Streckenstandards – Mindestelemente für eine leistungsfähige und resiliente Infrastruktur

Lange Nutzungsdauern sowie hohe Investitionsaufwände erfordern die Einbeziehung langfristiger Anforderungen bei der Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur. Die planerischen Vorgaben zur Ausgestaltung betrieblicher Infrastruktur sind bei der DB Netz AG in der Richtlinienfamilie 413 „Infrastruktur gestalten" verankert. Diese wird derzeit aktualisiert und an zukünftige Randbedingungen angepasst.

Tobias Müller, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
mueller@via.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Andreas Pfeifer
Oberingenieur
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
pfeifer@via.rwth-aachen.de

Tamme Emunds, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
emunds@via.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Institutsleiter
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
niessen@via.rwth-aachen.de

Maximilian Kliem, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
kliem@via.rwth-aachen.de

Erwin Hilbrich, M. Sc.
Leiter EBWU Mitte / Südwest
DB Netz AG
erwin.hilbrich@deutschebahn.com

1. Motivation

Das prognostizierte hohe Verkehrswachstum auf der Schiene stellt eine große Herausforderung an die Eisenbahninfrastruktur dar, da bereits heute viele Streckenabschnitte und Knoten hoch ausgelastet sind. Daher ist es von besonderem Interesse, die betriebliche Infrastruktur für diese Belastung adäquat zu dimensionieren oder zukünftige Engpässe des Netzes frühzeitig zu detektieren und durch gezielte Ausbaumaßnahmen entsprechend zu ertüchtigen.

Als Leitfaden für die initiale Planung der betrieblichen Infrastruktur fungiert innerhalb der Richtlinienfamilie 413 dabei die Richtlinie 413.2001 (alt 413.0301) „Streckenstandards" [1]. Ein Streckenstandard ist ein Katalog an Gestaltungsparametern für Eisenbahnstrecken, welcher auf Basis der geplanten Streckengeschwindigkeit und der erwarteten Streckenbelastung Mindestvorgaben zu einer Auswahl an relevanten Planungsparametern (z. B. Lichtraumprofil) und Standardelementen (z. B. Blockteilung, Überleitstellen) beschreibt. Die gestiegenen Anforderungen an das System Schiene aus der angestrebten Verkehrswende erfordern dabei ebenso wie der Aufbau des Deutschlandtaktes und die Etablierung neuer Techniken (z. B. ETCS, Digitale Automatische Kupplung) eine Anpassung der bestehenden Vorgaben an betriebliche Infrastruktur, welche basierend auf der Strategie Netz 21 in den 1990er-Jahren entstanden sind und den Fokus auf einen „kostengünstigen" Fahrweg richtete.

Eine wesentliche regulatorische Entwicklung nach Einführung der ursprünglichen Streckenstandards sind die Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI); besondere Relevanz haben die Regelungen für das Teilsystem Infrastruktur [2]. Sogenannte TSI-Verkehrscodes (P1 bis P6 für Personen- und F1 bis F4 für Güterverkehr) definieren grundlegende Anforderungen auf europäischer Ebene an eine so deklarierte Strecke; eine Übersicht der Anforderungen zeigt Bild 1.

Aufgrund der veränderten Anforderungen wurde das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen (VIA) durch die DB Netz AG mit dem Forschungsvorhaben beauftragt, um für eine grundlegende Überarbeitung der Streckenstandards eine breite wissenschaftliche Basis zu schaffen. Des Weiteren wurden Standardelemente

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DB Netz AG und RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Verkehrscode Personenverkehr	Begrenzungs-linie	Radsatzlast [t]	Strecken-geschwindigkeit [km/h]	Bahnsteig-nutzlänge [m]
P1	GC	17	250 – 350	400
P2	GB	20	200 – 250	200 – 400
P3	DE3	22,5	120 – 200	200 – 400
P4	GB	22,5	120 – 200	200 – 400
P5	GA	20	80 – 120	50 – 200
P6	G1	12	nicht relevant	nicht relevant

Verkehrscode Güterverkehr	Begrenzungs-linie	Radsatzlast [t]	Strecken-geschwindigkeit [km/h]	Zuglänge [m]
F1	GC	22,5	100 – 120	740 – 1050
F2	GB	22,5	100 – 120	600 – 1050
F3	GA	20	60 – 100	500 – 1050
F4	G1	18	nicht relevant	nicht relevant

1: Infrastrukturelle Anforderungen der TSI-Verkehrscodes Quelle: Eigene Darstellung nach [2]

Das erwartete Verkehrswachstum auf der Schiene erfordert eine angemessene Dimensionierung der Infrastruktur.

der Knotengestaltung untersucht und Planungsempfehlungen für deren Ausgestaltung gegeben.

