

Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten im Regel- und Störfall – Entwicklung einer Methodik zur vergleichenden Analyse von Infrastrukturplanungsparadigmen in Europa

Krips, Maike¹, Weik, Norman^{1,2}, Meirich, Christian¹

¹DLR Institut für Verkehrssystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

²Professur für Planung und Betrieb von Schienenverkehrssystemen,
TU München, Parkring 35-39, 85748 Garching b. München

Zusammenfassung

In Anbetracht steigenden Verkehrsaufkommens auf der Schiene sowie im Zuge der Umsetzung attraktiver Fahrplankonzepte mit guten Umstiegsbeziehungen kommt der (Neu-)Gestaltung der Ein- und Ausfärbereiche in Knotenbahnhöfen übergeordnete Bedeutung für die Machbarkeit und Pünktlichkeit des Betriebs zu. Im vorliegenden Beitrag werden vor diesem Hintergrund Infrastrukturplanungsparadigmen für Fahrstraßenknoten in verschiedenen Ländern verglichen und ein Ansatz vorgestellt, um diese in Hinblick auf Ihre Leistungsfähigkeit und Bedarfsgerechtigkeit im Regel- und Störbetrieb zu untersuchen. Mit der vorgestellten Methodik soll ein Beitrag geleistet werden, um Best Practices für die zukünftige Gestaltung von Knoten vor dem Hintergrund stark vertakteter Fahrplankonzepte wie des Deutschland-Takts zu identifizieren und zu bewerten.

Keywords: Leistungsfähigkeit, Infrastrukturplanung, Fahrstraßenknoten, Bahnhöfe, vergleichende Bewertung

1 Einleitung

Im Rahmen der Bewertung der Eisenbahninfrastruktur sind mit der wechselseitigen Abhängigkeit von Fahrplankonzept und Infrastruktur grundsätzliche Fragestellungen der Kapazitätsplanung verknüpft, welche gerade in Anbetracht der aktuell in Deutschland verfolgten Transition hin zu einem fahrplangetriebenen Infrastrukturplanungsansatz detaillierter Analyse bedürfen. Besonders in Hinblick auf die Gestaltung von Fahrstraßenknoten in Bahnhöfen ergibt sich hier für die Umsetzung kundenorientierter Fahrplankonzepte mit attraktiven Umstiegsmöglichkeiten für die Fahrstraßenplanung und Gleisgestaltung von Personenbahnhöfen Anpassungs- und Forschungsbedarf.

Historisch haben sich für die Gestaltung von Fahrstraßenknoten in Bahnhöfen unterschiedliche Herangehensweisen und Planungsparadigmen entwickelt: Während in Deutschland ein infrastrukturzentrierter Ansatz vertreten wurde, welcher die gegenseitige Vertretbarkeit von Bahnhofsgleisen in den Vordergrund stellt, liegt der Fokus in anderen Ländern schon seit Längerem auf anderen Zielen wie der Maximierung von Parallelfahrmöglichkeiten (Schweiz) bzw. einer weitgehenden Reduktion von Gleisanlagen auf betriebliche notwendige Fahrbeziehungen nach japanischem Vorbild (Niederlande) mit dem Ziel der Ausfallprävention [1].

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik entwickelt, welche die mit unterschiedlichen Planungsparadigmen einhergehenden betrieblichen Effekte im Regel- und Störfall aufzeigen kann. Ziel des Ansatzes ist eine skalierbare gesamtheitliche Analyse der Gestaltungsparameter von Bahnanlagen, welche Planungsprozesse von Infrastrukturanlagen in Personenbahnhöfen unterstützt.

Im Rahmen eines weitgehend automatisierbaren Open Data-Ansatzes, welcher unabhängig von landesspezifischen Nomenklaturen in Hinblick auf, z.B., Betriebsstellenabgrenzungen oder -bezeichnungen anwendbar ist, wird zunächst die vorhandene Gleisinfrastruktur in einzelne Regionen bzw. Einzugsbereiche von Bahnhöfen zerlegt und die zugehörige Infrastruktur selektiert. Innerhalb des Bahnhofsbereich werden Gleise, Haltepositionen und Nutzlängen aus den topologischen bzw. topographischen Eigenschaften der Gleisanlagen identifiziert. Für den Vergleich der Charakteristika von Gleislaysouts werden anschließend Kennwerte von Infrastrukturelementen, wie etwa die Anzahl und relative Lage bzw. Distanz von Weichen und Kreuzungen berechnet.

Darüber hinaus erfolgt eine Identifikation der topologisch möglichen Fahrwege, sowie die Analyse der vorhandenen Fahrtenausschlüsse bzw. Parallelfahrmöglichkeiten gewichtet mit dem aus dem Fahrplan extrahierten Betriebsprogramm (vgl. [2]). Basierend

auf einer Fahrtenumlegung des Fahrplankonzepts wird die Nutzung von Gleisanlagen sowie die vorhandene Robustheit im Regel-(Fahrplan)betrieb mittels analytischer (d.h. hier algebraischer) Kennziffern gemessen und mit den Ergebnissen von Betriebssimulationen verglichen. Anschließend wird die Kritikalität von Infrastrukturausfällen bzw. der Nicht-Verfügbarkeit von Weichen bzw. Gleisabschnitten ebenfalls auf Basis eines simulativen Ansatzes untersucht und verglichen. Im Ergebnis kann die betriebliche Robustheit im Regel- und Störfall bestimmt und mit der Komplexität und den Unterhaltskosten von Gleislaysouts verglichen werden.

Für die Analyse der Gleisinfrastruktur werden drei internationale Fallbeispiele auf Basis der Gleislaysouts von Braunschweig Hbf, des Bahnhofes Olten (CH), sowie des Bahnhofs Arnhem Centraal (NL) untersucht (vgl. Abbildung 1). In allen drei Fällen handelt es sich um mittelgroße Bahnhöfe vergleichbarer Größe und Gleisanzahl mit Streckenverknüpfungsfunktion, sodass eine aussagekräftige vergleichende Evaluierung der Designparameter durchgeführt werden kann. Anschließend wird der methodische Ansatz zur Analyse der Betriebsqualität im Regel- und Störfall anhand des Beispiels Braunschweig Hbf angewandt und demonstriert.

Die Darstellung der Untersuchung ist dabei in 4 Bereiche untergliedert: In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf die Gestaltung und Bewertung von Knoteninfrastrukturen aufgearbeitet. Anschließend wird in Kapitel 3 der methodische Ansatz vorgestellt und die Schritte hin zu einer vergleichenden Evaluierung unterschiedlicher, ggf. national spezifischer, Infrastrukturvarianten erläutert. Kapitel 4 schließlich beinhaltet die Auswertung der jeweiligen Charakteristika von Bahnhofsinfrastrukturen sowie die Ergebnisse der simulationsbasierten Bewertungsmethodik für die Betriebsqualität im Regel- und Störfall. Den Abschluss des Artikels bildet eine kurze Zusammenfassung nebst Ausblick auf mögliche Modellerweiterungen und Untersuchungsinhalte zur Unterstützung der Infrastrukturgestaltung.

