

Kundenfreundliche und robuste Ersatzfahrpläne während Bau- und Unterhaltsintervallen

An der ZHAW wurde ein Verfahren entwickelt, um in kürzester Zeit Ersatzfahrpläne für Bau- und Unterhaltsintervalle zu erstellen – ein für den stabilen Bahnbetrieb zunehmend wichtiges Thema. Die Methode berücksichtigt nicht nur betriebliche Aspekte wie die temporären Einschränkungen der Bahnanlage, sondern stellt gleichzeitig auch den Kundennutzen ins Zentrum der Planung. Dadurch kann das beste Transportangebot in Bezug auf Reisezeiten und Zuverlässigkeit realisiert werden.

1. HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE PLANUNG VON ERSATZFAHRPLÄNEN WÄHREND BAU- UND UNTERHALTSZEITEN

Baustellen führen regelmässig zu grösseren Fahrplanabweichungen. Diese sind umso gravierender, je umfangreicher das Bauvorhaben ist. In der Vergangenheit wurden für derartige Unterhaltsarbeiten vorwiegend Nachtstunden verwendet. Allerdings verursachen Umbaumassnahmen während kurzen verkehrssarmen Zeitfenstern in der Nacht hohe Kosten und erstrecken sich oft über längere Zeiträume. Um dies zu vermeiden, werden diese Arbeiten vermehrt auch während des Tages ausgeführt. Auf den betroffenen Gleisabschnitten

führt das häufig zu betrieblichen Einschränkungen, wie z. B. Langsam-Fahrstellen.

1.1. KAUM EIN BAUINTERVALL OHNE BEINTRÄCHTIGUNG FÜR DEN KUNDEN

Während der Dauer solcher Bau- und Unterhaltsmassnahmen kommt es daher oft zu unliebsamen Fahrplanänderungen. Streckenunterbrüche und Ersatzangebote wie der Einsatz von Bussen sind keine Seltenheit. Dieser Planungsvorgang wird auch Intervallplanung (wegen des Zeitintervalls für die Baumassnahmen) genannt. Bei den zunehmenden Instandhaltungs- und Ausbaufgaben der Infrastrukturbetreiber stellt sich immer häufiger die Frage, wie das kundenfreundlichste Beförderungsangebot während solcher Bauintervalle für einen ge-

gebenen Korridor aussehen müsste, ohne zusätzliche Einbussen bei der Zuverlässigkeit und Stabilität des eingeschränkten Fahrplans in Kauf nehmen zu müssen.

1.2. MEHR KUNDENNUTZEN, WENIGER BETRIEBSAUFWAND

Natürlich wird bei der Intervallplanung versucht, möglichst viele Verbindungen so zu belassen, wie sie im Normalfahrplan vorgesehen sind. Hierfür werden bei der Entwicklung des Normalfahrplans Reserven für Fahr- und Haltezeiten eingeplant. Da diese

während des Bauintervalls aufgebraucht werden, führen betriebliche Schwankungen und kleine Störungen leicht zu Verspätungs-

fortpflanzungen, die über die betroffene Region und das Intervall der Bauarbeiten hinausreichen. Auch das beeinträchtigt letztendlich den Kundennutzen, da die Reisenden nicht nur an kurzen Reisezeiten, sondern auch an einem verlässlichen Fahrplanangebot interessiert sind. Solche Verspätungsfortpflanzungen haben ungeplante Betriebszustände zur Folge, welche in Form von ergänzendem Personal und kurzfristigen Massnahmen zusätzlichen Betriebsaufwand verursachen. Daher muss bei der Intervallplanung neben dem Kundennutzen auch die betriebliche Stabilität berücksichtigt werden.

In Abstimmung mit der SBB Infrastruktur hat sich das Institut für Datenanalyse und Prozessdesign der ZHAW die Aufgabe gestellt, eine Methode zu entwickeln, mit der



Dr. Raimond Wüst

Dozent, Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP), ZHAW (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften), Winterthur

wura@zhaw.ch



Albert Steiner

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP), ZHAW (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften), Winterthur

sine@zhaw.ch



Claudio Gomez

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP), ZHAW (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften), Winterthur

gome@zhaw.ch

temporäre Ersatzfahrpläne in Bezug auf Kundennutzen und betriebliche Stabilität beurteilt werden können.

