

1 Problemdefinition und Aufgabenstellung

S-Bahn-Linien verkehren im Kernbereich der Städte meist gebündelt auf eigenen Strecken mit hoher Leistungsfähigkeit und teilen sich im Außenbereich auf verschiedene Streckenäste auf. Je nach verkehrlicher Bedeutung und Taktsystem wird auf diesen Außenästen in der Hauptverkehrszeit ein Takt von 10 bis 30 Minuten gefahren. Bei den Strecken sind im allgemeinen 3 verschiedene Typen zu unterscheiden (Beispiele aus dem Rhein-Main-Gebiet):

- Führung der S-Bahnen auf Fernbahngleisen (z.B. S6 nach Friedberg und S1 nach Wiesbaden).
- Besondere S-Bahn-Gleise neben bestehenden Fernbahnstrecken (z.B. S3 nach Darmstadt und S8 nach Hanau).
- Reine S-Bahn-Strecken (z.B. S3 nach Bad Soden und S4 nach Kronberg).

Benutzen S-Bahnen Fernbahngleise, so sind diese in der Regel zweigleisig ausgebaut. Falls ihnen besondere Gleise oder Strecken zur Verfügung stehen, ist für die S-Bahn aus Kostengründen häufig nur ein Gleis vorhanden. Zugkreuzungen erfolgen entweder fliegend auf zweigleisigen Begegnungsabschnitten oder – seltener – stehend in Kreuzungsbahnhöfen.

Ein markanter Nachteil eingleisiger Betriebsführung ist die Verspätungsübertragung auf die Züge der Gegenrichtung. Daher ist es hier besonders wichtig, Infrastruktur, Fahrplangestaltung und Fahrzeugeinsatz sorgfältig aufeinander abzustimmen. Bestehen außerdem noch hohe Anforderungen an die Pünktlichkeit, ist es ratsam, vor der Durchführung von pünktlichkeitsbeeinflussenden Maßnahmen Untersuchungen zur Betriebsqualität durchzuführen. Dies gilt beispielsweise für S-Bahnen, die ihre Fahrplantrasse auf der Stammstrecke zuverlässig erreichen müssen, aber auch für Nebenbahnen, die in einen Integralen Taktfahrplan (ITF) eingebunden sind. Pünktlichkeitsbeeinflussende Maßnahmen können sowohl baulicher Art sein, wie z.B. Verlängerungen zweigleisiger Ausweichabschnitte oder Umbauten mit Fahrzeitveränderungen, als auch betrieblicher Art, wie Linienänderungen oder Fahrplananpassungen.

Sofern auf einer Strecke nur ein Begegnungsabschnitt erforderlich ist, können diese Untersuchungen manuell durchgeführt werden. Ist die betrachtete Strecke jedoch länger und sind mehrere Begegnungsabschnitte erforderlich, so ist eine manuelle Optimierung kaum mehr möglich. Sinnvollerweise ist dann ein Planungsmodell auf der Basis von Betriebssimulationen einzusetzen. Beispiele für existierende Programme sind z.B. SIMU VII [10, 23, 29, 30, 31], Simu++ [24] oder UX-SIMU [4]. Diese erfordern jedoch einen hohen Eingabearbeit, ein Nachteil, der bei vielen durchzurechnenden Varianten sehr schwer wiegt. In der Praxis werden daher bei Untersuchungen zur Anordnung von Begegnungsabschnitten meist verschiedene Fahrpläne simuliert und die zweigleisigen Abschnitte zwischen zwei Betriebsstellen im Bereich der Zugkreuzungen angeordnet. Ein weiteres Problem ist, daß es für die Ermittlung der Eingabewerte in solche Simulationsprogramme kein einheitlich geregeltes und anerkanntes Verfahren gibt. Die Eingabewerte müssen abgeschätzt oder aus Messungen abgeleitet werden. Daher ist es im täglichen Planungsgeschäft

nicht möglich, jede Änderung, von der ein Einfluß auf die Betriebsqualität zu erwarten ist, mittels dieser Computerprogramme zu simulieren.