2 Stand der Technik

Während die Leistungsfähigkeit sowie das Leistungsverhalten von Eisenbahnstrecken sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext inzwischen als gut erforscht und verstanden gilt, stellt sich die Modellierung von Knotenbereichen aufgrund der Komplexität der Vernetzung von Zugfahrten sowie der unterschiedlichen Segmentierungsmöglichkeiten von Knoten als weitgehend nicht standardisiert dar. Im deutschen Kontext wird bei der Untersuchung von Knoten zwischen Gleisgruppen und (Gesamt-) Fahrstraßenknoten, welche die Ein-/Ausfahrbereiche der jeweiligen Betriebsstelle

bezeichnen, unterschieden (vgl. [3]). Während für Gleisgruppen auf Potthoff bzw. Hertel zurückgehende Ansätze basierend auf Warteschlangenmodellen [2, 4] und der Warte- bzw. Verlustwahrscheinlichkeit ([5], vgl. auch [6]) verwendet werden, liegen für die gesamtheitliche Betrachtung von Fahrstraßenknoten wenige validierte Ansätze vor.

Bestehende Ansätze verallgemeinernd, schlägt die 2. Auflage des UIC Codes 406 eine Adaption des verketteten Belegungsgrads für das Weichenvorfeld von Bahnhöfen nebst zugehöriger Schwellwerte für das Level of Service vor [7]. Vergleichbar mit existierenden Ansätzen erfolgt die Analyse auf Basis einer Desegmentierung von Knotenbahnhöfen in Gleisgruppen und die jeweiligen Gesamtfahrstraßenknoten. In [8] wird eine Anwendungsweise der Verkettungsmethodik beschrieben, welche eine infrastrukturbasierte, durch Ensemble-Mittlung von einem konkreten Fahrplankonzept abstrahierte Bewertung auf Ebene kompletter Bahnhofsknoten (unter Einbezug von Fahrplanwechselwirkungen) erlaubt. Jovanovic et al. [9] beschreiben einen Ansatz zur Analyse von parallel durchfahrbaren Zugfahrten (Kapazität), welcher die Thematik auf bekannte mathematische Optimierungsmodelle im Bereich der Färbung von Graphen zurückführt. Der Ansatz kann als eine Verallgemeinerung und methodische Fortschreibung des Potthoffschen Ansatzes auf Basis der sog. Verkettungszahl gesehen werden.

Wesentlich für die Leistungsfähigkeit von Knotenbereichen sind insbesondere Parallelfahrmöglichkeiten, welche kurze Zugfolgen bei der Ein- und Ausfahrt von Zügen zu den Taktzeiten des Knoten gestatten. Um dies zu realisieren, wurde in den vergangenen Jahrzehnten in der Schweiz, sowie den Niederlanden massiv in die Umgestaltung von Gleisvorfeldern von Knotenbahnhöfen investiert. Insbesondere in den Niederlanden wurde ein Ansatz der massiven Entflechtung der Verkehre und Vereinfachung der Weichenbereiche im Zulauf auf Knotenbahnhöfe verfolgt. Die damals ergriffenen Maßnahmen zeigen heutzutage jedoch eine geringe Störungsresilienz, da beispielsweise die rasche Bereitstellung bzw. Außerbetriebnahme von Fahrzeugen durch die geringe Flexibilität der topologischen Fahrmöglichkeiten und insbesondere der unzureichenden Anbindung von Rangier- und Abstellanlagen (vgl. z.B. Utrecht Centraal) erschwert ist.

Vor diesem Hintergrund soll im Zuge einer vergleichenden Analyse von Bahnhofslayouts ein Beitrag zu einem besseren Verständnis der Wirkweise von Infrastrukturplanungsentscheidungen in Knotenbahnhöfen geleistet werden, welcher zukünftig zur Etablierung von Best-Practices bzw. zur Vermeidung von Systemrisiken beitragen kann.

3 Vorgehensweise / Methodik

Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der infrastrukturabhängigen Belastung in den ausgewählten Knotenbahnhöfen beschrieben. Dafür werden zunächst Charakteristika von Gleislaysouts identifiziert und anschließend mögliche Fahrwege sowie gegenseitige Fahrtenausschlüsse bestimmt. Die darauffolgende Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans ermöglicht die Simulation des Bahnbetriebs im Regel- und Störfall und die Ableitung korrespondierender Qualitätskennzahlen.

3.1 Datengrundlage und Vorverarbeitung der Daten

Während gerade im europäischen Kontext seit mehreren Jahrzehnten eine Harmonisierung und Standardisierung von Planungsprozessen und Datenmanagement verfolgt wird, ist bis zum heutigen Tag eine starke Heterogenität in puncto Infrastruktur- und Betriebsdatenverfügbarkeit und -formaten zu beobachten. Auch wenn teilweise grenzübergreifend gleiche Standards (z.B. railML, GTFS für Fahrplandaten, o.ä.) genutzt werden, ergibt sich durch historisch gewachsene Datenhaltungsprinzipien und Betriebspraktiken nach wie vor eine gewisse Uneinheitlichkeit, die das Vorhaben eines länderübergreifenden Vergleichs von Planungsprinzipien erschwert. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie ein Open Data-Ansatz auf Basis von Open Street Map (OSM) – Daten verfolgt, da diese weltweit zur Abbildung von Verkehrsinfrastrukturen verwendet werden. Auch wenn hierdurch individuell auf den jeweiligen nationalen Kontext bezogen, mit Sicherheit nicht die Präzision der jeweils spezifisch zum Einsatz kommenden Daten erzielt wird, ist gerade in Hinblick auf die Topologie, welche die Grundlage der vorliegenden Studie bilden, eine weitgehend vollständige und vergleichbare Datenbasis, welche konsistent prozessiert werden kann, gewährleistet.

Beim Einlesen der Daten aus dem OSM-Format werden im Zuge der Vorverarbeitung aus dem Graphen diejenigen Kanten entfernt, die als „industrial“, „spur“ oder „yard“ gekennzeichnet sind. Anschließend wird der Graph auf die größte zusammenhängende Komponente reduziert, sodass eine Fokussierung auf die für den regulären Fahrplan- bzw. Zugbetrieb relevante Infrastruktur gegeben ist. Eine (vereinfachte) Anbindung von Abstellanlagen ist weiterhin gewährleistet, sodass bei Bedarf Abstellungs- und Bereitstellungsfahrten mitmodelliert werden können.

3.2 Bestimmung von Gleislayout-Charakteristika

Um die Infrastrukturelemente in einem Gleisnetz den zugehörigen Bahnhöfen zuordnen zu können, wird das eingelesene OSM-Netz zunächst in Einzugsbereiche zerlegt. Die Zerlegung erfolgt mithilfe eines Voronoi-Diagramms [10], welches das Netz in Regionen unterteilt. Jede Region wird durch ein Polygon definiert, welches ein Bahnhofsgebäude als Zentrum enthält. Infrastrukturelemente, die sich innerhalb eines Polygons befinden, weisen die Gemeinsamkeit auf, dass ihre euklidische Distanz zum Zentrum des Polygons geringer ist als die zu jedem anderen Zentrum des Voronoi-Diagramms. Folglich sind die Einzugsbereiche im Netz über die kürzeste Entfernung zwischen Infrastrukturelementen und Bahnhofsgebäuden definiert. Um den Bahnhofsbereich vollständig abzubilden, wird bei der erstellten Methode zusätzlich das Kriterium angewandt, dass die Polygone die Einfahrsignale enthalten müssen. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, so werden die Polygone vergrößert.

