

Datenbasierte Ermittlung von Einflüssen auf die Kapazität

Analyse von Störungen und Geschwindigkeiten im Netz für die Optimierung von Betriebsqualität und Leistungsfähigkeit

ORIOLE ARGELAGUET | FABIAN ZWICK |
BASTIAN EHRENHOLZ |
JAN PETER HEEMSOOTH | STEFAN OLBRICH

Die in den kommenden Jahren angestrebte, ambitionierte Kapazitätserhöhung im deutschen Schienennetz soll vornehmlich mittels Infrastrukturmaßnahmen erreicht werden. Es gibt jedoch darüber hinaus zahlreiche verkehrliche und betriebliche Faktoren, die die bestehenden Kapazitäten entweder optimieren oder deren geplante Steigerung beeinträchtigen könnten. Dieser Beitrag untersucht die wirksamsten Einflüsse aus den Bereichen Störungsgeschehen und Fahrplandurchführung unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten und deren Interaktion im Eisenbahnnetz. Darauf folgend werden Potenziale zur Optimierung der bestehenden Kapazitäten abgeleitet.

Der vielschichtige Begriff der Kapazität im Schienenverkehr, welcher sich von der Betriebsqualität bis zur Leistungsfähigkeit erstreckt, steht seit einigen Jahren verstärkt im Fokus. Neben politischen Diskussionen rund um die Verbesserung des Systems Bahn nimmt sich auch die Wissenschaft des Themas an. Dabei verfolgt der Bund die im Schienenpakt des Zukunftsbündnis Schiene gesetzten Ziele bis 2030, die Verkehrsleistung im Schienenpersonenverkehr (SPV) in Bezug auf das Basisjahr 2016 (94,2 Mrd. Pkm) zu verdoppeln und den Marktanteil im Schienengüterverkehr (SGV) in Bezug auf den Modal Split auf 25 % zu erhöhen. Fakt ist, dass sich der SPV erst im Jahr 2022 von dem Fahrgastzahleneinbruch der COVID-19-Pandemie erholt hat (mit 95,2 Mrd. Pkm). Gleichzeitig stagniert der SGV-Anteil der Gesamtverkehrsleistung (abzüglich Straßengüternahverkehr) jahrzehntelang bei unter 20 % [1].

Inwiefern sich die Unterschiede zwischen einer guten und einer schlechten Konjunktur auf diese Zahlen auswirken, ist eine offene Frage. Die Fragestellung im DZSF-Projekt „Ermittlung und Optimierung von Einflüssen im SPV und SGV auf die Kapazität des Gesamtsystems Schiene“ zielt vielmehr darauf, die Steuerbarkeit eines solchen Anstieges der Verkehrsleistung systematisch je Einflussfaktor zu ermitteln.