Bislang fehlen dem Ingenieur also folgende Informationen bzw. Instrumente für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken:

- Allgemeine Hinweise und Empfehlungen zu Beginn der Planungen, mit denen der Untersuchungsrahmen abgesteckt und Varianten definiert werden können.
- Ein 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. Dabei müssen sowohl Maßnahmen baulicher Art, wie z.B. Verlängerungen zweigleisiger Ausweichabschnitte oder Umbauten mit Fahrzeitveränderungen, als auch betrieblicher Art, wie Linienänderungen oder Fahrplananpassungen, berücksichtigt werden können.
- Betriebliche Daten, 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.

Ziel dieser Arbeit war es daher, die oben beschriebenen Informationen zu ermitteln und darzustellen sowie ein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm zu erstellen.

2 Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik

Um die oben definierten Ziele zu erreichen, war eine mehrstufige Vorgehensweise notwendig:

- Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen.
- Ermittlung von betrieblichen Informationen.
- Entwicklung eines Simulationsprogramms.
- Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke unter Variation von Infrastruktur und Betrieb.

Im einzelnen waren folgende Bearbeitungsschritte erforderlich:

Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen

Als erster Arbeitsschritt wurden die betrieblichen Randbedingungen geklärt. Die Ermittlung von Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten und Verspätungen wurde dargestellt und mit Literaturangaben sowie eigenen Messungen ergänzt. Bei den baulichen Randbedingungen wurde insbesondere auf die Zugbeeinflussungssysteme und die möglichen Anordnungen von Begegnungsabschnitten eingegangen.

Ermittlung von betrieblichen Informationen

Für den Ablauf einer Simulation und die Qualität der Ergebnisse sind neben dem Programm selbst auch die Verfügbarkeit und Qualität der Eingabedaten von wesentlicher Bedeutung. Während Infrastruktur-, Triebfahrzeug- und Fahrplandaten aus Planunterlagen entnommen werden können, existieren für andere betriebliche Daten, z.B. für die Mittelwerte und Verteilungsfunktionen von Fahr- und Haltezeiten, keinerlei Informationen. Weder in Druckschriften der DB noch in der Fachliteratur sind Aussagen bezüglich der diesbezüglichen Eingabewerte zu finden. Im Rahmen bisher durchgeführter Arbeiten wurden daher die gesuchten Daten durch Messungen des realen Betriebsablaufs ermittelt. Nachteil bei dieser Vorgehensweise ist der große finanzielle und zeitliche Aufwand bei gleichzeitig kleiner Datenbasis. Daher wurde bei der vorliegenden Arbeit ein anderer Weg beschritten, indem die Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung (RZü) aufbereitet und ausgewertet wurden. Die RZü wird von der DB AG zur Zuglaufverfolgung und Betriebsleitung eingesetzt. Dabei werden bei jeder Zugvorbeifahrt am Signal die Ist-Zeiten zu einer zentralen Datenerfassung gesendet und dort gemeinsam mit Soll-Zeiten, Zugnummern sowie sonstigen Daten abgespeichert. Diese Werte können nun aufbereitet und ausgewertet werden. Eine unmittelbare Eingabe der RZü-Daten in das Simulationsprogramm ist jedoch nicht möglich, da die Datengenauigkeit und -integrität zwar für den vorgesehenen Verwendungszweck der RZü, nicht aber für die Ansprüche einer Simulation ausreichen. Daher mußte eine aufwendige Datenkorrektur und -auswahl durchgeführt werden, um diese Daten für das Simulationsprogramm nutzbar zu machen. Anschließend erfolgte eine Auswertung, in deren Verlauf alle erforderlichen Eingabewerte wie Fahrzeiten, Haltezeiten, Abfahrtsverspätungen und Wendezeiten in Abhängigkeit der Linie, der Verkehrszeiten sowie anderer Merkmale ermittelt werden konnte.

Außerdem mußten die RZü-Daten in eine computernutzbare Form umgesetzt werden. Dies bedeutet, daß die RZü-Daten formelmäßig so zu beschreiben waren, daß sie in das Simulationsprogramm eingebunden werden konnten.

