



Doctoral Thesis

## Algorithms for railway traffic management in complex central station areas

**Author(s):**

Fuchsberger, Martin

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007583671> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20398

# **Algorithms for railway traffic management in complex central station areas**

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
MARTIN FUCHSBERGER

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Hans-Jakob Lüthi, examiner  
Prof. Dr. Ulrich Weidmann, co-examiner  
Prof. Dr. Peter Widmayer, co-examiner

2012

# Abstract

---

This thesis addresses the problem of managing dense railway traffic in a complex central station area by providing ongoing decision support to the dispatcher. For this purpose a closed-loop discrete-time control framework is developed, in which a model predictive controller provides decision support in the form of disposition schedules. The model predictive controller assumes that the railway network topology, the timetable, the connections and a forecast of future train movements are given. The controller's time-critical task is to provide the dispatcher with a conflict-free disposition schedule, which assigns a travel path and a start time to each train movement inside the considered time horizon and additionally, minimizes the delays and broken connections that could occur at the central station.

Many models and algorithms for train dispatching have already been proposed in the literature, but only a few of them with successful application in practice. The few successful applications are either limited to a restricted area of switches, consider a simpler network topology or are based on heuristics that lack a quality assertion. Approaches that are not affected by any of these restrictions, have so far not been applied in daily operations mostly due to their computational complexity. The approach of this thesis for dispatching trains in a central railway station area is sufficiently fast in order to be used in a decision support system and in addition, provides a guarantee of quality.

The train dispatching problem is addressed in this thesis in three consecutive steps:

1. Alternative train paths, alternative departure times and speed profiles are combined and form a set of alternative, so-called blocking time stairways, which model essentially safety corridors for the train movements in the railway network.
2. A mathematical constrained assignment model is formulated as a binary linear program in which constraints preclude safety-related and operational conflicts between alternative blocking time stairways and thus, the choice for assigning a blocking time stairway to each train movement is limited.
3. A bi-objective function is added to the model to measure the quality of an assignment in terms of generated delays and broken connections at the central station.

Finally, a commercial solver based on mathematical optimization techniques computes the best assignment.

The efficiency of this approach in terms of computation time depends on the formulation of the binary linear program. The formulation proposed in this thesis has considerably fewer variables as well as fewer and stronger constraints compared to previous formulations. The associated LP relaxation provides better bounds on objective values due to the stronger constraints, which in turn can be exploited by the solver and result in much shorter computation times.

A major aspect of this thesis was to showcase the viability of this framework in a comprehensive case study, so that industry will take this framework a step further towards its integration in practical operations. In close collaboration with the Swiss federal railways (SBB) the closed-loop discrete-time control system was simulated in a laboratory setting. In the simulation trains were dispatched over the course of a day in the central railway station area Berne, Switzerland. The closed-loop discrete-time control framework was successfully able to dispatch trains in a time interval of one minute. Nevertheless, the laboratory setting precluded a study of the qualitative impact that the closed-loop system would have on a physical railway system. The thesis outlines three additional important steps, which are required before a successful integration of this framework in practice becomes possible:

1. The framework is interfaced with a simulation environment that will be responsible for simulating the train movements in the physical railway system.
2. The dispatcher has to be incorporated in the close-loop system. A good platform for the interaction of the control system with the dispatcher is critical for a successful integration of the presented decision support system.
3. When the platform for the interaction between dispatcher and the control system can be successfully operated over a simulated physical railway system, the simulation can be replaced by the real world railway system.

It is obvious that the SBB strives for improved operational processes and thus supported this thesis. But it is quite remarkable that the SBB also supports the stepwise approach suggested by the thesis towards integrating decision support systems in their operational processes. As a consequence, the SBB started a new project in which the framework will be studied further by interfacing the closed-loop control system with a railway simulation software.

# Zusammenfassung

---

Diese Dissertation verfolgt das Ziel, den Disponenten in seiner zunehmend schwierigen Aufgabe zu unterstützen, den dichten Zugverkehr in komplexen Bahnhofsbereichen zu steuern. Dafür wird ein System zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, in welchem eine modellgestützte Regelung innerhalb eines zeit-diskreten, geschlossenen Regelkreises dem Disponenten laufend aktualisierte Betriebsfahrpläne als Entscheidungshilfe zur Verfügung stellt. Damit der Regler einwandfreie Betriebsfahrpläne erstellen kann, müssen die Infrastruktur des Eisenbahnnetzes, der offizielle Fahrplan, Anschlussinformationen und eine Prognose der zukünftigen Zugläufe verfügbar sein. Die schwierig und zeitkritisch zu erstellenden Betriebsfahrpläne müssen dabei jeder im Betrachtungsraum liegenden Zugbewegung einen geeigneten Laufweg und geeignete Fahrzeiten zuweisen, so dass es zu keinen Konfliktsituationen zwischen den Zugbewegungen kommt. Zur Ermittlung von qualitativen Betriebsfahrplänen werden die Verspätungen gegenüber dem offiziellen Fahrplan und die gebrochenen Anschlüsse gemindert.

In der Literatur sind etliche Modelle und Algorithmen für die Disposition von Zügen vorgeschlagen worden, jedoch nur wenige mit einer erfolgreichen gekoppelten Anwendung in der Praxis. Die wenigen erfolgreichen Anwendungen beziehen sich auf eine kleine Region von Weichen, beschränken sich auf eine einfache Netzwerktopologie oder basieren auf Heuristiken, welche keine Qualitätsgarantien bieten. Ansätze ohne diese Einschränkungen, wurden wegen ihrer rechnerischen Komplexität in der Praxis bisher nicht umgesetzt. Der in dieser Dissertation verfolgte Ansatz zur Disposition von Zügen in zentralen Bahnhofsbereichen, ermittelt genügend schnell Betriebsfahrpläne, um als Entscheidungsunterstützungssystem eingesetzt zu werden und bietet zusätzlich eine Qualitätsgarantie.

Der Ansatz für die Disposition von Zügen ist in drei aufeinanderfolgende Schritte unterteilt:

1. Alternative Laufwege, alternative Abfahrtszeiten und Geschwindigkeitskennlinien von Zugbewegungen werden zu so genannten Sperrzeitentreppen kombiniert. Diese Sperrzeitentreppen sind Raum-Zeit-Korridore und werden vom Sicherungssystem konzeptionell verwendet, um die kollisionsfreie sichere Bewegung der Züge zu ga-

rantieren.

2. Ein mathematisches Zuweisungsproblem mit Einschränkungen zur Vermeidung von Zugkollisionen wird als binäres lineares Programm formuliert. Jeder Zugbewegung muss eine geeignete Sperrzeitentreppe aus alternativen Sperrzeitentrepfen zugewiesen werden, wobei sicherheitsrelevante und betriebliche Einschränkungen gewisse Zuweisungen verbieten.
3. Dem Modell wird eine Zielfunktion hinzugefügt, welche die Qualität einer Zuweisung durch das Betrachten von entstehenden Verspätungen und gebrochenen Anschlüssen ermittelt. Abschliessend berechnet ein kommerzieller mathematischer Löser mittels Methoden der mathematischen Optimierung die beste erlaubte Zuweisung.

Die an der Rechenzeit gemessene Effizienz dieses Ansatzes hängt stark von der Formulierung des binären linearen Programms ab. Die von dieser Dissertation vorgeschlagene Formulierung reduziert deutlich die Anzahl der zu betrachtenden Variablen und enthält stark verschärfte Bedingungen im Vergleich zu früheren Formulierungen. In der assoziierten LP Relaxierung führen die verschärften Bedingungen dann zu besseren Zielwert-schranken und diese wiederum erlauben es dem mathematischen Löser, deutlich schneller die beste Zuweisung zu ermitteln.

Neben der algorithmischen Effizienz ist die praktische Tragfähigkeit des in dieser Dissertation verfolgten Ansatzes ein weiterer wichtiger Aspekt. Eine Fallstudie präsentiert zu diesem Zweck die Umsetzbarkeit der entwickelten algorithmischen und mathematischen Methoden mit dem klaren Ziel, die Industrie von der Umsetzbarkeit eines solchen Rahmenwerks zu überzeugen und letztlich die Integration von algorithmischen und mathematischen Ansätzen im Eisenbahnbetrieb voranzutreiben. In enger Zusammenarbeit mit den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wurde dazu der geschlossene, zeit-diskrete Regelkreis in einer Laborumgebung simuliert. In dieser Simulation wurden Züge im Verlaufe eines (simulierten) Tages innerhalb des zentralen Bahnhofbereiches Bern (Schweiz) disponiert. Das System war erfolgreich in der Lage, nach jeder simulierten verstrichenen Minute aktualisierte Betriebsfahrpläne zu berechnen, ohne dabei für die Rechnung länger als eine Minute zu benötigen. Dies belegt die rechnerische Umsetzbarkeit. Der qualitative Nutzen des vorgeschlagenen Entscheidungsunterstützungssystems kann nicht von einer Fallstudie untersucht werden, in welchem das Systemverhalten nicht abgebildet ist. Die Dissertation zeigt deswegen auf, wie in einem ersten Schritt zunächst der qualitative Mehrwert eines solchen Systems geprüft werden kann und wie in zwei weiteren Schritten die Einführung eines solchen Systems in der Praxis stattfinden könnte. Kurz gefasst sind die drei Schritte folgendermassen anzusetzen:

1. Das Rahmenwerk wird ergänzt durch eine Simulationsumgebung, welche das Systemverhalten des Eisenbahnnetzes realistisch abbildet.
2. Der Disponent wird in die Umsetzung einbezogen und interagiert im geschlossenen Regelkreis mit dem Entscheidungsunterstützungssystem. Der Fokus dieses Schrittes ist die Umsetzung einer guten Schnittstelle für die Interaktion zwischen dem Disponenten und dem System.

3. Nachdem die Interaktion zwischen dem Disponenten und dem System wie gewünscht verläuft, wird die Simulationsumgebung durch einen Anschluss an das physikalische System des Eisenbahnnetzes ersetzt.

Es ist offensichtlich, dass die SBB Verbesserungen in betrieblichen Prozessen anstreben und unter anderem deshalb, diese Dissertation unterstützt haben. Die SBB werden die in dieser Dissertation vorgeschlagene schrittweise Umsetzung eines Entscheidungsunterstützungssystem verfolgen. Als Konsequenz wurde erfreulicherweise bereits eine Folgestudie gestartet, welche sich mit dem ersten Umsetzungspunkt, nämlich der Integration einer Simulationsumgebung, beschäftigt.

# Résumé

---

Cette thèse de doctorat a pour but d'assister le planificateur dans sa tâche de gérer l'intense trafic ferroviaire dans l'environnement complexe de gares centrales. Dans cette optique, on y développe un système qui fournit au planificateur des horaires opérationnels constamment actualisés grâce à une commande prédictive opérant à l'intérieur d'un circuit logique fermé à temps discret. Afin d'élaborer des horaires opérationnels impeccables, le régulateur a besoin des données de l'infrastructure du réseau ferroviaire, les informations concernant les correspondances et une prévision des futurs parcours des trains. Ces horaires opérationnels attribuent une heure de départ et une route adéquate à tout mouvement de train à l'intérieur de l'intervalle de temps considéré, évitant tout conflit entre les différents mouvements de trains. En outre, la qualité de l'horaire opérationnel exige une minimisation de retards et d'interruptions de correspondances par rapport à l'horaire régulier.

