

8 Zusammenfassung und Ausblick

Allgemeines

Aus wirtschaftlichen Gründen werden reine S-Bahnstrecken im Außenbereich der Ballungsräume häufig nur eingleisig gebaut, wobei die Zugkreuzungen in Begegnungsabschnitten erfolgen. Ein Nachteil eingleisiger Strecken ist die Verspätungsübertragung auf die Gegenrichtung. Daher ist es hier besonders wichtig, Infrastruktur, Fahrplangestaltung und Fahrzeugeinsatz sorgfältig aufeinander abzustimmen. Bestehen außerdem noch hohe Anforderungen an die Pünktlichkeit, so sind vor der Durchführung von größeren baulichen oder betrieblichen Maßnahmen Untersuchungen zur Betriebsqualität durchzuführen. Bei Strecken mit mehreren Begegnungsabschnitten ist dafür ein Planungsmodell auf der Basis von Betriebssimulationen erforderlich. Existierende Programme erfordern jedoch einen hohen Eingabeaufwand, ein Nachteil, der bei vielen durchzurechnenden Varianten noch schwerer wiegt. Daher ist es im täglichen Planungsgeschäft nicht möglich, jede Änderung, von der ein Einfluß auf die Betriebsqualität erwartet wird, mittels eines Computerprogramms zu simulieren. Dem Ingenieur fehlen zu Beginn der Planungen allgemeine Empfehlungen, mit denen der Untersuchungsrahmen abgesteckt und Varianten definiert werden können. Außerdem existiert kein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm, mit dessen Hilfe die Auswirkungen der vorgesehenen Maßnahmen abgeschätzt und schnell verschiedene Varianten durchgespielt werden können. Weiterhin wären betriebliche Daten hilfreich, beispielsweise Mittelwerte und Verteilungsfunktionen von Fahr- und Haltezeiten, die als Eingabewerte für existierende Eisenbahnsimulationsprogramme dienen oder als Vergleichsbasis für bereits vorhandene Daten herangezogen werden können.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, dem Ingenieur die oben beschriebenen Hilfsmittel bzw. Informationen zur Verfügung zu stellen. Dafür war im Rahmen dieser Arbeit eine mehrstufige Vorgehensweise vorgesehen:

- Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen.
- Ermittlung von betrieblichen Informationen.
- Entwicklung eines Simulationsprogramms.
- Simulation einer bestehenden Strecke mit Variationen des Betriebsprogramms sowie der Lage der Begegnungsabschnitte und Ableiten von Handlungsempfehlungen.

Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen

In der ersten Arbeitsstufe wurden die betrieblichen und baulichen Randbedingungen geklärt. Die Anfangsbeschleunigung und Bremsverzögerung des Triebwagens ET 420 wurde anhand eigener Messungen mit $0,96 \text{ m/s}^2$ bzw. $0,67 \text{ m/s}^2$ ermittelt und entspricht damit den in der Literatur angegebenen Werten. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Zugsicherungsart gelegt, da die zur Zeit in S-Bahn-Netzen laufende Umstellung von Indusi I 60 auf Indusi PZB 90 Auswirkungen auf die Betriebsflüssigkeit haben kann. Die Größe dieser Auswirkungen hängt insbesondere vom Standort der Signale und Bahnsteige ab. Daher wurde die Anordnung der Ein- und Ausfädelungen untersucht und typisiert. Sowohl im eingleisigen als auch im zweigleisigen Abschnitt empfiehlt es sich, die Bahnsteige entweder unmittelbar vor dem Hauptsignal oder vor dem Vorsignal anzuordnen.