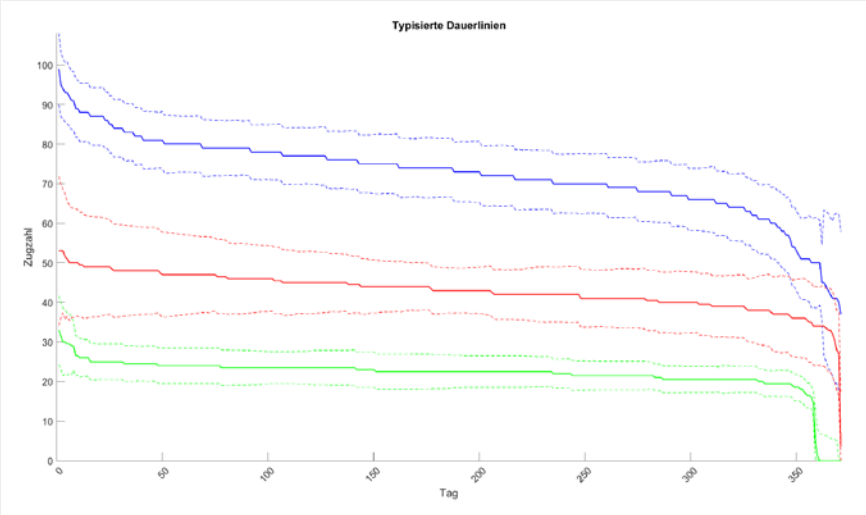
2. Strecken

2.1. Ermittlung repräsentativer Belastungen von Eisenbahnstrecken

Der Infrastrukturdimensionierung werden bislang prognostizierte mittlere Auslastungen zugrunde gelegt. Die Belastung eines Eisenbahnnetzes unterliegt jedoch zeitlichen Schwankungen. So variieren sowohl die Belastung (Zuganzahl) als auch die Auslastung (Verzehr der Leistungsfähigkeit des Infrastrukturelementes) über den Tages-, Wochen- und Jahresverlauf. Um diese zeitlichen Schwankungen der Belastungen im Jahresverlauf hinreichend zu berücksichtigen, ist es zielführend, das Verfahren zur Ermittlung der für die Dimensionierung maßgeblichen Zugfahrten ergänzend um die Verwendung von Spitzenzeiträumen zu erweitern. Durch einen Abgleich mit den Dimensionierungsgrundsätzen der Infrastruktur von Bundesfernstraßen können für die Eisenbahnbetriebswissenschaft zielführende Erkenntnisse etabliert werden [3]. So erfolgt die Dimensionierung von Straßenverkehrsanlagen anhand von sogenannten „Dauerlinien", also den der Größe nach sortierten Verkehrsstärken aller Stunden eines Jahres. Maßgebend für die Dimensionierung ist hier die 50.- höchste Verkehrsstärke (sog. „Bemessungsverkehrsstärke"), die mit empirisch ermittelten Kapazitätswerten ins Verhältnis gesetzt wird. Der auf diese Weise ermittelte Auslastungsgrad muss dabei für Neu-, Aus- und Umbaumaßnahmen der Einhaltung einer definierten Mindestqualität genügen. Die Verwendung der Bemessungsverkehrsstärke der 50. Spitzenstunde des Jahres gewährleistet daher eine geeignete Dimensionierung der Straßeninfrastruktur, da hohe Auslastungsgrade bzw. Spitzenzeiträume angemessen berücksichtigt werden.