Die Analyse der Infrastruktur sowie der Fahrplankapazität erfolgt für segmentierte Bereiche innerhalb eines Voronoi-Polygons. Dabei wird die Lage der parallelen Bahnhofsgleise anhand von geometrischen Eigenschaften ermittelt und anschließend ein Schnitt durch die Bahnhofsmitte gelegt. Im Zuge der Segmentierung werden insgesamt sechs Schritte durchgeführt, die im Folgenden näher erläutert werden:

1. Suchen von Kanten im Radius von 300m um das Bahnhofsgebäude
2. Berechnen der Orientierung der Kanten und Erstellen eines Histogramms
3. Auswählen aller Kanten, deren Orientierungen im Peak des Histogramms liegen
Die folgenden drei Schritte werden für jede der vorausgewählten Kanten durchgeführt:
 - Berechnen der Orthogonalen durch die vorausgewählte Kante und Erzeugen eines vorläufigen Schnittes durch den Bahnhof entlang der Orthogonalen
 - Bestimmen der Anzahl an Kanten, die innerhalb des Radius liegen und orthogonal zum Schnitt sind
 - Berechnen der euklidischen Distanz zwischen der vorausgewählten Kante und dem Bahnhofsgebäude
4. Auswählen des Bahnhofsschnittes, bei dem die Anzahl an parallelen Kanten maximal und die euklidische Distanz zum Bahnhofsgebäude minimal sind

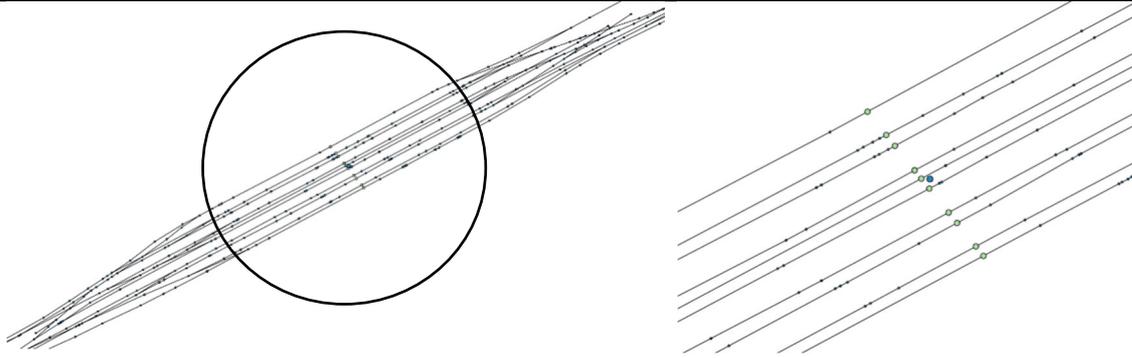


Abbildung 1 – Schnitt durch die Bahnhofsmitte am Beispiel von Braunschweig Hbf. Betrachten von Kanten im ausgewählten Radius (links) und Einfügen von Knoten, die den Schnitt durch den Bahnhof markieren (rechts), Datenquelle Visualisierung: © OpenStreetMap contributors

Im ersten Schritt wird ein Kreis mit einem Radius von 300m um das Bahnhofsgebäude gelegt, der zur weiteren Einschränkung des Suchbereiches dient (siehe *Abbildung 1*). Für alle Kanten innerhalb dieses Radius wird die Orientierung berechnet und die Verteilung in einem Histogramm dargestellt (Schritt 2). Durch die Kanten, deren Orientierungen im Histogramm-Peak liegen, wird anschließend jeweils eine Orthogonale gelegt und die Anzahl an Schnittpunkten mit parallelen Kanten berechnet (Schritt 4). Die Anzahl der berechneten Schnittpunkte gibt somit die Anzahl an parallelen Gleisen an. Für einen Schnitt durch die Bahnhofsmitte wird die Kante ausgewählt, die die höchste Anzahl an parallelen Nachbarkanten sowie als weiteres Kriterium die geringste euklidische Distanz zum Bahnhofsgebäude aufweist (Schritt 5).

Als weitere charakteristische Merkmale werden die Anzahl und Verteilung der Weichen und Kreuzungen (bzw. Kreuzungsweichen) im Polygon bestimmt. Dabei wird zum einen die euklidische Distanz zwischen dem jeweiligen Infrastrukturelement und dem Bahnhofsschnitt und zum anderen die kürzeste Distanz im Graphen berechnet. Innerhalb eines Bahnhofsegments werden ausschließlich diejenigen Infrastrukturelemente berücksichtigt, die im Graphen einen fahrbaren Pfad zum Bahnhofsschnitt aufweisen. Somit sind beispielsweise Weichen, die nicht durch eine Kantenfolge mit dem Bahnhofsschnitt verbunden sind, auch nicht in der Analyse enthalten. Gleiches gilt für Weichen, bei denen der Pfad zum Bahnhofsschnitt über einen spitzen Weichenwinkel verlaufen würde.

3.3 Fahrtenumlegung und -analyse

Für die mikroskopische Fahrtenumlegung werden die Einfahrtsignale eines Bahnhofs identifiziert, die als Start- und Endpunkte für die anschließende Fahrwegsuche dienen. Anhand einer Tiefensuche werden topologisch mögliche Fahrwege zwischen den Einfahrtsignalen und den Haltepositionen bestimmt. Ausgehend von den Fahrwegen wird mithilfe der folgenden Kriterien ein konfliktfreier Fahrplan für ein 1h-Intervall erstellt, wobei zunächst der Fernverkehr, danach der Nahverkehr und zuletzt der Güterverkehr betrachtet wird:

1. Einhalten des Rechtsverkehrs in Arnhem und Braunschweig und des Linksverkehrs in Olten
2. Einhalten der Haltezeiten sowie der zugewiesenen Plattformen
3. Auswählen kürzester Fahrwege

Die Fahrtenumlegung wird mithilfe von öffentlichen Fahrplänen der drei Bahnhöfe erstellt, die Informationen zur Gleisbelegung, zu Ankunfts- und Abfahrzeiten sowie zur Art des Zuges (Nah- oder Fernverkehr) enthalten. In Hinblick auf den Güterverkehr wurde für jeden Bahnhof vereinfacht eine Anzahl von vier Zügen pro Stunde angenommen.

Für das Erkennen von Konflikten werden für jede Zugfahrt die zugehörige Fahrdynamik und, darauf aufbauend, die Belegungszeiträume der Weichen berechnet. Beim Auftreten eines Konflikts wird zunächst für den geringer priorisierten Zug ein alternativer Pfad gewählt. Zur weiteren Konfliktlösung können anschließend die Halteposition und letztendlich die Haltezeiten verändert werden.