Ermittlung von Eingabedaten

Zur Ermittlung von Eingabedaten für das Simulationsprogramm wurden Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/M. (RZü) aufbereitet und ausgewertet. Die Aufbereitung war erforderlich, da die Datengenauigkeit und -integrität für die Ansprüche einer Simulation nicht ausreichten. Wesentliche Bestandteile waren die Datenkorrektur, in deren Rahmen für jede Betriebsstelle und Linie ein Korrekturparameter ermittelt wurde, sowie die Datenauswahl, bei der fehlerhafte Datensätze gelöscht wurden. Anschließend wurden mit einer breiten Datengrundlage von ca. 155.000 Zugläufen die Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten, Abfahrtsverspätungen und die Häufigkeit von Zugschäden untersucht. Ziel war es dabei, Verteilungsfunktionen für die Implementierung in das Simulationsprogramm zu ermitteln sowie eine Abhängigkeit von anderen Faktoren festzustellen. Die Verteilungsfunktionen wurden in drei Teile untergliedert: Eine Exponentialfunktion im unteren Bereich, eine Exponentialfunktion mit ergänzender Hyperbelfunktion zur Anpassung des Mittelwertes im oberen Bereich sowie eine verbindende Gerade. Diese Darstellung bietet eine optimale Anpassung der Modellfunktion an die tatsächliche Verteilungsfunktion sowie eine leichte Handhabbarkeit. Die Haltezeiten wurden nach den Kriterien Freqüentierung, Verkehrszeit und Lastrichtung in Gruppen eingeteilt. Die Fahrzeitabweichungen wurden prozentual ausgedrückt und nach den Merkmalen Verkehrszeit, Zugfolgezeit und Lastrichtung unterschieden. Eine Betrachtung der Fahrzeit in Abhängigkeit der Verspätung ergab, daß Verspätungen insbesondere während der Halte und weniger während der Fahrt abgebaut werden. Eine Einteilung der Wendezeit erfolgte nach den Kriterien Zugkonfiguration und Anzahl der an der Wende beteiligten Triebfahrzeugführer. Bei der Abfahrtsverspätung an den Wendebahnhöfen wurden die Stationen in normale Stationen, Stationen mit Wendeanlage und Stationen mit Behinderung bei der Ausfahrt unterteilt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Zugschäden mit Auswirkungen auf die Haltezeit und Fahrzeit wurde nicht mit einer Verteilungsfunktion, sondern lediglich mit Auftretenswahrscheinlichkeit und Größe beschrieben.

Erstellung eines Simulationsprogramms

Zur Erstellung des Simulationsprogramms wurde das Programmiersystem DELPHI verwendet. Es bietet objektorientierte Programmierung, eine gute Strukturierbarkeit sowie leistungsfähige Datenverwaltungsroutinen. Alle Daten werden in einem dBase-kompatiblen Datenformat gespeichert.

Ein wesentlicher Bestandteil der Simulation ist die Fahrzeitrechnung. Mit ihr wird nicht nur die unbehinderte Fahrzeit berechnet und der Fahrplan erstellt, sondern auch die Fahrzeit im Behinderungsfall ermittelt und in die Behinderungs-Übertragungsdatei eingetragen. Die unbehinderte Fahrzeit wird vor der Durchführung der Simulation ermittelt und währenddessen nur noch stochastisch variiert. Eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten konnte somit durch nur einen Rechenschritt dargestellt werden mit dem Vorteil einer hohen Rechengeschwindigkeit. Zur Gewährleistung einer hohen Genauigkeit werden in der Behinderungs-Übertragungsdatei alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten, gespeichert. Falls sich während der Simulation Behinderungen ergeben, wird darauf zurückgegriffen.

Simulation einer bestehenden Strecke

Zur Simulation einer bestehenden Strecke wurde die S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt ausgewählt. Diese ist abschnittsweise eingleisig und erlaubt damit zwischen Langen und Darmstadt nur einen 30-Minuten-Takt. Für einen mittelfristig geplanten 15-Minuten-Takt wären Infrastrukturausbauten erforderlich, wobei sich nun die Frage stellt, wie sich die möglichen Ausbauten auf die Betriebsqualität auswirken. Die Spanne der denkbaren Maßnahmen reicht dabei von einem zusätzlichen Bahnsteiggleis in Darmstadt-Arheilgen bis zu einem kompletten zweigleisigen Ausbau der Strecke.

Zur Beurteilung der Betriebsqualität wurde nicht nur der Regelbetrieb, sondern auch Langsamfahrstellen als Beispiel für eine Abweichung vom Regelbetrieb berücksichtigt. Da die Auswirkungen von Langsamfahrstellen auf die Pünktlichkeit am größten sind, wenn sie sich in einem eingleisigen Abschnitt im zentralen Bereich der Strecke befinden, wurde die Langsamfahrstelle im Streckenabschnitt zwischen Langen und Egelsbach angeordnet. Dabei wurden zwei verschiedene Langsamfahrstellen simuliert, die eine Fahrzeitverlängerung von 15 % bzw. von 70 % verursachen.

Neben der getrennten Auswertung jeder Variante wurden die Varianten auch miteinander verglichen, um folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie groß ist der Unterschied zwischen der Minimalvariante, den Zwischenvarianten und dem vollständigen zweigleisigen Ausbau?
- Welchen Einfluß haben relativ kurze Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität?
- Wie groß ist der Einfluß von kurzen eingleisigen Abschnitten auf die Betriebsqualität?
- Welchen Einfluß hat die Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau?
- Wie groß ist der Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität?
- Welche Bedeutung hat die Verteilung der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau?
- Von welcher Bedeutung ist der Einfluß unterschiedlicher Abfahrtsverspätungen bzw. Behinderungen am Beginn des Zuglaufs auf die Betriebsqualität bei den unterschiedlichen Ausbauvarianten?