2. PLANUNGSEBENEN

Im Verlauf der Planung des Zugbetriebs tauchen verschiedene Anforderungen auf. Wie eingangs beschrieben, möchte der Planer einerseits rasch verschiedene Varianten von Abfahrzeiten einzelner Zugläufe, Fahrzeitreserven, Reihenfolgen von Ein- und Ausfahrten verschiedener Züge an einem Bahnhof, sowie Halte- und Umsteigezeiten in Bezug auf den Kundennutzen bewerten. Andererseits gilt es vor allem bei dichten Fahrplanszenarien, die Stabilität einer gewählten Konstellation gegenüber betrieblichen »

Schwankungen zu testen. Um diesen unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, werden verschiedene Instrumente eingesetzt. Für die Entwicklung eines Szenarios verwendet der Planer ein Planungstool, in dem für die einzelnen Zugläufe an jedem Halteort Ankunfts- und Abfahrtszeiten eingegeben werden. Diese Eingabe geschieht typischerweise in Form von Tabelleneinträgen, welche sich im Planungstool auch als grafisches Fahrplandiagramm darstellen lassen (vgl. schwarze Linien in Bild 3 b). Für den Stabilitätstest wird hingegen häufig ein Simulationstool wie z.B. OpenTrack verwendet, in dem alle betrieblich relevanten Details wie z.B. Streckenlängen, -steigungen und -radien sowie Zugeigenschaften und Signalfunktionen nachgebildet und ihr Zusammenspiel in einem Simulationsdurchlauf sekundengenau gemessen werden kann. Die Variabilität des praktischen Alltags kann dabei in wiederholten Durchläufen ebenfalls mitberücksichtigt und ausgewertet werden (siehe OpenTrack; Hürlimann, 2001). Die beiden unterschiedlichen Planungsinstrumente bauen auf verschiedenen Datenmodellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad auf (Planung: makroskopische Planungsebene, Simulation: mikroskopische Planungsebene. Vgl. auch Bešinović et al., 2016).

Makroskopische Planungsebene

Die Zeitpunkte der erwähnten zug- und halteortspezifischen Fahrplanereignisse lassen sich in einem Graphen als Knoten darstellen. Ein solcher Ereignisgraph ist in Bild 2 a) für das Fallbeispiel von Abschnitt 4 dargestellt. Die Verbindungen zwischen den Knoten repräsentieren einerseits für die Planung relevante Prozesszeiten und andererseits syntaktische Abhängigkeiten zwischen den zu planenden Ereignissen. So muss z.B. Ereignis von Knoten 1 nach Ereignis von Knoten 5 unter Berücksichtigung von mindestens der Dauer der durch den verbindenden Pfeil hinterlegten Haltezeit stattfinden. Ein Pfeil zwischen zwei Knoten repräsentiert eine minimale Prozesszeit (Fahrt, Halt, Umstiegsprozess, Zugfolge und Zugwende). Für die Ereignisknoten 1 bis 8 sind in kursiver Schrift oben bzw. unten die Ereigniszeiten (Ankunft und Abfahrt) gemäss Fahrplan angegeben. Jede einzelne der dargestellten Abhängigkeiten kann in Form von algebraischen Gleichungen und Ungleichungen formuliert und quantitativ ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 3.2.). Mit Hilfe solcher Gleichungen lassen sich Fahrplansenarien nicht nur bewerten (vgl. z.B. Baccelli et al., 1993; Goverde 2007), sondern auch automatisch erzeugen (vgl. z.B. Caimi et al., 2011; Herrigel, 2015).

Mikroskopische Planungsebene

In der mikroskopischen Darstellung des Si-

mulationsinstruments OpenTrack sind alle einzelnen Prozesszustände des Betriebsablaufs erkennbar. Solch einen Prozesszustand der Simulation zeigt z.B. das Bild 2 b). Der Zuglauf 10 der Linie L1 befindet sich hier gerade auf dem Abschnitt von Stop A nach Stop AT, was durch die rot gefärbte Gleiskante angezeigt wird. Die Einfahrt in Stop AT ist bereits für Zuglauf 10 reserviert (grün markiert). Die zeitliche Dauer aller Ereignisse sowie deren gegenseitige Beeinflussung werden während der Simulation im Detail berechnet und aufgezeichnet. So lässt sich jede Planungssituation im Nachhinein detailliert analysieren.

3. LEISTUNGSMASSE

3.1. LEISTUNGSINDIKATOR DES KUNDEN-NUTZENS: SERVICE INTENTION INDEX

Um die Kundenfreundlichkeit eines Ersatzfahrplans zu messen, wurde ein Index eingeführt, der sich auf die Gesamtreisezeit (GRz) des Mobilitätsangebots, welches durch ein Fahrplansenario abgebildet wird, bezieht (vgl. auch Toletti und Weidmann, 2016). Hierbei werden für ein gegebenes Szenario zunächst einmal die Reisezeiten aller Verbindungen von jedem Halteort i zu jedem anderen Halteort j aufaddiert. Die zu berücksichtigenden Punkt-zu-Punkt-Beziehungen ergeben sich teilweise durch Direktverbindungen oder über Umsteigebeziehungen unter Berücksichtigung von zwei oder mehr Zugläufen. Jede Punkt-zu-Punkt-Verbindung stellt so ein beabsichtigtes Transportangebot (engl. 'service intention', vgl. z.B. Caimi et al., 2011 und Wüst et al., 2008) dar. Für das normale Fahrplanangebot ergibt sich so die Grösse GRz (Normalplan) = $\sum_{ij} Rz$ (Normalplan)_{ij}. Berechnet man nun für ein reduziertes Fahrplanangebot während eines Bauintervalls, bei dem längere Reisezeiten durch z.B. langsamere Verbindungen oder gebrochene Umsteigebeziehungen entstehen ebenfalls die Grösse GRz (Ersatzplan) = $\sum_{ij} Rz$ (Ersatzplan)_{ij}, so erhält man den gesuchten Index ('Service Intention Index', kurz SII) indem man den Quotienten der beiden Zahlen bildet:

$$SII = \frac{GRz \text{ (Normalplan)}}{GRz \text{ (Ersatzplan)}}$$

Da GRz (Ersatzplan) immer grösser als die Referenzgrösse GRz (Normalplan) ist, ergibt sich für den SII eine Zahl zwischen 0 und 1. Je näher sie sich der SII bei eins befindet, desto geringer ist die Beeinträchtigung des Kundennutzens. Anhand dieser Kennzahl lassen sich nun verschiedene Varianten für den Ersatzfahrplan in Bezug auf die Gesamtreisezeit miteinander vergleichen.

3.2. LEISTUNGSINDIKATOREN DER FAHRPLANSTABILITÄT

Zur mathematischen Beschreibung von zeitgesteuerten Discrete Event Systemen (DES), zu denen auch Bahnsysteme zählen, hat sich auf makroskopischer Ebene in den letzten Jahren die so genannte Max-Plus-Algebra (MPA) etabliert. Ausgezeichnete Einführungen bieten z.B. Goverde, 2005 oder Hansen und Pachtl, 2014. Mit diesem Framework lässt sich die Klasse von periodischen Systemen als zeitgesteuerter, gerichteter Graph formell elegant beschreiben und es bietet gleichzeitig Methoden zur Systemanalyse und zur Berechnung von Leistungsindikatoren. In diesem Abschnitt sollen zwei wichtige Begriffe erläutert werden: kritischer Zyklus und Stabilitätsreserve.

Kritischer Zyklus

In einem System mit einem periodischen Fahrplan (Taktfahrplan) wiederholen sich die Abfahrts- und Ankunftsereignisse regelmässig in jeder Periode (typischerweise eine Stunde). Zusätzlich sind zwischen diesen Ereignissen die Prozesszeiten gemäss Planung definiert. Dabei werden vier Typen unterschieden (siehe auch Bild 2 a): Linienverbindung, Haltezeiten, Umsteigezeiten und Zugfolgezeiten. Aufgrund der Periodizität des Systems existiert mindestens ein Zyklus zwischen Ereignissen, wobei ein Zyklus innerhalb eines Graphen als ein Pfad über ≥ 0 andere Ereignisse zurück zum Ausgangsereignis definiert ist. Der kritische Zyklus ist nun derjenige Zyklus, welcher die maximale mittlere Dauer aufweist, oder mathematisch ausgedrückt, den grössten Eigenwert des Systems ergibt (siehe Goverde, 2010). Die maximale Zykluszeit λ wird wie folgt berechnet:

$$\lambda = \max_{\xi \in C} \frac{w(\xi)}{\mu(\xi)}$$

Dabei stellt C die Menge aller möglichen Zyklen im System dar, ξ steht für einen dieser Zyklen, $w(\xi) = \sum_{(j,i) \in \xi} a_{ij}$ repräsentiert die Summe der Prozesszeiten a_{ij} (zwischen Ereignis j und i) entlang des Zyklus' und $\mu(\xi) = \sum_{(j,i) \in \xi} \mu_{ij}$ stellt die Summe der Periodensprünge entlang des Zyklus' dar.

Auslastung und Stabilitätsreserve

Ein betrachtetes Bahnsystem ist in einem stabilen Zustand, wenn jeder mögliche Zyklus des Systems eine positive Zeitreserve hat. Um dies zu prüfen wird nun der oben ermittelte maximale Eigenwert mit der Periodendauer T des Systems verglichen. Die Stabilitätsreserve ist dabei definiert als $\Delta = T - \lambda$. Für einen stabilen Betrieb muss immer $\Delta > 0$ gewährleistet sein.

Es können nun die folgenden drei Fälle unterschieden werden:

- $\lambda < T$: Die Reserve ist positiv und das System ist stabil.
- $\lambda = T$: Es existiert keine Zeitreserve und das System ist in kritischem Zustand. Bereits im Falle von kleinsten Störungen wird das System instabil.
- $\lambda > T$: Die Reserve ist negativ und das System ist instabil.

Im Fallbeispiel, welches in Kapitel 4 erläutert wird, werden für mehrere Szenarien die maximalen Zykluszeiten, die kritischen Pfade und der Systemzustand anschaulich dargestellt. Für weitergehende Analysen und Darstellungen sei wiederum auf Goverde, 2005 oder Hansen und Pacht, 2014 verwiesen.