Zur Betrachtung der gegenseitigen Beeinträchtigung von Zugfahrten wird die von Potthoff definierte Verkettungszahl φ [2] berechnet:

$$\varphi = \sum_i \sum_j p_{ij} \cdot a_{ij}$$

Dabei wird durch a_{ij} festgelegt, ob sich zwei Zugfahrten i und j gegenseitig ausschließen. Liegt ein Ausschluss vor, so ist $a_{ij} = 1$, ansonsten 0. Mit p_{ij} wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Zugfolgefalls i - j bezeichnet. Auf Basis der Zugfolgefälle im Fahrplan wird somit das Verhältnis aus Fahrten, die einen Fahrtenausschluss aufweisen und der Gesamtanzahl an Fahrten bestimmt.

Um Unterschiede in den Einfahrbereichen der einzelnen Bahnhofsknoten (Gesamtfahrstraßenknoten) zu berücksichtigen, wird die Verkettungszahl gemäß Richtlinie 405 [3]

für die beiden zuvor erstellten Segmente separat berechnet. Eine Fahrt ist dabei so definiert, dass sie von einem Einfahrsignal zur Halteposition oder umgekehrt führt.

3.1 Betriebssimulation im Regel- und Störfall

Die zuvor beschriebenen Analysemethoden für Gesamtfahrstraßenknoten, sowie deren warteschlangentheoretischen Erweiterungen (vgl. [11, 6] finden als *statische* Beschreibung der Infrastrukturnutzung bzw. von Fahrplankonzepten insbesondere in der Prozessebene der Fahrplannerstellung Anwendung. Für die Bewertung der Betriebsqualität ergeben sich durch die Limitationen in der Abbildung von Fahrplanzusammenhängen, Korrelationen, sowie betrieblichen Zugfolgeprozessen, Einschränkungen.

Aus diesem Grund wird im beschriebenen Projekt ein simulativer Ansatz mithilfe performanter betrieblicher Simulationen, die dynamisch und variabel mit dispositiven Algorithmen gekoppelt werden können, verfolgt. Als Simulationssoftware kommt hierbei das DLR Open Source-Tool SUMO [12] zum Einsatz. Wiewohl SUMO nicht zu den dezierten Bahnbetriebssimulationssoftwaretools zählt, sondern ursprünglich als Digitaler Zwilling des urbanen Verkehrs konzipiert wurde, so weist die Software dennoch zwischenzeitlich auch umfangreiche Modellierungsmöglichkeiten im Bahnkontext auf (vgl. [13], wobei zwischenzeitlich weitreichende Erweiterungen umgesetzt wurden). So wird SUMO beispielsweise als Simulations-Backend der DB Netz AG für das Training bzw. die Modellierung von Machine Learning-Ansätzen zur Optimierung der Disposition in S-Bahn-Netzwerken (z.B. S-Bahn Stuttgart) verwendet [14].

Darüber hinaus weist SUMO einige Features auf, die bei konventionellen, kommerziell erwerblichen Software-Tools nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen. Hierbei ist insbesondere die Möglichkeit zu nennen, dynamisch über einen Python-Client (Traffic Control Interface – TraCI) in eine laufende Simulation eingreifen bzw. die Simulationsparameter ändern zu können, und auf diese Weise geänderten Umgebungsrandbedingungen Rechnung zu tragen oder *zur Laufzeit* Modifikationen in Erreichbarkeiten, Routenwahl- und Betriebsprogramm oder Dispositionsstrategien vorzunehmen. Dies erlaubt insbesondere die flexible, ggf. auch im jeweiligen Anwendungskontext abweichenden Gegebenheiten Rechnung tragende, Anbindungen externer Algorithmen, welche steuernd in die Simulation eingreifen.

Für die Abbildung des Bahnbetriebs kommt in der vorliegenden Studie ein komplett integrierter Ansatz auf Basis von SUMO-eigenen (und frei verfügbaren) Routinen zum Einsatz. Die Identifikation von möglichen Fahrwegen im Bahnhof erfolgt auf Basis einer

Tiefensuche, wobei die Fahrbeziehungen an Weichen (connections) in Abhängigkeit der relativen Winkel der ein- bzw. ausgehenden Gleise bestimmt werden. Für die fahrdynamische Berechnung werden in SUMO hinterlegte Traktionscharakteristika von Modellzügen (z.B. ICE3, REDosto7, sowie Freight; vgl. [15]) verwendet. Die mikroskopische Umlegung inklusive Gleisbelegung des initialen, makroskopischen Fahrplankonzepts, welches aus öffentlichen kommunizierten Fahrplandaten abgeleitet wurde, erfolgt in einer Kombination von automatisierten Heuristiken mit manueller Nachkontrolle und -justage, sodass Konfliktfreiheit konsistent zur fahrdynamischen Berechnung auf Modellzugbasis in SUMO hergestellt wird. Für die Prozessebene der Disposition wird über die TraCI-Schnittstelle bei Nicht-Verfügbarkeit des Planfahrweges dynamisches (Re-)Routing auf Basis einer egoistischen kürzeste Fahrzeit-Heuristik auf der jeweiligen Start-/Ziel-Beziehung über die Funktion *rerouteTravelTime* umgesetzt. Ausgefeiltere Methoden wie beispielsweise die Anbindung von Optimierungsalgorithmen oder KI-Methoden zum re-scheduling sind selbstverständlich möglich und werden aktuell prototypisch umgesetzt und untersucht.

Für die nachfolgende Studie wird unterschieden zwischen *Regelbetrieb*, bei dem das vorgegebene Fahrplankonzept inklusive Gleisbelegung unter kleineren Störungen, aber ohne Re-Routing der Züge, d.h. Veränderung des Lenkplans, umgesetzt wird, sowie dem *Störfall*, bei dem aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Infrastruktur ein Re-Routing bzw. ggf. auch der Ausfall oder die weiträumige Umleitung von Zugfahrten nötig ist. Für die vorliegende Studie werden hierbei lokale Weichenausfälle mit einer Störungsdauer von 45 Minuten untersucht.