In der Folge zeigt sich für die Schieneninfrastruktur eine deutlich häufigere Überlastung im realen Betrieb als für die Straßeninfrastruktur, da aufgrund der Verwendung prognostizierter mittlerer Belastungen saisonale Schwankungen und Spitzenzeiträume nur unzureichend berücksichtigt werden [3]. Die Übernahme dieses Vorgehens einer rückblickenden Bewertung von Belastungen eines Streckenabschnittes im Jahresgang kann dabei die Infrastrukturdimensionierung von Eisenbahnstrecken wirksam unterstützen. Im Rahmen der Überarbeitung der Streckenstandards wurden aus netzweiten Betriebsdaten erstmalig typisierte Dauerlinien, also der Größe nach absteigend sortierte Darstellungen der Zuganzahlen oder Belastungen für relevante Kombinationen von TSI-Verkehrscodes abgeleitet (vgl. Bild 2).

Für die Aktualisierung der Mindestelemente der Streckenstandards werden diese typisierten Dauerlinien als Grundlage für die Ableitung der Betriebsprogramme herangezogen. In Kombination mit einer hinreichenden Berücksichtigung der typischen, real auftretenden Schwankungen



2: Typisierte Dauerlinien einer TSI-Verkehrscodekombination mit drei Leistungsklassen („Grundbelastung" in Grün, „mittlere Belastung" in Rot, „hohe Belastung" in Blau) Quelle: Eigene Darstellung

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DB Netz AG und RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Streckenstandard		Leistungsklasse: Grund-belastung	mittlere Belastung	hohe Belastung
P1	Hochgeschwindigkeitsstrecke für Personenverkehr	P1 Gb		P1 hB
P1 / F1	Hochgeschwindigkeitsstrecke für Mischverkehr	P1 / F1 Gb		P1 / F1 hB
P2 / F1	Hochgeschwindigkeitsstrecke für Mischverkehr	P2 / F1 Gb	P2 / F1 mB	P2 / F1 hB
P3	Hauptstrecke für Personenverkehr	P3 Gb	P3 mB	P3 hB
P3 / F1	Hauptstrecke für Mischverkehr	P3 / F1 Gb	P3 / F1 mB	P3 / F1 hB
P3-P5	Hauptstrecke im Ballungsraum für Personenverkehr	P3-P5 Gb	P3-P5 mB	P3-P5 hB
P5 / F2	Regionalstrecke für Mischverkehr	P5 / F2 Gb	P5 / F2 mB	P5 / F2 hB
F1	Hauptstrecke für Güterverkehr	F1 Gb		F1 hB
F3	Regionalstrecke für Güterverkehr	F3 Gb		F3 hB

3: Übersicht der Streckenstandards Quelle: Eigene Darstellung

bzw. Spitzenzeiträume auch im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung kann eine leistungsfähige und resiliente Eisenbahninfrastruktur gestaltet werden.

2.2. Streckenstandards

Für die Gestaltung langfristig anwendbarer Streckenstandards wird im Rahmen der Überarbeitung ETCS Level 2 (ohne Signale) angenommen, was neben einer zukunftssicheren technischen Ausstattung auch neue Optimierungsmöglichkeiten in der Infrastrukturgestaltung und besonders der Blockteilung ermöglicht. Der Schwerpunkt der Überarbeitung liegt, neben allgemeinen Anforderungen, besonders auf leistungsfähigkeitsbeeinflussenden Elementen der Infrastruktur. Wesentliche Einflussgrößen sind daher die Blockteilung der Strecke, die zulässige Geschwindigkeit und der Abstand der Überholmöglichkeiten; für diese Parameter sollen individuelle Mindestwerte je Streckenstandard festgelegt werden.

