lokal unterstützen können. Die nächste Phase ist die Entwicklung einer intelligenten Koordinationsmethodik für die Unterstützung der Disposition in benachbarten Zonen. Bis zum Herbst 2017 sollen die definitiven Resultate in Form einer Dissertation vorliegen. Es ist nicht geplant, eine dynamische Netzzerlegung, welche die zeitlichen Variationen der Verkehrsdichte berücksichtigt, zu implementieren. Dies wird eventuell im Rahmen von Nachfolgearbeiten untersucht. ◀

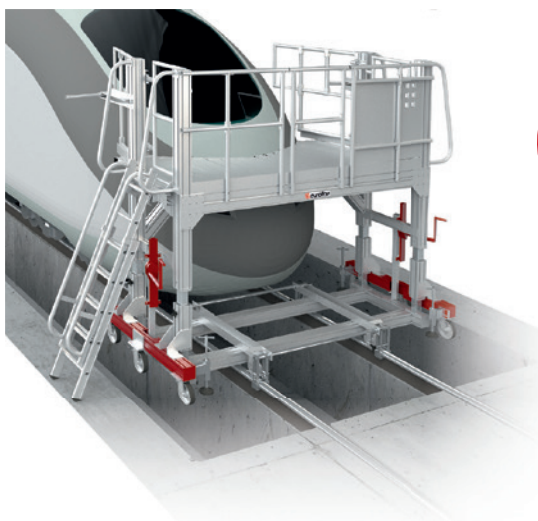
Literatur

- [1] U. Weidmann, M. Laumanns, M. Montigel und X. Rao: Dynamische Kapazitätsoptimierung durch Automatisierung des Bahnbetriebs. In: Eisenbahn-Revue, Nr. 12/2014, S. 606-611.
- [2] G. Caimi: Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilized railway network, ETH Zürich: Diss. No. 18581, 2009.
- [3] M. Fuchsberger: Algorithms for railway traffic management in complex central station areas, ETH Zürich: Diss. No. 20398, 2012.
- [4] A. Toletti und U. Weidmann: Modelling customer inconvenience in train rescheduling. Swiss Transport Research Conference (STRC), Ascona, 2016.
- [5] B. Seybold und D. Hürlimann: Presentation of the OpenTrack API. IT13.RAIL, Zürich, 2013.
- [6] C. Krause: Simulation of dynamic station dwell times on high frequency rail transport systems - Representing dynamic station delays with OpenTrack. Masterarbeit, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.
- [7] F. Laube, S. Roos, R. Wüst, M. Lüthi und U. Weidmann: PULS 90 - Ein systemumfassender Ansatz zur Leistungssteigerung von Eisenbahnnetzen. In: ETR 3/2007, S. 104-107.
- [8] A. Toletti, V. De Martinis, U. Weidmann und A. Nash: An enhanced RCG rescheduling model for freight rail traffic: introducing the energy saving. In: TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, DC, 2016.

► SUMMARY

Simulation and optimisation of support for scheduling

Research work currently ongoing at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich is aiming to go a step further in providing algorithmic support for scheduling. Experimental studies show promising results for the use in local support for scheduling of the algorithms that have been developed in the framework of current and earlier research. The research is now turning its focus to the methods for coordinating scheduling in neighbouring parts or the network. It is planned to present the definitive results in autumn 2017 in the form of a dissertation.



Besuchen Sie
uns auf der
InnoTrans
CityCube Halle B
Stand 504

Ganz nah.

Passgenaue Lösungen für Bahn- und Bus-Wartung

Individuell konstruierte Steigtechnik ermöglicht eine sichere, komfortable und wirtschaftliche Wartung von Zügen und Bussen. Beispiel Zugwartung: Die Kassettenbühne mit „Spaltmaß null“ – höhenverstellbar und auf Hallenböden oder Schienen einsetzbar.

Alle Sonderkonstruktionen unter:
www.euroline-leitern.de
Youtube-Kanal: [euroline.tv](https://www.youtube.com/euroline)

euroline
Der sichere Aufstieg