Entwicklung eines Simulationsprogramms

Im Rahmen dieser Arbeit sollte ein Hilfsmittel für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken erstellt werden. Dieses kann entweder auf der Basis eines mathematisch-analytischen Ansatzes oder einer Betriebssimulation gestaltet sein. Eine Betriebssimulation hat den Vorteil, daß damit die Eigenschaften des Vorbildes besser abgebildet werden können und eine flexiblere Anpassung möglich ist. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Simulationsprogramm entwickelt. Dieses wurde speziell auf die Nachbildung des Betriebsablaufs auf eingleisigen Strecken zugeschnitten und ermöglicht die schnelle Variation von Eingabedaten sowie eine hohe Rechengeschwindigkeit und erfüllt gleichzeitig maximale Ansprüche an die Genauigkeit.

Um alle diese Bedingungen zu gewährleisten, waren die Konzepte bestehender Simulationsprogramme abzuwandeln und mit neuen Ansätzen zu kombinieren.

- Um Eingabedaten einfach und schnell abändern zu können, wurden die einzelnen Infrastrukturdaten wie Neigungen und zulässige Geschwindigkei-

ten getrennt betrachtet und abgespeichert. Statt die Gleistopologie (insbesondere Weichen) und Gleisschaltmittel (z.B. Schienenstöße oder Signalzugschlußstellen) exakt darzustellen, wurden die für die Gleisbelegung und Gleisfreimeldung maßgebenden Werte auf die Signalstandorte bezogen. Damit kann die Verlängerung oder Verkürzung eines Begegnungsabschnittes im allgemeinen durch die Änderung lediglich zweier Kilometrierungsangaben bewerkstelligt werden.

- Eine hohe Rechengeschwindigkeit wurde erreicht, indem jeweils eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten im allgemeinen durch nur einen Rechenschritt nachgebildet wurde. Die reinen Fahrzeiten werden vor der Simulation berechnet und danach nur noch stochastisch variiert.
- Um die Forderung nach einer hohen Genauigkeit zu erfüllen, müssen Fahrzeitverlängerungen, die im Behinderungsfall auftreten, exakt berücksichtigt werden. Alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten können, werden vorausberechnet und in einer Datei abgelegt. Auf diese wird während der Simulation zurückgegriffen, wenn ein Zug eine Behinderung erfährt. Der Betrag der Fahrzeitverlängerung hängt in erster Linie von der Dauer der Behinderung, aber auch von fahrdynamischen Kenngrößen, vom Fahrverhalten der Triebfahrzeugführer sowie vom Zugsicherungssystem ab.

Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke

Der letzte Bearbeitungsschritt betrifft die Simulation einer bestehenden Strecke unter Variation von Infrastruktur und Betrieb, mit dem Ziel, daraus allgemeine Empfehlungen und Hinweise für die Gestaltung von eingleisigen S-Bahn-Strecken abzuleiten.

Als konkretes Beispiel für die Simulation wurde die S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt ausgewählt. Sie ist ein typisches Beispiel für eine eingleisige, reine S-Bahn-Strecke in einem überwiegend monozentrischen Ballungsraum mit zentraler Innenstadtstrecke, auf der alle S-Bahn-Linien gebündelt sind.

Auf der ausgewählten S-Bahn-Strecke verkehren die ausschließlich mit Triebwagen der Baureihe ET 420 betriebenen S-Bahn-Linien S3 Bad Soden - Darmstadt und S4 Kronberg - Langen. Beide Linien verkehren im Halbstundentakt und überlagern sich zwischen Niederhöchststadt und Langen zu einem 15-Minuten-Takt. Eingleisige Abschnitte befinden sich zwischen Bad Soden bzw. Kronberg und Niederhöchststadt sowie zwischen Langen und Darmstadt (mit Begegnungsabschnitt). Für die betriebliche Simulation wurde angenommen, daß die Linie S4 bis Darmstadt verlängert werden soll. Dies wäre zur Zeit nicht möglich, da sich die Züge auf eingleisiger Strecke begegnen würden. Daher wären für einen durchgehenden 15-Minuten-Takt bis Darmstadt auf jeden Fall Ausbaumaßnahmen notwendig.