Die Streckenstandards definieren sich über TSI-Verkehrscodekombinationen, welche die bislang geläufigen Bezeichnungen (z. B. G120, M160 etc.) ersetzen. Die Verkehrscodes treffen jedoch qua Definition keine Aussagen über die Belastung der Strecke [4]. Eine derartige Differenzierung ist jedoch sinnvoll, daher werden bis zu drei Leistungsfähigkeitskategorien bzw. Leistungsklassen je Streckenstandard definiert (vgl. Bild 3). Dadurch stehen Angaben zu Mindestelementen für viele unterschiedliche Anwendungsfälle zur Verfügung. Die Bemessungsrechnung erfordert die Kenntnis einer erwarteten Belastung der Strecke, welche über typische Belastungen und eine zugehörige Dauerlinie festgelegt werden (vgl. Abschnitt 2.1.). Auf dieser Grundlage werden die Mindestelemente der Streckenstandards in Abhängigkeit des Leistungsverhaltens unter Anwendung analytischer Methoden ermittelt. Die Analytik eignet sich besonders für die mittel- bis langfristige Dimensionierung von Infrastruktur mit Gültigkeit für eine Vielzahl möglicher Fahrpläne. Das Verfahren stellt ein wissenschaftlich und von den Aufsichtsbehörden anerkanntes Verfahren zur Kapazitätsermittlung dar, indem eine Nennleistung als maximal mögliche Zugzahl unter Beachtung einer marktgerechten Betriebsqualität ermittelt wird.

Die Streckenstandards berücksichtigen über den Regelbetrieb hinaus auch Aspekte der Resilienz für den Betrieb mit Kapazitätseinschränkungen (z. B. Bau). Neben ausreichenden Überholmöglichkeiten und der Ausstattung für vollständigen Gleiswechselbetrieb beeinflusst insbesondere der Abstand der Überleitverbindungen

> Die Streckenstandards stellen eine resiliente Gestaltung der Infrastruktur sicher.

die Resilienz einer Strecke. So ist sicherzustellen, dass bei einer abschnittsweisen Sperrung eines Streckengleises der resultierende eingleisige Abschnitt über eine ausreichende Leistungsfähigkeit verfügt.

Die ermittelten Mindestelemente stellen für den Erstentwurf einer Strecke eine auskömmliche Infrastrukturausstattung sicher. Es ist gewährleistet, dass das angestrebte Betriebsprogramm in guter Betriebsqualität durchgeführt werden kann und die Infrastruktur resilient gestaltet ist.

3. Knoten

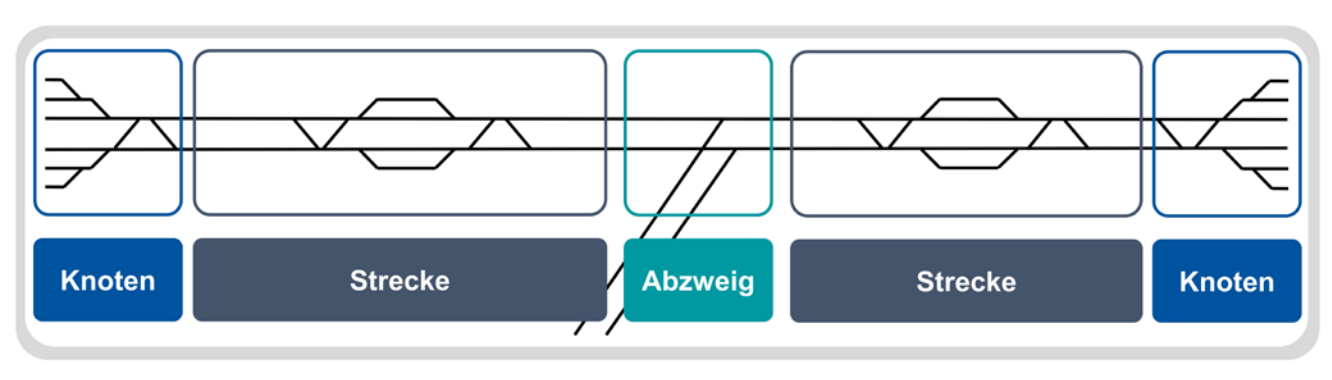
3.1. Empfehlungen zur Knotengestaltung

Mithilfe der ermittelten Mindestelemente der Streckeninfrastruktur können in einem weiteren Schritt Anforderungen an die Knoteninfrastruktur abgeleitet werden. Dabei kann ein Eisenbahnknoten mit Hilfe der Bedientheorie als Bediensystem modelliert werden, um relevante Qualitätskennzahlen mit Hilfe von entsprechenden Berechnungsverfahren zu ermitteln. Mittels eines Abgleichs der berechneten Qualitätskennzahlen (z. B. Wartezeiten) mit den zugehörigen Grenzwerten können Aussagen hinsichtlich der erforderlichen Ausgestaltung der Infrastruktur hergeleitet werden. Durch die Nutzung von solchen analytischen Methoden können bereits in frühen Planungsstadien auch ohne Kenntnis von konkreten Fahrplänen verschiedene Infrastrukturvarianten miteinander verglichen werden.

