

# Fahrplanbasierte Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzwerken unter Berücksichtigung der Betriebsqualität

Im Rahmen eines DFG-geförderten Projekts entwickeln der Lehrstuhl für Verkehrsströmungslehre der TU Dresden und die Professur für Planung und Betrieb von Schienenverkehrssystemen der TU München einen neuen Ansatz zur netzweiten Kapazitätsanalyse, der durch die Verknüpfung von systemtrassengestützten Optimierungsmodellen zur Güterverkehrsplanung und einem stochastischen (max,+)-Modell zur Verspätungsprognose eine Bewertung der netzweiten Kapazität im Kontext der Fahrplanung erlaubt.



## Einleitung

Im Zuge steigender Verkehrsnachfrage kommt der strategischen Planung und Bewertung von Verkehrskonzepten und Infrastrukturausbaumaßnahmen im deutschen Schienennetz zunehmende Bedeutung zu. Während historisch lokale, auf Methoden der Warteschlangentheorie aufbauende analytische Verfahren zu diesem Zweck entwickelt wurden und bis zum heutigen Tag in entsprechenden Planungsproblemen Anwendung finden, ergibt sich durch die Orientierung hin zu einem fahrplanbasierten Infrastrukturplanungsansatz, welcher die Abbildung von Trassenzusammenhängen erfordert, grundsätzlicher Forschungs- und Anpassungsbedarf.

Bei der Weiterentwicklung analytischer Verfahren wurden in jüngerer Vergangenheit vorrangig Ansätze zur netzweiten Automatisierung (Industrialisierung) eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen sowie zur probabilistischen Verknüpfung existierender lokaler Bewertungsmethoden untersucht [1, 2]. Ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten ist bei Methoden auf der Prozessebene der Fahrplanerstellung zu beobachten, welche die Kapazitätsbewertung an Kenngrößen wie Fahrplanmachbarkeit oder Fahrzeitquotienten knüpfen [3, 4].

Eine Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Schienenverkehrssystemen auf Netzebene mit Bezug zur betrieblichen Qualität, welche Zugfahrten und ihre

Wechselwirkungen ganzheitlich modelliert, ist aktuell noch nicht möglich. Diese ist jedoch insbesondere in Bezug auf die in einem stark vertakteten Fahrplankonzept zur Verfügung stehende Restkapazität von entscheidender Bedeutung, um belastbare Aussagen über die Qualität und Restleistungsfähigkeit im Schienengüterverkehr treffen zu können. Im Rahmen des dreijährigen DFG-Projekts NetCap wird diese Lücke durch einen kombinierten Ansatz aus Fahrplanung und Verspätungsprognose geschlossen, welcher über einen Feedbackloop eine integrierte Bewertung der mit einem Fahrplankonzept und Verkehrsaufkommen erzielbaren Betriebsqualität ermöglicht, und somit die Definition netzweiter Kapazitätskennzahlen erlaubt.

## Methodischer Überblick

Der im Projekt verfolgte Ansatz basiert auf einem Verkehrsumlegungsmodell mit detaillierter, systemtrassenbasierter Modellierung der Prozessebene der Fahrplanung, sowie dynamischer Evaluierung der jeweiligen Fahrplankonzepte. Die Gesamtkonzeption zur fahrplangestützten Bewertung der Leistungsfähigkeit wird in Bild 1 dargestellt.

Aufbauend auf makroskopischen Nachfragedaten werden zunächst die Fahrtverläufe der Zugfahrten initial umgelegt, um eine Abschätzung der erforderlichen Systemtrassen auf sogenannten Zuglaufabschnitten zu erhalten [5, 6]. Hierunter werden vordefinierte Streckensegmente



**Sara Comelli, M. Sc.**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Professur für Planung und Betrieb  
von Schienenverkehrssystemen,  
TU München  
sara.comelli@tum.de



**Univ.-Prof. Dr. Norman Weik**

Leiter  
Professur für Planung und Betrieb  
von Schienenverkehrssystemen  
TU München  
norman.weik@tum.de



**Dipl.-Ing. Cédric Kekes**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Professur für Verkehrsströmungslehre  
TU Dresden  
cedric.kekes@tu-dresden.de



**Dr. Franziska Theurich**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Professur für Verkehrsströmungslehre  
TU Dresden  
franziska.theurich@tu-dresden.de



**Univ.-Prof. Dr. Karl Nachtigall**

Leiter  
Professur für Verkehrsströmungslehre  
TU Dresden  
karl.nachtigall@tu-dresden.de