Es stellte sich nun die Frage, welche baulichen und betrieblichen Maßnahmen für die Verdichtung auf einen 15-Minuten-Takt erforderlich wären und wie sich diese auf die Betriebsqualität auswirken würden. Die untersuchten Maßnahmen reichten vom Bau eines einzigen kurzen Gleisabschnittes bis zum vollständigen zweigleisigen Ausbau der Strecke. Dabei wurden neben Varianten mit einem

Begegnungsabschnitt zwischen zwei Betriebsstellen auch Varianten mit kurzen Verlängerungen der Begegnungsabschnitte untersucht. Um die Empfindlichkeit der untersuchten Varianten gegenüber Störungen zu testen, wurde sowohl der Normalbetrieb als auch der gestörte Betrieb simuliert. Damit ergab sich eine ausreichende Anzahl von Varianten, um die Betriebsqualität zu bewerten und Empfehlungen auszusprechen.

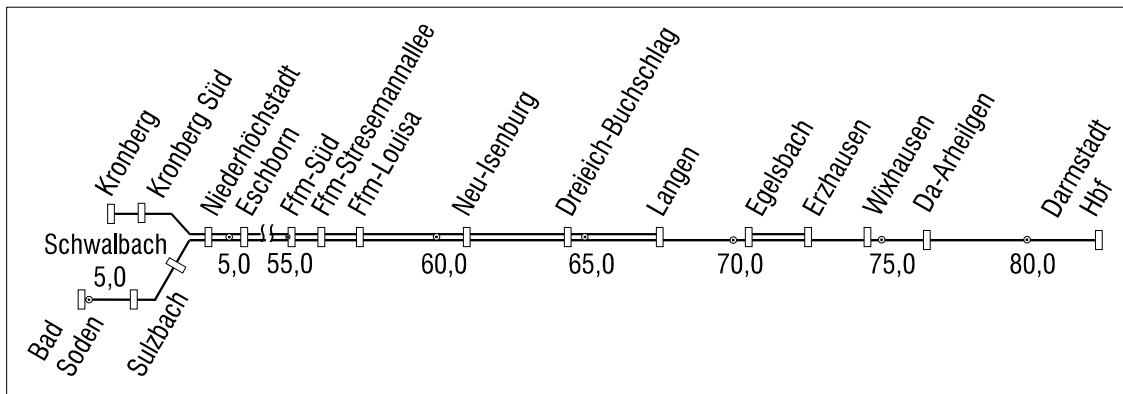


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der von den S-Bahn-Linien 3 und 4 befahrenen Strecken

Untersuchungsmethodik

Die einzelnen Bestandteile der vorliegenden Arbeit wurden oben bereits beschrieben. Im folgenden wird noch die Untersuchungsmethodik und die Abhängigkeit der einzelnen Bearbeitungsstufen voneinander erläutert.

Für die Ermittlung der Eingabedaten waren zunächst die RZü-Daten aufzubereiten und danach auszuwerten. Die Auswertung diente sowohl zur Ermittlung von Eingabedaten für eine Betriebssimulation als auch zur Umsetzung der RZü-Daten in eine computernutzbare Form. Dies bedeutet, daß die RZü-Daten formelmäßig so zu beschreiben waren, daß sie in das Simulationsprogramm eingebunden werden konnten. Das Simulationsprogramm wiederum mußte so gestaltet werden, daß die aus den RZü-Daten gewonnenen Informationen möglichst genau und vollständig in die Simulation einfließen konnten. Eine weitere Voraussetzung für die Entwicklung des Simulationsprogrammes war die Klärung der baulichen und betrieblichen Randbedingungen. Nach Abschluß der Programmentwicklung war damit ein Planungsinstrument vorhanden, das optimal auf die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken abgestimmt ist.

Die aus den RZü-Daten gewonnenen Eingabedaten für Betriebssimulationen wurden zum einen übersichtlich dargestellt, um sie für beliebige Programme verwenden zu können, zum anderen flossen sie in die Betriebssimulation eines typischen Beispiels ein. Die Ergebnisse dieser Simulation wurden ausgewertet, um daraus allgemeine Hinweise und Empfehlungen für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken abzuleiten.