In der Betrachtung von Eisenbahnknoten wird dabei zwischen Abzweigstellen, also „Blockstellen der freien Strecke, wo Züge von einer Strecke auf eine andere Strecke übergehen können“ [5] sowie Bahnhöfen, also „Bahnanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen“ [5] unterschieden (vgl. Bild 4). Diese Unterscheidung wird auch in den verwendeten Modellen unterstellt, welche zur Abbildung der Bedienprozesse in den unterschiedlichen Knotenelementen genutzt werden.

Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Knoten werden verschiedene

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DB Netz AG und RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH



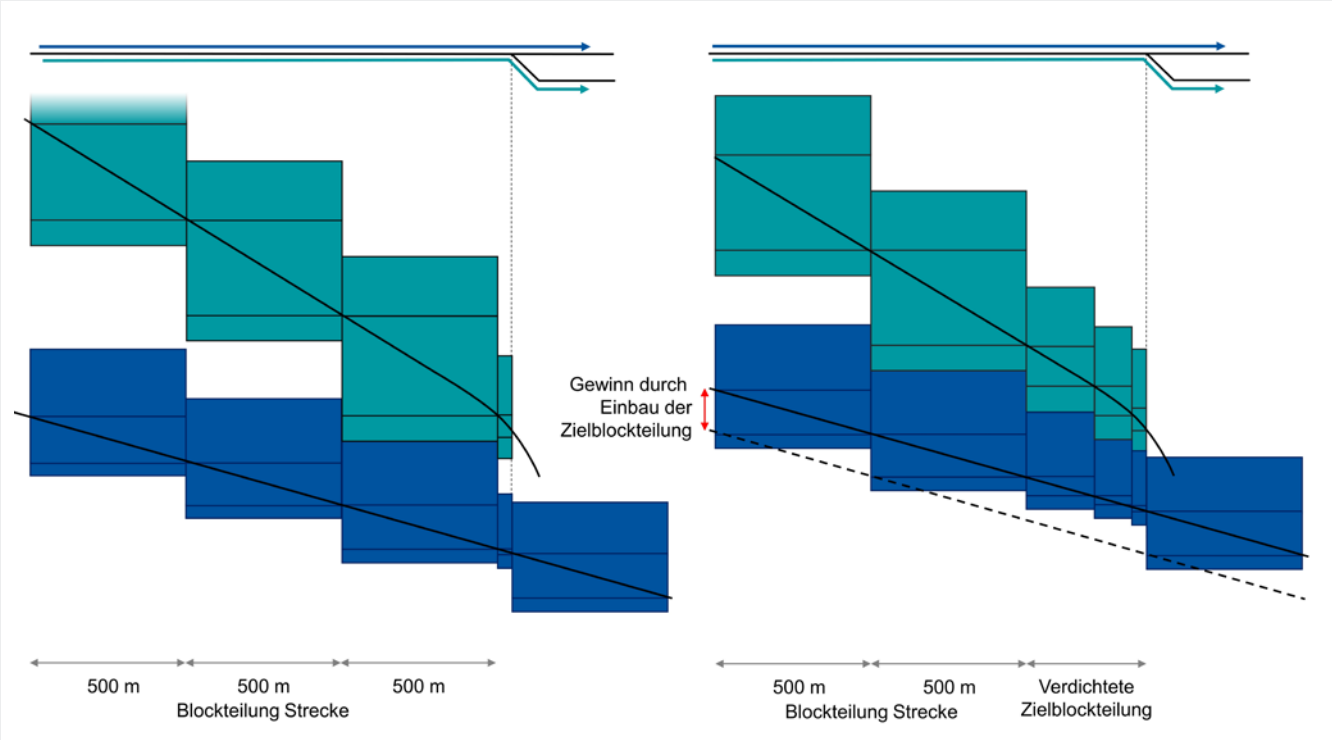
4: Differenzierung zwischen Eisenbahnknoten und -strecken Quelle: Eigene Darstellung

Maßnahmen betrachtet. So können auftretende Fahrstraßenkonflikte mithilfe von Überwerfungsbauwerken gelöst oder die Auswirkungen von Konflikten auf die Leistungsfähigkeit der angrenzenden Strecken mithilfe von Wartepositionen verringert werden. Weiterhin kann die notwendige Weichengeschwindigkeit auf Grundlage der ermittelten Mindestelemente für Streckeninfrastruktur bestimmt werden.

