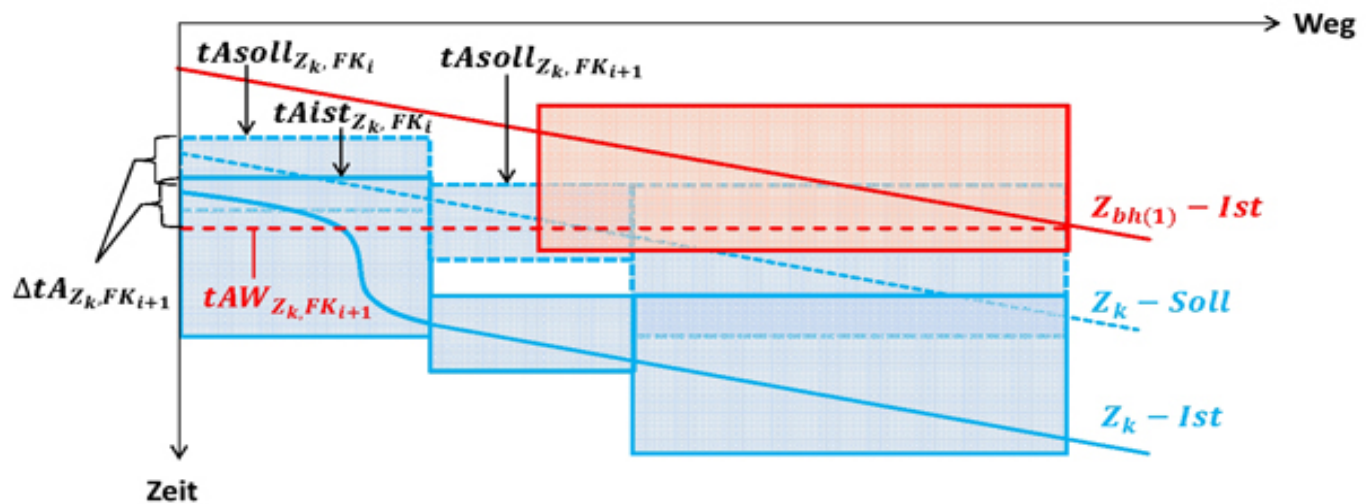
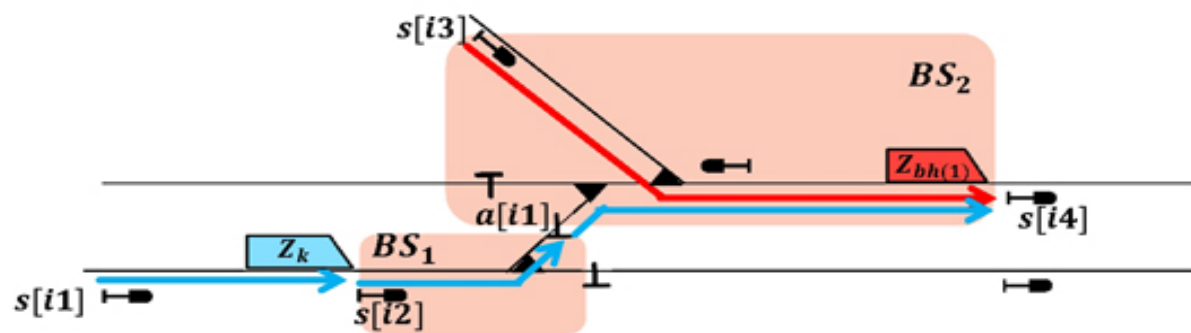


Mikroskopische Engpassanalyse bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen



Xiaojun Li

Ausgabe 14

Xiaojun Li

aus Tianjin, VR China

Hauptberichter: Prof. Dr-Ing. Ullrich Martin

Mitberichter: Prof. Dr-Ing. Ulrich Weidmann

Tag der mündlichen Prüfung: 03.07.2015

Dipl.-Inf. Xiaojun Li

Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität
Stuttgart

Juli 2015

Vorwort

Im spurgeführten Verkehr sind Engpässe maßgebend für die Kapazität des Verkehrssystems. Aufgrund der geringeren Netzbildungsfähigkeit, der Beschränkung der Freiheitsgrade sowie des Abstandshalteverfahrens entfalten die Engpässe im spurgeführten Verkehr jedoch gegenüber anderen Verkehrsträgern eine deutlich restriktivere Wirkung. Die Qualität und Kapazität eines Eisenbahnnetzes können unter weitgehendem Verzicht auf eine extensive Erweiterung deshalb lediglich dann erhöht werden, wenn bestehende oder potenzielle Engpässe vorausschauend identifiziert und beseitigt werden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche Maßnahmen für die Beseitigung von Engpässen zielführend und effektiv sind. Um die Frage zu beantworten, müssen die Engpässe lokalisiert werden und deren Ursachen bekannt sein. Für eine anforderungsgerechte Dimensionierung und effiziente Nutzung von Infrastrukturen spielt die Engpassanalyse bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen somit eine wichtige Rolle. Aufgabenstellungsorientiert wird in dieser Arbeit die Untersuchung von Engpässen in makroskopischer und mikroskopischer Betrachtung unterschiedlich behandelt. Bezugnehmend auf vorhandene, die langfristige Planung unterstützende Methoden der makroskopischen Engpassanalyse, wurde ein mikroskopischer Ansatz zur ortsgenauen Engpassidentifizierung auf der Grundlage eines neuen mikroskopischen Infrastrukturmodells entwickelt, der auch bei beliebig komplexen Gleisstrukturen und anspruchsvollen Betriebsprogrammen verwendet werden kann.

Die vorliegende Dissertation ist im Zusammenhang mit dem DFG-Forschungsprojekt „Entwicklung einer simulationsbasierten Methodik zur ursachenbezogenen Engpassbewertung komplexer Gleisstrukturen in spurgeführten Verkehrssystemen unter Berücksichtigung stochastischer Bedingungen“, an dem Frau Li maßgebend beteiligt war, entstanden. Wesentliches Forschungsergebnis der vorliegenden Arbeit ist die signifikante Weiterentwicklung der Methodik der Leistungsuntersuchungen im spurgeführten Verkehr im Teilgebiet der Engpassanalyse mit mikroskopischen Infrastrukturmodellen und ein darauf aufbauendes Verfahren zur praxisbezogenen Anwendung. Mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Modellierungsansatz auf der Grundlage der Kenngröße „Zuwachsrate der Nicht erfüllbaren Belegungswünsche“ wird eine wichtige Voraussetzung für eine umfassende Leistungsuntersuchung unter Berücksichtigung maßgebender Engpässe und damit für eine effizientere Infrastrukturnutzung im Bereich der Eisenbahn geschaffen.

Stuttgart, im September 2015

Ullrich Martin

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die mich in dieser spannenden Phase meiner akademischen Laufbahn begleitet und bei der Erstellung dieser Arbeit sehr unterstützt haben.

Großer Dank gebührt zuallererst Prof. Ullrich Martin für die Betreuung und Begutachtung meiner Promotion. Seine Anregungen und kritischen Kommentare mit unendlicher Geduld haben zum guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Die Arbeit am Institut hat mir den nötigen Rahmen geboten, meine Dissertation gedanklich vorzubereiten. Herrn Prof. Ulrich Weidmann danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Mein großer Dank gilt meinen Eltern für ihr vorhaltloses Vertrauen und ihre Unterstützung. Obwohl sie in einem fernen Land leben, haben sie von Anfang an mich bei meiner Promotion motiviert und bei allen schwierigen Situationen aufgemuntert.

Ein besonderer Dank gilt der Stiftung "Carl-Pirath-Forschungsstipendium" des VWI e.V. Die im Rahmen des Stipendiums gewonnenen zeitlichen Freiräume ermöglichten eine beschleunigte Fertigstellung dieser Arbeit.

Meinen damaligen und jetzigen Kolleginnen und Kollegen danke ich für ihre informativen und konstruktiven Vorschläge. Für das Korrekturlesen der Gesamtfassung danke ich Markus Tideman und für den englischen Abstract danke ich Keru Feng.

Ein weiteres Dankeschön gilt dem Entwicklungsteam der Software PULEIV im Institut. Nur basierend auf dieser guten Grundlage war es möglich, meine Ansätze in der vorliegenden Arbeit zu testen und zu implementieren.