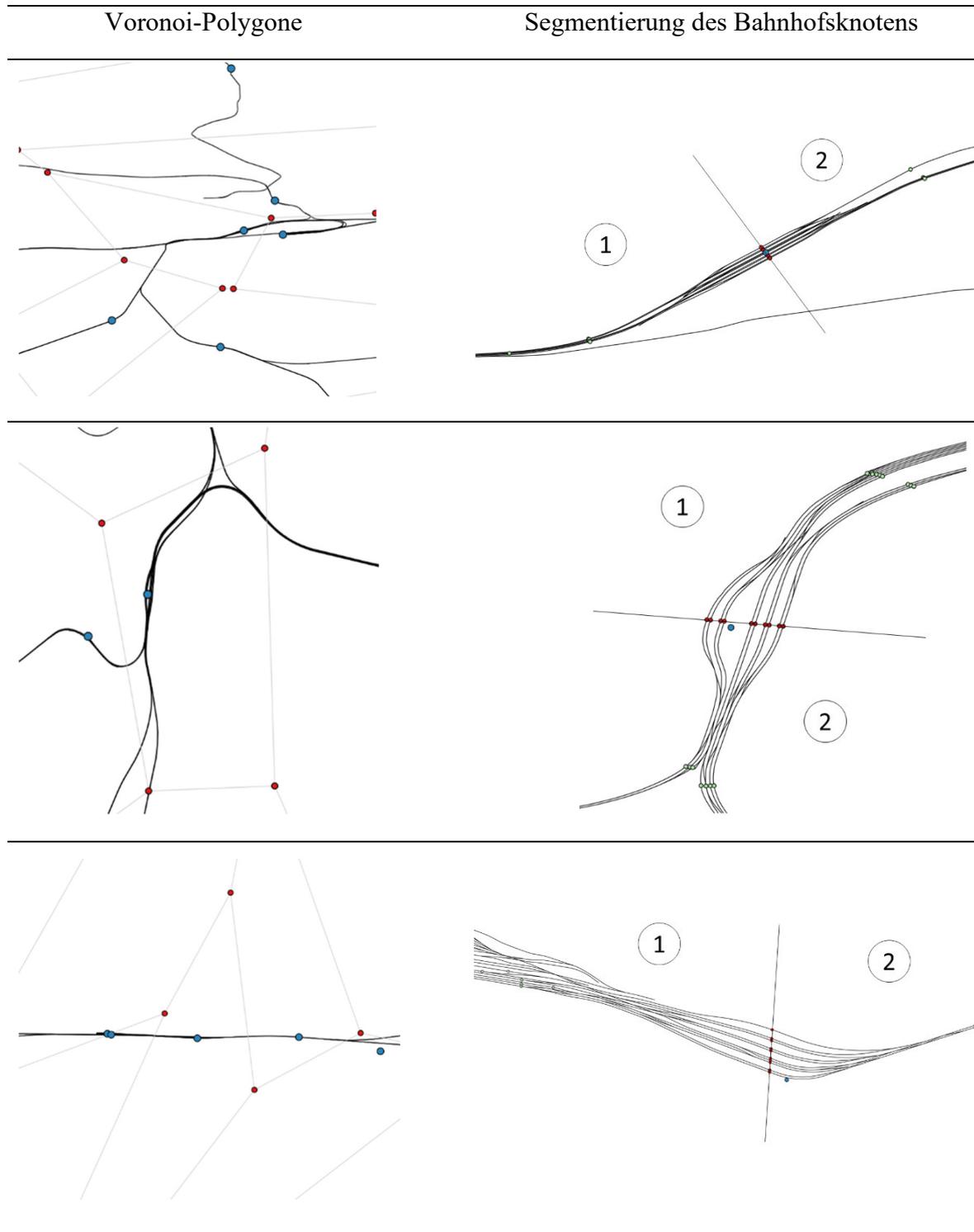
4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Charakteristika der drei untersuchten Bahnhöfe dargestellt und miteinander verglichen sowie die Simulationsergebnisse im Regel- und Störbetrieb für den Bahnhof in Braunschweig exemplarisch gezeigt.

4.1 Charakteristika der Gleislayers

Die Visualisierung der Voronoi-Polygone sowie der Segmentierungen der Bahnhofsbereiche sind in Tabelle 1 dargestellt. In der linken Spalte markieren die roten Knoten die Polygon-Eckpunkte und die blauen Knoten die Bahnhofsgebäude. Im vergrößerten Netzwerkausschnitt in der rechten Spalte sind zusätzlich die Einfahrtsignale durch grüne Knoten und der Schnitt durch die jeweiligen Bahnhöfe mit roten Knoten visualisiert.

Tabelle 1 – Zerlegung in Einzugsbereiche und Segmentierung der Bahnhofsknoten in Braunschweig (oben), Olten (Mitte) und Arnhem (unten), Datenquelle Visualisierung: © OpenStreetMap contributors



Die betrachteten Charakteristika der Infrastruktur sind in Tabelle 2 dargestellt. Aufgrund der angrenzenden Rangierbahnhöfe in Olten und Arnhem, die zum Teil im Bahnhofs-zuschnitt enthalten sind, ist die Anzahl an Weichen mit insgesamt 84 bzw. 69 Weichen vergleichsweise hoch. In dem jeweils gegenüberliegenden Bahnhofssegment ist die Anzahl bei den zwei Bahnhöfen geringer. Sie liegt in Olten bei 29 Weichen und ist in Arnhem mit 15 Weichen – entsprechend dem niederländischen Planungsgrundsatz – im Bahnhofsvergleich minimal.

Die Gesamtanzahl an Kreuzungen bzw. Kreuzungsweichen ist allen drei Bahnhöfen mit 4 bzw. 5 Elementen ähnlich, wobei sich ihre Verteilung in Olten und Arnhem auf ein Bahnhofssegment beschränkt. Im Vergleich dazu sind in Braunschweig in beiden Segmenten Kreuzungen vertreten.

In Bezug auf die Fahrtenumlegung weist Olten mit insgesamt 60 Fahrten die höchste Anzahl auf. In Arnhem liegt ihre Anzahl bei 39 Fahrten und in Braunschweig bei 33 Fahrten. Die Verteilung der Fahrten auf die beiden Bahnhofssegmente zeigt weitere Unterschiede auf. So liegt in Olten die Differenz zwischen der Anzahl an Fahrten in den beiden Bahnhofssegmenten bei 2, in Braunschweig und Arnhem hingegen bei 7.

Die Verkettungszahl liegt im Bahnhofsvergleich in Arnhem im östlichen Bahnhofssegment am höchsten, was auf die geringe Anzahl an Einfahrgleisen zurückzuführen ist. Züge, welche aus östlicher Richtung in den Bahnhof einfahren oder nach dort ausfahren, können lediglich über zwei mögliche Gleise fahren. Die niedrigste Verkettungszahl hingegen weist das nördliche Bahnhofssegment von Olten auf. In diesem Bereich werden (bezogen auf die Wahl des Bahnhofs-zuschnitts) die Züge über 9 mögliche Gleise geleitet, wodurch sich eine Verkettungszahl von 0,27 ergibt.