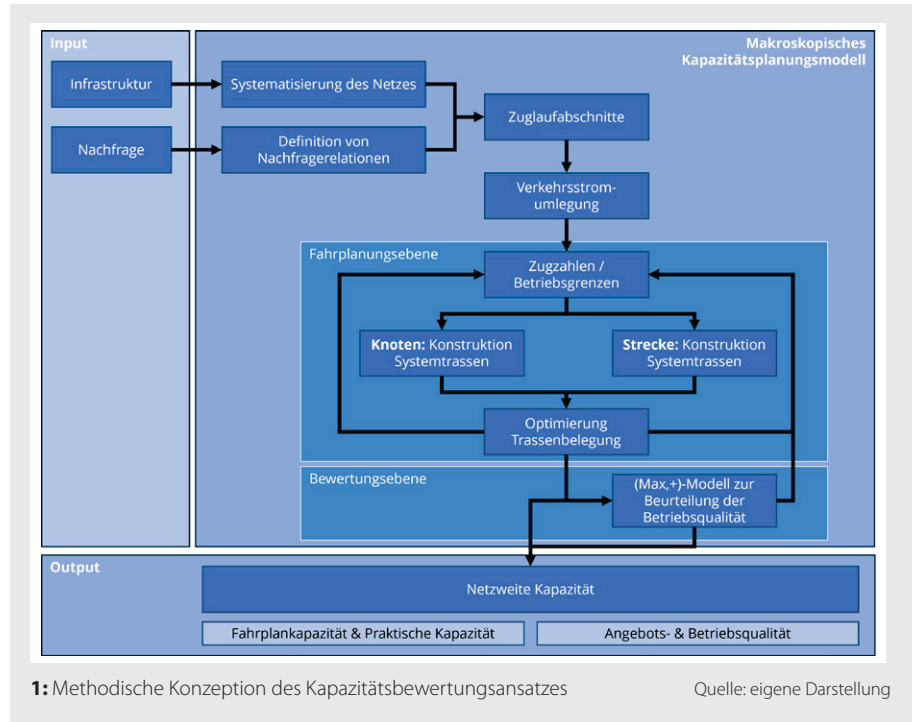
Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit auf Netzebene mit Bezug zur Durchführung des Betriebs ist für die Qualität in stark vertakteten Fahrplänen von entscheidender Bedeutung.

auf makroskopischer Ebene zwischen Knotenbahnhöfen verstanden. Anschließend erfolgt die Konstruktion von Systemtrassen auf den Zuglaufabschnitten bzw. für Belegungselemente in Knoten, welche die für die Fahrplanung des Güterverkehrs zur Verfügung stehenden Ressourcen definieren und die Grundlage für den Prozessschritt der Fahrplanung bilden. Dabei werden, entsprechend einer Nachfrage, Zugfahrten konstruiert, indem mittels eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems passende Systemtrassen ausgewählt werden.

Der so entstandene Fahrplan wird einerseits auf der Prozessebene der Fahrplanung bezüglich der Angebotsqualität bewertet. Zusätzlich und ergänzend erfolgt auf Bewertungsebene eine detaillierte Analyse der mit dem jeweiligen Fahrplan zu erwartenden Betriebsqualität und Verspätungsentwicklung im Netz. Hierzu wird ein stochastischer (max,+)-Ansatz gewählt, welcher Zugfahrten ganzheitlich auf Basis ihrer Verspätungsverteilungen beschreibt. Durch effiziente Wahl der Modellparameter und Modellreduktion können Verspätungen prognostiziert und kritische Strukturen in einem iterativen Feedbackloop mit der Trassengenerierung und -belegung auf Ebene der Fahrplanung identifiziert werden. Somit kann gezielt die Fahrplanung in Bezug auf die Robustheit optimiert werden. Gleichzeitig erlaubt der stochastische Ansatz die netzweite Analyse von Verspätungsförderungseffekten, da zugspezifisch an jedem Punkt des Zuglaufs – und somit auch in jeder Betriebsstelle – die Statistik der Verspätungen zur Verfügung steht. Die wesentlichen Bestandteile des Modellierungsansatzes werden nachfolgend näher beschrieben.