Sowohl für Abzweigstellen als auch für Bahnhöfe werden zur Untersuchung der Notwendigkeit eines Überwerfungsbauwerks Betrachtungen der Leistungsfähigkeit durchgeführt. Über eine Bewertung von Wartewahrscheinlichkeiten kann zudem der Nutzen einer Warteposition in Abzweigstellen abgeschätzt sowie die benötigte Anzahl an Gleisen in einer Gleisgruppe eines Bahnhofs bestimmt werden.

Während Maßnahmen zur Leistungssteigerung auf Strecken vor allem die Reduzierung von Mindestzugfolgezeiten (z. B. durch verkürzte bzw. optimierte Blocklängen oder verkürzte Überholabschnitte) zum Ziel haben, können in Knotenbereichen auch Fahrstraßen und deren Ausschlüsse so optimiert werden, dass ein vorgegebenes Betriebsprogramm auf dieser Infrastruktur mit definierter Qualität umgesetzt werden kann.

Dabei kann das vorgegebene Betriebsprogramm aus den ermittelten Streckenstandards bestimmt und als Grundlage für die Dimensionierung der Knotenbereiche verwendet werden. Die verwendeten Grenzwerte zur Bestimmung der notwendigen Qualität werden aus den Qualitätsgrenzwerten für die freie Strecke (vgl. [6])



5: Auswirkungen einer verdichteten Zielblockteilung im Bahnhofsbereich auf die Mindestzugfolgezeiten Quelle: Eigene Darstellung

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DB Netz AG und RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

mithilfe von Umrechnungsfaktoren für mehrkanalige Bediensysteme (vgl. [7]) ermittelt.

Als Qualitätsmaß wird hierbei die Leistungsfähigkeit genutzt, welche die maximale Anzahl von Fahrplantrassen beschreibt, die auf der betrachteten Eisenbahninfrastruktur unter Beachtung der unterstellten betrieblichen Infrastruktur, sicherungstechnischer Zusammenhänge sowie fahrdynamischer Einflüsse und des Betriebsprogramms ohne Konflikte im Untersuchungszeitraum eingeplant werden können. Dabei werden auftretende Stauerscheinungen, hier Konflikte, bei der Planung von Trassen und daraus resultierende Wartezeiten modelliert und mit dem bestimmten Grenzwert beschränkt. Die entsprechenden Infrastrukturmaßnahmen wie zusätzliche Wartepositionen oder Überwerfungsbauwerke werden in Abhängigkeit der ermittelten Leistungsfähigkeit bewertet.

Durch die geringe Rechenzeit und einfache Handhabung der Methoden lassen sich schnell Einschätzungen zur Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten treffen und somit die Planungen von Infrastruktur in Knotenbereichen effektiv unterstützen. Dabei sind insbesondere die Unabhängigkeit von konkreten Fahrplänen, die einfache Untersuchung verschiedener Betriebsprogramme und die Einfachheit der Anwendung durch die Bereitstellung von fundierten Richtwerten für individuelle Anwendungsfälle hervorzuheben. Letztlich lassen sich somit konkrete Empfehlungen z. B. zur Notwendigkeit einer höhenfreien Gestaltung von Knoten ableiten.