Tabelle 2 - Charakteristika der Gleislaysouts

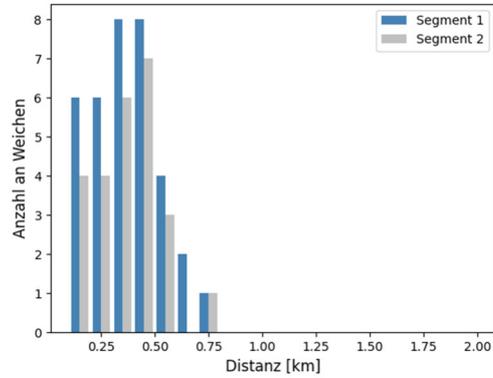
Bahnhof	Braunschweig		Olten		Arnhem	
	1	2	1	2	1	2
Anzahl an Weichen	38	26	55	29	54	15
Anzahl an Kreuzungen / Kreuzungsweichen	2	3	5	0	4	0
Anzahl an Fahrten	20	13	31	29	23	16
Verkettungszahl	0,4	0,46	0,27	0,39	0,32	0,69

Tabelle 3 - Entfernung zwischen Weichen und Bahnhofschnitt im Graphen

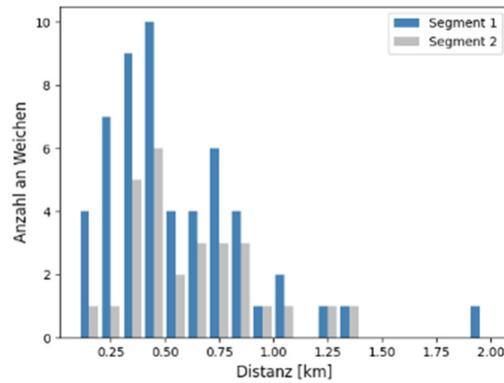
Bahnhof

Histogramm

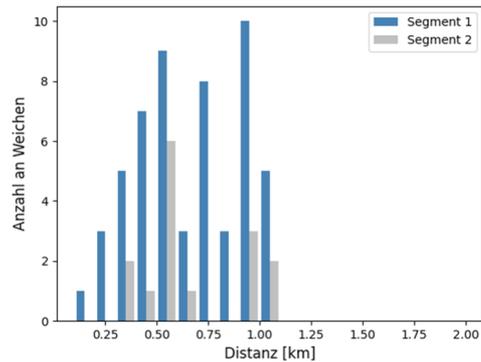
Braunschweig



Olten



Arnhem



Die Verteilung der Weichen in Abhängigkeit von der Distanz zum Bahnhofschnitt ist in Tabelle 3 gezeigt. In den Histogrammen sind diejenigen Weichen enthalten, die sich in

den Voronoi-Polygonen bis zu einem Abstand von 2km befinden, wobei die zwei Bahnhofssegmente separat dargestellt werden. Die maximale Distanz zwischen Weichen und Bahnhofsschnitt variiert bei den drei Fallbeispielen zwischen etwa 500m und 1,9km. Hierbei ist die Größe des Voronoi-Polygons zu berücksichtigen, das zum Beispiel bei dem Bahnhof in Arnhem vergleichsweise klein ist und somit keine Weichen enthält, die weiter als 1km vom Bahnhofsschnitt entfernt sind. Bei allen Bahnhöfen tritt die größte Häufung an Weichen in einer Distanz von etwa 500m zum Bahnhofsschnitt auf. Lediglich im ersten Segment von Arnhem ist die größte Anzahl an Weichen im ersten Segment in einem Abstand von etwa 1km zu finden, was auf den bereits erwähnten angrenzenden Rangierbahnhof zurückzuführen ist.

4.2 Simulationsergebnisse

Zur Demonstration der Wirkweise der auf einem simulativen Ansatz zur Quantifizierung der Betriebsqualität im Regel- und Störfall beruhenden Methodik wird der Braunschweiger Hauptbahnhof herangezogen. Als Fahrplan wurden Daten zur aktuellen Verkehrslage der DB [16] zugrunde gelegt.

Im Regelfall wurden die Effekte kleinerer Fahrplanunregelmäßigkeiten durch Einbruchsverspätungen abgebildet. Hierzu wurden für die Einbruchszeiten für die einzelnen Zugfahrten Verspätungen gemäß $U[0,10 \text{ min}]$ untersucht. Im Störfall wurde zusätzlich nach einer Vorlaufzeit von 500s eine zufällige Weichenstörung (Totalausfall) von 45min Dauer simuliert. Als Resultat müssen alle Zugfahrten, deren Fahrweg durch die Nicht-Verfügbarkeit der Weiche inkonsistent wird, umgeroutet werden. Fahrten mit konsistentem Fahrweg werden auf dem Regelfahrweg durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für die Simulation des leicht gestörten Ursprungsfahrplans (Regelbetrieb). Es ist ersichtlich, dass sich für die meisten Realisierungen ein ähnliches Bild und nahezu vergleichbare Ergebnisse ergeben. Die Schwankungen der durchschnittlichen Wartezeiten sind über die unterschiedlichen Realisierungen hinweg sehr gering. Insbesondere sind keine unvollständigen Routen / Zugausfälle zu beobachten, wie sie sich theoretisch aus einer durch eine ungünstige Verspätungskonstellation resultierenden Deadlocksituation ergeben könnten. Es ist augenscheinlich, dass geringe Verspätungen vorrangig zu Fahrtzeitverlusten, jedoch nicht zu Wartezeiten, d.h. Zeiten, in denen sich Zugfahrten im Stillstand befinden, führen. D.h. dass Zugfahrten durch die Signalisierung und Geschwindigkeitsüberwachung zwar eine gegenüber der Nominalgeschwindigkeit erhöhte Fahrzeit erhalten, jedoch nur äußerst selten vor Halt-zeigenden Signalen zum Stehen kommen. Eine mögliche Schlussfolgerung hieraus ist, dass sich durch das

Einspielen der Einbruchsverspätungen nur ein geringfügig gestörter Betrieb, ggf. auch bedingt durch die relativ geringe Gesamtauslastung des Knotens Braunschweig, ergibt und die Gesamtbetriebssituation als stabil betrachtet werden kann.

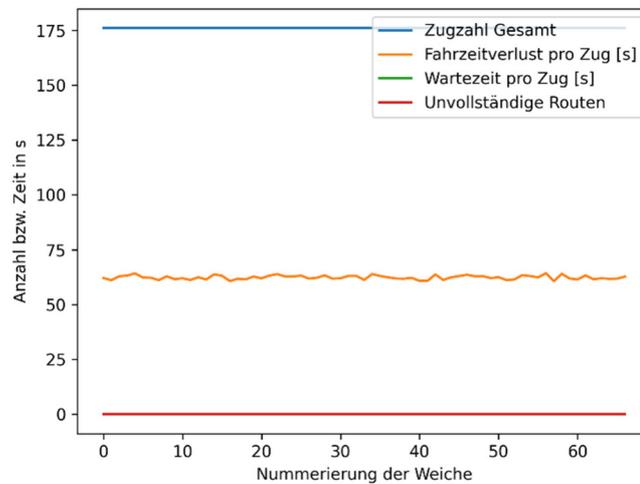


Abbildung 2: Mittlere Verspätung und Fahrzeitverluste im Regelfall

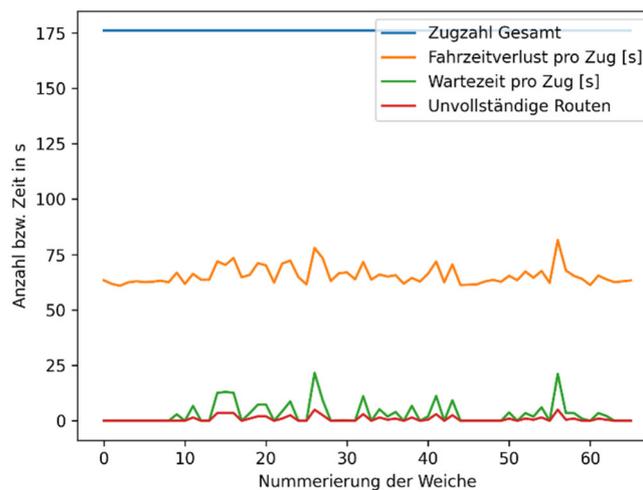


Abbildung 3: Mittlere Verspätung, Fahrzeitverluste, und nicht durchführbare Zugfahrten im Störfall