**Eingangsdaten und Nachfragestruktur**

Grundlage des Ansatzes ist eine makroskopische Umlegung von Güterverkehrsvolu-



1: Methodische Konzeption des Kapazitätsbewertungsansatzes Quelle: eigene Darstellung

mina. Hierzu werden zunächst makroskopische Nachfragerelationen identifiziert und in einem makroskopischen Eisenbahnnetz geroutet. An verkehrlichen Knotenpunkten erfolgt eine Unterteilung mit Bezug zur genutzten Infrastruktur (Streckenobjekte) in sogenannte Zuglaufabschnitte. Zuglaufabschnitte bilden die räumliche Grundlage für die Generierung von Systemtrassen, welche die Basis der nachfolgenden Trassenbildung darstellen. Im Projekt werden hierbei die Systemtrassen für die Strecken und Knoten separat gebildet.

Die Nachfragestruktur wird aus Daten des Statistischen Bundesamts [7] gebildet, welche in eine Quelle-Ziel-Matrix überführt wurden. Es ist vorgesehen, diese mit Querschnittsdaten zu kalibrieren und für verschiedene Szenarien zu skalieren. Die Grundlage der Systemtrassenbildung auf den Strecken bildet eine mesoskopische Streckeninfrastruktur, in der für jede Bahnstrecke die Kilometrierung, Betriebsstellen und Blocksignale vorliegen. Damit können die Blockabschnitte für die vorliegenden Strecken modelliert werden. Für das Projekt liegen hierfür mehrere Datensätze vor, sodass sowohl der IST-Zustand als auch der Zielfahrplan des Deutschlandtakts als Szenarien analysiert werden können.

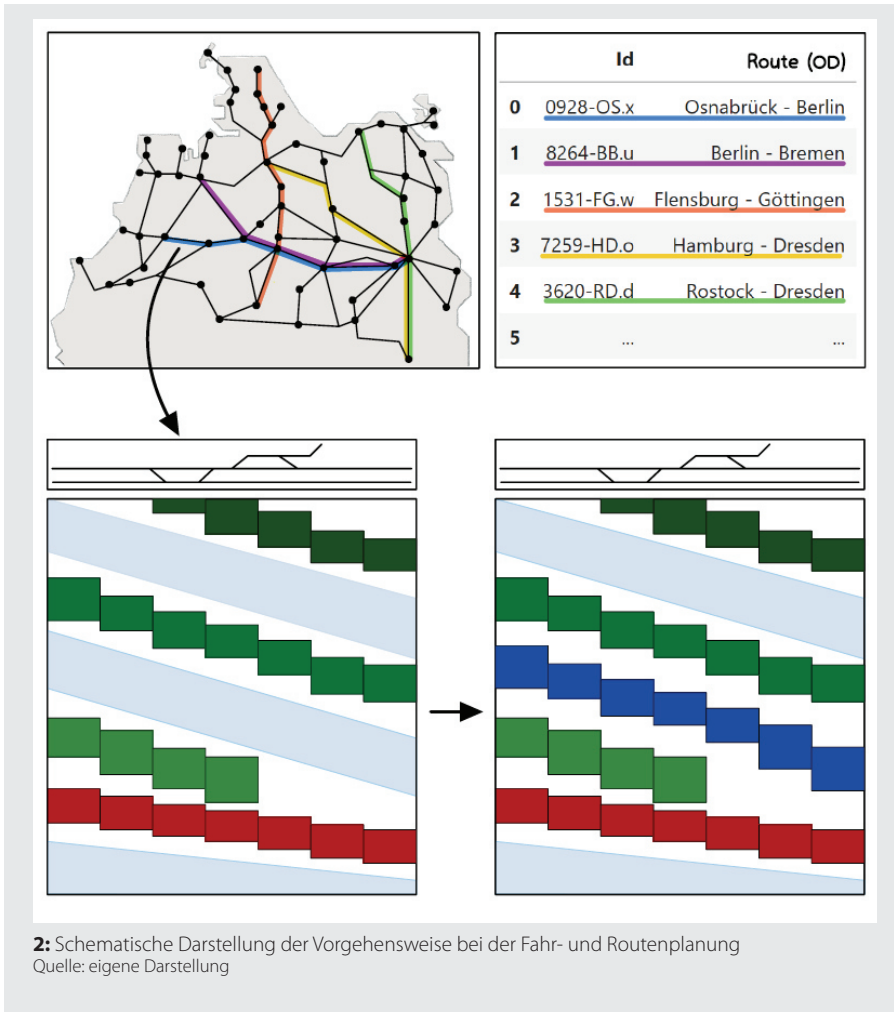
Die Knoten werden in beiden Datenquellen makroskopisch als Punkte betrachtet. Da für die Kapazitätsanalyse die Knoten eine entscheidende Rolle spielen, wird die

mikroskopische Knoten-Infrastruktur aus öffentlich verfügbaren Datenquellen bezogen und zur Berechnung von Fahrwegen durch die Knoten verwendet, welche anschließend die Basis für die Knotensystemtrassen bilden. Hierzu werden vorrangig Geodaten aus dem Openstreetmap-Projekt genutzt, welche es ermöglichen, für jeden Knoten den Knoten-Graph zu konstruieren. In diesem Graphen werden mögliche Ein- und Ausfahrstraßen sowie Konflikte zwischen diesen identifiziert. Auf Basis dieser werden dann Knotensystemtrassen für haltende und durchfahrende Züge konstruiert und Mindestzugfolgezeiten im Knoten abgeleitet.

**Fahrplanung**

Im Gegensatz zum Personenverkehr ist ein Langfristfahrplan für den Schienengüterverkehr nicht immer möglich und sinnvoll, da die Nachfrage täglich schwanken kann. Für die Abschätzung der fahrplanabhängigen Restkapazität im Schienengüterverkehr soll daher der Systemtrassenansatz [8] genutzt werden. Durch die Verwendung von Systemtrassen als Bausteine der Planung des Güterverkehrs können für eine konkrete Nachfrage-Situation schnell geeignete Zugläufe angeboten werden

Zur flexiblen Verknüpfung der Systemtrassen werden diese auf festgelegten Zuglaufabschnitten gebildet. Innerhalb



Eine schematische Darstellung der Vorgehensweise und einzelnen Verfahrensschritte in der Fahrplankonstruktion ist in Bild 2 gegeben. Im oberen Teil der Abbildung ist ein konkretes Nachfrageszenario mit insgesamt fünf Routen gegeben, welche verschiedene Zuglaufabschnitte durchlaufen. Im unteren Teil der Grafik ist der Bildfahrplan für einen Streckenabschnitt des Untersuchungsgebiets abgebildet. Die Züge des Personenverkehrs sind dabei durch rote und grüne Sperrzeitentrepfen visualisiert. Die konstruierten, konfliktfreien Systemtrassen sind im Bildfahrplan als hellblaue Zeit-Wege-Bänder dargestellt. Rechts daneben erfolgt die Belegung einer Systemtrasse durch einen Zug der Route 0, dargestellt als dunkelblaue Sperrzeitentreppe.

**Verspätungsprognose und Qualitätsbewertung mittels eines stochastischen (max,+)-Ansatzes**

Für eine gegebene Trassenbelegung im Zuge des vorgelagerten Fahrplanungs-schrittes wird in einem zweiten Schritt die netzweite Qualität des Zugbetriebs modelliert. Hierzu werden Zugfahrten und ihre Wechselwirkungen im Betrieb statistisch durch Verspätungsverteilungen bzw. mathematische Operationen auf Basis an eine (max,+)-Algebra angelehnter mathematischer Operationen auf dem zugrunde liegenden Aktivitätengraphen modelliert. Auf diese Weise liegen netzweit und zugspezifisch für den gesamten Laufweg statistische Informationen über die Pünktlichkeit und Verspätungsverteilung aller Zugfahrten vor, sodass anstelle einer mittelwertsbezogenen Qualitätsbewertung detaillierte verteilungsbasierte Metriken erschlossen werden, welche u.a. auch die Prognose der Erreichbarkeit von Anschlüssen o.ä. erlauben.

Der im Projekt verfolgte Ansatz erweitert den gegenwärtigen Stand der Technik (z.B. im Kontext von Fahrplanstabilitätsprognosen auf Basis der Software OnTime bei der SBB [9]) in verschiedenen Aspekten:

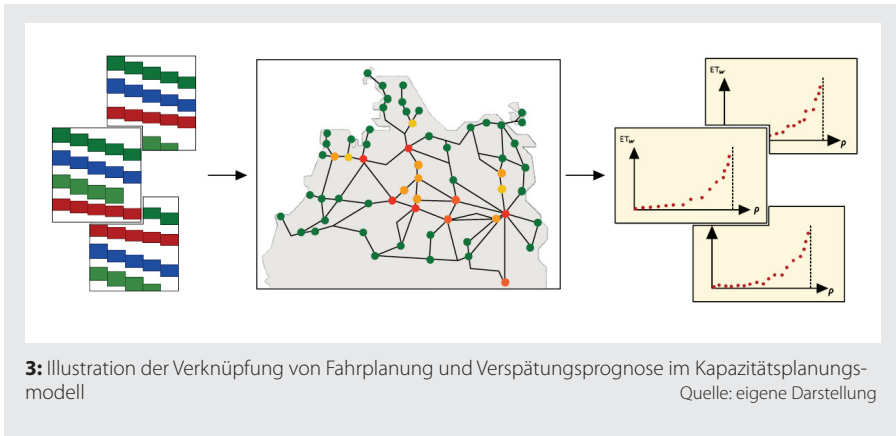
- Auf methodischer Ebene, indem dispositive Eingriffe wie Reihenfolgewechsel als alternative Events in Abhängigkeit der Verspätungssituation im Aktivitätengraphen modelliert werden. Die korrespondierende Modellierung der Übertragungseffekte erfolgt dabei rein numerisch wie in [10], wobei eine wahr-scheinlichkeitsbasierte Beschneidung

der Zuglaufabschnitte sollen die Güterzüge möglichst ohne größere Wartezeiten verkehren. Für eine flexible Kapazitätsnutzung ist es wichtig, eine gewisse Vielfalt an Systemtrassen anzubieten und damit für verschiedene Nachfragesituationen ein passendes Angebot machen zu können. Somit werden auf einem Zuglaufabschnitt mehrere Systemtrassen-Szenarien generiert, sodass in jedem Szenario die Kapazität optimal genutzt wird und die Trassen konfliktfrei sind. Systemtrassen verschiedener Szenarien können zueinander in Konflikt stehen.

Bei der Trassenbelegung werden dann für konkrete Nachfrage-Relationen die Güterzüge konstruiert, indem Systemtrassen verschiedenerer Zuglaufabschnitte zu einem Fahrweg zusammengesetzt werden. Dabei müssen auch Pausenzeiten und Fahrerwechsel berücksichtigt werden. Die ausgewählten Systemtrassen müssen konfliktfrei sein, um einen zulässigen Fahrplan zu gewährleisten. Die Trassenbelegung soll als gemischt-ganzzahliges Optimierungs-

problem formuliert und mit geeigneten Lösungsverfahren gelöst werden. Das Optimierungsziel ist dabei die Angebotsqualität, das heißt, es soll möglichst für alle angefragten Güterzüge ein Fahrweg gefunden werden und die Fahrtzeiten inkl. Wartezeiten sollten möglichst kurz sein, da lange Fahrtzeiten zum einen für den Kunden wenig attraktiv sind, aber auch die Kapazität reduzieren.

Für eine flexible Kapazitätsnutzung ist es wichtig, eine gewisse Vielfalt an Systemtrassen anzubieten und damit für verschiedene Nachfragesituationen ein passendes Angebot zu machen.



3: Illustration der Verknüpfung von Fahrplanung und Verspätungsprognose im Kapazitätsplanungsmodell  
Quelle: eigene Darstellung

von Übertragungspfaden im Aktivitätsgraphen vorgenommen werden soll.

- Auf numerischer Ebene, wo für die Koppelung mit Fahrplanungsalgorithmen zu einem Kapazitätsplanungsmodell effiziente Berechnungsmethoden benötigt werden, um Feedbackloops zwischen Fahrplanung und Pünktlichkeitsprognose zu erlauben.
- Im Bereich der Modellbildung, wo im Projekt untersucht werden soll, inwiefern eine modellimmanente, konsistente Autokalibrierung der hinterlegten Verspätungsstatistiken bzw. -verteilungen möglich ist.

### Anwendung zur netzweiten Kapazitätsbewertung

Durch die Kombination der beiden Methoden kann die mit einem gegebenen Fahrplankonzept zu erwartende Betriebsqualität unter Berücksichtigung von Fahrplanzusammenhängen gesamtheitlich für das Netz bestimmt werden, aber auch für einzelne Streckenabschnitte oder Knoten-

bereiche zeitlich aufgelöst untersucht werden (vgl. Bild 3). Im Gegensatz zu aktuell verwendeten Ansätzen auf Basis der Warteschlangentheorie oder der Kompressionsmethode nach UIC 406 [11] liegt erstmals ein auf Netzwerkebene konsistenter Ansatz für die Leistungsfähigkeitsbewertung von Strecken- und Knotensegmenten vor.

Als Kenngrößen für die Leistungsfähigkeit können neben bereits heute verwendeten Metriken wie Verspätungszuwachs, mittlere Verspätung oder Pünktlichkeit auch weitere verteilungsbasierte Kenngrößen untersucht werden. Dies ist besonders relevant, um die Effekte von seltenen Ereignissen korrekt wiedergeben zu können (vgl. [12]). Die entsprechenden Kenngrößen bilden die Grundlage der Kapazitätsbewertung und werden zur Evaluierung der mit einem gegebenen Verkehrsaufkommen bzw. Fahrplankonzept erzielbaren Betriebsqualität herangezogen.

Neben der evaluierenden Betrachtung der Verspätungsentwicklung in einem bestehenden Fahrplan können hierdurch beispielsweise auch besonders verspätungssensitive Punkte identifiziert werden, welche dann in einem Feedback-Loop zur Verbesserung des Fahrplankonzepts durch Adaption der Trassenlage und Reserven herangezogen werden können. Auf diese Weise ist die Methodik ebenfalls geeignet, Vorschläge zur Verbesserung der betrieblichen Robustheit zu geben.

In Summe wird durch das Projekt ein Beitrag zu einem besseren Verständnis der Kapazitätsauslastung im Kontext von teilfixierten Fahrplankonzepten geleistet, wie sie insbesondere für die Planung des Schienengüterverkehrs relevant sind. Nach Abschluss des Projektes liegt ein Verfahren vor, das es erlaubt, für gegebene Nachfragestrukturen ein mathematisch optimales Fahrplankonzept zu erstellen und die mit

dem entsprechenden Verkehrsaufkommen erzielbare Betriebsqualität zu bestimmen, sodass Infrastrukturdimensionierungsentscheidungen unter Berücksichtigung der Einschränkungen des Fahrplans getroffen werden können.

### Literatur

[1] A. Pfeifer, B. Kogel, N. Nießen, S. Kurby und U. Steinborn, „Zielgerichtete Infrastrukturdimensionierung durch eine netzweite Ermittlung der Kapazität“, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 10, S. 30-33, 2018.

[2] A. Fink, F. Hantsch, U. Martin, S. Schmidhäuser und M. Fietze, „Verfahren zur Leistungsuntersuchung von Knoten unter Berücksichtigung von Einflüssen aus dem umgebenden Netz“, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 5, S. 18-22, 2023.

[3] N. Weik, E. Hemminki und N. Nießen, „The effective residual capacity in railway networks with predefined train services“, in OR Proceedings 2019, S. 725-732, Springer, Cham, 2020.

[4] M. Maus, B. Kogel und N. Nießen, „Entwicklung einer Methodik zur netzweiten Kapazitätsbestimmung“, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 5, S. 24-28, 2023.

[5] D. Pöhle, Strategische Planung und Optimierung der Kapazität in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanung, disserta Verlag, Hamburg, 2016.

[6] K. Nachtigall und J. Opitz, „Modelling and Solving a Train Path Assignment Model“, in Operations Research Proceedings 2014, Springer, Cham, 2016.

[7] Genesis-Online, GENESIS-Tabelle: 46131-0013: Beförderte Güter (Eisenbahngüterverkehr): Deutschland, Jahre, Versandregion, Empfangsregion, Gütergruppen, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023.

[8] K. Nachtigall, O. Noll und D. Pöhle, „Ein innovatives Belegungsverfahren für den zukünftigen industrialisierten Fahrplanprozess“, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 12, S. 28-33, 2014.

[9] „On-Time - Netzweite Analyse der Fahrplanstabilität“, <http://www.ontime-rail.com/> (abgerufen am 10.04.2024).

[10] J. Yuan, Stochastic Modelling of Train Delays and Delay Propagation in Stations, Dissertation, TU Delft, 2008.

[11] UIC, Leaflet 406 - Kapazität, 2. Ausgabe, Paris, 2013.

[12] N. Weik, Long-term Capacity Planning of Railway Systems - A stochastic approach capturing infrastructure availability, Dissertation, RWTH Aachen, 2020.

### Summary

#### Timetable-based determination of the capacity of railway networks taking operational quality into account

In a DFG-funded project, researchers from TU Dresden and TU Munich are jointly developing an approach for determining the capacity of rail transport systems. By linking optimisation models based on pre-arranged paths for timetable planning and a stochastic (max,+) model for delay forecasting, the effect of transport concepts can be analysed network-wide and optimal use of the rail network can be controlled.