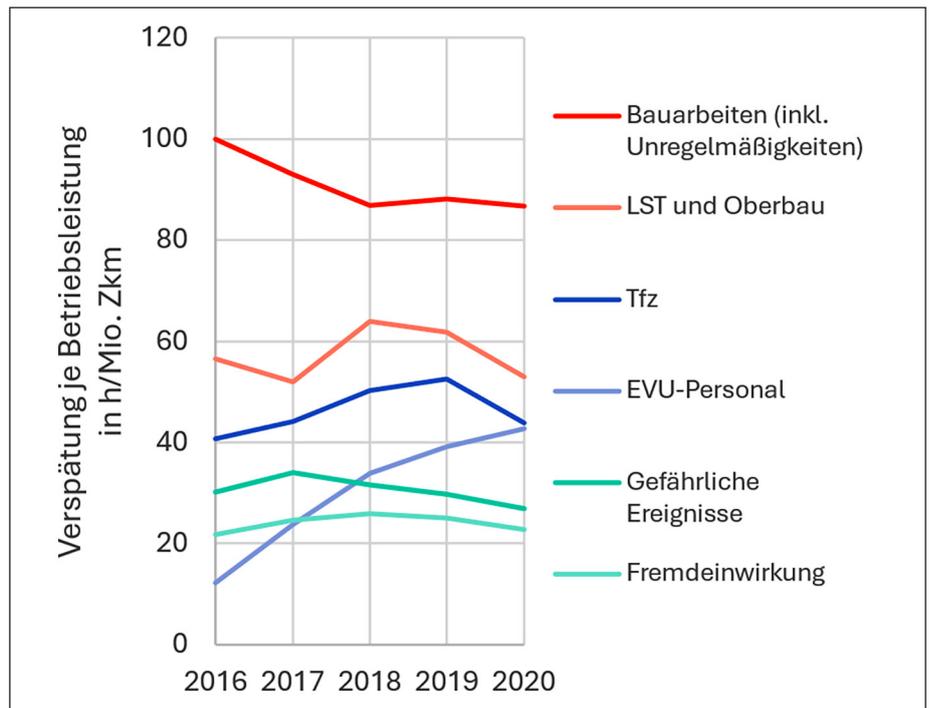


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der Verspätung der wirksamsten Störungen von 2016 bis 2020

Quelle: IFB

Aus fachlicher Perspektive kann die Kapazitätswirkung einzelner Faktoren nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Beispielsweise ist die pauschale Geschwindigkeitserhöhung auf einer Strecke für den Fernverkehr von Vorteil. Steigt aber die Heterogenität zwischen den Verkehrsarten, muss im konkurrierenden Nah- und Güterverkehr auf Trassen verzichtet werden. Ebenso würde eine Minimierung der Zugfolgezeit und Pufferzeiten die Leistungsfähigkeit erhöhen, dadurch wären aber Robustheit und Zuverlässigkeit stark betroffen.

Die Analyse im Beitrag ist systematisch in drei Bereiche gegliedert. Zuerst werden die wirksamsten Ursachen im Störungsgeschehen und Optimierungspotenziale in der Betriebsdurchführung ermittelt. Zweitens sind fahrplantechnische Einflüsse nach Wirkung einzuordnen und Potenziale für die Ausnutzung der vorhandenen Kapazität zu beleuchten. Als Letztes werden relevante Merkmale für die Erhöhung der Leistungsfähigkeit untersucht. Als Basis dienen hierfür unter anderem Betriebsdaten über den Zeitraum 2016 bis 2020, welche die Deutschen Bahn AG (DB) für dieses Projekt zur Verfügung gestellt hat.

Betriebsoptimierung

Die Einordnung von Verspätungsursachen nach Zuständigkeitsbereich ist für die Entgeltregelung (und ein funktionsfähiges Anreizsystem) relevant und wird im Eisenbahnregulierungsgesetz (ERegG) geregelt. Die Zuständigkeiten werden entweder Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) oder externen Einflüsse zugeordnet. Die Umsetzung des Kodierungsprozesses obliegt der DB InfraGO AG, die als größtes EIU Deutschlands gleichzeitig für die Instandhaltung der Infrastruktur zuständig ist. Diese Rollenüberlappung stellt laut Monopolkommission [2] die Plausibilität dieser Zuordnung in Frage, weil gewisse externe Ursachen tatsächlich dem EIU zugerechnet werden könnten.

Insbesondere fällt auf, dass (weder im Netzfahrplan noch im Bauportal Kundeninformation Großbaumaßnahmen (KiGbau) enthaltene) Bauarbeiten die wirksamste Verspätungsursache im EIU-Zuständigkeitsbereich sind (Abb. 1). Im Weiteren sind die dadurch generierten Verspätungsminuten seit 2020 um über

50 % gestiegen [3]. Die fehlende Zuverlässigkeit in der Bauplanung wirkt im Rahmen der zahlreichen geplanten Infrastrukturmaßnahmen in den kommenden Jahren (u. a. Grundsicherungen) herausfordernd. Zudem zeigt sich eine stark wachsende Tendenz zu Störungen an Oberbau (inkl. Weichen) und Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik (LST), welche auf den bekannten schlechten Infrastrukturzustand zurückzuführen sind.

Neben der Darstellung der wirksamsten Störungen in Abb. 1 sind in Abb. 2 die EVU-bezogenen Verspätungsursachen nach Verkehrsart dargestellt. Die folgenreichsten Ursachen, welche mit der größten durchschnittlichen Verspätung je Störung besonders hervorstechen, bestehen auf der einen Seite aus gefährlichen Ereignissen (z. B. Zugkollisionen, Suizide). Deren Wirkung lässt sich jedoch schwer reduzieren, da bereits wenige Fälle erhebliche Folgen auf den Betrieb haben können. Auf der anderen Seite gibt es Störungen am Triebfahrzeug (Tfz), die zwar regelmäßig auftreten, aber aufgrund ihrer Vielfältigkeit in ihrer Vorbeugung nur mit großem Aufwand denkbar wären. Diese Störungsarten befinden sich daher im orange markierten Bereich.

Hingegen beinhalten die Störereignisse im grün markierten Bereich, aufgrund eines ge-

eigneten Verhältnisses zwischen Wirkungsgrad und Störanzahl, das größte Potenzial, ihre Wirkung zu reduzieren. Darunter fallen überwiegend personal- und fahrzeugbedingte Ursachen (insbesondere Bremsstörungen und Heißläufer) im SGV. Konkret handelt es sich bei den personalbedingten Ursachen um Fehlhandlungen des Zugpersonals, Einhaltung der Pausenregelung und Probleme beim Personalwechsel.

Insgesamt ist es für die Erhöhung der Robustheit seitens der EVU notwendig, die Ressourcen so einzuplanen, dass genug Reserven für die Aufnahme von Unregelmäßigkeiten übrigbleiben. Außerdem sollen die Betreiber durch regelmäßige Überprüfungen der Brems- und Radlagersysteme dafür sorgen, dass sich ihr Wagenmaterial in gutem Zustand befindet. Die Ausstattung von Güterwagen mit Sensorik und die Einführung prädiktiver Instandhaltung sind zu berücksichtigen. Dies soll jedoch in eigenem Interesse der Betreiber bereits erfolgen. Der hohe Wettbewerb im SGV zeigt dabei aber auf, wie wenig Spielraum für die EVU besteht.

Es gibt sehr starke Abhängigkeiten zwischen den Zuständigkeitsbereichen, sodass die Fahrplan- und Betriebsdurchführung von einer engeren Kooperation von EIU und EVU

entscheidend profitieren könnte. Angesichts des gravierenden Personalmangels sollten Ansätze wie die integrierte Fahr-, Umlauf- und Dienstplanung vorangetrieben werden. Das Baustellenmanagement sollte sich mittels koordinierter Optimierung der Sperrpausen und Streckensperrungen weiterentwickeln und die Planbarkeit für die EVU anhand einer verbesserten Kommunikation hinsichtlich Baumaßnahmen erleichtern. Auch die DB InfraGO AG arbeitet bereits an der Ertüchtigung der Baustellenplanung und Durchführung mit den Konzepten „Generalsanierung“ oder „Bauen im Takt“.

Kapazitätsoptimierung

Die zuvor beschriebenen Störungen wirken täglich negativ auf die nutzbaren Kapazitäten im Schienenverkehr ein. Eine Verringerung des Störgeschehens wirkt somit auf eine bessere Ausnutzung bereits geplanter Kapazitäten. Die geplanten Kapazitäten im Jahresfahrplan unterliegen hingegen einem längeren Vorlauf und gewissen Planungsgrundsätzen. Auch bei der langfristigen, strategischen Planung des Eisenbahnbetriebs sind daher Optimierungen möglich.

Bei der Betrachtung der Geschwindigkeitschere, also der Geschwindigkeitsdifferenz

PRÄZISE MESSTECHNIK

als zuverlässige Komponente der Schieneninstandhaltung



Vogel & Plötscher

Maß nehmen.



Weichen- und Streckenvermessung



Schienenfehlerprüfung



Längsprofilmessung

Präventives Messen • Kostenreduktion durch Planbarkeit von Maßnahmen • Abnahmemessungen • Lebenszyklus erhöhen

... und viele Anwendungen mehr auf www.vogelundploetscher.de

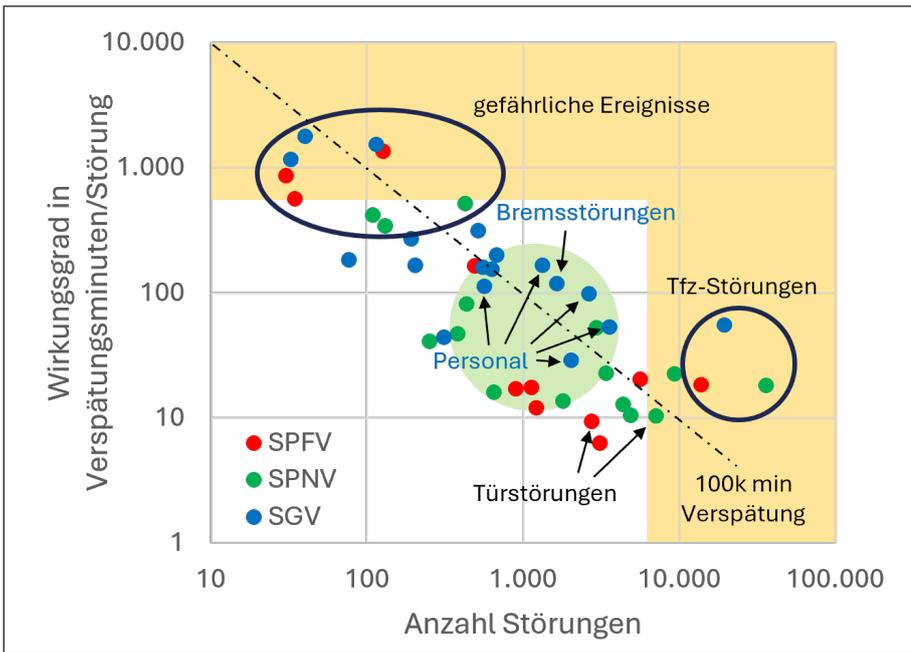


Abb. 2: Verhältnis Wirkungsgrad – Anzahl Störungen im EVU-Zuständigkeitsbereich *Quelle: IFB*

der aufeinanderfolgenden Verkehre auf demselben Streckenabschnitt, wird deutlich, dass bei unpassender Infrastruktur die vorhandene Kapazität nicht optimal ausgenutzt wird. Dies ist kein bahnspezifisches Phänomen, sondern tritt bei allen Verkehrsmitteln auf, die nicht harmonisiert verkehren. In Deutschland wird das Eisenbahnnetz nahezu vollständig im Mischverkehr betrieben, wodurch es permanent zur gegenseitigen Behinderung von schnellen Fernverkehrszügen sowie langsamen Nahverkehrs- und Güterzügen kommt. Grundsätzlich ist der Jahresfahrplan kapazitätsoptimiert konstruiert, und die Geschwindig-

keitsdifferenzen der Verkehrsarten sind unter Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur aufeinander abgestimmt. Aufgrund der im täglichen Betrieb sehr häufig auftretenden Störungen werden außerplanmäßige Überholungen oder Haltezeitverlängerungen im geplanten Überholgleis der langsameren Zuggattungen notwendig. Diese bauen hierdurch Verspätungen auf und verursachen ihrerseits Folgeverspätungen im weiteren Fahrtverlauf.

Abb. 3 zeigt beispielhaft eine Geschwindigkeits- und Fahrzeitverteilung von 15 ausgewählten Betriebsstellenabschnitten einer hoch ausgelasteten Strecke im Zeitraum von 6 bis 22 Uhr. Die

Zugzahlen im oberen Abschnitt der Grafik zeigen eine Auslastung der Strecke, die permanent über der vom EIU angenommenen Nennleistung liegt. Der mittlere Abschnitt zeigt die Geschwindigkeiten der im Betriebsstellenabschnitt verkehrenden Züge, welche sich nach Zuggattungen unterteilen. Hierbei ist auffällig, dass der SPFV die Streckenhöchstgeschwindigkeit ausnutzen kann, während der SPNV und SGV geringere Geschwindigkeiten fahren. Im untersten Abschnitt sind die IST-Zeit-Veränderungen aufgetragen. Dabei lassen sich insbesondere für den SGV deutliche Ausschläge im linken Bereich der Abbildung feststellen. Dies kann darauf hindeuten, dass es in diesem Bereich zu ungeplanten Überholungen des SGV durch den schnelleren SPFV kommt, sodass dieser in den nachfolgenden Betriebsstellenabschnitten eine deutlich höhere Streckengeschwindigkeit fahren kann.

Durch die Betrachtung der gefahrenen Züge pro Tag und Streckenabschnitt sowie deren dazugehörige mittlere Geschwindigkeit lässt sich anhand der vorliegenden Daten die Theorie in der Praxis bestätigen: Bei einer Harmonisierung der mittleren Geschwindigkeiten sind höhere Zugzahlen möglich (Kapazitätsoptimierung). Dies kann einerseits durch Reduktion der maximalen Geschwindigkeit im SPFV erfolgen, was wiederum den notwendigen Kantenfahrzeiten widersprechen kann. Andererseits ist zu prüfen, inwiefern insbesondere im SGV Potenziale für eine Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit vorhanden sind, wobei der Energieverbrauch eine betriebswirtschaftliche Grenze darstellen kann.

Die Nutzung der bestehenden Kapazität des deutschen Eisenbahnnetzes kann, wird und muss in Zukunft stetig optimiert werden. Dabei werden kurz- und mittelfristige Maßnahmen, wie beispielsweise moderne Leit- und Siche-

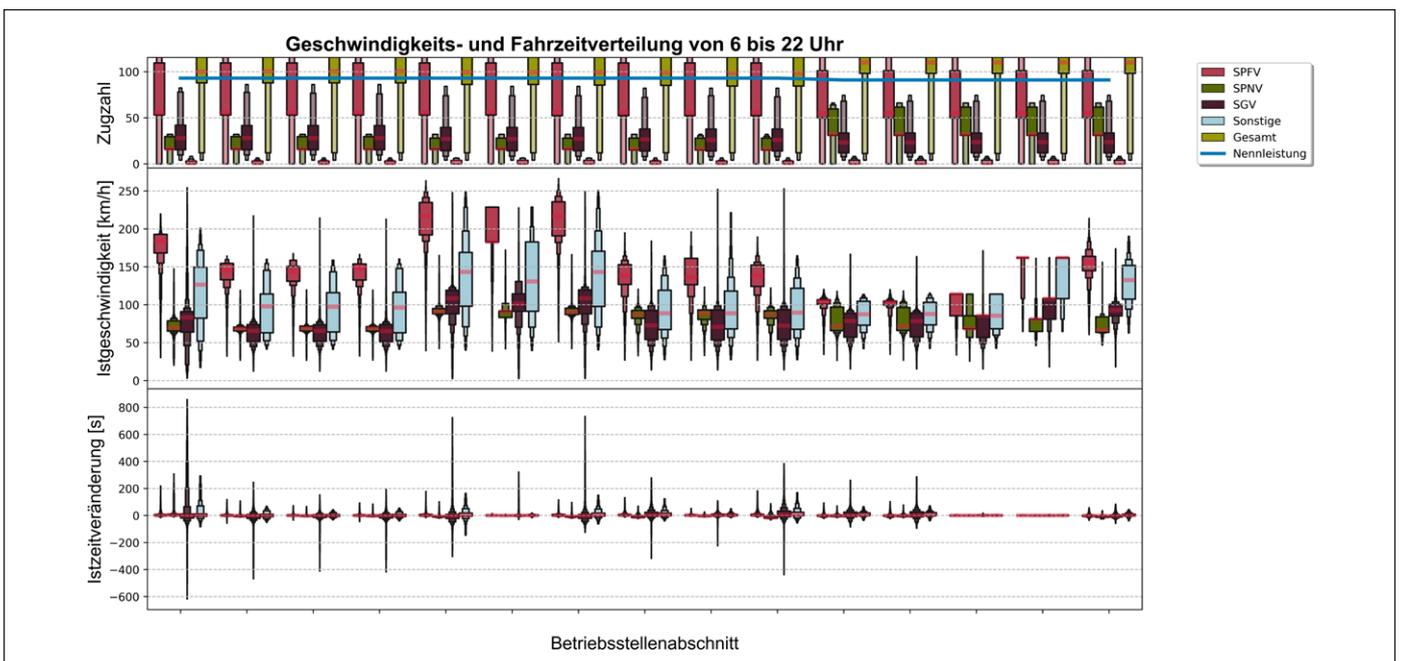


Abb. 3: Geschwindigkeits- und Fahrzeitverteilung von 6 bis 22 Uhr

Quelle: IVE

rungstechnik, helfen. Solche kapazitätsoptimierend wirksamen Maßnahmen werden in Zukunft zusätzlich von intelligenten Systemen flankiert. Die Digitalisierung des Eisenbahnnetzes ermöglicht es, die bestehende Kapazität bestmöglich auszunutzen und ein Verkehrsmanagement für das Schienennetz zu etablieren, welches schnell und effizient auf Störungen reagieren kann. ETCS kann dabei ein (Kapazitäts-) Baustein des modernen, europäischen Eisenbahnbetriebs sein.

Allerdings besitzt die Schieneninfrastruktur eine physikalische Kapazitätsgrenze, die bei allen möglichen Optimierungen ab einem gewissen Punkt ausgereizt sein wird. Bis zu welchem Grad die Kapazität der Schieneninfrastruktur optimiert werden kann, hängt stark vom betrachteten Scope ab und kann nicht pauschal beantwortet werden.

Kapazitätssteigerung

Die Kapazitätssteigerung im Bereich der Eisenbahn in Deutschland ist ein zentrales und oft diskutiertes Thema für die Effizienz, Zuverlässigkeit und nicht zuletzt auch die Pünktlichkeit des Schienenverkehrs sowie die Förderung umweltfreundlicher Mobilität. Um die Kapazität auf der Schiene zu erhöhen, gibt es mehrere Ansätze, die in Betracht gezogen werden sollten. Die bestehende Kapazität kann durch

entsprechende optimierende Maßnahmen nicht unendlich gesteigert werden, sondern benötigt ab einem gewissen Grenzwert sehr wahrscheinlich eine tatsächliche Anpassung der physikalischen Infrastruktur.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Modernisierung der Infrastruktur. Eine Steigerung der Kapazität im Eisenbahnnetz kann hier bereits durch kleine, gezielte Maßnahmen für bestimmte Strecken erreicht werden. Ein Beispiel dafür ist der Weicheneinbau, der es ermöglicht, mehrere Züge effizienter auf einem bzw. mehreren Gleisen zu führen. Durch den gezielten Einsatz von Weichen an strategischen Punkten im Streckennetz kann die Flexibilität deutlich erhöht und die Zugfolge optimiert werden. Dies kann somit zu einer besseren Auslastung der bestehenden Infrastruktur führen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Aus- und vollständige Neubau von Gleisinfrastrukturen. Der Neubau zusätzlicher Gleise auf stark frequentierten Strecken trägt dazu bei, Engpässe zu vermeiden und aufzulösen. Der Ausbau und Betrieb von Überholgleisen mit passenden Weichen bzw. entsprechenden Bogenradien hingegen ermöglicht das Überholen langsamer Züge und kann somit eine bessere Fließgeschwindigkeit für den schnelleren Eisenbahnverkehr gewährleisten.

Im Rahmen des Projekts wurde unter anderem auch die Heterogenität des Streckennetzes betrachtet. Hierfür wurde der Zugmix für jeden Betriebsstellenabschnitt untersucht und den Kategorien SPV oder SGV zugeordnet, sodass nach dieser binären Definition die höchste Heterogenität bei 50 % vorliegt. Abb. 4 zeigt hierzu die Zugzahlen je Heterogenitätswert. Die Analyse der Zugzahlen über die Heterogenität zeigt, dass die höchsten Zugzahlen während des Betriebszeitraums am Tag (bis zu 350 Züge in 16 Stunden) bei einer Heterogenität von $H = 0$ erreicht werden. Dies ist im verdichteten S-Bahnverkehr auf eigener Infrastruktur möglich. Mit steigender Heterogenität nehmen die beobachteten Zugzahlen tendenziell ab. Für die tagsüber fahrbaren Zugzahlen ergibt sich eine kleinste obere Grenze von ca. 150 Zügen pro 16 Stunden, sofern das Betriebsprogramm nach der binären Definition heterogen ist.

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass es im realen Mischbetrieb eine signifikante obere Grenze für die Zugzahlen gibt, welche nicht überschritten wird: Ebenso existiert ein Minimum an möglichen Zugzahlen bei mittlerer Heterogenität. Diese Erkenntnisse liefern wichtige Hinweise für die infrastrukt-

iaf 29. Internationale Ausstellung
Fahrwegtechnik

29. Internationale Ausstellung Fahrwegtechnik (iaf) 20. - 22. Mai 2025 in Münster

- Weltweit größte Messe auf dem Gebiet der Fahrwegtechnik
- Über 200 internationale Aussteller
- Über 15.000 Fachbesucher
- 15.000 m² Hallenfläche, 6.000 m² Freigelände und 3 km Gleise
- Seminare und Workshops im iaf Salon
- Jobbörse und Karrieretag



Weitere Informationen unter:
www.iaf-messe.com

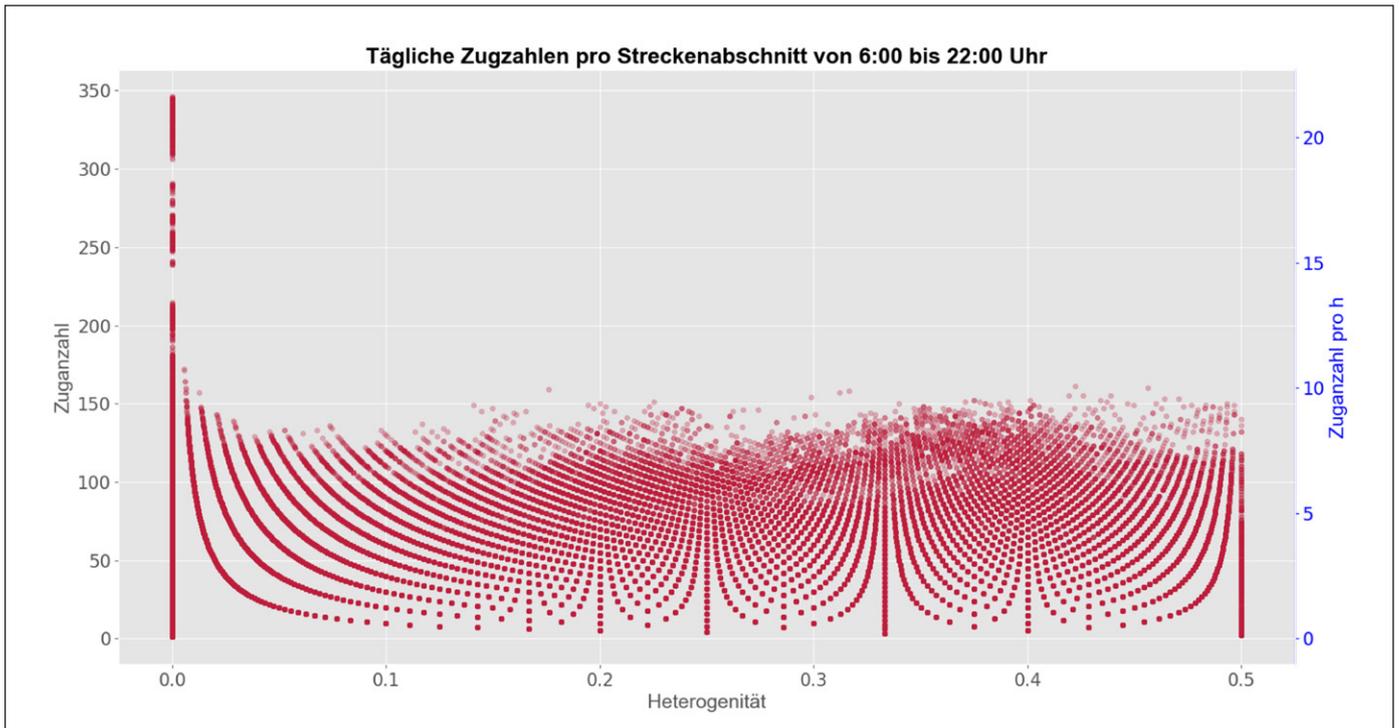


Abb. 4: Zugzahl über Heterogenität H für jeden Streckenabschnitt

Quelle: IVE

turellen Anforderungen und Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Kapazität des Schienenverkehrs nachhaltig zu steigern.

Somit spielt auch die Entflechtung der Verkehrsarten im Eisenbahnverkehr eine entscheidende Rolle bei der Steigerung der Kapazität auf der Schiene. Durch die Schaffung klarer Trennlinien zwischen langsameren, öfter haltenden oder schnelleren Verkehrsarten, wie dem Personennah- und Fernverkehr sowie dem Güterverkehr, kann eine effizientere Nutzung der Schieneninfrastruktur erreicht werden. Wenn langsamere oder öfter haltende Züge auf separaten Strecken verkehren, wird der störungsanfällige Mischbetrieb reduziert, wodurch die Pünktlichkeit und Frequenz der Züge im Allgemeinen erhöht werden können. Neben der Entflechtung durch den Aus- und Neubau dedizierter Gleise für Verkehrsarten oder die Implementierung von Zeitfenstern für unterschiedliche Verkehrsarten führen verbesserte Abläufe auch zu einer optimalen Auslastung der vorhandenen Kapazitäten.

Erkenntnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Entflechtung der Verkehrsarten im Eisenbahnverkehr verdeutlichen, dass eine relevante Kapazitätssteigerung maßgeblich nur durch den

Aus- und Neubau zusätzlicher Infrastruktur möglich ist. Während kleinere Maßnahmen, wie beispielsweise der Weicheneinbau, bereits kurzfristige Verbesserungen bringen können, erfordert die langfristige Optimierung der Kapazitäten umfassendere infrastrukturelle Investitionen und den Neubau von Schieneninfrastruktur. Auch vergleichsweise kleinere Maßnahmen im Bereich der Sicherungstechnik, wie die Blockverdichtung und die Aufrüstung auf ETCS, kann Kapazitätsvorteile bringen, wenn alle Aspekte (z. B. Bremskurven) mit einbezogen und entsprechend beachtet werden.

Der gezielte Bau dedizierter Gleise für die Entflechtung sowie die Implementierung separater Strecken für den langsameren oder öfter haltenden Verkehr sind essenziell, um die verschiedenen Verkehrsarten effizient zu entflechten und den Mischbetrieb sowie die Geschwindigkeitsschere zu reduzieren. Diese Maßnahmen führen nicht nur zu einer höheren Pünktlichkeit und Frequenz der Züge, sondern ermöglichen auch eine optimale Auslastung der bestehenden Kapazitäten. Die bisherigen Untersuchungen verdeutlichen somit die Notwendigkeit einer strategischen Planung hinsichtlich Infrastruktur-

anforderungen und -maßnahmen, um den steigenden Ansprüchen an das Eisenbahnsystem gerecht zu werden und leistungsfähige Mobilität nachhaltig zu gewährleisten.

QUELLEN

- [1] BMDV: Verkehr in Zahlen, 2024
- [2] Monopolkommission: 9. Sektorgutachten Bahn, 2023
- [3] DB Netz AG: Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht, 2023



Oriol Argelaguet, M.Sc.

Projektleiter
IFB Institut für Bahntechnik GmbH,
Berlin
oa@bahntechnik.de



Fabian Zwick, M.Sc.

Doktorand
Institut für Verkehrswesen,
Eisenbahnbau und -betrieb
TU Braunschweig, Braunschweig
f.zwick@tu-braunschweig.de



Bastian Ehrenholz, M.Sc.

Doktorand
Institut für Verkehrswesen,
Eisenbahnbau und -betrieb
TU Braunschweig, Braunschweig
b.ehrenholz@tu-braunschweig.de



Jan Peter Heemsoth, M.Sc.

Doktorand
Institut für Verkehrswesen,
Eisenbahnbau und -betrieb
TU Braunschweig, Braunschweig
j.heemsoth@tu-braunschweig.de



Dipl.-Ing. Stefan Olbrich

Wissenschaftlicher Referent
Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung
beim Eisenbahn-Bundesamt, Dresden
olbrichs@dzsf.bund.de