Im Störfall (vgl. Abbildung 3) ergibt sich ein differenzierteres Bild. Es zeigt sich, dass (erwartungsgemäß) nicht alle Weichenausfälle gleichermaßen kritisch sind. Während einige Ausfallszenarien zu einer erhöhten Zahl von Zugausfällen (bzw. inkonsistenten Routen) führen, sind bei anderen Szenarien von Weichenausfällen, die das Fahrplangeschehen nur geringfügig stören, Ergebnisse nahezu wie im Regelbetrieb gegeben. Es ist anzumerken, dass in der vorliegenden Studie bei Ausfällen, welche zur Nichtdurchführbarkeit von Zugfahrten aufgrund des Mangels konsistenter Fahrwege während der Durchfahrt

oder vor dem Einbruch des betrachteten Infrastruktursegments führen, diese Züge nicht entfernt werden. Letzteres würde zum gängigen statistischen Problem unrealistischer Verspätungskennwerte bis hin zu einer Verbesserung der Betriebsqualität durch geringere Auslastung führen. Stattdessen werden die entsprechenden Zugfahrten durchgeführt und mit einer Maximalwartezeit von 10min versehen, und anschließend am nächsten nutzbaren Routensegment fortgeführt.

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Effekte der unterschiedlichen Störungen ist in Abbildung 4 gegeben. Basierend auf dem Fahrzeitverlust werden die Effekte der unterschiedlichen Weichenausfälle vergleichend dargestellt, wobei die Farbskala linear zwischen dem Szenario mit dem höchsten bzw. dem niedrigsten Fahrzeitverlust erfolgt.

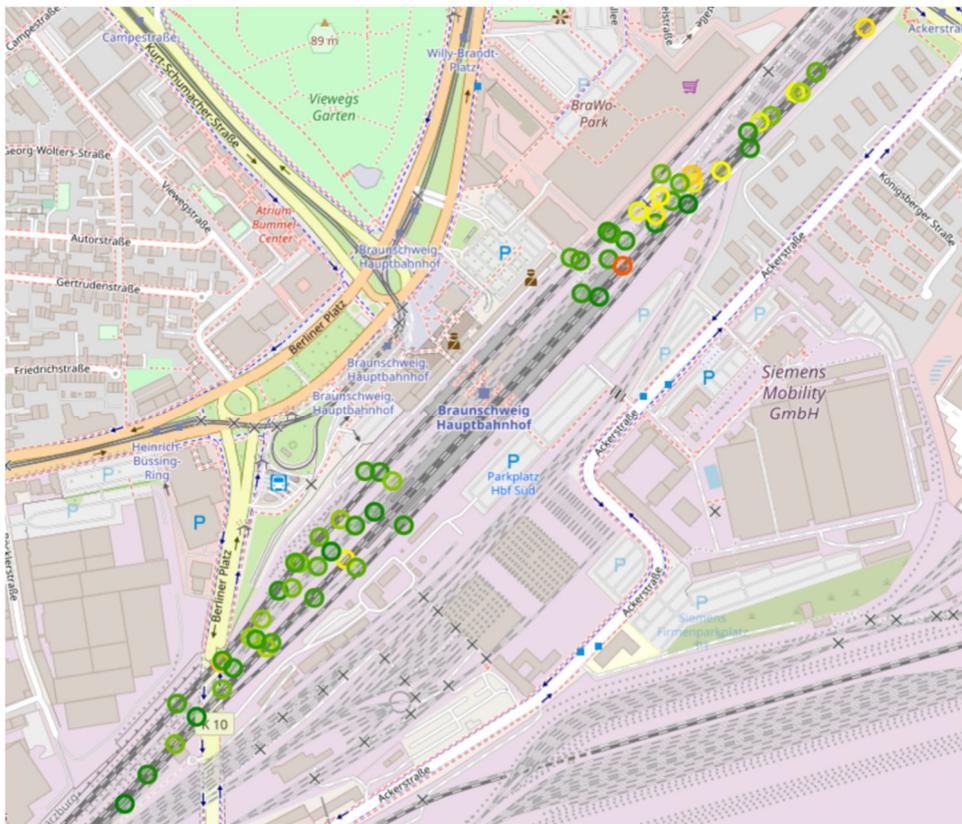


Abbildung 4: Kritikalität von Elementen, Map Data by © OpenStreetMap, under ODbL.

Es ist zu erkennen, dass insbesondere Weichen, die zur sechsten Bahnhoisplattform führen, sowie solche, die der Überleitung zwischen dem nördlichen und dem südlichen Bahnhoisbereich und folglich der Trennung zwischen den Kursbuchstrecken 1901 Braunschweig-Bad Harzburg und 1900 Braunschweig-Magdeburg dienen, bei Ausfällen zu erhöhten Fahrzeitverlusten führen. Auch wenn im Fahrplankonzept eine Brechung der öst-

lich und westlich verlaufenden Linien im Regionalverkehr stattfindet und dementsprechend keine Liniendurchbindung gegeben ist, so scheint doch gerade für den Störfall die zusätzliche Flexibilität in der Nutzbarkeit weiterer Gleise, welche durch die entsprechenden Weichen ermöglicht wird, bei der gewählten Dispositionsheuristik wichtig für die Betriebsqualität. Eine reine Linienorientierung mit weitgehender Vereinfachung der Gesamtfahrstraßenknoten birgt hier offensichtlich gerade im Störfall Risiken. Im Rahmen der vorliegenden Studie kann nicht abschließend geklärt werden, in wieweit diese Risiken durch die Nutzung anderer Dispositionsstrategien abgemildert werden können, jedoch wird durch die Ergebnisse aufgezeigt, dass bei der Planung von Gleisvorfeldern, insbesondere im Zuge der Migration zum Deutschland-Takt eine verzahnte Abbildung von Infrastrukturverfügbarkeitseinschränkungen und betrieblichen Abweichungen mitberachtet werden muss, um Risiken in der Betriebsdurchführung zu vermeiden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methodik ermöglicht die Charakterisierung von Gleislaysouts in Fahrstraßenknoten sowie die Analyse ihrer jeweiligen Störungsanfälligkeit. Für drei ausgewählte Fallbeispiele in Braunschweig, Olten und Arnhem wurden die Charakteristika mithilfe eines halbautomatisierten Vorgehens identifiziert und mit der Verkettung von Zugfahrten in Zusammenhang gebracht. Anhand der Simulation von Betriebs- und Störfällen konnte für den Bahnhof in Braunschweig beispielhaft aufgezeigt werden, wie die lokal vorhandene Gleisinfrastruktur die Betriebsabwicklung im Regel- und Störfall beeinflusst und wie sich durch die Topologie der Gesamtfahrstraßenknoten Nutzungseinschränkungen, gerade im Störfall, auswirken. Aus der resultierenden Effektanalyse können Rückschlüsse im Rahmen einer vergleichenden Evaluierung von Gleislaysouts für die Adaption von Bahnhofsinfrastrukturen für zukünftige Fahrplankonzepte – unter Berücksichtigung von Unsicherheiten im Betrieb – gezogen werden.

Um wesentliche Best Practices für die Gestaltung von Fahrstraßenknoten abzuleiten und somit Planungsprozesse von Infrastrukturanlagen in Personenbahnhöfen zu unterstützen, soll die vorgestellte Methodik zukünftig auf weitere Fallbeispiele angewendet werden. Insbesondere können – vergleichbar zum hier vorgestellten Beispiel Braunschweig Hbf – die integrierten Simulationsstudien zur Bewertung der Betriebsqualität bei leicht bzw. massiv gestörtem Fahrplan durch den internationalen Vergleich mit den anderen Fallbeispielen erweitert werden. Bereits am Beispiel Braunschweig ist jedoch ersichtlich, dass gerade im Störfall die Verfügbarkeit zusätzlicher Weichenverbindungen im Gesamtfahrstraßenknoten von großem Einfluss auf die Aufrechterhaltung des Betriebs ist.

Zukünftig soll die vorgestellte Methodik insbesondere mit unterschiedlichen Dispositionsmodellen auf Basis von Optimierungsmodellen bzw. KI-basierten Lösungen erweitert werden und der Einfluss bzw. die Limitationen von Dispositionsmodellen für die Aufrechterhaltung eines attraktiven Verkehrsangebots auch im Störfall detailliert untersucht werden. Die Nutzung von SUMO als performantes Simulations-Backend bietet hierbei auch die Möglichkeit, größere, über den zu untersuchenden Bahnhofsknoten hinausgehende Netzbereiche mikroskopisch zu simulieren und somit die Netzeffekte von Störungen, welche bisher oftmals lediglich mesoskopisch betrachtet werden, mit einzubeziehen. Zusammen mit der vergleichenden Betrachtung von Planungskonzepten im internationalen Kontext, können somit Best Practices im komplexen Zusammenspiel zwischen Infrastruktur, Verkehrsangebot und Disposition / Betriebssteuerung evaluiert werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Jakob Geischberger sowie Jakob Erdmann für die Unterstützung im Datenmanagement sowie der Umlegung von Bahnfahrplan- und -betriebskonzepten in der DLR-Verkehrssimulationssoftware SUMO.

Literatur

- [1] D. van de Velde, „Learning from the Japanese railways: Experience in the Netherlands,“ *Policy and Society*, pp. 143-161, 2013.
- [2] G. Potthoff, Verkehrsströmungslehre Bd. 3: Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen, Berlin: Transpress, 1980.
- [3] DB Netz AG, Richtlinie 405: Fahrwegkapazität, Frankfurt/Berlin, 2008.
- [4] G. Hertel, „Exakte Lösung zur Berechnung der Wartegleiszahl vor im Einrichtungsbetrieb,“ *Wissenschl. Zeitschrift Hochschule für Verkehrsw.* 31, 1984.
- [5] L. Jensen und A. Landex, „Measuring Robustness of Timetables at Stations using a Probability Distribution,“ in *in Proceedings 5th International Conference on Railway Operations Management and Analysis*, Copenhagen, 2013.
- [6] N. Weik, Long-term capacity planning of railway infrastructure - A stochastic approach capturing infrastructure unavailability, Aachen: PhD Thesis, 2020.
- [7] UIC, „UIC Code 406 - Capacity,“ Paris, 2013.

- [8] N. Weik, I. W. J. Johansson, M. Bohlin und N. Nießen, „Extending UIC 406-based Capacity Analysis - New Approaches for Railway Nodes and Network Effects,“ *Journal of Rail Transport Planning & Management* 15, 100199, 2020.
- [9] P. Jovanovic, N. Pavlopvic, I. Belosevic und S. Milinkovic, „Graph coloring-based approach for railway station design analysis and capacity determination,“ *European Journal of Operational Research* 287 (1), S. 348-360, 2020.
- [10] G. Voronoï, „Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques,“ *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 1908.
- [11] N. Nießen, Leistungskenngrößen für Gesamtfahrstraßenknoten, Aachen: Dissertation, RWTH Aachen, 2008.
- [12] P. Alvarez Lopez et al., „Microscopic Traffic Simulation using SUMO,“ in *in Proc. 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2018.
- [13] E. Wießner, J. Erdmann, L. Flamm und B. Jäger, „Auf Straße und Schiene mobil – intermodale Verkehrssimulation mit SUMO,“ *Signal & Draht* 11, S. 49-55, 2018.
- [14] J. Erdmann, „Simulation als Baustein für KI Anwendung in der Disposition von digitalen Eisenbahnknoten,“ in *DER ZUG ZUR DIGITALISIERUNG*, online, 2022.
- [15] DLR, „SUMO Documentation: Simulation / Railways,“ 17.07.2023. [Online]. <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Railways.html>. [Zugriff am 14.08.2023].
- [16] DB, „API Marketplace - Timetables,“ 2023. [Online]. <https://developers.deutschebahn.com/db-api-marketplace/apis/product/timetables>. [Zugriff am 21.03.2019].

Autoren**Krips, Maike**

Maike Krips beendete 2020 ihr Ingenieurstudium an der Leibniz Universität Hannover und arbeitete als Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Braunschweig, wo sie sich mit der Anwendung von Machine Learning Algorithmen in der Medizinischen Informatik beschäftigte. Seit 2022 ist sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig tätig. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen dort in der Optimierung des Betriebsgeschehens durch vernetzte Fahrerassistenzsysteme sowie in der Infrastrukturplanung für den Bahnbetrieb.

**Weik, Norman**

Norman Weik studierte Mathematik und Physik am KIT in Karlsruhe. Nach seiner Promotion am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen zum Themenfeld Kapazität und Infrastrukturverfügbarkeit, wechselte er 2020 ans DLR Institut für Verkehrssystemtechnik, wo er eine Schnittstellenfunktion zwischen den Gruppen Bahnbetrieb und Anlagenmonitoring innehatte. Im September 2023 wurde er an die TU München berufen, wo er die Professur für Planung und Betrieb von Schienenverkehrssystemen leitet.

**Meirich, Christian**

Christian Meirich ist am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik als Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Bahnbetrieb seit August 2017 tätig. Er schloss sein Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen 2017 mit der Promotion am Verkehrswissenschaftlichen Institut im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaften ab. Sein derzeitiger Arbeitsschwerpunkt liegt im Bereich Verkehrsbewertung mit Schwerpunkt betrieblicher Fragestellungen des Eisenbahnsystems. Weiterer Fokus der Arbeit ist die Verbesserung des Eisenbahnbetriebs durch Digitalisierung und Automatisierung.