Dabei zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Das niedrige Verspätungsniveau in Richtung Stammstrecke und das relativ hohe Verspätungsniveau in Gegenrichtung bewirken eine unterschiedliche Bedeutung der Verspätungsarten: Bei den Zügen in Richtung Stammstrecke überwiegt die direkte Verspätungsübertragung vom Gegenzug. Die Züge in Richtung Peripherie hingegen werden überwiegend durch Verspätungen des vorigen Zuges der gleichen Fahrtrichtung sowie durch Reihenfolgetausch infolge Eigenverspätung behindert.
- Die Abfahrtsverspätung an der ersten Betriebsstelle hat eine größere Bedeutung für die Verkehrs- und Betriebsqualität als die Gestaltung der Begegnungsabschnitte.
- Die Zwischenvariante, in der nur einfach zu realisierende Maßnahmen durchgeführt werden, weist eine fast genauso gute Betriebsqualität auf wie die Vollausbauvariante. Die Verkehrsqualität hingegen ist geringfügig schlechter.

- Kurze eingleisige Abschnitte haben keinen Einfluß auf die Betriebsqualität, falls sie günstig zwischen den Schnittpunkten der Fahrplanschere liegen und bis zur für die Betriebsqualität maßgebenden Betriebsstelle eine gewisse Fahrstrecke haben, bis zu der geringe Verspätungen wieder abgebaut werden können.
- Die Zugbeeinflussungsart hat bei einer Vermeidung ungünstiger Anordnungen der Signale und Halteplätze zueinander nahezu keinen Einfluß auf die Verkehrs- und Betriebsqualität.
- Mit einer Reduktion der Haltezeitreserven im letzten Bahnhof vor der Stammstrecke und einer Erhöhung in der Gegenrichtung um den gleichen Betrag ließe sich die Verkehrsqualität deutlich erhöhen. Die Betriebsqualität würde bei kleinen Abfahrtsverspätungen im Wendebahnhof nur geringfügig, bei größeren Abfahrtsverspätungen aber deutlich zunehmen.

Beitrag zum Stand der Forschung

Die vorliegende Arbeit trägt in drei wesentlichen Punkten zum Stand der Forschung bei: Auf der Grundlage von Daten der RZü Frankfurt/M. wurden Verteilungsfunktionen der Eingabedaten für Simulationsprogramme ermittelt. Weiterhin wurde ein Simulationsprogramm erstellt, das Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten und Abfahrtsverspätungen stochastisch variiert und zudem Schäden am Zug berücksichtigt. Anhand eines konkreten Beispiels wurden die Auswirkungen verschiedener Ausbaumaßnahmen auf die Betriebsqualität aufgezeigt und daraus Empfehlungen für die Strecken- und Fahrplangestaltung von S-Bahn-Strecken abgeleitet.

Ausblick

Trotz einer umfassenden Untersuchung der Problematik von eingleisigen Begegnungsabschnitten auf S-Bahn-Strecken im Rahmen der vorliegenden Arbeit bleibt ein weites Feld für weitere Forschungen:

Die gewonnenen Erkenntnisse stützen sich ausschließlich auf Auswertungen der RZü-Daten im S-Bahn-Netz Rhein-Main. Eine Übertragbarkeit auf ähnlich gestaltete S-Bahn-Systeme mit Stammstrecke ist damit gegeben. Die Problematik der Qualitätssicherung auf eingleisigen Strecken stellt sich aber ebenso bei S-Bahnen in einem polyzentrischen Ballungsraum oder bei Nebenbahnen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf solche Strecken sollte unter Berücksichtigung entsprechender Betriebsdaten untersucht werden. Bei Nebenbahnen wären nicht in erster Linie die Begegnungsabschnitte zu bemessen, sondern Anzahl und Lage der Kreuzungsbahnhöfe zu optimieren.

Ein weiteres wichtiges Forschungsthema wäre die Behandlung von Betriebsstörungen im S-Bahn-Verkehr. Auf hochbelasteten Streckenabschnitten verursachen beispielsweise Signal- oder Weichenstörungen hohe Verspätungen. Mit verschiedenen Maßnahmen könnten die Auswirkungen reduziert werden. Eine Möglichkeit wäre die Erstellung eines Notfahrplans, der bei Sperrung eines bestimmten Gleisabschnittes automatisch in Kraft treten könnte. Außerdem müßte die Anordnung von zusätzlichen Weichenverbindungen untersucht werden, über die Züge an dem gesperrten Streckenabschnitt vorbei geleitet werden könnten. Bei Sperrung eines Gleises auf der Stammstrecke wären vorzeitige Wenden einiger Züge in Betracht zu ziehen.