

IRSA 2025

TAGUNGSBAND
PROCEEDINGS



© davis/fotolia

5th International Railway Symposium Aachen

Aachen, Germany

19 - 20 November 2025

VERANSTALTER / ORGANISER



PARTNER



Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

Approximation von Bediensystemen zur Leistungsfähigkeitsbestimmung von Eisenbahninfrastruktur in Bahnhöfen

Emunds, Tamme¹ and Nießen, Nils¹

¹RWTH Aachen University, Verkehrswissenschaftliches Institut

Zusammenfassung

Die existierenden bedientheoretischen Methoden zur Leistungsfähigkeitsbetrachtung von Eisenbahninfrastruktur in Bahnhöfen beschreiben bisher insbesondere die isolierte Leistungsfähigkeit von Gleisgruppen oder Gesamtfahrstraßenknoten. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Analyse der gesamten Infrastruktur im Bahnhofsbereich vorgestellt. Dazu werden die Ankunfts- und Abfahrtsprozesse in den Gesamtfahrstraßenknoten approximiert und zusammen mit den Verkehrshalten in der Gleisgruppe in einem kombinierten Bediensystem beschrieben. Dieses kann als zeitkontinuierliche Markov-Kette dargestellt und mit Hilfe von probabilistischem Model-Checking analysiert werden. Mit der hier beschriebenen Approximationsmethode können erstmals Kennzahlen zur Leistungsfähigkeit gesamter Bahnhöfe mit einer hohen Anzahl an Fahrstraßen berechnet werden. Die errechneten Kennzahlen bieten eine wichtige Entscheidungsgrundlage für Infrastrukturbetreiber zur Langfrist-Analyse von Infrastrukturmaßnahmen.

Keywords: Leistungsfähigkeit, Infrastrukturdimensionierung, Bediensystem, zeitkontinuierliche Markov-Kette

1. Einleitung

Zur strategischen Planung der Weiterentwicklung von Eisenbahnnetzen ist die frühzeitige Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahninfrastruktur von großer Bedeu-

*Session 1**Tamme Emunds, Nils Nießen*

tung. In vielen Fällen wird die Infrastruktur für mehrere Dekaden geplant, es ist dementsprechend essentiell fahrplanunabhängige Methoden zur Bewertung von Eisenbahninfrastruktur einzusetzen. Strecken und Knoten können zur fahrplanunabhängigen Planung mit Bediensystemen modelliert werden. Während Strecken als einkanalige Systeme analysiert werden können, erfordert die Bewertung von Bahnhöfen die Modellierung von komplexeren Bediensystemen.

Zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten in Bahnhöfen werden diese in Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen (vgl. [4]) in *Gleisgruppen* (GG) und *Gesamtfahrstraßenknoten* (GFK) aufgeteilt. Eine Gleisgruppe beschreibt dabei den Bereich eines Knotens, in welchem sich die Gleise für Verkehrshalte und Wartevorgänge befinden. Die Gleisgruppe schließt an einem (Kopfbahnhof) oder mehreren Enden an Gesamtfahrstraßenknoten an, in welchen die eingehenden Streckengleise auf die unterschiedlichen Gleise der Gleisgruppe und *durchgehenden Hauptgleise* (HG) aufgeteilt werden. Im Gegensatz zu den Gleisen in der Gleisgruppe sind in großen Knoten auf den durchgehenden Hauptgleisen keine planmäßigen Halte zulässig.

Die Leistungsfähigkeit von Gleisgruppen kann mit mehrkanaligen Bediensystemen [15, 11] untersucht werden, in welchen jedes Gleis einen parallelen Bedienkanal darstellt. Für die Berechnung der planmäßigen Wartezeiten auf Gesamtfahrstraßenknoten müssen nicht nur parallele Bedienungen, sondern insbesondere auch Konflikte von unterschiedlichen Fahrstraßen modelliert werden. Die Belegungskonflikte werden entweder über die Verwendung eines einkanaligen Ersatzsystems [18, 19] aufgelöst oder detailliert auf Ebene von Teilfahrstraßenknoten [13, 16] oder Fahrwegen [6] betrachtet.

Um eine Berechnung der planmäßigen Leistungsfähigkeit im Gesamtsystem aus Gleisgruppe und Gesamtfahrstraßenknoten zu ermöglichen, wird in [7] der Ansatz aus [6] zur Leistungsfähigkeitsanalyse von Abzweigstellen weiterentwickelt. Dabei wird für jeden Fahrweg ein eigenes Bediensystem (mit den drei Bedienprozessen Einfahrt, Halt und Ausfahrt und eigenem Ankunftsprozess) eingeführt, um eine genaue Engpassanalyse zu ermöglichen. Andere bedientheoretische Methoden zur Analyse der Leistungsfähigkeit von gesamten Eisenbahnknoten nutzen entweder Simulationen zur Kalkulation eines Warteschlangennetzwerks in Güterverkehrsknoten [1], oder approximieren die außerplanmäßigen Wartezeiten durch die Einführung zusätzlicher Wartezeiten zur Modellierung von Bedienkonflikten in Gesamtfahrstraßenknoten [8].

*Session 1**Tamme Emunds, Nils Nießen*

Das existierende Modell aus [7] ermöglicht zwar die Berechnung fahrwegsscharfer Leistungskennzahlen, der Berechnungsaufwand steigt aber exponentiell mit der Anzahl der betrachteten Fahrwege. Im Folgenden soll dieses Modell deshalb so angepasst werden, dass eine Berechnung unabhängig von der Größe des betrachteten Knotens möglich ist.

In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren zur Analyse der planmäßigen Leistungsfähigkeit von gesamten Bahnhöfen vor. Dabei werden die Gesamtfahrstraßenknoten mit Hilfe der Verkettungsmethode nach Schwanhäüßer [17] abstrahiert und die entstehenden Bedienprozesse in einem gemeinsamen Modell mit den Bedienprozessen auf der Gleisgruppe kombiniert. Das Gesamtsystem wird in einem Bediensystem modelliert und als zeitkontinuierliche Markov-Kette dargestellt. Darüber können unterschiedliche Kennzahlen zur planmäßigen Leistungsfähigkeit der analysierten Bahnhofsinfrastruktur errechnet werden.

Abschnitt 2 führt dazu zunächst die Modellierung von Eisenbahnknoten als Bediensystem ein. Ein Fokus liegt darin auf der Approximation des Gesamtsystems (2.2) und der Formulierung als Markov-Kette (2.3.1). Anschließend wird die Methode am Beispiel des Knotens *Aachen Hbf* getestet und mit den etablierten Verfahren zur isolierten Betrachtung der GFKs und GG verglichen (Abschnitt 3). In Abschnitt 4 folgt eine Diskussion der erzielten Ergebnisse, sowie die Entwicklung der sich aus den Ergebnissen ergebenden Forschungsfragen.

2. Bediensysteme zur Analyse von Eisenbahnknoten

In diesem Abschnitt wird das bedienungstheoretische Modell zur Leistungsanalyse von Bahnhöfen eingeführt.

2.1. Bediensysteme zur Kapazitätsanalyse

Ein Bediensystem ist ein formales Modell zur Beschreibung von Ankunfts- und Bedienprozessen von den verschiedenen Objekten in einem System. Im Rahmen der Anwendung zur Bestimmung der planmäßigen Leistungsfähigkeit werden dabei Anfragen der Eisenbahnverkehrsunternehmen zur Belegung der zur Verfügung stehenden Infrastruktur als Objekte betrachtet. Eine Belegungsanfrage stellt somit die Forderung nach einer Trasse für eine Zugfahrt dar, im Folgenden bezeichnen wir Anfragen auch als Züge. Die Anfra-

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

gen beschreiben sowohl einen Ankunftszeitpunkt, zu dem die Belegung starten soll, als auch die geplante Dauer der Belegung, die *Bedienzeit*. Die Zeit zwischen zwei Ankunftszeitpunkten wird im Folgenden als *Zwischenankunftszeit* bezeichnet. Da sowohl der Ankunftszeitpunkt als auch die Bedienzeit der Anfragen als zufällig verteilt angenommen werden, werden Ankunfts- und Bedienprozess eines Bediensystems mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert. Außerdem können für das Bediensystem eine Anzahl k an parallelen Bedienkanälen und eine Anzahl m an Wartepositionen, an denen eingetroffene aber noch nicht bediente Anfragen warten können, vorgegeben werden. Eine grundlegende Einführung in Bediensysteme und Anwendungen in der Verkehrswissenschaft ist beispielsweise in [9] zu finden.

In analytischen Kapazitätsuntersuchungen wird der Ankunftsprozess durch die mittlere Zwischenankunftszeit t_A sowie den Variationskoeffizienten v_A , und der Bedienprozess durch die mittlere Bedienzeit t_B sowie den Variationskoeffizienten v_B beschrieben. Das Modell unterstellt dabei Ankunftsrate $\lambda = \frac{n_{\text{ges}}}{U}$, welche die Anzahl aller Anfragen n_{ges} im Zeithorizont U darstellen, und Bedienrate $\mu = \frac{1}{t_B}$.

Eine wichtige Kennzahl, der *Belegungsgrad* $\rho = \frac{\lambda}{k \cdot \mu}$, beschreibt die Auslastung des Bediensystems. Aufgrund der Zufälligkeit der Ankunfts- und Bedienprozesse kann sich eine Warteschlange vor der Bedienung im System bilden, die erwartete *Länge der Warteschlange* L ist eine weitere Kennzahl für das Bediensystem. Für ein Bediensystem mit einer begrenzten Anzahl an Wartepositionen $m < \infty$ können nur begrenzt viele Forderungen in der Warteschlange warten; Forderungen, die bei voller Warteschlange ankommen, verlassen das System ohne Bedienung. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine ankommende Forderung nicht direkt bedient werden kann, wird als *Wartewahrscheinlichkeit* p_W bezeichnet.

Für einkanalige ($k = 1$) Bediensysteme mit exponentialverteilten Zwischenankunfts- und Bedienzeiten (M/M) lassen sich die geschlossene Formel $L_{M/M/1} = \frac{\rho^2}{1-\rho}$ zur Berechnung der Warteschlangenlänge L und $p_W = \rho$ als Ausdruck der Wartewahrscheinlichkeit angeben.

Zur Analyse von Bediensystemen mit beliebigen, stoch. unabhängigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für den Ankunfts- und Bedienprozess (GI/GI) existieren Approximationsformeln. Beispielsweise kann mit der Formel von Pollaczek-Chintchin [14, 9] die

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

erwartete Länge der Warteschlange

$$L_{M/GI/1} = \frac{\rho^2}{1-\rho} \cdot \frac{1+v_B^2}{2} = L_{M/M/1} \cdot \frac{1+v_B^2}{2} \quad (1)$$

in einem einkanaligen M/GI System berechnet werden. Für mehrkanalige $k \in \mathbb{N}$ GI/GI Systeme kann die Formel von Hertel verwendet werden. Sie beschreibt die erwartete Länge der Warteschlange

$$L_{GI/GI/k} \approx L_{M/M/k} \cdot \frac{1}{\gamma}, \quad (2)$$

in Abhängigkeit von

$$\gamma = \frac{2}{c \cdot v_B^2 + v_A^2} \quad (3)$$

und

$$c = \left(\frac{\rho}{k}\right)^{1-v_A^2} \cdot (1+v_A^2) - v_A^2. \quad (4)$$

Um die Kennzahlen von komplexeren Bediensystemen zu berechnen, können Bediensysteme mit exponentialverteilten Ankunfts- und Bedienprozessen (M/M) als zeitkontinuierliche Markov-Ketten dargestellt werden. Die Kennzahlen können dann als Kombination von Zustandswahrscheinlichkeiten im stationären Zustand ausgedrückt werden.

Eine entsprechende Markov-Kette zur Analyse der Kennzahlen des hier betrachteten Bahnhof-Bediensystems wird in Abschnitt 2.3.1 beschrieben. Zunächst wird die Modellierung der Prozesse innerhalb eines Eisenbahnknotens eingeführt.

2.2. Modellierung von Eisenbahnknoten

Betrachten wir die Infrastruktur eines Beispielbahnhofs, der aus zwei Gesamtfahrstraßenknoten (GFK) West (W) und Ost (O), einer Gleisgruppe (GG) und zwei durchgehenden Hauptgleisen (HG) besteht.

In Abbildung 1 wird die Modellierung des Beispiel-Bahnhofs aus Abschnitt 3 als kombiniertes Bediensystem skizziert. Die verschiedenen Fahrstraßen eines Bahnhofs können anhand des in ihrer Einfahrt verwendeten GFK, sowie der Angabe ob sie in der Gleisgruppe halten (bzw. wenden) oder auf den Hauptgleisen ohne Halt durchfahren, zu Strömen zusammengefasst werden. Dabei kann entweder ein GFK zur Einfahrt und der andere zur Ausfahrt genutzt werden, oder, durch die Durchführung einer Wende in der Gleisgruppe,

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

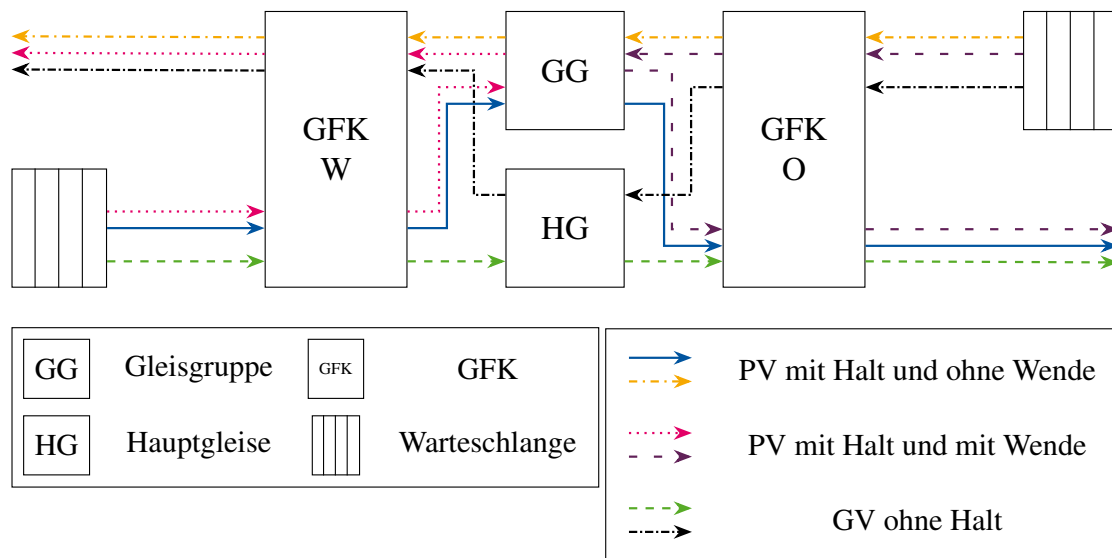


Abbildung 1: Skizze der möglichen Ströme für den Bahnhof aus Abschnitt 3 mit einer Gleisgruppe, zwei durchgehenden Hauptgleisen und zwei Gesamtfahrstraßenknoten (GFKs).

derselbe GFK für Ein- und Ausfahrt benutzt werden. Die mehrkanalige Gleisgruppe steht dabei für alle haltenden Anfragen zur Verfügung; Züge ohne planmäßigen Halt werden auf den durchgehenden Hauptgleisen geplant.

Der Bedienprozess einer Anfrage lässt sich dementsprechend in die drei Phasen Einfahrt, Halt und Ausfahrt aufteilen. Für Anfragen ohne planmäßigen Halt werden nur die beiden Phasen zur Ein- und Ausfahrt betrachtet. Wir bezeichnen die Bedienzeiten in den einzelnen Phasen als Einfahrtsperrzeit t_B^{Ein} , Haltezeit t_B^{Halt} und Ausfahrtsperrzeit t_B^{Aus} . Die Sperrzeiten sollten typischerweise aus einem mikroskopischen Modell errechnet werden, siehe bspw. [10]. Falls keine mikroskopischen Daten verfügbar sind, müssen die Sperrzeiten geschätzt werden. Die Haltezeiten können beispielsweise aus historischen Daten oder Fahrplänen in ähnlichen Knotenpunkten für die einzelnen Verkehrsarten und unter Beachtung der geforderten Wenden geschätzt werden.

Insgesamt können Forderungen aus zwei verschiedenen Ankunftsströmen in das System eintreten, wir bezeichnen die Anzahl Anfragen mit n_W^{An} (GFK W) und n_O^{An} (GFK O). Anhand der *Durchfahrtswahrscheinlichkeit* $p_G^{\text{HG}} = n_G^{\text{HG}} / n_G^{\text{An}}$, welche den Anteil der durchfahrenden Züge $n_{G, \text{HG}}$ beschreibt, können die ankommenden Anfragen an einem GFK G auf die Gleisgruppe und die Hauptgleise aufgeteilt werden. Analog beschreibt die *Wendewahrscheinlichkeit* p_G^{Wende} den Anteil der wendenden Zugfahrten in der Gleisgruppe an

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

der Gesamtzahl der über GFK G ankommenden Anfragen.

In der hier diskutierten Modellierung des Gesamtsystems werden die Bedienprozesse der Ein- bzw. Ausfahrt auf den Gesamtfahrstraßenknoten A und B durch jeweils ein einkana-
liges Bediensystem approximiert.

2.3. Kombinierte Modellierung des Gesamtsystems

Das in Abbildung 1 dargestellte Gesamtsystem eines Bahnhofs wird im Folgenden als Markov-Kette beschrieben. Im Anschluss wird die Methode zur Berechnung der Leistungsfähigkeitskennzahlen kurz erläutert.

Im Modell werden die Ankunftsraten $\lambda_W^{\text{An}} = n_W^{\text{An}}/U$ und $\lambda_O^{\text{An}} = n_O^{\text{An}}/U$ an den beiden GFKs, sowie der dreigeteilte Bedienprozess mit Bedienraten μ_B^{Ein} , μ_B^{Halt} und μ_B^{Aus} betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Approximation aus Abschnitt A für einen GFK G dieselbe Bedienrate $\mu_{B,G}$ sowohl für die Ein- als auch für die Ausfahrt unterstellt wird. Weiterhin bezeichnen wir die Anzahl der Gleise in der Gleisgruppe mit k_{GG} .

2.3.1. Formulierung als zeitkontinuierliche Markov-Kette

Die zeitkontinuierliche Markov-Kette zur Modellierung des zuvor beschriebene Bediensystems kann über ihre Zustandsmenge S und allen Übergängen U zwischen den Zuständen beschrieben werden. Dabei kann ein Zustand $s = (s_{\text{GFK O}}, s_{\text{GFK W}}, s_{\text{GG}}, s_{\text{HG}}) \in S$ als Tupel der Einzelsystemzustände $s_{\text{GFK O}}$, $s_{\text{GFK W}}$, s_{GG} , s_{HG} beschrieben werden.

Die Eigenschaften des Teilzustands $s_{\text{GFK O}} = (q_O, q_O^n, e_O, d_O)$ von GFK O (und analog von GFK W) beschreiben die Anzahl der aktuell auf Einfahrt wartenden Forderungen $q_O \in [m]_0 = \{0, \dots, m\}$, sowie die Tatsache, ob die nächste Forderung in der Warteschlange durchfährt $q_O^n = 1$, oder in der Gleisgruppe hält $q_O^n = 0$. Außerdem wird für haltende Züge beschrieben, ob der GFK zum aktuellen Zeitpunkt über eine einfahrende $e_O = 1$ oder ausfahrende $d_O = 1$ Zugfahrt belegt ist oder gerade keine entsprechende Belegung ($e_O = d_O = 0$) erfolgt.

Für den Gleisgruppenzustand $s_{\text{GG}} = (tr_O, tr_W, tr_O^w, tr_W^w)$ wird die Anzahl der aktuell haltenden Züge mit Ausfahrt über GFK O $tr_O \in [k_{GG}]$ oder GFK W $tr_W \in [k_{GG}]$ nachgehal-

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

ten. Forderungen, die bereits ihre Mindesthaltezeit eingehalten haben und auf Ausfahrt warten, werden ebenfalls nach Ausfahrtrichtung getrennt über $tr_O^w, tr_W^w \in [k_{GG}]$ modelliert. Über den Zustand der Hauptgleise $s_{HG} = (hg_O, hg_W)$ lässt sich nachhalten, in welcher Bedienphase sich die Hauptgleise aus Richtung GFK O (oder analog GFK W) befinden. Sie können entweder aktuell nicht in Bedienung sein $hg_O = 0$, oder einen durchfahrenden Zug $hg_O \in \{1, 2\}$ in einer der beiden Bedienungsphasen beschreiben. Dabei ist die Bedienung in zwei Phasen aufgeteilt, um die Bedienzeiten der einkanaligen Ersatzsysteme für die beiden GFKs getrennt zu betrachten. Zur Durchfahrt eines Zuges sind aber immer beide GFKs für anderweitige Nutzung gesperrt.

Die in den Zuständen beschriebenen Eigenschaften der mehrkanaligen Gleisgruppe und der als einkanalig approximierten GFKs werden über die Übergänge im Markov-Ketten-Modell miteinander verknüpft. Eine genaue Auflistung aller Übergänge und der entsprechenden Übergangsraten ist in Anhang B angegeben.

2.3.2. Berechnung von Leistungsfähigkeitskennzahlen

Mit Hilfe der im vorherigen Abschnitt beschriebenen zeitkontinuierlichen Markov-Kette, können Kennzahlen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems berechnet werden. Dafür werden die Kennzahlen in Abhängigkeit von den Zustandswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette im stationären Zustand ausgedrückt. In dieser Arbeit verwenden wir die Methodik aus [6, 7] und benutzen das Python-Modul `stormpy` [12] um die Kennzahlen mit Hilfe von Algorithmen zum probabilistischem Model-Checking zu erhalten.

Das über die Markov-Kette formalisierte System beschreibt dabei lediglich exponentialverteilte Übergangszeiten. Zur Approximation der unterstellten *GI* Ankunfts- und Bedienprozesse benutzen wir die Formeln von Hertel aus (2)-(4). Für die Schätzung der erwarteten Warteschlangenlänge verwenden wir einen Parameter von $k = 1$ und für die Schätzung der Wartewahrscheinlichkeit unterstellen wir ein $k = k_{GG}$ -kanaliges Bediensystem. Hierbei ist anzumerken, dass die Approximationsformeln (2)-(4) von Hertel primär zur Abschätzung der Warteschlangenlänge geeignet ist. Da sich die Wartewahrscheinlichkeit proportional zur Warteschlangenlänge verhält, benutzen wir die Formel aus (2) aber auch zur Approximation der Wartewahrscheinlichkeit.

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

Um eine Einschätzung über die Leistungsfähigkeit zu ermitteln, vergleichen wir die errechneten Warteschlangenlängen und Wartewahrscheinlichkeiten mit den Grenzwerten aus [4]. Dabei wird für die Warteschlangenlänge ein Grenzwert (vgl. [18, 4]) von

$$L_{\max} = 0.479 \cdot \exp(-1.3p_{Rz}) \cdot 1/\varphi, \quad (5)$$

in Abhängigkeit von dem Anteil der Personenzüge p_{Rz} am Betriebsprogramm und der Verkettungszahl φ des Gesamtfahrstraßenknotens (siehe Anhang A), unterstellt. Für die Wartewahrscheinlichkeit in Personenbahnhöfen wird ein Grenzwert von $p_{W,\max} = 0.05$ festgesetzt. Der Quotient aus errechneter Kennzahl und Grenzwert wird im Folgenden als *Qualitätsfaktor* bezeichnet. Die optimale Qualität ist bei einem Qualitätsfaktor von 1.0 erreicht, Werte darüber deuten auf eine zu geringe Leistungsfähigkeit für das unterstellte Betriebsprogramm, während ein Qualitätsfaktor deutlich unter 1.0 für eine unwirtschaftliche Planung spricht.

Im nächsten Abschnitt werden die für ein Anwendungsbeispiel so errechneten Kennzahlen des Gesamtsystems mit den Kennzahlen zu isoliert betrachteter Gleisgruppe und Gesamtfahrstraßenknoten verglichen.

3. Anwendungsbeispiel

Zur Anwendung der skizzierten Methode betrachten wir im Folgenden die Infrastruktur von *Aachen Hbf*. Im Anhang C sind der Gleisplan und ein Beispiel-Fahrplan für eine Stunde im Juli 2025 zu finden. Damit wurde ein Betriebsprogramm mit zugehörigen Fahrstraßen und entsprechenden Konflikten konstruiert. Außerdem wurden die Sperrzeiten für Aus- und Einfahrten geschätzt. Die hier ermittelten Aussagen zur Leistungsfähigkeit sind also nicht unbedingt als repräsentativ für die tatsächliche Infrastruktur zu bewerten.

Insgesamt sind für die analysierte Spitzenstunde 17 Zugfahrten angefragt. Davon kommen 7 über den GFK O aus Richtung Rothe Erde (ARE) und 10 über den GFK W aus Richtung Belgien (BEL) oder Aachen-Schanz (ASZ) in das Gesamtsystem an.

Die entsprechenden Ankunftsdaten können zusammen mit anderen Eingangsparametern der Tabelle 1 entnommen werden. Alle Parameter wurden auf Grundlage der Daten aus Anhang C konstruiert. Für den Variationskoeffizient der Bedienung in den GFKs wurden die Variationskoeffizienten der drei Teilprozesse Einfahrt, Halt und Ausfahrt mit der Me-

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

Tabelle 1: Parameter für GFK Ost, GFK West und GG

Parameter	GFK Ost	GFK West	GG
Ankunftsrate [λ]	0.117	0.167	0.250
Bedienrate [μ]	0.690	0.632	0.078
Wendewahrscheinlichkeit [p_G^{Wende}]	0.333	0.556	–
Durchfahrtswahrscheinlichkeit [p_G^{HG}]	0.143	0.100	–
Variationskoeff. Ankunft	0.494	0.733	–
Variationskoeff. Bedienung	0.949	0.958	0.876
Variationskoeff. Haltezeit	–	–	0.876
Anzahl Gleise	–	–	7
Verkettungszahl [φ]	0.6327	0.52	–

thode aus [7] kombiniert. Im Fall der isolierten Betrachtung mit der Verkettungs-Methode nach Abschnitt A wurde für jeden GFK der entsprechende Variationskoeffizient der verketteten Belegungen im GFK benutzt. Dieser beträgt 0.973 für GFK West und 0.855 für GFK Ost.

Das Gesamtsystem wurde mit Hilfe der in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten zeitkontinuierlichen Markov-Kette mit einer Anzahl von $m = 10$ Wartepositionen pro GFK modelliert, die entsprechende Markov-Kette besteht aus 1,449,096 Zuständen und 7,798,208 Übergängen. Das probabilistische Model-Checking benötigte auf einem Computer (i7-1260P mit 8x 2.1 Ghz und 16GB RAM) insgesamt ca. 40s zur Berechnung aller verwendeten Kennzahlen pro Szenario. Zur Visualisierung der Staueffekte wurden die Kennzahlen für Szenarien mit verschiedenen Zugzahlen zwischen 1.7 und 34 berechnet, wobei lediglich die Ankunftsraten proportional verändert wurden. Die relative Aufteilung der Verkehrsmenge auf die verschiedenen Ströme durch den Knoten wurde dabei nicht verändert.

In den folgenden Abschnitten werden die berechneten Kennzahlen beschrieben und mit den Kennzahlen der isolierten Betrachtungen verglichen.

3.1. Vergleich der erwarteten Warteschlangenlänge

Zunächst betrachten wir die über das Gesamtsystem errechnete Länge der Warteschlange $L_{GI/GI}$ vor den beiden Gesamtfahrstraßenknoten. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse für GFK Ost (Abbildung 2a) und West (Abbildung 2b) jeweils im Vergleich mit der Warteschlangenlänge $L_{M/GI}$ des isolierten einkanaligen Ersatzsystems (vgl. Anhang A)

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

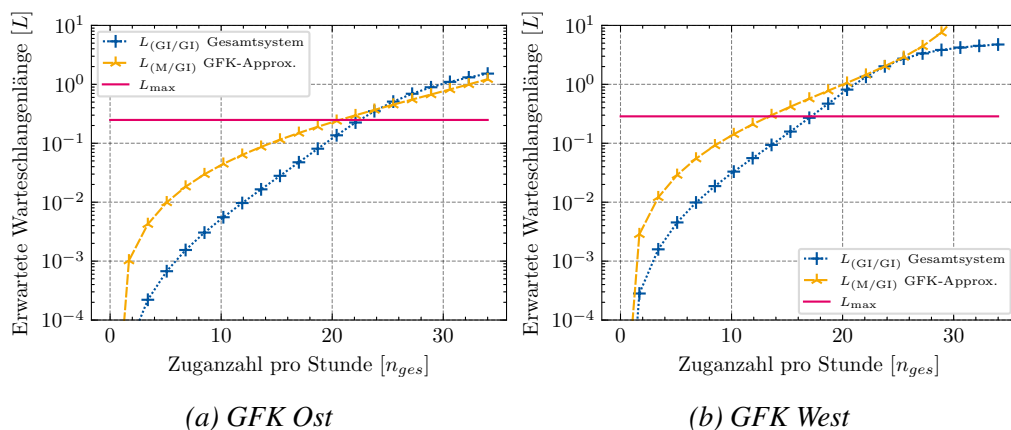


Abbildung 2: Vergleich der erwarteten Warteschlangenlänge für die GFKs Ost und West in der kombinierten Berechnung mit der Ersatzsystem-Approximation für den jeweils einzelnen GFK.

dargestellt.

Die erwarteten Warteschlangenlängen sind für beide Methoden am GFK West deutlich höher als am GFK Ost. Das ist in erster Linie durch die Unterschiede in der Zugzahl des unterstellten Betriebsprogramms zu erklären, im GFK West müssen ca 40% mehr Anfragen bearbeitet werden. Zusätzlich ist die verkettete Bedienrate von GFK West noch etwas geringer als die Bedienrate in GFK Ost.

Im Vergleich der beiden Methoden lässt sich für beide GFKs außerdem noch beobachten, dass mit der Betrachtung des Gesamtsystems eine geringere Warteschlangenlänge als mit der isolierten Betrachtung des einzelnen GFKs errechnet wurde. Die Erklärung dafür liegt in der Modellierung des Gesamtsystems: Anfragen, welche den betrachteten GFK zur Ausfahrt aus der Gleisgruppe belegen möchten, können auf ihrem Haltegleis auf die Ausfahrt warten. Die Gleisgruppe dient also neben dem Verkehrshalt auch als zusätzlicher Wartebereich, der die Staueffekte vor stark ausgelasteten GFKs abfedern kann. In der isolierten Betrachtung werden die auf Ausfahrt wartenden Forderungen hingegen zusammen mit den einfahrenden Forderungen in der gemeinsamen Warteschlange vor der Bedienstelle gesammelt. Diese Abhängigkeitseffekte zwischen GFK und GG sind somit lediglich durch eine integrierte Betrachtung von GFK und GG analysierbar.

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

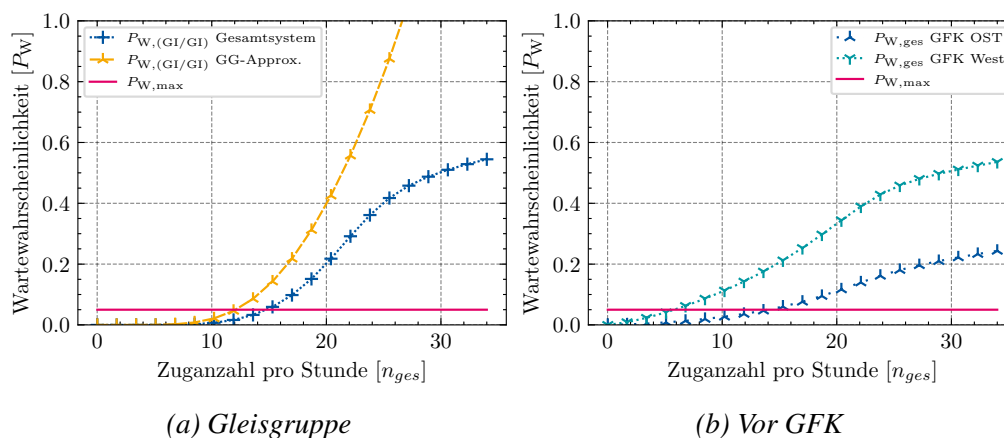


Abbildung 3: Vergleich der Wartewahrscheinlichkeit in der Gleisgruppe zwischen dem Gesamtsystem und der isolierten Betrachtung (a), sowie Vergleich der Wartewahrscheinlichkeit bei Ankunft an GFK Ost/West in der kombinierten Berechnung (b).

3.2. Vergleich der Wartewahrscheinlichkeit

Die Leistungsfähigkeit der Gleisgruppe wird in [4] über die Kennzahl der Wartewahrscheinlichkeit beschrieben. In Abbildung 3a ist diese für die beiden untersuchten Methoden in Abhängigkeit von der Gesamtzuganzahl aufgeführt. Darin ist im Vergleich mit der Gesamtsystembetrachtung für die isolierte Berechnung ein stärkerer Anstieg der Wartewahrscheinlichkeit zu beobachten.

Beide Methoden geben die Wahrscheinlichkeit wieder, dass alle Gleise der Gleisgruppe durch haltende, auf Ausfahrt wartende oder bereits einfahrende Züge belegt sind. In der isolierten Betrachtung besteht die Bedienzeit in der mehrkanaligen Gleisgruppe dabei nicht nur aus der Mindesthaltezeit, wie im Gesamtsystem, sondern zusätzlich aus der Ein- und Ausfahrsperrzeit. Im Gesamtsystem sind die Gleise der GG zwar auch für die Ein- und Ausfahrt der haltenden Züge belegt, allerdings ist lediglich nur eine Ein- oder Ausfahrt pro GFK gleichzeitig möglich.

Dementsprechend entstehen Staueffekte schon vor den GFKs, eine Auswertung der entsprechenden Wartewahrscheinlichkeiten ist in Abbildung 3b gegeben. Ähnlich zur Wartewahrscheinlichkeit (Abschnitt 3.1) ist auch hier die höhere Auslastung des westlichen GFKs deutlich zu beobachten.

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

3.3. Bestimmung der planmäßigen Leistungsfähigkeit

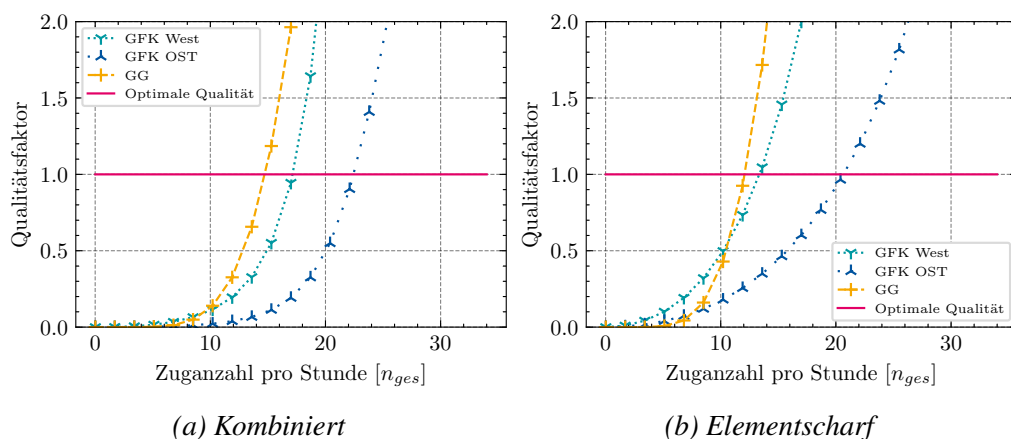


Abbildung 4: Der erwartete Qualitätsfaktor nach Zugzahl im Gesamtsystem für die kombinierte Berechnung und im Vergleich für die Approximation des einzelnen Elements.

Zur Bestimmung der planmäßigen Leistungsfähigkeit können die errechneten Kennzahlen der Komponenten mit den entsprechenden Grenzwerten kombiniert werden (Abschnitt 2.3.2), um den Qualitätsfaktor auszurechnen. Die planmäßige Leistungsfähigkeit bezeichnet dann die Zugzahl für einen Qualitätsfaktor von 1.0.

In Abbildung 4 ist der Qualitätsfaktor nach Teilelementen in der kombinierten (4a) und isolierten (4b) Betrachtung dargestellt. Beide Methoden weisen die höchsten Qualitätsfaktoren für die Gleisgruppe, gefolgt von GFK West und schließlich GFK Ost auf. Allerdings liegt die Auslastung von GFK West in der isolierten Betrachtung sehr nah an der Auslastung der Gleisgruppe und wird bei kleineren Verkehrsmengen sogar zum rechnerischen Flaschenhals.

Im Vergleich der beiden Methoden ist zu erkennen, dass die Modellierung als Gesamtsystem deutlich höhere Zugzahlen für das gleiche Qualitätsniveau erlaubt. Während für die kombinierte Betrachtung in der maßgebenden GG eine Leistungsfähigkeit von 14 Zugfahrten pro Stunde errechnet wird, kommt die isolierte Berechnung der Knotenelemente lediglich auf 12 Zugfahrten in der Gleisgruppe. Im Gesamtsystem profitieren die Warteschlangen vor den beiden GFKs dabei von dem zusätzlichen Warteraum der GG. Aber auch für die Gleisgruppe werden durch die gemeinsame Modellierung geringere Qualitätsfaktoren berechnet, da ankommende Forderungen bereits zur Einfahrt vor den GFKs synchronisiert werden.

*Session 1**Tamme Emunds, Nils Nießen*

4. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Beitrag wurde eine neue Methode zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten im Gesamtsystem vorgestellt. Dazu werden die Gesamtfahrstraßenknoten mit der Verkettungsmethode als einkanaliges Bediensystem abstrahiert und gemeinsam mit der Gleisgruppe in einem kombinierten Bediensystem modelliert. Über die Formalisierung als zeit-kontinuierliche Markov-Kette ist eine Berechnung von Leistungsfähigkeits-Kennzahlen durch Methoden des probabilistischen Model-Checking möglich. Die Ergebnisse eines Beispielknoten zeigen eine höhere Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bei Verwendung derselben Grenzwerte wie sie in der Praxis für die isolierte Betrachtung der Knotenelement eingesetzt werden.

Dabei können insbesondere die Abhängigkeitseffekte zwischen Ein- und Ausfahrt in GFKs und Verkehrshalten in der GG im Gesamtsystem dargestellt werden. So kann die Gleisgruppe beispielsweise als Warteraum für ausfahrende Forderungen genutzt werden, um den Qualitätsfaktor der GFKs zu verkleinern. Umgekehrt wirken die einkanalig modellierten GFKs bereits als eine Art Filter, um die an der Gleisgruppe ankommenden Forderungen zu synchronisieren.

Welche der beiden Modellierungen dabei näher an der Realität der auftretenden Warte-effekte in der Fahrplanerstellung liegen, sollte in weiterer Forschung gesondert untersucht werden. Ein besonderer Fokus könnte dabei auf der Entwicklung von Grenzwerten zu Kennzahlen des Gesamtknotens liegen. Die hier vorgestellte Modellierung als zeit-kontinuierliche Markov-Kette erlaubt dazu die Formulierung weiterer Kennzahlen, die über die klassische Warteschlangenlänge an den GFKs und Wartewahrscheinlichkeit zur Nutzung der GG hinausgehen.

Mit der eingeführten Betrachtung lassen sich Kennzahlen für das Gesamtsystem berechnen, allerdings ist eine detaillierte Identifizierung von Engpässen im GFK-Bereich durch die einkanalige Approximation nicht ohne weiteres möglich. Neben der Weiterentwicklung der Grenzwerte und Kennzahlen könnte deshalb auch die Entwicklung einer Zwischenstufe der Abstraktionsebenen zwischen Fahrstraßen und ganzen GFKs für weitere Forschung interessant sein.

Insgesamt bietet die vorgestellte Methode Infrastrukturbetreibern erstmals die Möglichkeit zur Berechnung von Kennzahlen eines gesamten Eisenbahnknotens, unabhängig von der Anzahl der Fahrstraßen. Damit werden sie in die Lage versetzt, bereits in frühen Pla-

*Session 1**Tamme Emunds, Nils Nießen*

nungsstufen die Leistungsfähigkeit der gesamten Knoten-Infrastruktur einzuschätzen, ohne zeitaufwendige Simulationen für einzelne Fahrplan-Szenarien durchzuführen.

Förderung

Dieser Beitrag wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – 2236/2 gefördert.

Literatur

- [1] BYCHKOV, Igor ; KAZAKOV, Alexander ; LEMPERT, Anna ; ZHARKOV, Maxim: Modeling of Railway Stations Based on Queuing Networks. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 5, 2425. <http://dx.doi.org/10.3390/app11052425>. – ISSN 2076–3417
- [2] DB INFRAGO AG: *Trassenfinder – Railway Path Request and Conflict Search Tool*. <https://trassenfinder.de/>, 2025. – Zugriff am 02.07.2025
- [3] DB INFRAGO AG ; SMA UND PARTNER AG: *Entwurfsstand mKoK 2026ff Schienengüterverkehr Bereich Nord-West*. <https://www.dbinfrago.com/web/schienennetz/kazu-novum-11909200>, 2024. – Stand: 06.05.2024. Zugriff am 04.07.2025
- [4] DB NETZ AG: *Richtlinie Fahrwegkapazität*. 2019
- [5] DEUTSCHE BAHN / HAFAS: *HAFAS Arrival Board for Station 8000001 at 07:00 – Archived Version*. <https://tinyurl.com/fppnjeuu>, 2025. – Zugriff am 02.07.2025
- [6] EMUNDS, Tamme ; NIESSEN, Nils: Evaluating Railway Junction Infrastructure: A Queueing-Based, Timetable-Independent Analysis. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 165 (2024). <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2024.104704>
- [7] EMUNDS, Tamme ; NIESSEN, Nils: A Queueing-Based Approach for Timetable-Independent Railway Station Performance Analysis. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 36 (2025). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2025.100539>
- [8] FINK, Alexander ; HANTSCH, Fabian ; MARTIN, Ullrich ; SCHMIDHÄUSER, Stefan ; FIETZE, Mario: Ermittlung der Leistungsfähigkeit für Zugmeldestellen in Eisen-

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

-
- bahnnetzen. In: *Proceedings of the 4th International Railway Symposium Aachen 2023*. Aachen, 2023, S. 408–427
- [9] FISCHER, Klaus ; HERTEL, Günter: *Bedienungsprozesse im Transportwesen: Grundlagen und Anwendungen der Bedienungstheorie*. Transpress-Verlag, 1990
- [10] HANSEN, Ingo ; PACHL, Jörn: *Railway Timetabling and Operations: Analysis, Modelling, Optimisation, Simulation, Performance, Evaluation*. Eurail press, 2014. – ISBN 3–7771–0462–0
- [11] HERTEL, Günter: Exakte Lösung Zur Berechnung Der Wartegleiszahl Vor Im Einrichtungsbetrieb Befahrenen Streckengleisen Bei Nicht-Poisson-Ankünften (G/M/1-Wartesystem). In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen* 31 (1984), S. 195–205
- [12] JUNGES, Sebastian ; VOLK, Matthias: *Stormpy - Python Bindings for Storm: Version 1.7.0*. <https://moves-rwth.github.io/stormpy/index.html>. Version: 2023
- [13] NIESSEN, Nils: *Leistungskenngrößen Für Gesamtfahrstraßenknoten*, Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Diss., 2016
- [14] POLLACZEK, Felix: Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. In: *Mathematische Zeitschrift* 32 (1930), Nr. 1, 64–100. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01194620>. – ISSN 0025–5874, 1432–1823
- [15] POTTHOFF, Gerhart: *Verkehrsströmungslehre - Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen*. Transpress, 1970
- [16] SCHMITZ, Christoph ; WEIK, Norman ; ZIEGER, Stephan ; NIESSEN, Nils ; SCHMEINK, Anke: Markov Models for the Performance Analysis of Railway Networks. In: *International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailLille)*. Lille, France, 2017, S. 23
- [17] SCHWANHÄUSSER, Wulf: Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen Des Eisenbahnnetzes. In: *Archiv für Eisenbahntechnik* 1978 (1978), Nr. 38, S. 7–18
- [18] SCHWANHÄUSSER, Wulf ; SCHULTZE, Kurt: *Ermittlung von Qualitätsmaßstäben für die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes und Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Endverspätungen: Forschungsarbeit für die Deutsche Bundesbahn*. 1982
- [19] WEIK, Norman ; BOHLIN, Markus ; NIESSEN, Nils: *Long-Term Capacity Planning of Railway Infrastructure: A Stochastic Approach Capturing Infrastructure Unavailability*, Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Diss., 2020

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

Autoren


Emunds, Tamme

Tamme Emunds studierte bis 2021 Mathematik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft. In 2024 übernahm er zusätzlich die Rolle des Gruppenleiters für Modellierung und Analyse.


Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon in Hannover und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.

A. Verkettungsmethode zur Analyse von Gesamtfahrstraßenknoten

Zur Abstraktion der Bedienprozesse auf den Gesamtfahrstraßenknoten orientieren wir uns in dieser Arbeit an Schwanhäüßer [17]. Dazu werden alle Zugfahrten i in einem GFK betrachtet und für je zwei Zugfahrten i, j die Wahrscheinlichkeit $p_{\varphi,ij}$ bestimmt, dass diese sich ausschließen.

Unter Berücksichtigung des Anteils $p_i = n_i/n_G^{\text{ges}}$ einer Zugfahrt i mit Zugzahl n_i an der Anzahl n_G^{ges} aller Zugfahrten im GFK G , kann dann

$$p_{\varphi,ij} = \begin{cases} p_i \cdot p_j, & \text{Zugfahrt } i \text{ und } j \text{ schließen einander aus} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6)$$

bestimmt werden. Dabei setzt sich die Anzahl n_G^{ges} aller Zugfahrten im GFK G aus den Anzahlen der ankommenden Züge n_G^{An} und der ausfahrenden Züge n_G^{Aus} zusammen. Die Verkettungszahl φ des Gesamtfahrstraßenknoten berechnet sich dann aus der Summe $\varphi = \sum_i \sum_j p_{\varphi,ij}$. Der Kehrwert der Verkettungszahl kann als Anzahl gleichzeitig tätiger Bedienkanäle interpretiert werden [17], und damit genutzt werden, um den Grenzwert

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

einkanaliger Bediensysteme auch auf die einkanaligen Ersatzsysteme für GFKs anzuwenden, siehe Gleichung (5).

Die mittlere Bedienzeit des einkanaligen Ersatzsystems im GFK G kann über

$$t_{B,G} \approx \sum_i \sum_j p_{\varphi,ij} \cdot t_{B,i} \quad (7)$$

durch Verrechnen der Ausschlusswahrscheinlichkeit $p_{\varphi,ij}$ mit der Sperrzeit für Zugfahrt i berechnet werden. Für die Bestimmung des Variationskoeffizienten $v_{B,G}$ ist außerdem das zweite Moment der Bedienzeit $\hat{t}_{B,G} \approx \sum_i \sum_j p_{\varphi,ij} \cdot t_{B,i}^2$ zu berechnen.

B. Übergänge in der zeitkontinuierlichen Markov-Kette

Im Folgenden werden die Übergänge innerhalb der zeitkontinuierlichen Markov-Kette aus Abschnitt 2.3.1 dargelegt.

Ein Übergang $u = (s, s') \in U$ beschreibt dabei die Rate mit der sich das System von einem Zustand $s \in S$ zu einem andern Zustand $s' \in S$ verändert. Dabei werden zur Beschreibung der Übergänge die folgenden Abbildungen benutzt.

- Mit $k_{\text{Belegt}} : s \mapsto tr_O + tr_W + tr_O^w + tr_W^w$ wird die Anzahl an belegten Gleisen beschrieben.
- $GG_{\text{frei}} : s \mapsto k_{\text{Belegt}} < (k_{GG} - e_O - e_W - d_O - d_W)$ beschreibt ob in einem Zustand s ein Gleis der Gleisgruppe belegt werden kann.
- $HG_{\text{frei}} : s \mapsto (hg_O = 0) \wedge (hg_W = 0)$ gibt an, ob die durchgehenden Hauptgleise gerade frei sind.
- $O_{\text{frei}}^{\text{Ein}} : s \mapsto GG_{\text{frei}}(s) \wedge HG_{\text{frei}}(s) \wedge (e_O = 0) \wedge (d_O = 0)$ beschreibt ob eine Einfahrt von GFK O zur Gleisgruppe möglich ist.
- $W_{\text{frei}}^{\text{Ein}} : s \mapsto GG_{\text{frei}}(s) \wedge HG_{\text{frei}}(s) \wedge (e_W = 0) \wedge (d_W = 0)$ beschreibt ob eine Einfahrt von GFK W zur Gleisgruppe möglich ist.
- $O_{\text{frei}}^{\text{Aus}} : s \mapsto HG_{\text{frei}}(s) \wedge (e_O = 0) \wedge (d_O = 0)$ beschreibt ob eine Ausfahrt von der Gleisgruppe über GFK O möglich ist.
- $W_{\text{frei}}^{\text{Aus}} : s \mapsto HG_{\text{frei}}(s) \wedge (e_W = 0) \wedge (d_W = 0)$ beschreibt ob eine Ausfahrt von der Gleisgruppe über GFK W möglich ist.
- $HG_{\text{frei}}^{\text{Durch}} : s \mapsto O_{\text{frei}}^{\text{Aus}} \wedge W_{\text{frei}}^{\text{Aus}}$ gibt an, ob eine Durchfahrt gerade möglich ist.

Wir formulieren die Übergänge $u = (s, s')$ in der Form $A \rightarrow_{\phi} A'$, wobei in A eine logische

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

Formel angegeben wird, welche die Ausgangszustände s definiert, und in A' die Änderung von s zu s' beschrieben werden. Mit ϕ wird die Übergangsrate beschrieben. Wie in den Modellen aus [6, 7] nutzen wir eine künstliche Übergangsrate $D \gg 1$ zur Modellierung von quasi direkten Übergängen. Für die Berechnungen in Abschnitt 3 wird eine Übergangsrate von $D = 600$ unterstellt, was eine durchschnittliche Verzögerung von 0.1s bedeutet.

Die Modellierung des Ankunftsprozess an einem GFK $G \in \{O, W\}$ erfolgt über die Übergänge

$$(q_G < m) \wedge (q_G > 0) \rightarrow_{\lambda_G} (q_G + 1) \quad (8)$$

$$(q_G = 0) \rightarrow_{\lambda_G \cdot p_G^{\text{HG}}} (q_G + 1) \wedge (q_G^n = 0) \quad (9)$$

$$(q_G = 0) \rightarrow_{\lambda_G \cdot (1 - p_G^{\text{HG}})} (q_G + 1) \wedge (q_G^n = 1). \quad (10)$$

Dabei ist zu beachten, dass ankommenden Anfragen zu einer leeren Warteschlange über (9) und (10) auf die GG und die HG aufgeteilt werden, indem die Ankunftsrate λ_G mit der Durchfahrtswahrscheinlichkeit p_G^{HG} multipliziert wird.

Der Start eines Einfahrprozesses wird dann über Übergänge der Form

$$(q_G > 0) \wedge (G_{\text{frei}}^{\text{Ein}}(s)) \wedge (q_G^n = 0) \rightarrow_{D \cdot p_G^{\text{HG}}} (q_G - 1) \wedge (e_G = 1) \wedge (q_G^n = 0) \quad (11)$$

$$(q_G > 0) \wedge (G_{\text{frei}}^{\text{Ein}}(s)) \wedge (q_G^n = 0) \rightarrow_{D \cdot (1 - p_G^{\text{HG}})} (q_G - 1) \wedge (e_G = 1) \wedge (q_G^n = 1) \quad (12)$$

und der Start eines Durchfahrprozesses über

$$(q_G > 0) \wedge (HG_{\text{frei}}^{\text{Durch}}(s)) \wedge (q_G^n = 1) \rightarrow_{D \cdot p_G^{\text{HG}}} (q_G - 1) \wedge (hg_G = 1) \wedge (q_G^n = 0) \quad (13)$$

$$(q_G > 0) \wedge (HG_{\text{frei}}^{\text{Durch}}(s)) \wedge (q_G^n = 1) \rightarrow_{D \cdot (1 - p_G^{\text{HG}})} (q_G - 1) \wedge (hg_G = 1) \wedge (q_G^n = 1) \quad (14)$$

modelliert.

Eine Durchfahrt ab GFK O ist dann beispielsweise mit den Übergängen

$$(hg_O = 1) \rightarrow_{\mu_{B,O}} (hg_O = 2) \quad (15)$$

$$(hg_O = 2) \rightarrow_{\mu_{B,W}} (hg_O = 0) \quad (16)$$

definiert, analog für GFK W.

Bei der Bedienung des Einfahrprozesses in die Gleisgruppe muss der Eingangsstrom erneut aufgeteilt werden, diesmal zwischen den beiden Ausfahrrichtungen. In den entspre-

Session 1

Tamme Emunds, Nils Nießen

chenden Übergängen für GFK O,

$$(e_O = 1) \wedge (k_{\text{Belegt}} < k_{GG}) \rightarrow_{\mu_{B,O} \cdot p_O^{\text{Wende}}} (e_O = 0) \wedge (tr_O + 1) \quad (17)$$

$$(e_O = 1) \wedge (k_{\text{Belegt}} < k_{GG}) \rightarrow_{\mu_{B,O} \cdot (1 - p_O^{\text{Wende}})} (e_O = 0) \wedge (tr_W + 1), \quad (18)$$

wird die Anzahl haltender Züge für wendende Züge in Richtung GFK O ($(tr_O + 1)$) und sonst in Richtung GFK W ($(tr_W + 1)$) erhöht.

Für den Halteprozess in der Gleisgruppe muss in den Übergängen

$$(tr_G > 0) \wedge (G_{\text{frei}}^{\text{Aus}}) \rightarrow_{\mu_{B,G} \cdot tr_G} (d_G = 1) \wedge (tr_G - 1) \quad (19)$$

$$(tr_G > 0) \wedge (\neg G_{\text{frei}}^{\text{Aus}}) \rightarrow_{\mu_{B,G} \cdot tr_G} (tr_G^W + 1) \wedge (tr_G - 1) \quad (20)$$

$$(tr_G^W > 0) \wedge (G_{\text{frei}}^{\text{Aus}}) \rightarrow_D (d_G = 1) \wedge (tr_G^W - 1) \quad (21)$$

der Belegungsstatus des Ausfahr-GFKs G beachtet werden. Falls er durch eine andere Forderung belegt ist, wird die Anzahl auf Ausfahrt wartender Züge erhöht (20) und die sonst direkte Ausfahrt (19) muss nach Freimeldung des GFKs erfolgen (21). Die mehrkanalige Modellierung der Gleisgruppe erlaubt eine gleichzeitige Bedienung von allen haltenden Zügen in (19) und (20).

Die Bedienung des Ausfahrtprozesses in einem GFK G erfolgt schließlich in

$$(d_G = 1) \rightarrow_{\mu_{B,G}} (d_G = 0) \quad (22)$$

erneut mit der verketteten Bedienrate $\mu_{B,G}$ des Ausfahr-GFKs.

C. Zusätzliche Informationen zum Beispielbahnhof

In Abbildung 5 ist der Gleisplan von *Aachen Hbf* abgebildet. Mit Hilfe der Fahrstraßen und Haltegleise aus den Fahrplandaten in Tabelle 2 konnten die Konflikte der einzelnen Zugfahrten bestimmt werden. Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten für den Personenverkehr Aachen Hbf wurden aus Online-Plänen [5] für den 02.07.2025 in der betrachteten Stunde zwischen 07:00 Uhr - 08:00 Uhr gewonnen und die Angaben zum Güterverkehr wurden aus [3] übernommen.

Session 1
Tamme Emunds, Nils Nießen

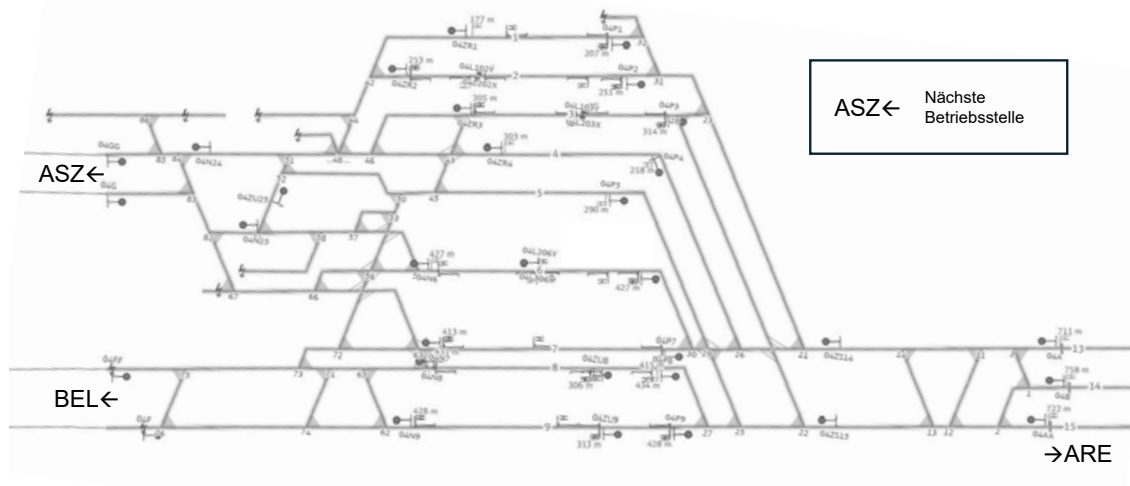


Abbildung 5: Infrastrukturplan von Aachen Hbf; modifiziert nach [2].

Tabelle 2: Fahrplandaten in Aachen Hbf zwischen 07:00 und 08:00 Uhr nach [5, 3]

Zug	Ankunft	Abfahrt	Halt [min]	Sperrzeit Einfahrt [min]	Sperrzeit Ausfahrt [min]	Fahrweg Ankunft	Fahrweg Abfahrt	Gleis	GFK Einfahrt	GFK Ausfahrt	Zugart
RB 30007	07:00	07:01	1	3	2	ASZ-8	8-ARE	8	GFK W	GFK O	NV
RB 30056	07:01	07:02	1	2	3	ARE-1	1-ASZ	1	GFK O	GFK W	NV
RE 26857	07:06	07:07	1	3	2	ASZ-8	8-ARE	8	GFK W	GFK O	NV
RE 26802	07:07	07:51	44	2	2	ARE-2	2-ARE	2	GFK O	GFK O	NV
RE 18911	07:12	07:17	5	3	3	ASZ-6	6-ASZ	6	GFK W	GFK W	NV
EST 9414	07:17	07:22	5	2	2	ARE-9	9-BEL	9	GFK O	GFK W	FV
S 41	07:22	07:37	15	2.5	3	BEL-8	8-BEL	8	GFK W	GFK W	NV
RB 10313	07:27	07:37	10	3	3	ASZ-6	6-ASZ	6	GFK W	GFK W	NV
RB 30509	07:30	07:31	1	3	2	ASZ-7	7-ARE	7	GFK W	GFK O	NV
RB 30554	07:31	07:32	1	2	3	ARE-1	1-ASZ	1	GFK O	GFK W	NV
ICE 11	07:36	07:39	3	2.5	2	BEL-9	9-ARE	9	GFK W	GFK O	FV
RE 26404	07:39	08:20	41	3	3	ASZ-7	7-ASZ	7	GFK W	GFK W	NV
RE 10902	07:41	08:18	37	2	2	ARE-3	3-ARE	3	GFK O	GFK O	NV
RE 18913	07:42	07:47	5	3	3	ASZ-6	6-ASZ	6	GFK W	GFK W	NV
NJ 40468	07:47	08:09	22	2	2.5	ARE-9	9-BEL	9	GFK O	GFK W	FV
GV 128-1	07:17	07:17	0	4	4	ASZ-5	5-ARE	5	GFK W	GFK O	GV
GV 128-2	07:14	07:14	0	4	4	ARE-4	4-ASZ	4	GFK O	GFK W	GV