Mein besonderer Dank geht an meinen Mann Yanpeng und meinen Sohn David für ihre Unterstützung in allen Phasen, ihr liebevolles Verständnis und ihre Geduld während der Promotionszeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

1 Einleitung

2 Grundlagen der Engpassanalyse im spurgeführten Verkehr

2.1 Engpässe im spurgeführten Verkehr

2.1.1 Engpässe im Verkehr allgemein

2.1.2 Besonderheiten im spurgeführten Verkehr

2.1.3 Definitionen von Engpässen

2.2 Grundbegriffe

2.3 Methodik bei Leistungsuntersuchungen

2.3.1 Analytische Methode

2.3.2 Simulative Methode

2.4 Leistungsuntersuchungen mit der simulativen Methode

2.4.1 Durchsatzbezogene Leistungsfähigkeit

2.4.2 Optimaler Leistungsbereich

2.4.3 Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen

2.4.4 Strukturierung der Leistungsuntersuchung

2.5 Aufgabenstellung der Engpassanalyse bei Leistungsuntersuchungen

2.6 Zielstellung der vorliegenden Arbeit

3 Modelle zur Engpassanalyse

3.1 Makroskopische Modelle

3.2 Mesoskopische Modelle

3.3 Vorhandene mikroskopische Modelle

3.3.1 Teilfahrstraßenknoten

3.3.2 Knoten-Kanten-Modell

3.4 Neues mikroskopisches Modell

3.4.1 Ebene 1 - Fahrwegkomponente

3.4.2 Ebene 2 - Basisstruktur

3.4.3 Zwei-Ebenen-Modell

3.5 Schlussfolgerung

4 Methoden zur Lokalisierung von Engpässen

4.1 Wirksamkeit von Engpässen

4.1.1 Engpassrelevanz - Potenzieller Engpass bei grobem Betriebsprogramm

4.1.2 Engpasssignifikanz - Signifikanter Engpass bei einer Belastung

4.2 Drei-Kriterien-Methode

4.2.1 Auswahl von vorhandenen Kenngrößen

4.2.2 Neue Kenngröße - Nicht erfüllbare Belegungswünsche

4.2.3 Neue Kenngröße - Engpassempfindlichkeit

4.2.4 Lokalisierung von Engpässen nach drei Kriterien

4.3 Vier-Phasen-Ansatz - Weiterentwicklung in der vorliegenden Arbeit

4.3.1 Hintergrund - Zusammenhang von Engpässen und Leistungsfähigkeit

4.3.2 Konzept des Vier-Phasen-Ansatzes

4.3.3 Neue Kenngröße - NEB-Zuwachsrates

4.3.4 Lokalisierung von Engpassrelevanzen

4.3.5 Lokalisierung von Engpasssignifikanzen

4.3.6 Bestimmung des maßgebenden Engpasses

4.3.7 Ermittlung von Reserven

4.4 Schlussfolgerung

5 Ansatz zur Zuordnung der Ursachen von Engpässen

5.1 Kategorisierung von Behinderungen

5.2 Korrelation von Behinderungen und Ursachen

5.3 Ansatz zur Lokalisierung der tatsächlichen Ursachen

5.3.1 Belegungselementverursachte Behinderungszeit

5.3.2 Suchalgorithmus zur Zuordnung einer Behinderung

5.3.3 Lokalisierung der Ursachen für einen Engpass

5.4 Einflussfaktoren auf die Entstehung von Engpässen

5.4.1 Einflussfaktoren aus der Infrastrukturgestaltung

5.4.2 Einflussfaktoren aus der Betriebsplanung

5.5 Maßnahmen zur Beseitigung der Engpässe

5.6 Schlussfolgerung

6 Ablauf der rechnerunterstützten Engpassanalyse mit der simulativen Methode

7 Schlussfolgerung und Ausblick

7.1 Offene Fragen und Ausblick

7.2 Wesentliche Ergebnisse der Arbeit

Anhang I: Fallbeispiele

Beispiel 1 – Eine Zuglaufgruppe auf einer Strecke

Beispiel 2 – Zwei einfädelnde Zuglaufgruppen

Beispiel 3 – Drei kreuzende Zuglaufgruppen

Beispiel 4 – Kleines Eisenbahnnetz

Beispiel 5 – Großer Eisenbahnknoten

Anhang II: Ablauf eines allgemeingültigen Bewertungsverfahrens in [Martin & Li 2014]

Abkürzungen

Formelzeichen

Glossar

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bewertung des Leistungsverhaltens bei Leistungsuntersuchungen (Quelle: [Martin & Li 2014] vgl. [Chu 2014])

Abbildung 2-2: Strukturierung der allgemeinen Leistungsuntersuchung (Quelle: [Martin et al. 2012])

Abbildung 3-1: Beispielteilnetz im makroskopischen Knoten-Kanten-Modell

Abbildung 3-2: Aufteilung eines Beispielbahnhofs in Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen

Abbildung 3-3: Infrastrukturmodellierung eines Beispielbahnhofs in Teilfahrstraßenknoten (TFK)

Abbildung 3-4: Mikroskopischer Knoten-Kanten-Graph

Abbildung 3-5: Infrastrukturmodellierung des Beispieleisenbahnknotens in Fahrwegkomponenten

Abbildung 3-6: Aufteilung der Infrastruktur des Beispieleisenbahnknotens in Basisstrukturen

Abbildung 3-7: Darstellung der Infrastrukturmodellierung im Zwei-Ebenen-Modell

Abbildung 4-1: Zusammenhang von Engpassrelevanz und Engpasssignifikanz

Abbildung 4-2: Zuordnung von Fahrwegkomponenten mit Belegungswünschen an eine Basisstruktur (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])

- Abbildung 4-3: Ermittlung der Engpassempfindlichkeit einer Fahrwegkomponente (Quelle: eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 4-4: Ablauf zur Lokalisierung von Engpässen mit der Drei-Kriterien- Methode (Quelle: Eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 4-5: Verschiedene Engpässe und Durchsatzbezogene Leistungsfähigkeiten (Quelle: [Chu 2014])
- Abbildung 4-6: Bestimmung der Durchsatzbezogenen Leistungsfähigkeit mit dem Ansatz in [Chu 2014]
- Abbildung 4-7: Wartezeitfunktion des gesamten Untersuchungsraums (Modellfunktion in [Chu 2014])
- Abbildung 4-8: Verlauf der Nicht erfüllbaren Belegungswünsche einer Basisstruktur in vier Phasen
- Abbildung 4-9: Vergleich der Verläufe der Nicht erfüllbaren Belegungswünsche zweier Basisstrukturen
- Abbildung 4-10: Vergleich der Berechnungen für NEB-Zuwachsrate und Engpassempfindlichkeit
- Abbildung 4-11: Beispielhafte Darstellung der Engpassrelevanzen unterschiedlicher Stufen anhand NZR
- Abbildung 4-12: Workflow Lokalisierung von Engpassrelevanzen mit Hilfe des Vier-Phasen-Ansatzes
- Abbildung 4-13: Festlegung des Bewertungsmaßstabs für Nicht erfüllbare Belegungswünsche
- Abbildung 4-14: Zwei Kriterien bei der Bewertung von maßgebenden Engpässen

- Abbildung 4-15: Mutmaßlich maßgebende Engpässe auf einer Beispielstrecke
- Abbildung 5-1: Kategorisierung von Behinderungen (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Li & Martin 2014] und [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-2: Aufteilung von Behinderungen nach Häufigkeit (Quelle: Eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-3: Aufteilung von Behinderungen nach Einflussweite (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014] vgl. [Li & Martin 2014])
- Abbildung 5-4: Beispiel des Zusammenhangs von Behinderungen und Ursachen – Fall 1 (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-5: Beispiel des Zusammenhangs von Behinderungen und Ursachen – Fall 2 (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-6: Beispiel des Zusammenhangs von Behinderungen und Ursachen – Fall 3 (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-7: Beispiel des Zusammenhangs von Behinderungen und Ursachen – Fall 4 (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-8: Zusammenhang und Unterschied der Kenngrößen Behinderung und Belegungselementverursachte Behinderung
- Abbildung 5-9: Bestimmung des behindernden Zugs für einen behinderten Zug (Schritt 1) (Quelle:

- Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-10: Konflikte zweier Züge entlang der Fahrwege im Soll-Fahrplan (Quelle: Modifizierte eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-11: Workflow der Zuordnung der Belegungselementverursachten Behinderungszeiten für eine Behinderung (Quelle: Eigene Darstellung in [Martin & Li 2014])
- Abbildung 5-12: Belegungszeit der gerichteten Belegungselemente (Fahrwegkomponenten) (Quelle: Eigene Darstellung in [Li & Martin 2014])
- Abbildung 5-13: Behinderung aufgrund unterschiedlicher Blocklängen (Quelle:[Martin & Li 2014])
- Abbildung 6-1: Ablauf der Engpassanalyse mit Simulationsverfahren

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Attribute einer Fahrwegkomponente

Tabelle 4-1: Kategorisierung von Kenngrößen bei Leistungsuntersuchungen

Tabelle 4-2: Bewertung von Engpassrelevanzen nach drei Phasen

Tabelle 5-1: Vorschläge für Maßnahmen in Abhängigkeit der Ursachen (Quelle: [Martin & Li 2014])

Zusammenfassung

Die Engpassanalyse ist eine der wichtigsten Aufgaben bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen in allen Planungsphasen, weil die Betriebsqualität und Kapazität der Infrastruktur durch Engpässe im Eisenbahnnetz stark beeinflusst werden können. Da Engpässe häufig in Infrastrukturbereichen mit komplexen Gleisstrukturen entstehen, beschränkt die hiermit verbundene hohe Berechnungskomplexität die Entwicklung in diesem Forschungsgebiet seit längerer Zeit. Mit Unterstützung der modernen Rechentechnik heutzutage kann die Beschränkung durch die Anwendung von passenden Werkzeugen und innovativen Bewertungsansätzen überwunden werden. In der vorliegenden Arbeit wurde die simulative Methode zur mikroskopischen Engpassanalyse basierend auf einem neuen mikroskopischen Infrastrukturmodell von [Martin & Li 2014] entwickelt, die umfangreiche Aussagen über Engpässe und deren Ursachen unabhängig von der Komplexität der Infrastruktur und des Betriebsprogramms liefert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der mikroskopischen Lokalisierung von Engpässen und Bestimmung von deren Ursachen bei der Nutzung der simulativen Methode. Es wird der Zusammenhang von lokalen Engpässen im Untersuchungsraum und dem globalen Leistungsverhalten aus vorhandenen Forschungsbeiträgen von [Chu 2014], [Martin & Chu 2013], [Schmidt 2009] und [Hertel 1992] diskutiert und darüber hinaus die Korrelation der Wirkung von Engpässen und den mutmaßlichen Ursachen

untersucht. Um die tatsächlichen Ursachen von Engpässen festzustellen, wird die Wirkung der Behinderungsfortpflanzung infolge des Zusammenwirkens von Infrastrukturabschnitten und Zugfahrten in dieser Arbeit berücksichtigt. Dabei wurden wichtige neue Erkenntnisse gewonnen:

- Zur präzisen Lokalisierung von Engpässen wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der auf einem mikroskopischen Infrastrukturmodell basiert, das insbesondere für die simulative Methode geeignet ist. Bei diesem Ansatz zur Lokalisierung von Engpässen wird der Einfluss der zunehmenden Behinderungen an einzelnen Infrastrukturabschnitten auf das Leistungsverhalten des gesamten Untersuchungsraums berücksichtigt. Die Behinderungen an Engpässen werden mit der Kenngröße „Nicht erfüllbare Belegungswünsche“ (NEB) und deren Zuwachs mit der neuen Kenngröße „NEB-Zuwachsrates“ (Zuwachsrates der Nicht erfüllbaren Belegungswünsche) dargestellt. Die beiden Kenngrößen werden als Kriterien für die Lokalisierung von Engpässen in der vorliegenden Arbeit verwendet.
- Mit dem Ansatz werden nicht nur wirksame, sondern auch potenzielle Engpässe im Untersuchungsraum identifiziert. Darüber hinaus wird der maßgebende Engpass mit einer hohen, für die praktische Anwendung hinreichenden Wahrscheinlichkeit bestimmt.
- Um zu beantworten, durch welche Ursachen die lokalisierten Engpässe ausgelöst werden, wird die Fortpflanzung von Behinderungen anhand der Wechselwirkung von Zugfahrten und Infrastrukturabschnitten untersucht. Darauf basierend wurde ein Suchalgorithmus entwickelt, mit dem die tatsächlichen Ursachen der Engpässe entlang der Fahrwege lokalisiert werden können.

- Auf diese Weise wird festgestellt, wo sich die Ursachen genau befinden und, ob diese durch eine ungeeignete Nutzung der Infrastruktur oder einer mangelhaften Dimensionierung bzw. Gestaltung der Infrastruktur begründet sind. Die Einflussfaktoren auf die Entstehung von Engpässen werden zusammengestellt, und es können geeignete Maßnahmen zur Entschärfung der Engpässe abgeleitet werden.

In der vorliegenden Arbeit, die im Kontext des DFG-Forschungsprojekts „Entwicklung einer simulationsbasierten Methodik zur ursachenbezogenen Engpassbewertung komplexer Gleisstrukturen in spurgeführten Verkehrssystemen unter Berücksichtigung stochastischer Bedingungen“ [Martin & Li 2014] entstanden ist, wird die vorhandene makroskopische Bewertung bei Leistungsuntersuchungen mit der neu entwickelten mikroskopischen Engpassanalyse ergänzt, so dass eine allgemeingültige umfassende Leistungsuntersuchung innerhalb eines Bewertungsprozesses möglich ist.

Abstract

In the railway system, the operation quality and infrastructure capacity in railway can be significantly affected by bottlenecks. Therefore, the bottleneck analysis is one of the most important tasks in railway capacity research in all phases of planning. Since bottlenecks often occur in those areas with complex track-structures, the high computational complexity limits the development in this research field for a long time. Today, with the support of modern computing technology, this limitation can be overcome by the use of appropriate tools and innovative evaluation approaches. The microscopic bottleneck analysis using simulative method in this work was developed based on a new microscopic infrastructure model by [Martin & Li 2014]. The new approach gives comprehensive evidences of bottlenecks and their causes independent from the complexity of infrastructure and operating program.

There are two focuses in this work. The first is the microscopic localization of bottlenecks in an investigation area. The other is determining their causes. The relationship between local bottlenecks and the global performance defined by existing research by [Chu 2014], [Martin & Chu 2013], [Schmidt 2009] and [Hertel 1992] is discussed. Additionally, the correlation between the effect of bottlenecks and possible causes is analyzed. To determine the actual causes of bottlenecks, the effect of the hindrance propagation due to the interaction of infrastructure sections and trains is included in this work. The important findings are as follows:

- To precisely locating the bottlenecks, a new approach was developed based on the microscopic infrastructure model which is especially suitable for simulative methods. In the approach of bottlenecks locating, the influence of the increasing hindrance attributed to individual infrastructure sections on the performance of the entire investigation area is considered. The hindrance at bottlenecks is characterized with a parameter “Non-satisfiable occupation request“ (abb. in German: NEB“), and their growth is described with the parameter “NEB growth rate“. These two parameters are used as indicators for locating bottlenecks in this research.
- With this approach not only the significant, but also the potential bottlenecks in the investigation area can be identified. Moreover, the authoritative bottleneck can be defined effectively and sufficiently.
- To answer the question “how are the identified bottlenecks caused“, the propagation of hindrance resulted from the interaction of trains and infrastructure sections is analyzed. Based on that study a search algorithm was developed, so that the actual causes of the bottlenecks can be located along the route.
- In this way, it is determined where the causes of bottlenecks are located accurately and whether they are results of an unsuitable use of infrastructure or from the insufficient design of infrastructure. The influence factors on bottlenecks are gathered, so that the suitable measures for minimizing bottlenecks can be derived.

In this research, which has arisen from the DFG research project “The development of a simulation-based methodology for cause-related bottleneck analysis for complex infrastructure in railway systems in consideration of stochastic conditions“ [Martin & Li 2014] (*German: “Entwicklung einer simulationsbasierten Methodik zur*

ursachenbezogenen Engpassbewertung komplexer Gleisstrukturen in spurgeführten Verkehrssystemen unter Berücksichtigung stochastischer Bedingungen“), the existing macroscopic evaluation of capacity research is complemented with the newly developed microscopic bottleneck analysis, so that a universal comprehensive capacity research within an evaluation process is possible..

1 Einleitung

In allen Bereichen der Verkehrsinfrastruktur, ob auf Straßen, Schienen, Luftwegen oder Wasserstraßen, kann durch die Zunahme der Verkehrsbelastung ab einem gewissen Zeitpunkt das Verkehrsangebot die gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllen, sodass Engpässe wirksam werden und auf diese Weise die Infrastrukturnutzung gebremst wird. Der spurgeführte Verkehr nimmt als umweltfreundliches motorisiertes Verkehrsmittel eine strategische Rolle bei der Gestaltung nachhaltiger Verkehrssysteme ein, deren Kapazität und Qualität auch von Engpässen stark beeinträchtigt werden. Um eine Kapazitätssteigerung eines Verkehrssystems unter Beibehaltung einer gewünschten Qualität herbeizuführen, müssen vordringlich Engpässe, die betriebsbehindernd wirken, beseitigt oder minimiert werden. Wo sich der Engpass befindet, der für die Kapazität eines Eisenbahnnetz oder -teilnetz maßgebend ist, ist zurzeit oftmals nicht eindeutig bestimmbar und nur nach Erfahrungen abschätzbar. Zu diesem Zweck wird die Engpassanalyse in eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen eingesetzt, um Engpässe und deren Ursachen in einem Untersuchungsraum mittels modernen Verfahren zu identifizieren. Dafür werden Leistungsuntersuchungen durchgeführt, mit denen der Einfluss des Zusammenwirkens der beteiligten Verkehrskomponenten - Infrastruktur, Betriebsprogramm und Fahrzeuge - auf Kapazität und Qualität des Verkehrssystems untersucht und bewertet werden.

Von vorrangigem Interesse bezogen auf die Verkehrskomponente Infrastruktur ist dabei das Eisenbahnnetz, welches aus Eisenbahnknoten und Strecken besteht, die die Eisenbahnknoten miteinander verknüpfen. Aus zahlreichen praktischen Beispielen lässt sich schließen, dass die Leistungsfähigkeit eines Eisenbahnknotens maßgeblich von dessen Gestaltung und Nutzung abhängt. Obwohl Eisenbahnknoten eines Eisenbahnnetzes aufgrund ihrer komplexen Gleisstruktur im Gegensatz zu den Strecken häufig Engpässe darstellen, existieren für Eisenbahnknoten bisher nur wenige Verfahren, um die Kapazität eines Eisenbahnknotens zu bewerten sowie gleichzeitig die zugrunde liegenden Ursachen der Engpässen zu identifizieren. Darüber hinaus ist es relativ schwierig, geeignete Maßnahmen zur Beseitigung derartiger Engpässe zu ermitteln. Der Grund hierfür liegt darin begründet, dass sich die gegenwärtig existierenden Bewertungsverfahren weitgehend lediglich auf abgeschlossene Teilbereiche beziehen. Daher ist eine ganzheitliche Betrachtung eines größeren Untersuchungsraums, der Strecken und Eisenbahnknoten oder komplexe Knotenstrukturen umfasst, in detaillierter Form bislang nicht durchführbar.

In der vorliegenden Arbeit, die im Zusammenhang mit dem DFG-Forschungsprojekt [Martin & Li 2014] entstanden ist, wird ein neues Verfahren zur mikroskopischen Engpassanalyse bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen entwickelt, um die oben genannten Schwierigkeiten zu überwinden. Diese Engpassanalyse orientiert sich an einer konkreten Problemlösung, indem Engpässe und deren Ursachen diagnostiziert werden, um darauf aufbauend geeignete Maßnahmen zur Beseitigung oder Vermeidung von Engpässen abzuleiten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Engpassanalyse im spurgeführten Verkehr unter Verwendung mikroskopischer Modelle sowie der simulativen Methode und ist wie folgt aufgebaut:

- [Kapitel 2](#) gibt einen Überblick über die Problematik der Engpassanalyse im spurgeführten Verkehr und die gängigen Methoden der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Leistungsuntersuchungen, bei denen die Engpassanalyse berücksichtigt wird.
- Die Modellauswahl dient als eine wichtige Voraussetzung für eine zielorientierte Engpassanalyse. In [Kapitel 3](#) werden verschiedene Modelle der Leistungsuntersuchungen vorgestellt, die für unterschiedliche Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Für die Zielstellung der vorliegenden Arbeit wird das im Rahmen des DFG-Projekts [Martin & Li 2014] entwickelte mikroskopische Modell für die weitere Untersuchung ausgewählt, da es sich für den beabsichtigten Zweck als besonders vorteilhaft erweist.
- [Kapitel 4](#) und [5](#) stellen den Kern der Arbeit dar und beschreiben die wesentlichen Ansätze zur Identifizierung von Engpässen sowie deren Ursachen. In [Kapitel 4](#) wird dabei der Ansatz zur Lokalisierung von Engpässen vorgestellt, der basierend auf der Grundlage des DFG-Projekts [Martin & Li 2014] entwickelt wurde. [Kapitel 5](#) stellt den Ansatz zur Bestimmung der tatsächlichen Ursachen von Engpässen dar, wobei auf den Suchalgorithmus aus dem DFG-Projekt [Martin & Li 2014] aufgebaut wird.
- [Kapitel 6](#) beschreibt, wie die Engpassanalyse mit den Ansätzen aus den [Kapiteln 4](#) und [5](#) bei allgemeingültigen Leistungsuntersuchungen angewendet und integriert wird.