La littérature fournit bon nombre de modèles et d'algorithmes pour le dispatching de trains. Peu d'entre eux ont été implémentés avec succès dans la pratique. Ces rares applications se limitent à un nombre d'aiguillages restreint, à une topologie de réseau simplifiée, ou se basent sur des méthodes heuristiques qui ne fournissent aucune garantie de qualité. Jusqu'à présent, les approches faisant fi de ces restrictions n'ont pas pu s'appliquer à la pratique étant donnée leur complexité de calcul. L'approche de cette thèse pour la régulation de trains dans des gares centrales fournit dans un délai adéquat des horaires opérationnels capables d'améliorer le *système de support à la prise de décision* et de plus comprend une garantie de qualité. Le problème du dispatching de trains est abordé dans cette thèse en trois pas consécutifs :

1. Des parcours de trains, des heures de départ et des profils de vitesse alternatifs sont combinés pour former des escaliers de temps de blocage. Ces derniers modèlent essentiellement des corridors temps-espace que le système de sécurité utilise de façon conceptionnelle pour garantir le déplacement sûr et sans collision des trains.
2. Un problème mathématique d'attribution est formulé en tant que logiciel binaire linéaire, dont les prémisses incluent des restrictions pour éviter des collisions entre trains. Il s'agit d'attribuer un escalier de temps de blocage adéquat à chaque mou-



vement de train, tout en considérant les restrictions opérationnelles et celles dues aux exigences de sécurité.

3. Le modèle est complété par une fonction à double objectif, qui mesure la qualité de l'attribution par l'analyse des retards engendrés et des correspondances interrompues. Finalement, un solveur commercial basé sur les méthodes d'optimisation calcule la meilleure attribution possible.

L'efficacité de cette approche, mesurée en temps de calcul, dépend largement de la rédaction du logiciel binaire linéaire. La formulation proposée dans cette thèse réduit notablement le nombre de variables à considérer et comprend de fortes restrictions par rapport aux formulations préalables. Grâce à l'usage de la relaxation continue, ces restrictions renforcées autorisent de meilleures *bornes d'objectif*, qui à leur tour permettent un gain de rapidité du solveur mathématique dans la détermination de la meilleure attribution.

Mis à part l'efficacité algorithmique, la capacité pratique de l'approche poursuivie est d'une importance évidente. Une étude de cas présente dans cette thèse l'application des méthodes algorithmiques et mathématiques développées dans le but de convaincre l'industrie de la viabilité d'un tel système et de pousser à l'intégration d'approches algorithmiques et mathématiques dans l'exploitation des chemins de fer. En étroite collaboration avec les chemins de fer fédéraux (CFF), le circuit logique fermé à temps discret a été simulé sous conditions de laboratoire. Cette simulation a organisé les mouvements des trains durant une journée fictive dans l'environnement central de la gare de Berne (Suisse). Minute après minute, le système s'est montré capable de pourvoir un horaire opérationnel, sans excéder le temps de calcul d'une minute. Cela prouve la faisabilité des calculs. L'avantage qualitatif du *système de support à la prise de décision* proposé ne peut pas s'analyser par cette étude de cas qui ne tient pas compte du comportement du système. Néanmoins, la thèse esquisse trois étapes importantes à franchir avant l'introduction d'un tel système dans la pratique.

1. La trame de ce système est complétée par un environnement fictif qui simule le mouvement des trains du réseau ferroviaire.
2. Le planificateur participe à l'application et interagit avec la commande prédictive. L'établissement d'une bonne plateforme d'interaction entre le planificateur et le système est essentielle pour le succès d'un tel modèle.
3. Une fois que cette plateforme opère sans problèmes, l'environnement fictif peut être remplacé par la connexion au système physique du réseau ferroviaire.

Il faut remarquer que les CFF aspirent à une amélioration des processus à l'intérieur de leur entreprise, d'où leur soutien pour cette thèse. Dorénavant, ils favoriseront l'introduction graduelle comme prévue ci-dessus d'un tel *système de support à la prise de décision*. Comme premier pas dans cette direction, les CFF ont mis sur pied un nouveau projet dans le but de tester ce système au moyen d'autres logiciels de simulation utilisant les données du secteur ferroviaire.