In folgender Abbildung ist die Untersuchungsmethodik graphisch dargestellt:

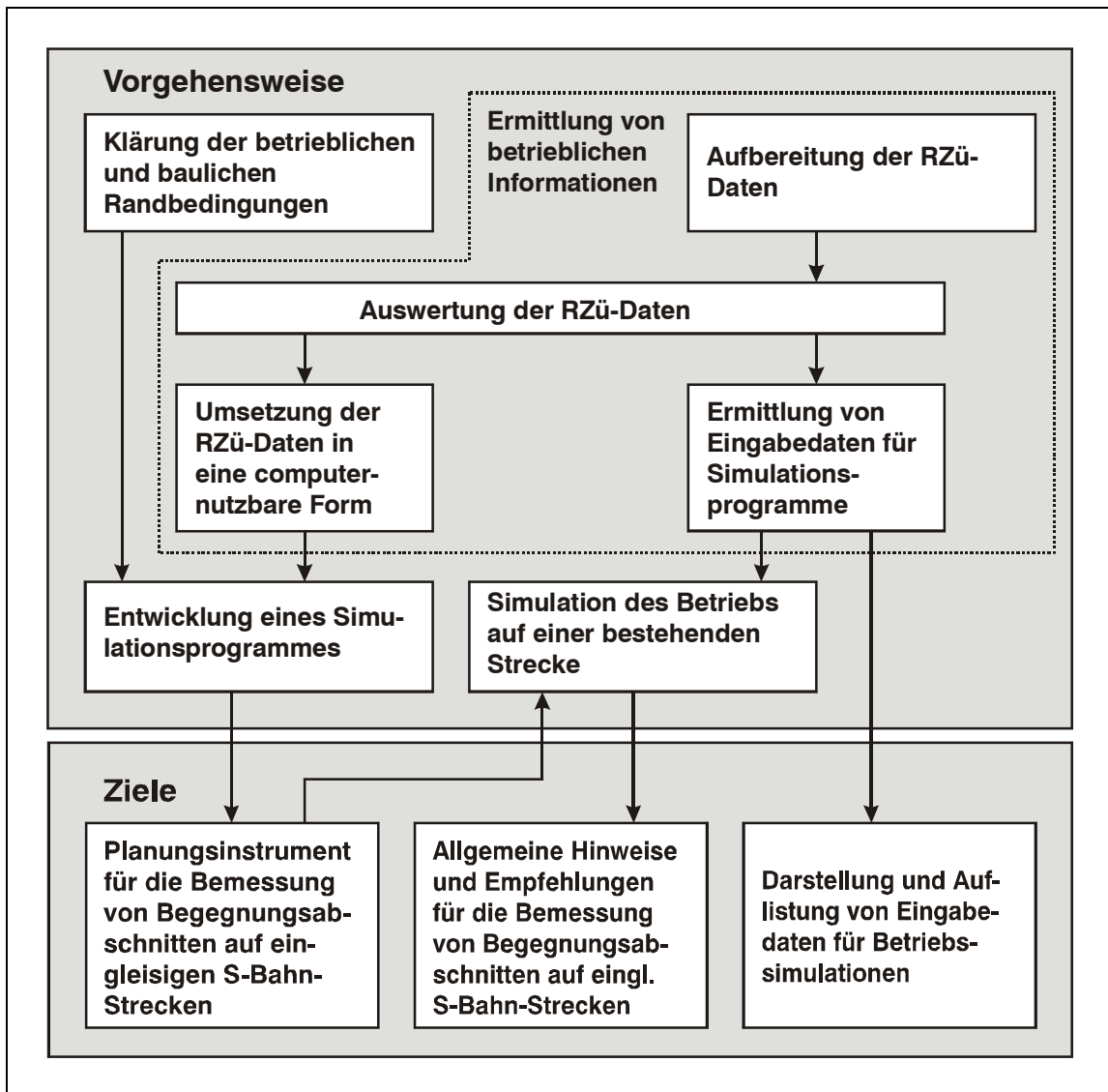


Abb. 2.2: Graphische Darstellung der Untersuchungsmethodik