4. SZENARIENBEWERTUNG ANHAND EINES FALLBEISPIELS

Die vorgestellten Bewertungsmethoden sollen mit Hilfe eines einfachen Fallbeispiels erläutert werden. In diesem Fallbeispiel werden 5 Standorte mit 3 Linien bedient (siehe Netzgrafik in Bild 1). Die Linie L1 verbindet die Halteorte Stop A und Stop AT mit dem Knotenbahnhof Station A, Linie L3 verbindet den Halteort Stop B mit dem Knotenbahnhof Station B und die Fernverkehrslinie L2 verbindet die zwei Knotenbahnhöfe Station A und Station B miteinander. Ankunfts- und Abfahrzeiten gemäss Fahrplan an den Bedienstationen sowie bei den beiden Weichennestern (Junction A und B, Angabe der Zeiten für Betriebszwecke) sind ebenfalls eingezeichnet.

4.1. DARSTELLUNG DER PLANUNGSEBENEN

Makroskopische Planungsebene

Für unser anschauliches Beispielszenario lassen sich die makroskopischen Zusammenhänge zwischen den Fahrplanereignissen der drei Zuglinien als Netzwerkgraph darstellen (siehe Bild 2a) sowie auch Goverde, 2010.

Für unser Fallbeispiel beschränkt sich die Darstellung im Wesentlichen auf die Angaben der zwei Knotenbahnhöfe (Stationen A und B) und der drei Linien. Die planungsrelevanten Nebenbedingungen für das Fallbeispiel beschränken sich auf Station A und B. Die Zeiten für die Umläufe der Linien 1 und 3 sind in jeweils einem Pfeil zusammengefasst.

Mikroskopische Ebene

Die mikroskopische Planungsebene enthält die detailliertesten Modellinformationen. Sie berücksichtigt alle bahntechnisch relevanten Komponenten der Infrastruktur und wird in dieser Form in OpenTrack zur Simulation des Bahnverkehrs genutzt. Bild 2b zeigt die

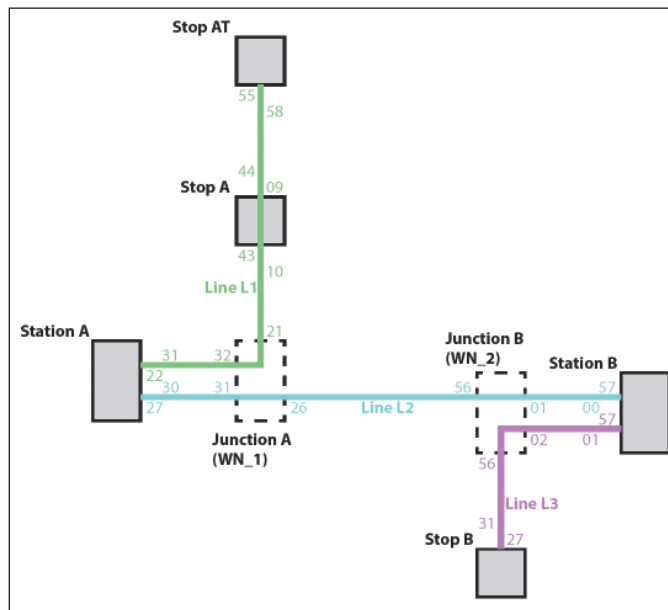


BILD 1: Das Liniennetz und dessen Fahrplan sind für das Fallbeispiel als Netzgrafik dargestellt, wobei auch die geplanten Durchfahrtszeiten an den Betriebspunkten (Weichennest, Junction) zu sehen sind

Gleisbenutzung durch die einzelnen Zugfahrten der Linien L1 (grün), L2 (blau) und L3 (violett). Zu erkennen ist hier ebenfalls, dass die Linien L1 und L2 im Betriebspunkt Junction A (vor Station A) und die Linien L2

und L3 im Betriebspunkt Junction B (vor Station B) ein Gleis gemeinsam befahren. Dies hat in der makroskopischen Darstellung von Bild 2a zur Folge, dass die Abfahrt der Linie L2 (Knoten 2) eine Minute vor derjeni- »

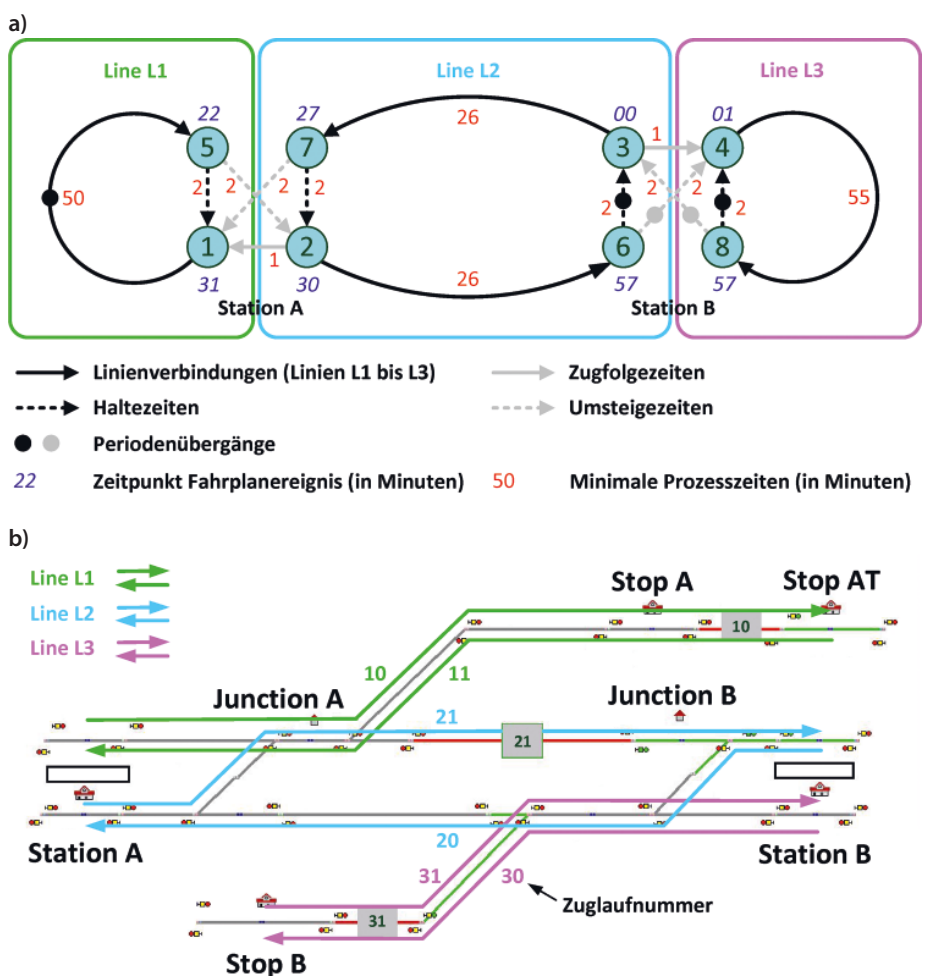


BILD 2: Einfaches Netzwerk des Fallbeispiels mit zwei Bahnhöfen und drei Linien. a) Darstellung auf makroskopischer Ebene. b) Darstellung auf mikroskopischer Ebene mit den drei Linien L1 bis L3 und den zugehörigen zweistelligen Zuglaufnummern. Im Hintergrund ist das Netzwerk gemäss Implementierung in OpenTrack sichtbar

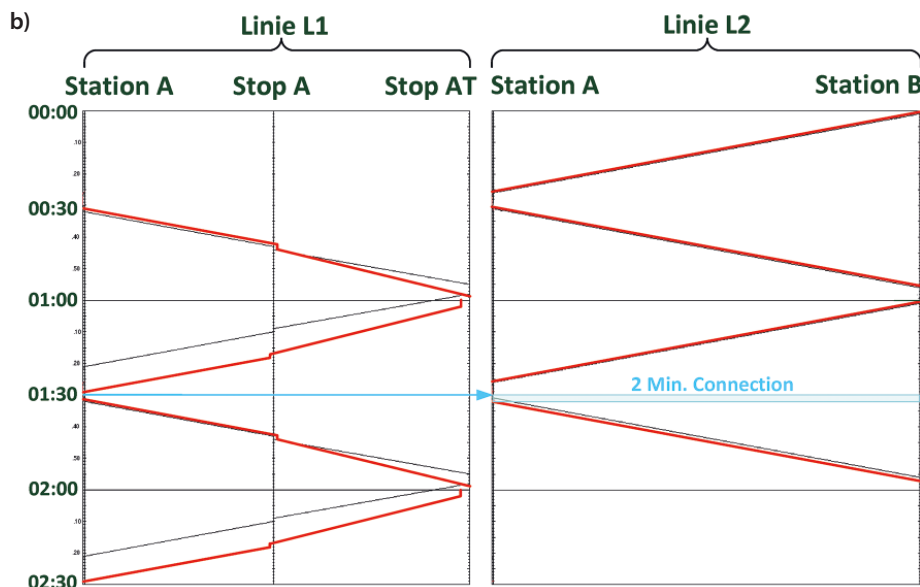
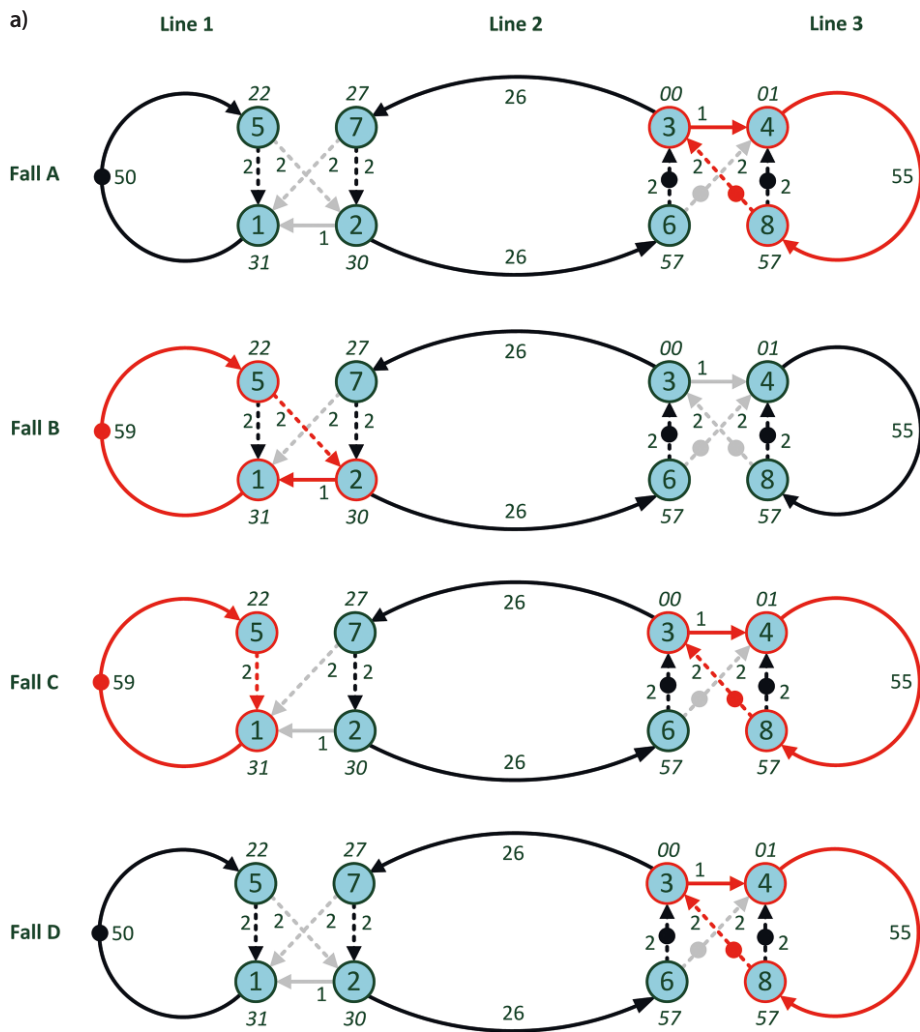


BILD 3: a) Darstellung der verschiedenen Fälle anhand der entsprechenden kritischen Zyklen (in Rot) auf der makroskopischen Planungsebene. Detaillierte Erläuterungen zu den vier Fällen finden sich im Text.
 b) Darstellung von Fall B für die Linien 1 und 2 im Zeit-Weg-Diagramm. Zeitverlauf gemäss Normalfahrplan (schwarze Linien) und Simulation (rote Linien)

gen der Linie L1 (Knoten 1) stattfinden muss. Die beiden Ereignisknoten sind über eine Kante für die Zugfolgezeit von einer Minute miteinander verbunden. Die entsprechende

Abhängigkeit ist für die Linien L2 und L3 in Station B zwischen den Ereignisknoten 3 und 4 abgebildet.

4.2. SZENARIENBEWERTUNG MIT HILFE DER LEISTUNGSINDIKATOREN

Den Ablauf für das Auffinden einer geeigneten Variante für den Ersatzfahrplan mit Hilfe der Leistungsindikatoren möchten wir anhand der folgenden vier Fälle des Beispielszenarios demonstrieren (siehe Bild 3 a) für eine Darstellung auf makroskopischer Ebene):

- Fall A: Referenzfahrplan.
- Fall B: Referenzfahrplan mit den durch die Baumassnahmen gegebenen betrieblichen Einschränkungen.
- Fall C: Bedienung aller Stationen, aber Aufhebung des Anschlusses von Linie L1 auf Linie L2.
- Fall D: Kürzung des Umlaufs der Linie L1 durch Aufheben der Bedienung von Stop AT.

Normalfahrplan und die Auswirkungen der Baumassnahmen

Im Fall A von Bild 3 a ist die normale Situation im Fahrplan dargestellt. Der kritische Zyklus besteht aus dem Abfahrtsereignis des Zuglaufs 22 der Linie 2 und dessen Abhängigkeit vom Umlauf der Linie 3 und dem abzuwartenden Anschluss für die Reisenden des Zuglaufs 31. Die Abfahrt des Zuglaufs 30 muss die Freigabe des Ausfahrgleises aus der Station A durch die Abfahrt des Zuglaufs 20 abwarten. So ergibt sich ein kritischer Zyklus mit einer Gesamtdauer von 58 Minuten (rot markiert). In der Tabelle von Bild 4 sind die betrieblichen Leistungsmerkmale zusammen mit dem SII für die verschiedenen Fälle angegeben. Unter der Annahme, dass die mittleren Prozesszeiten im kritischen Zyklus insgesamt nicht mehr als 2 Minuten von der Zykluszeit abweichen, kann der Fall A wie folgt beurteilt werden: Planungsfall A ist als Referenzszenario betrieblich stabil und hat per Definition einen SII von 1. Fall B stellt die Situation des Planungsfalls A unter den betrieblichen Bedingungen der Baumassnahmen im Abschnitt Stop A-Stop AT dar. Diese haben zur Folge, dass sich der kritische Zyklus mit einer Gesamtdauer von 62 Minuten nun auf den Umlauf der Linie 1 verschiebt. Die verlängerte Umlaufzeit der Linie 1 hat wiederum zur Folge, dass sich auch die Abfahrt der Linie 2 in Station A verzögert (siehe Bild 3 b). Bild 4 entnimmt man, dass man mit einem SII von 0.83 auch unter diesen Bedingungen im Hinblick auf die Fahrzeit noch einen relativ hohen Kundennutzen erzielt. Da die zeitliche Ausdehnung des kritischen Zyklus jedoch die Periodenlänge überschreitet, ist der Normalfahrplan nun nicht mehr stabil. Dies hat zur Folge, dass es zu einer Verspätungsfortpflanzung in die folgende Fahrplanperiode kommt. Da die Stabilitätsreserve nur 2 Minuten beträgt, wäre der Plan selbst unter der Annahme,

dass in der Folgeperiode wieder normale Betriebsbedingungen herrschten, auch bei einer Betrachtung von 2 Periodenlängen kritisch. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Reduktion des Angebots unausweichlich ist. Hierfür werden 2 Varianten erarbeitet, die gemäss Bild 4 in Form der Fälle C und D einander gegenüber gestellt werden.

Ersatzfahrplan Variante 1

Fall C zeigt die Ersatzplanvariante 1, in der der Umlauf der Linie 1 wie geplant stattfindet, ein Anschluss auf die Linie 2 in Station A jedoch aufgehoben wird. Die Aufhebung dieses Anschlusses hat zur Folge, dass sich der Ereignisgraph in zwei nicht streng zusammenhängende Teilgraphen aufteilen lässt. Für jeden dieser Teilgraphen erhält man einen kritischen Zyklus. Der erste hat eine Dauer von 61 Minuten und beinhaltet nur die Umlaufzeit der Linie 1, der zweite hat eine Dauer von 58 Minuten und beinhaltet den kritischen Pfad des Normalfahrplans unter Einbezug der Linien L2 und L3.

Ersatzfahrplan Variante 2

Fall D zeigt die Ersatzplanvariante 2. In dieser Variante bleibt der Anschluss auf die Linie 2 in Station A erhalten. Dies geht jedoch zu Lasten einer Bedienung von Halteort Stop AT, da die Linie 1 vorzeitig in Stop A gewendet wird. Da der Anschluss der Linie L1 auf die Linie L2 in Station A erhalten bleibt, bleibt der Graph streng zusammenhängend, was durch den Betrag von 58 Minuten des ursprünglichen kritischen Zyklus des Normalfahrplans zum Ausdruck kommt. Bei dieser Variante bleibt also in Bezug auf die Stabilität der Referenzwert erhalten.

Wahl des Ersatzfahrplans mit Hilfe der Leistungsindikatoren

Vergleicht man die Leistungsmasse der beiden Planungsvarianten für den Ersatzfahrplan miteinander (in Bild 4, Fall C und Fall D), so erkennt man, dass es sowohl im Hinblick auf die Stabilität als auch im Hinblick auf den SII sinnvoller ist, die Linie 1 in Station Stop A vorzeitig zu wenden. Die Folge ist, dass sich die Reisezeit der Reisenden von und nach Halteort Stop AT um eine Fahrplanperiode verlängert. Die Reisezeiten aller übrigen Reisenden bleiben hingegen unbeeinträchtigt. Hinzu kommt, dass die Betriebsstabilität dieser Planungsvariante gleich hoch ist wie die des Normalplans. Unter Berücksichtigung der vorgestellten Leistungsindikatoren und der Annahmen für unser Fallbeispiel wäre also die zweite Variante (Fall D) zu bevorzugen.

5. FAZIT/SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die zunehmenden Instandhaltungs- und Ausbauforderungen stellen Bahn-Infrastrukturbetrei-

Fall	Bewertung aus betrieblicher Sicht			Bewertung aus Kundensicht	
	Eigenwerte der kritischen Zyklen		Stabilität	Pufferzeit	Service Intention Index
	λ_1	λ_2			
A	58 Min.	–	stabil	+ 2 Min.	1,00
B	62 Min.	–	instabil	– 2 Min	0,83
C	61 Min.	58 Min.	instabil	– 1 Min.	0,60
D	58 Min.	–	stabil	+ 2 Min	0,69

BILD 4: Vergleich der verschiedenen Varianten mit Hilfe der Leistungsindikatoren. Die Werte in den Spalten λ_1 und λ_2 repräsentieren die Dauer der kritischen Zyklen. Die Stabilität ergibt sich aus der Pufferzeit bzw. dem Kriterium für die Stabilitätsreserve Δ (vgl. Abschnitt 3.2). Der Service Intention Index (SII) ist das Mass des Kundennutzens in Bezug auf die Gesamtreisezeit (vgl. Abschnitt 3.1)

ber immer häufiger vor die Herausforderung, kundenfreundliche und robuste Ersatzangebote während Zeitintervallen für Baumassnahmen zu planen. Zu dieser Planungsaufgabe gehört die rasche und zuverlässige Beurteilung von Planungsvarianten. In einer Zusammenarbeit zwischen SBB und ZHAW konnte ein Verfahren für die automatische Berechnung von Leistungskennzahlen entwickelt werden, mit dessen Hilfe verschiedene Planungsvarianten miteinander verglichen werden können. Mit den vorgestellten Kennzahlen lassen sich sowohl die Betriebsstabilität als auch der Kundennutzen in Bezug auf die Reisezeit beurteilen. Die im Fallbeispiel in Form des SII zugrunde gelegte Gesamtreisezeit aller betroffenen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen gewichtet alle Zugfahrten gleich stark. Sofern dem Betreiber differenziertere Gewichtungparameter zur Verfügung stehen, lassen sich auch diese in die Berechnung einbeziehen. Aus Gründen der Verständlichkeit haben wir uns im Fallbeispiel auf die Betrachtung eines Zeithorizonts von einer Planungsstunde beschränkt. Bei länger andauernden Baumassnahmen kann das Verfahren auf den entsprechenden Bezugszeitraum ausgedehnt werden. Bei längeren Streckenunterbrüchen, wie im Fall D, kommt ein Ersatzangebot (z. B. Busersatzbetrieb) in Betracht.

Wir betrachten das Beurteilungskonzept als repräsentativ auch für andere Planungsaufgaben, insbesondere für ungeplante Störungssituationen, die während des alltäglichen Bahnbetriebs auftreten. Das Projektteam arbeitet auch auf dem Gebiet der Störungsdisposition gemeinsam an automatisierbaren Lösungsverfahren, die auf dem vorgestellten Beurteilungskonzept aufbauen. Hierbei spielt das Modell der makroskopischen Planungsebene eine zentrale Rolle. ◀

Literatur

- Baccelli, F.L., Cohen, G., Olsder, G.J., Quadrat, J.P. (1993). Synchronization and Linearity: An Algebra for Discrete Event Systems. Wiley, Chichester.
- Bešinović, N., Goverde, R.M.P., Quaglietta, E., Roberti, R. (2016). An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 87, pp. 14-32.

- Caimi, G., Laumanns, M., Schüpbach, K., Wörner, S., Fuchsberger, M. (2011). The Periodic Service Intention as a Conceptual Frame for Generating Timetables with Partial Periodicity. Transportation Planning and Technology, vol. 34, issue 4, pp. 323-339.
- Goverde, R.M.P. (2005). Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis. TRAIL Thesis Series no. T2005/10. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Goverde, R.M.P. (2007). Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. Transportation Research Part B, vol. 41, no. 2, pp. 179–201.
- Goverde, R.M.P. (2010). A Delay Propagation Algorithm for Large-Scale Railway Traffic Networks. Transportation Research Part C, vol. 8, no. 3, pp. 269–287.
- Hansen, I.A., Pachl, J. (eds.) (2014). Railway Timetabling & Operations: Analysis, Modelling, Optimisation, Simulation, Performance Evaluation. Eurail Press, Hamburg, Germany.
- Herrigel, S. (2015). Algorithmic decision support for the construction of periodic railway timetables, Diss. ETH Zürich Nr. 22548, Department Bau, Umwelt und Geomatik, ETH, Zürich.
- OpenTrack. (<http://www.opentrack.ch>). Letzter Zugriff: 13.08.2017.
- Hürlimann, D. (2001). Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnbereich, Dissertation ETH Zürich Nr. 14281.
- Toletti, A., Weidmann, U. (2016a). Modelling customer inconvenience in train rescheduling. Proceedings of the 16th Swiss Transport Research Conference (STRC), Ascona, 2016.
- Wüst, R., Laube, F., Roos, S., Caimi G. (2008). Sustainable global service intention as objective for controlling railway network operations in real time. Proceedings of the 8th World Congress of Railway Research (WCRR), Seoul, Korea.

► SUMMARY

Customer friendly and robust replacement schedules during construction and maintenance periods

More often, railway and infrastructure companies face the challenge of how to plan customer friendly and robust replacement offers during the increasing maintenance and expansion periods. Data models of different planning levels may suggest key performance indicators for the schedules. With the help of these indicators, various formats of replacement schedules in terms of customer benefit and operational stability can be compared. The practical use of these data models will be shown by an example.