3.2. Entwicklung einer optimierten Zielblockteilung im Bahnhofsbereich

Die Mindestzugfolgezeiten zwischen Zugfahrten auf einer Strecke werden in vielen Fällen durch die Blockteilung im Bereich von Überholbahnhöfen und von Knoten beeinflusst, sodass die Verwendung von ETCS Level 2 (ohne Signale) neue Gestaltungsmöglichkeiten eröffnet. Besonders bei Überholungen ist der Einfluss von Beschleunigungs- und Bremsphasen zu berücksichtigen, sodass eine optimierte und verdichtete Zielblockteilung in diesem Bereich der Reduzierung von Mindestzugfolgezeiten dienen kann. Als maßgebend erweist sich der Bremsvorgang vor einem Überholbahnhof. Zur Bestimmung der optimalen Blockteilung werden die für die Streckenstandards definierten repräsentativen Modellzüge verwendet. Es ergibt sich je möglichem Zugfolgefall und in Abhängigkeit der Geschwindigkeitspaarung von Strecke und Zweiggleis der Weiche eine individuelle Staffelung der Blocklängen, deren Länge sich bis zur Weiche des Überholbahnhofs stufenweise verringert. Den positiven Effekt dieser Verdichtung verdeutlicht Bild 5 beispielhaft.

Auf Grundlage der jeweils verkehrenden Modellzüge wird jedem Streckenstandard die effektivste Zielblockteilung zugeordnet, sodass optimale Mindestzugfolgezeiten realisiert werden können. Bei der Umsetzung der Zielblockteilung muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese durch äußere Randbedingungen (wie z. B. Schaltabschnittsgrenzen und Bahnübergänge) im konkreten Anwendungsfall eingeschränkt werden kann und der Nutzen daher ohne gewerkeübergreifende Optimierung der Infrastruktur nicht immer voll ausschöpfbar ist. [8]

4. Anwendung der Forschungsergebnisse bei der DB Netz AG

Die Forschungsergebnisse bilden die Grundlage für eine umfassende Weiterentwicklung der Richtlinie Streckenstandards. Insbesondere werden Knoten als Verknüpfungen von Eisenbahnstrecken und wesentliche Elemente für ein leistungsfähiges Eisenbahnnetz stärker in den Fokus gerückt und die Optimierungspotenziale unter ETCS verarbeitet. Darüber hinaus wird die Neuaufnahme der verschiedenen Leistungsklassen die Möglichkeiten einer anforderungsgerechten Planung von Beginn an vereinfachen.

Durch die vorgenommene Überarbeitung der Streckenstandards, die Berücksichtigung von Resilienz- und Leistungsfähigkeitsaspekten sowie die entwickelten Empfehlungen der Knotengestaltung wird angestrebt, eine langfristig effiziente und gegenüber den real auftretenden Auslastungsschwankungen robuste Infrastruktur zu schaffen. •

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Projekt ID 2236/2 und die DB Netz AG.

Literatur

[1] DB Netz AG: „Richtlinie 413.0301 ‚Streckenstandards'", Version 4.0, 1. Januar 2022.
[2] Europäische Kommission: „Technische Spezifikationen für die Interoperabilität, Teilsystem Infrastruktur (TSI INF)", Verordnung (EU) 2019/776, 16. Mai 2019.
[3] Pfeifer, A., Kogel, B., Nießen, N., Berghaus, M., Kemper, D., Hilbrich, E.: „Berücksichtigung von Spitzenzeiträumen bei der Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur", in: Deine Bahn 10/2021, S. 36-42.
[4] Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA): „Leitfaden zur Anwendung der TSI INF", 14. Dezember 2015.
[5] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), 1967.
[6] Schwanhäußer, W. und Schultze, K.: „Ermittlung von Qualitätsmaßstäben für die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes und Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Endverspätungen", Forschungsarbeit für die Deutsche Bundesbahn, 1982.
[7] Fischer, K. und Hertel, G.: „Bedienungsprozesse im Transportwesen - Grundlagen und Anwendungen der Bedienungstheorie", Transpress, 1990.
[8] Hernández, L. und Hardel, S.: „Schaltabschnittsgrenzen und Bahnübergänge schränken den Kapazitätseffekt von ETCS Level 2 ein", in: Signal + Draht 1-2/2023, S. 24-30.

Summary

Route standards – minimum elements for an efficient and resilient infrastructure

Strong traffic growth on the rail is expected for the years ahead. In order to manage this growth, the railway infrastructure has to be adequately dimensioned. This article shows recent research results by RWTH Aachen University on which basis the regulations for the dimensioning of the operational infrastructure at DB Netz AG has to be basically revised and adjusted to the new requirements.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DB Netz AG und RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH