

FAHRPLANTRASSEN BEI ZWEIFLEISIGEN STRECKEN MIT GEMISCHTEM VERKEHR

Andreas Schöbel¹

The European guideline 96/48/EG claims the interoperability for the railway. "Railway" as a system of various components reflects the diversity of operation modes. Modern computers offer the possibility of retrieving data from daily railway services and consequently using them in railway-simulation. interaction Phenomenons of management interactions between infrastructure and timetable as complex matters, can only be depicted by computer-supported methods. Moreover there are influences by the measures of infrastructure (f.e. building of a new track in a station for overtaking), safety concepts (Blocksystem, European Train Control System) and various forms of timetables. Therefore my contribution by means of a fictitious two-track-section should demonstrate possible occurrences and point out management options. As part of solution proposals considering problems in railroad management a timetable-software is mentioned in this connex.

1. Einleitung

Im Zuge der EU-Richtlinie 96/48/EG über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems wird auch die Interoperabilität für den Betrieb gefordert. Das System „Eisenbahn“ mit all seinen Komponenten vom Fahrweg über die Fahrzeuge bis zur Leit- und Sicherungstechnik bietet eine Fülle von Betriebsvarianten, die sich auch in der Fahrplangestaltung manifestieren.

Sowohl für die Planung von Neubaustrecken als auch für die Adaptierung von Bestandsstrecken ist das Zusammenwirken von infrastrukturseitigen Maßnahmen (zusätzliche Überholgleise zur Schaffung von Dispositionsvarianten, weitere Gleisverbindungen), sicherungstechnische Konzepten (klassisches Blocksignalsystem, LZB, ETCS) und Fahrplangestaltung (Art und Anzahl der Züge bestimmter Gattungen und deren Höchstgeschwindigkeiten) zu berücksichtigen.

Auftretende Wechselwirkungen zwischen diesen Komponenten führen zu höchst komplexen Vorgängen, die nur durch die Anwendung der Betriebssimulation veranschaulicht und entsprechend der Zielvorstellungen beurteilt werden können. Daher sollen in diesem Beitrag verschiedenste Phänomene, die sich aus den systembedingten Einflüssen von Infrastruktur, Sicherungstechnik und Fahrplan ergeben, aufgezeigt werden, um damit einen Beitrag zu den Randbedingungen der Umsetzbarkeit der genannten Richtlinie zu leisten. Außerdem soll auch ein höchst interessanter Ansatz aus der Graphentheorie erwähnt werden, der bei entsprechender Erweiterung sich als ein gutes Werkzeug für die Bearbeitung der Trassenvergabe erweisen könnte.

¹Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Wien
Tel.: +43 1 58801 23211 Fax: +43 1 58801 23299 andreas.schoebel@eiba.tuwien.ac.at

2. Modellierung

Je nach Abstraktionsstufe können verschiedene Formen der Modellierung unterschieden werden. Diese entspricht im wesentlichen auch der Aufteilung zwischen den Fachgebieten der Verkehrsplanung und der Eisenbahnbetriebswissenschaft. Während der Verkehrsplaner nicht so sehr an den einzelnen Fahrzeugen, sondern vielmehr an den Verkehrsströmen als ganzheitliches Phänomen interessiert ist, verhält es sich bei den Betriebsplanern der Eisenbahn vice versa. Auf die Transportvorgänge bezogen bedeutet dies, daß bei der makroskopischen Sicht abstrakte Kenngrößen wie etwa das Mischungsverhältnis von Zuggattungen und bei der vergleichsweise mikroskopischen Sicht meist ein konkreter Fahrplan vorliegt. Dieser unterschiedliche methodische Zugang bewirkt in weiterer Folge auch eine mehr oder weniger genaue Aussagekraft der Ergebnisse. Während prozentuelle Anteile von Zuggattungen noch keine Grundlage für Fahrdienstleiter oder Disponenten sind, wird der Verkehrsplaner für seine Modelle damit in vielen Fällen das Auslangen finden können. Eine weiterführende Zusammenschau zu dieser Thematik findet sich etwa bei [1].

Grundsätzlich unterschiedlich sind die Ansätze für die Betriebsführung bei Bestandsstrecken und Neubaustrecken. Während Bahnverwaltungen bei bestehenden Anlagen mit historisch gewachsenen Formen meistens das Auslangen finden müssen, wird bei Planungen für neue Abschnitte eines Netzes eine Fülle von Szenarien entwickelt, die bewertend verglichen werden müssen. Mit der zunehmenden Rechnerleistung ist die Simulation von unterschiedlichen Betriebsvarianten nur noch ein Problem des sinnvollen und vertretbaren Zeitaufwandes der damit befaßten Mitarbeiter. Im Laufe des letzten Jahrzehntes haben die meisten Bahnverwaltungen ihre Netze einer mehr oder weniger genauen Umsetzung in ein graphentheoretisches Modell unterzogen. In mühsamster Art wurden dabei aus Lageplänen und Stellwerkstechnik die für eine Betriebssimulation benötigten Daten wie Längen, Radien, Signalstandorte und deren Begriffe herausgefiltert. Das dadurch gebildete Knoten-Kanten-Modell soll dem Bearbeiter dieselbe Funktionalität wie die wirkliche Anlage dem Fahrdienstleiter bzw. den Disponenten bieten, um den Betrieb möglichst praxisnah abzubilden. Diese Bearbeitung bedingt von ihrer Methodik her eine Reduktion auf die für den Fahrbetrieb relevanten Gleise. Rangierfahrten sind dabei meist von untergeordneter Bedeutung für die Simulation. Man folgt dabei dem Grundsatz, daß Rangierfahrten sich nach den Pausen im Fahrbetrieb richten müssen. Umgekehrt bedingt dies, daß Rangiermanöver in der Simulation Planfahrten nicht behindern können, da sie nicht abgebildet werden und daher nicht berücksichtigt werden können. Andererseits ist die Modellierung dafür flexibler, da nicht jede kleine Änderung im Zuge einer neuen Betriebsvariante weitreichende Auswirkungen auf eine Vielzahl von Zugsfahrten hat. Der hier beispielhaft aufgezeigte Kompromiß ist durchaus innerbetrieblich vertretbar, wenn man bedenkt, welche Geschäftsbereiche von diesem Werkzeug der Simulation berührt werden [2].

3. Simulation

Dem sachkundigen Ingenieur bieten sich am Markt verschiedenste Softwarepakete zur Simulation von Eisenbahnnetzen. Am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Wien werden zur Zeit u.a. SIMU ++ [3] und OPENTRACK [4] im Hinblick auf ihre Funktionalität und ihre Anwendungsgrenzen analysiert. Für die hier in diesem Beitrag im folgenden gezeigten Phänomene spielt die Verwendung einer bestimmten Software keine Rolle, da diese Wirkungsmechanismen systemimmanente Eigenschaften des Eisenbahnbetriebes widerspiegeln. Die am Markt vorhandenen Versionen erlauben in gleicher Weise das Nachvollziehen der von mir beschriebenen Vorgänge.

4. Zusammenspiel von Infrastruktur und Fahrplan

Für eine Beurteilung von Varianten der Betriebsabwicklung werden verschiedene Parameter herangezogen wie z.B.: Verspätungssummen. Betrachtet man eben diese Summe, so liefert sie zwar einen Gesamteindruck, der eine makroskopische Beurteilung der Variante zuläßt. Geht es aber nun um die einzelnen Fahrplantrassen, also um die einzelnen Zugsfahrten, so ist diese Sichtweise nicht ausreichend. Es kann nämlich durchaus passieren, daß zwar die Gesamtsumme ein Minimum ist, einzelne Zugsfahrten aber massiv behindert werden und zusätzliche Verspätungen zu ihren ursprünglichen Einbruchsverspätungen erhalten, da der Fahrweg durch einen bestimmten Abschnitt nicht rechtzeitig frei gegeben werden kann.

Bei der Erstellung eines Fahrplanes bestehen verschiedenste Zwangspunkte. So gilt es in manchen Bahnhöfen gewisse Anschlüsse sicher zu stellen, um den Fahrgästen die Umsteigezeiten möglichst klein zu halten. Andererseits müssen dadurch Kantenfahrzeiten eingehalten werden, um die Taktknoten zu erhalten. Aufgrund des vorhandenen Spannungsfeldes ist es meist nicht möglich, den optimalen Fahrplan zu konstruieren. Es müssen aber Kompromisse zwischen den aus verschiedenen Perspektiven gewonnenen Optimalvarianten gefunden werden.

Ein guter Ansatz, um zu einer hohen Betriebsqualität zu kommen, ist es, den schnelleren Zug vorfahren zu lassen und dann mit der nächstlangsameren Gattung zu folgen. Dies entspricht auch dem Anschlußprinzip nach einem IC-Halt. Ein Intercity-Zug hält an einem Knoten von dem aus die Fahrgäste mit Eilzügen in die frequenzmäßig geringer ausgelasteten Stationen gelangen. Der Anschlußzug erhält seine Funktion nur durch den übergeordneten Zug, d.h. allfällige Verspätungen werden im Knoten abgewartet, um die Fahrgäste zum gewünschten Zielbahnhof zu bringen. Nach den Personenzügen werden die weitaus flexibleren Güterzüge eingelegt. Diese weisen eine geringere Reisegeschwindigkeit auf (Abbildung 1)

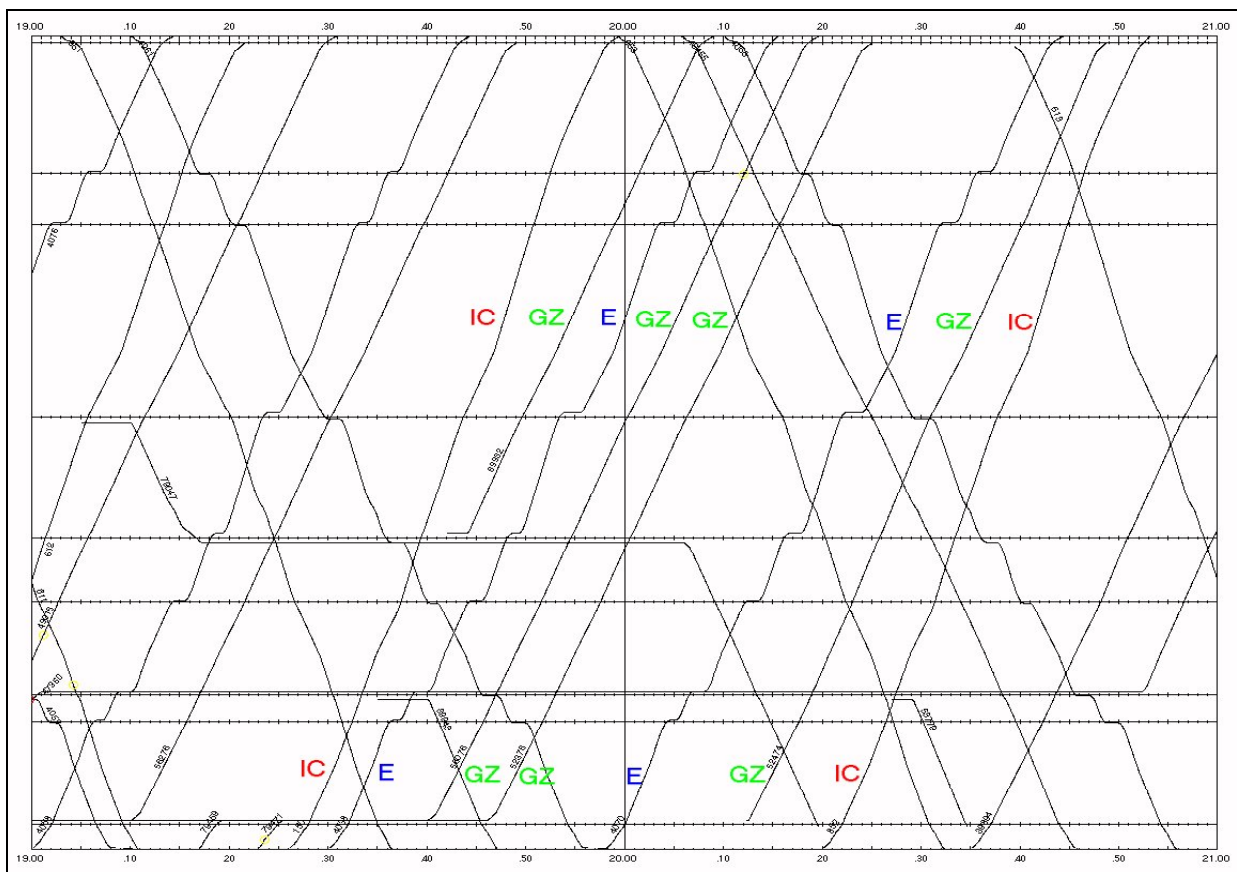


Abb. 1 Fahrplan mit Bündelung

Weiters erkennt man auch, daß, wenn die Zeitlücke zwischen IC und E groß genug geworden ist - über den Fahrweg betrachtet - , ein weiterer Güterzug von einer Zwischenstation aus starten kann ohne den nachfolgenden Eilzug zu behindern und den vorausfahrenden Intercity einzuholen. Nach dem zweiten durchgängigen Güterzug folgt eine Pause, die der Fahrplanstabilität gegenüber Verspätungen dient. Der nun folgende Eilzug erfüllt eine Zubringerfunktion zu dem nachfolgenden Intercity. Damit dieser Zug seine Zubringerfunktion auch im Verspätungsfall erfüllen kann, liegt zwischen diesen beiden Zügen noch eine Güterzugstrasse.

Interessant an diesem Zeitfenster (Abb.1) ist, daß es zu keinen planmäßigen Überholvorgängen an den Zwischenstationen kommt. Diese werden bewußt vermieden, da sie zu einer Verlängerung der Reisezeit des anhaltenden Zuges führen. Für Personenzüge stellen längere Aufenthalte als für den Fahrgastwechsel benötigt in Stationen eine Verschlechterung im Angebot dar und sollte daher soweit möglich vermieden werden. Bei geringen Zugzahlen und passenden Taktzeiten sollte dieser Grundsatz eingehalten werden. Bei höher belasteten Strecken als in diesem Beispiel werden sich Überholvorgänge zwischen langsamen und schnellen Personenzügen nicht immer vermeiden lassen. Auf einer vergleichsweise höher belasteten Strecke kann nur danach getrachtet werden, die Überholvorgänge in günstige Lagen bezüglich der Pendlerströme zu legen z.B.: zwischen zwei Ballungsräumen, wo noch wenige oder schon wieder wenige Personen im Anschluß- oder Zubringerzug reisen.

Über eine Fahrplanperiode hinweg betrachtet, sieht der Planer, daß der Fahrplan im tagtäglichen Betrieb nicht immer genau eingehalten werden kann. Aufgrund der tatsächlich gefahrenen Trassen können bei bestehenden Strecken Auswertungen über die Betriebsqualität getroffen werden. Diese Daten lassen sich heutzutage mit mehr oder weniger großem Aufwand aus der Rechnergestützten Zugsüberwachung ableiten. Geringfügige Verspätungen im Minutenbereich stellen dabei keine zusätzlichen Anforderungen an die Disposition, da ein Eingreifen i.A. länger dauert und daher von der Realität überholt wird. Bei Verspätungen von einzelnen Zugfahrten über 10 Minuten hingegen, lassen sich schon gewisse Maßnahmen zur Beschleunigung des verspäteten Zuges treffen. In Abbildung 2 sieht man die selbe Zugkonfiguration wie in Abbildung 1 nur diesmal ist der Intercity 15 Minuten verspätet.

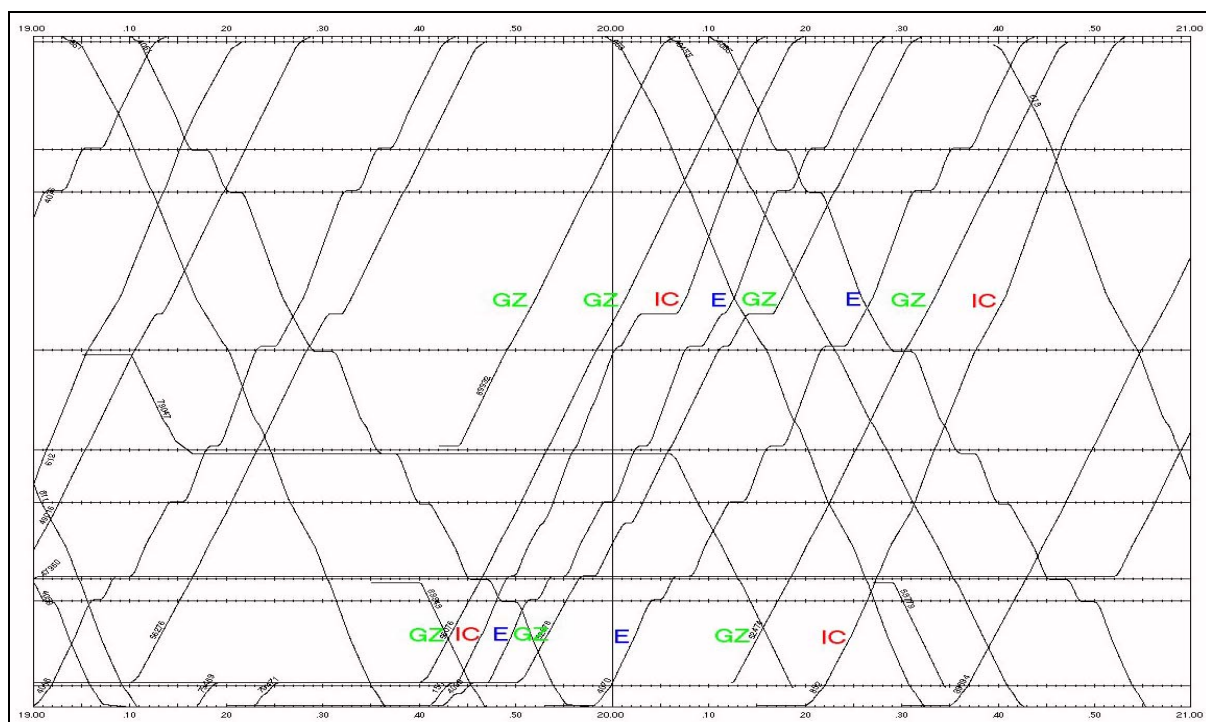


Abb. 2 Verspätungsfall ohne dispositive Maßnahmen

Überläßt man nun den Betrieb sich selbst und setzt keine dispositiven Maßnahmen, wird die durch den verspäteten Intercity ausgelöste Zugfolge beibehalten. Für die Verspätungssumme wirkt sich dies negativ aus, da die Züge ihre zulässigen Höchstgeschwindigkeiten nicht ausnützen können, um Verspätungen abzubauen. Es bedarf also einer Optimierung, um die Gesamtverspätung der beteiligten Züge auf dem betrachteten Abschnitt zu reduzieren. Dabei stellt sich natürlich gleich die Frage, nach welchen Gesichtspunkten eine solche Optimierung zu erfolgen hat. Geht man von den Erfahrungswerten aus, so ist feststellbar, daß Einzelverspätungen von Zügen in dieser Größenordnung nur an wenigen Tagen im Jahr auftreten werden. Gerade an diesen wenigen Tagen ist aber eine klare Dispositionsstrategie notwendig. Im konkreten Beispiel ist eine dispositive Entscheidung für den Anschluß-Eilzug fällig. Zu dieser Fragestellung erkennt man im Bildfahrplan der Abb.2, daß kurze Zeit später bereits der Zubringer-Eilzug fährt. Daher kann der zuständige Disponent den Anschluß-Eilzug pünktlich abfahren lassen, um eine bessere Auslastung und Verteilung der Zugstrassen zu erzielen (Abb.3).

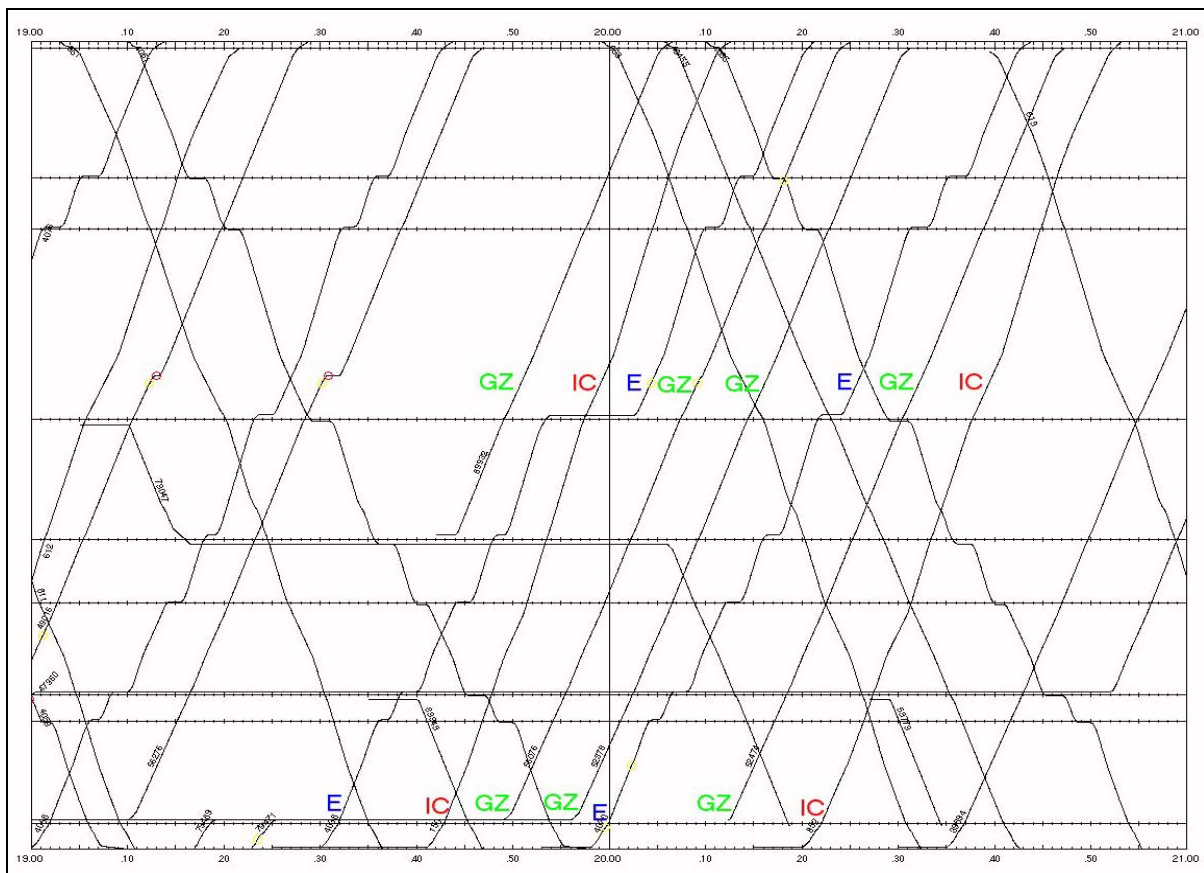


Abb.3 Optimiertes Verspätungsszenario

In dieser Abbildung ist erkennbar, daß der vorausfahrende Eilzug eine außerplanmäßige Verlängerung einer Aufenthaltszeit in einer Zwischenstation erfährt. Dies begünstigt zwar die verspätete Intercity-Fahrt, stellt aber für den Eilzug eine Angebotsverschlechterung dar. In diesem Zusammenhang zeigt sich, daß eine Bevorrangung eines Zuges (als Vertreter einer Zugsgattung) eine Benachteiligung eines anderen Zuges einer anderen Zugsgattung mit sich bringt. Der Zeitverlust des Eilzuges kann nun ein Ansatzpunkt für eine infrastrukturseitige Maßnahme sein. Die betriebliche Rechtfertigung dieser Bautätigkeit gestaltet sich schon etwas diffiziler, da diese Situation ja nicht zum Regelfall gehört, sondern nur in Ausnahmesituationen und selbst da nur unter bestimmten Randbedingungen nutzbar wird. Auf einer Bestandsstrecke liegt die Problematik anders, da meistens ein Überholgleis vorhanden sein wird. In historisch gewachsenen Bahnhöfen befinden sich viele Gleise, die heute im Planbetrieb oftmals keine Funktion mehr haben. So können dies etwa

Anschlußgleise, Rangiergleise oder Abstellgleise einer Firma oder einer Ladestelle sein, die unter dem Konkurrenzdruck zur Strasse nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können. Wenn nun diese Gleise sicherungstechnisch nutzbar sind, d.h. wenn sie durch Ausfahrtssignale geschützt sind und in die Stellwerkstechnik eingebunden sind, können sie im Verspätungsfall für Überholungen genutzt werden. Damit gelangt man zu dem Punkt, wo der Fahrdienstleiter entscheiden muß, welcher Zug auf welchem Gleis den Bahnhof passieren darf. Im Allgemeinen ist er in dieser Entscheidung auch nicht vollkommen frei, sondern hat sich nach Zwangspunkten zu orientieren. Für haltende Personenzüge ist ein solcher Zwangspunkt das Vorhandensein eines Bahnsteiges. Natürlich kann die Einfahrt des Zuges an manchen Tagen auch von der planmäßigen und veröffentlichten Bahnsteigkante abweichen. Dies setzt aber die Möglichkeit einer rechtzeitigen Information der Fahrgäste voraus, da diese den Bahnsteigswechsel in einer zumutbaren Zeit vollziehen müssen. Gerade im Bestand sind Bahnsteige nicht immer optimal angeordnet, so daß bestimmte Einfahrten von haltenden Personenzügen per se nicht sinnvoll sind. Diese Ausführungen können anhand der Abbildung 4 veranschaulicht werden.

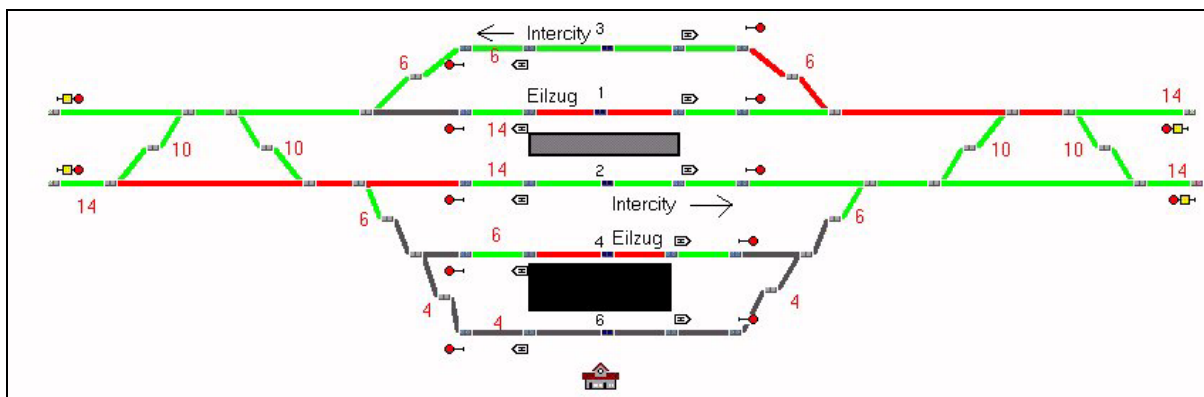


Abb. 4 Durchfahrtsmöglichkeiten in einem Bahnhof

In roter Schrift sind die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten angegeben. Dieses Beispiel zeigt einen typischen Bestandsbahnhof an einer zweigleisigen Strecke. Die Farben der Kanten sind der Stellwerkspulsausleuchtung nachvollzogen und dienen nur der Übersichtlichkeit der Darstellung. Die grünen Kanten bedeuten eine Reservation durch einen Zug und die roten eine physische Belegung durch die Triebfahrzeuge und Waggonen. Die Überleitstellen seien vor und nach dem eigentlichen Bahnhofsbereich angeordnet und mit 100 km/h zu befahren. Die Überholgleise 3 und 4 seien mit 60 km/h und Gleis 6 nur mit 40 km/h trassiert. Diese Wahl der Trassierungselemente kann einer wirtschaftlichen Untersuchung entstammen, die eine Optimierung der Kosten für die Weichen und den Nutzen für den Betrieb zum Ziel hatte. In der Fahrtrichtung von rechts nach links müssen haltende Personenzüge das Gleis 1 benutzen, da nur dieses über einen Bahnsteig verfügt. Die Benutzung der Gleise, die planmäßig in der Gegenrichtung befahren werden, soll nicht näher verfolgt werden, da es nur in sehr wenigen Fällen zu erwarten ist, daß die benötigten Abschnitte so lange frei sind, daß eine konfliktfreie Benutzung ermöglicht wird. Der haltende Eilzug auf Gleis 1 bewirkt daher, daß ein überholender Intercity das Gleis 3 benutzen muß. Diese Durchfahrt ist aber insofern als problematisch anzusehen, da die Durchfahrt mit maximal 60 km/h erfolgen kann gegenüber den 140 km/h auf dem Hauptgleis. Die Reduktion der Geschwindigkeit des Intercitys hat bei Ankündigung des Fahrbegriffes am zugehörigen Vorsignal zum Einfahrtsignal zu erfolgen. Die Beschleunigung auf die zulässige Geschwindigkeit im Hauptgleis kann nach Überfahrt des letzten Wagens der Weiche erfolgen. Je nach Länge zwischen Vorsignal und Ausfahrtsweiche kann der Zeitverlust einige Minuten betragen. Eine Verbesserung der Situation wäre durch den Bau eines Bahnsteiges für Gleis 3 zu erreichen oder – etwas kostenintensiver – durch den Einbau schlanker Weichen für die Anbindung von Gleis 3. Günstigere Verhältnisse für eine Überholung zeigen sich im Fall der

Fahrtrichtung von links nach rechts. Ein haltender Personenzug kann auf die Überholgleise 4 und 6 ausweichen und damit dem Intercity die Durchfahrt auf dem Hauptgleis (Gleis 2) ermöglichen. Die Zugfolgezeit zwischen dem Eilzug und dem Intercity kann durch Teilauflösung der Fahrstrassen (Achszählkontakte unmittelbar nach Weichen) sowie durch die Trassierung der Weichenköpfe verkürzt werden. Für den auf Gleis 4 haltenden Eilzug ergibt sich eine Verlängerung gegenüber seiner Mindesthaltezeit, die durch den Fahrgastwechsel und die Abfertigung des Zuges definiert sei, wegen der Überholung durch den Intercity. Auch auf Neubaustrecken, wo prinzipiell ein höheres zulässiges Geschwindigkeitsniveau anzutreffen ist, sind Zugsüberholungen von Personenzügen an Zwischenstationen als nachteilig für das Angebot zu bewerten. Bei Güterzügen hingegen dienen solche Betriebsaufenthalte mehr der Stabilität der Fahrplantrasse, da durch solche Aufenthalte Verspätungen besser abgebaut oder zumindest konstant und nicht zusätzlich aufgebaut werden. Maßgeblich für die betrieblichen Auswirkungen von Infrastruktur und Fahrplan ist die sogenannte Geschwindigkeitsschere, also die Differenz zwischen schnellstem und langsamstem Zug. Gerade beim Hochgeschwindigkeitsverkehr führt dies zu nicht nutzbaren Trassenfenstern. Eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten ist als Extremfall im schienengebundenen ÖPNV einer Stadtschnellbahn oder einer U-Bahn zu finden, wo nur Fahrzeuge desselben Typs mit selber Z-v-Charakteristik verkehren. Dies liefert bei Betrachtung der Sperrzeitentreppe auch folgende Abbildung 5.

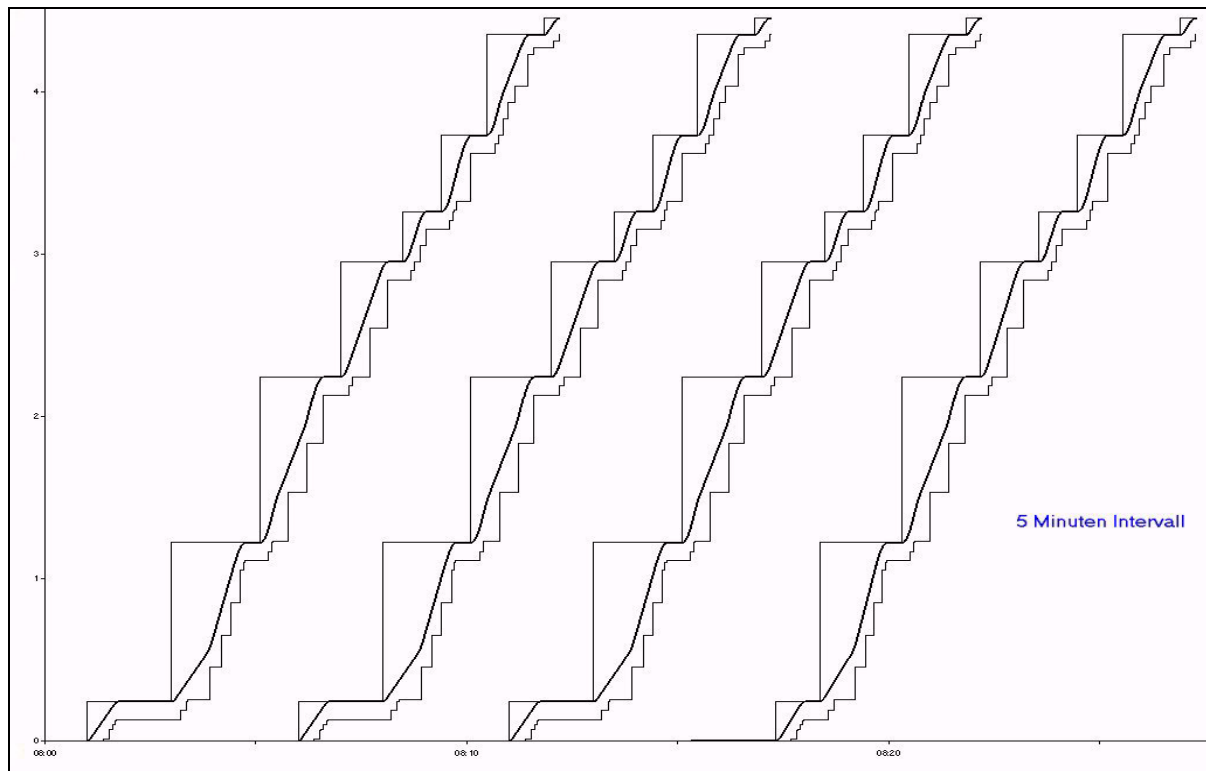


Abb.5 Sperrzeitentreppe bei einer U- bzw. S- Bahn

Bei der Vollbahn wird sich ein solcher Bildfahrplan mit Sperrzeitentreppe nicht wiederfinden sowohl im Hinblick auf die Regelmäßigkeit als auch auf die freien Abschnitte zwischen den Fahrplantrassen. In dieser Abbildung wurde eine Teilauflösung der Fahrstrassen angenommen. Die Reservation erfolgt von Hauptsignal zu Hauptsignal (erste Linie der Treppe), die Auflösung nach den stellwerkstechnisch erfaßten Punkten an der Strecke (zweite Linie der Treppe). Innerhalb dieser beiden Begrenzungen liegt die gefahrene Zeit-Weg-Kurve der Zugspitze.

Für die komplexe Fragestellung der Trassenvergabe wurden bereits einige Vorstellungen hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und der Diskriminierungsfreiheit überprüft. Bekannte Ansätze hiezu sind etwa die Berücksichtigung entsprechend der zeitlichen Reihenfolge der Anmeldung. Problematisch bei vielen Ansätzen ist, daß sie nicht diskriminierungsfrei sind [5]. Kuhn wählt daher als Lösungsverfahren den Out-of-Kilteralgorithmus, da er das Trassenvergabeproblem als Flußproblem in einem Netzwerk auffaßt. In einem Anwendungsbeispiel kann er damit zusätzliche Züge einplanen und freie Kapazitäten ermitteln. Ein bisher erkennbarer Mangel dieser Software ist, daß die Infrastrukturdaten noch nicht abgebildet sind und daher nicht überprüft werden kann, ob ein freies Bahnhofsgleis überhaupt zur Verfügung steht. Dem Verfasser dieses Beitrages ist jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht bekannt, ob diese für eine ganzheitliche Betrachtung wertvollen Daten in einer aktuelleren Version der Software bereits berücksichtigt werden können.

5. Ausblick

Die Begriffswelt zur Beschreibung betrieblicher Situationen ist sehr vielfältig. Jede Bahnverwaltung hat ihr eigenes, historisch gewachsenes Vokabular, um den Betrieb zu beschreiben und zu regeln. Im vereinten Europa ist es ein Gebot der Stunde für die Kommunikation einheitliche Begriffe festzulegen, um damit allgemein bekannte betriebliche Abläufe zu normieren. So darf es nicht sein, daß europäische Regelwerke einfach nur ein mehr oder weniger widerspruchsfreies Konglomerat von nationalen Bestimmungen sind. Die in diesem Beitrag aufgezeigten Fragestellungen aus der Simulation und dem tagtäglichen Betriebsgeschehen sollen grundsätzliche Abhängigkeiten zwischen Infrastruktur und Fahrplan erneut verdeutlichen, um bei der Fülle von Einzelvorschriften und Gesetzesmaterialien nicht den Blick auf die systemimmanenten Eigenschaften des Systems Eisenbahn zu verlieren. Erst mit diesem Systemverständnis lassen sich die zukünftigen Anforderungen an den Infrastrukturhersteller und der Angebotsbesteller ganzheitlich darstellen. Mit den am Markt befindlichen Softwarepaketen und den graphentheoretischen Grundlagen stehen jetzt schon Werkzeuge zur Verfügung, die der Visualisierung und dem Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Infrastruktur und Fahrplan dienen.

6. Referenzen

- [1] G. Decknatel, E. Schnieder: Modellbildung und Simulationssysteme für den Schienenverkehr, ETR 47 (1998) 8-9, 535
- [2] A. Haslinger: Einsatz der Simulationstechnologie bei den ÖBB, VDI (1995) 1219, 475
- [3] H. Dannenberg, V. Klahn, W. Kretschmer, L. Kos: Anwendung von Simulationsmodellen für Planungs- und Steuerungsprobleme im Eisenbahnbetrieb, Signal und Draht 85 (1993) 5, 166
- [4] D. Hürlimann: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen, Zürich 2001, Diss ETH Nr. 14281
- [5] C. Kuhn: Rechnergestützte Vergabe von Fahrplantrassen bei Eisenbahnen, Hannover 1996, Wissenschaftliche Arbeiten Nr. 47, 39