

# Eisenbahninfrastruktur ökonomisch planen

VON NILS NIEßEN UND BASTIAN KOGEL, AACHEN

## 1. Einleitung

Das für die Zukunft prognostizierte hohe Verkehrswachstum auf der Schiene, insbesondere im Bereich des Schienengüterverkehrs, stellt eine große Herausforderung an die Eisenbahninfrastruktur dar. Bereits heutzutage sind viele Strecken und Knoten stark ausgelastet und stoßen an ihre Kapazitätsgrenzen. Da die Eisenbahninfrastruktur einen langen Lebenszyklus bei sehr hohen Planungszeiträumen aufweist, ist es von besonderem Interesse die zukünftigen Engpässe, wo die derzeitige Kapazität nicht ausreichend sein wird, frühzeitig zu detektieren, um somit gezielt in die Infrastruktur zu investieren.

Zur Bewältigung des prognostizierten Verkehrswachstums auf der Schiene ist neben betrieblichen und organisatorischen Maßnahmen ebenso der Neu- und Ausbau der Eisenbahninfrastruktur erforderlich. Die sehr kostenintensiven Neu- und Ausbaumaßnahmen werden in der Regel im Rahmen des Bundesverkehrswegeplans finanziert. Insbesondere in Zeiten angespannter öffentlicher Haushaltskassen ist eine fundierte Priorisierung der erforderlichen Neu- und Ausbaumaßnahmen unumgänglich. Die prognostizierte Nachfrage und die vorhandene bzw. zukünftige Kapazität der Eisenbahninfrastruktur sind dabei die wesentlichen Messgrößen einer solchen Priorisierung. Gleichzeitig stellt neben den Neu- und Ausbaumaßnahmen jedoch auch die Erhaltung des Bestandsnetzes eine große Herausforderung dar. Zur Erhaltung des Bestandsnetzes stellt der Bund gemäß Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) jährlich entsprechende Mittel bereit, welche durch die DB Netz AG ergänzt werden.

Mit Hilfe von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Modellen gelingt es, die derzeit und zukünftig zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Infrastruktur zu ermitteln, vorhandene Engpässe zu identifizieren sowie Maßnahmen zu deren Beseitigung zu bewerten. Die Ermittlung der Kapazitäten wird dabei sowohl für Eisenbahnstrecken als auch für Knoten (Bahnhöfe) durchgeführt. Dabei kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung.

In Kapitel 2 werden zunächst die wesentlichen eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Grundlagen dargestellt. So wird der Begriff Kapazität abgegrenzt und erläutert, durch welche

---

*Anschrift der Verfasser:*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen  
RWTH Aachen University  
Verkehrswissenschaftliches Institut  
Mies-van-der-Rohe Str. 1  
52074 Aachen  
e-mail: niessen@via.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Bastian Kogel  
RWTH Aachen University  
Verkehrswissenschaftliches Institut  
Mies-van-der-Rohe Str. 1  
52074 Aachen  
e-mail: kogel@via.rwth-aachen.de

Größen die Kapazität beeinflusst wird, und der Zusammenhang zwischen Kapazität und der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 3 die verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der Kapazität beschrieben, deren wesentlichen Anwendungsgebiete genannt sowie deren Vor- und Nachteile erläutert. Abschließend werden in Kapitel 4 derzeitige Anwendungsfelder der Methoden zur Kapazitätsermittlung von Schienenwegen in Deutschland dargestellt.

## 2. Kapazitätsverbrauch im Eisenbahnwesen

Im Eisenbahnwesen beschreibt die Kapazität die Anzahl an Zugfahrten, welche auf den Schienenwegen innerhalb eines betrachteten Zeitraums durchgeführt werden kann. Diese Anzahl an Zugfahrten ist dabei abhängig von dem Ausbauzustand der Infrastruktur. Die Dimensionierung der Anlagen mit Gleisen, Weichen sowie Signalen, das verwendete Zug-sicherungssystem und die örtlich zulässigen Geschwindigkeiten bestimmen somit die mögliche Anzahl an Zugfahrten, welche auf dieser Infrastruktur abgewickelt werden kann. Nachfolgend wird beschrieben, was grundsätzlich unter dem Begriff Kapazität im Verkehrswesen – speziell im Eisenbahnwesen – zu verstehen ist.

Die Kapazität von Verkehrssystemen beschreibt im Allgemeinen deren Vermögen, die Nachfrage nach dem Transport von Personen, Gütern und Informationen nach Menge und Verkehrsrelation mit einer gewünschten Qualität zu befriedigen. Die Auslastung eines Verkehrssystems wird dabei in der Regel einer auslastungsabhängigen Qualitätskenngröße gegenübergestellt. Mit steigender Auslastung eines solchen Verkehrssystems behindern sich die einzelnen Verkehrseinheiten gegenseitig stärker, so dass es zu vermehrten Stauer-scheinungen und damit zu höheren Wartezeiten kommt. Dieser prinzipielle Zusammenhang zwischen der Auslastung von Verkehrssystemen und der resultierenden Wartezeit ist in Abbildung 1 dargestellt.

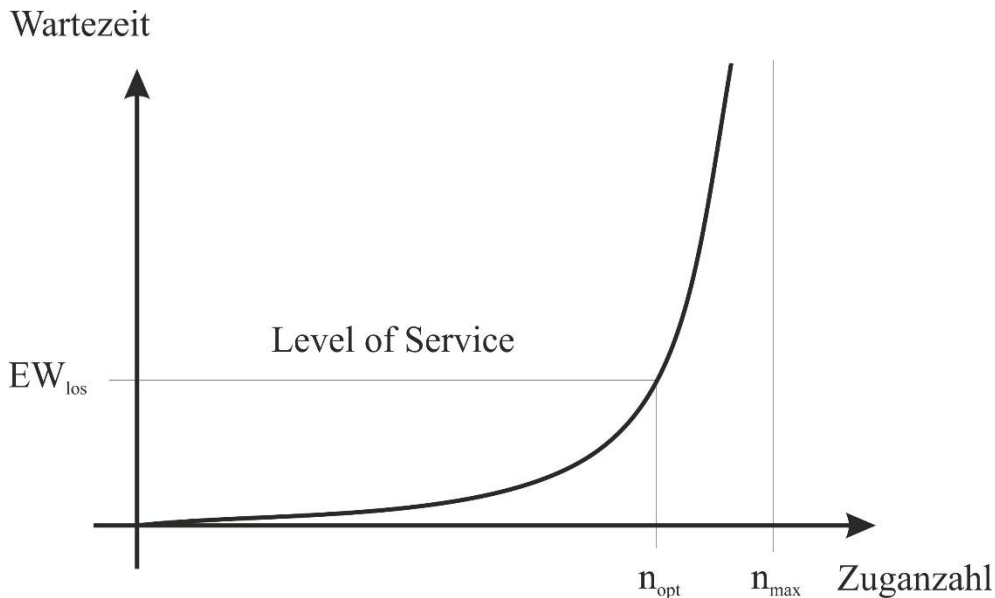


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Auslastung und Qualität

Bezogen auf das Eisenbahnwesen wird die maximal mögliche Zuganzahl  $n_{\text{max}}$ , bei der sich eine unendliche Wartezeit ergeben würde, als „theoretische Kapazität“ bezeichnet. Für praktische Anwendungen hat dieser Grenzwert allerdings keine Bedeutung. Zur Dimensionierung von Schienenwegen wird dagegen die bei einer bestimmten Zuganzahl pro Zeiteinheit vorhandene Qualität (Wartezeit) einem zulässigen Qualitätsniveau gegenübergestellt. Die Zuganzahl  $n_{\text{opt}}$  stellt dabei die (wirtschaftlich) optimale Auslastung dar, bei welcher sich die zu erwartenden Wartezeiten noch in einem akzeptierten Niveau befinden und sich für das Gesamtsystem, bestehend aus Eisenbahninfrastrukturunternehmen und Eisenbahnverkehrsunternehmen ein maximaler Gewinn erwarten lässt. Diese Zuganzahl wird als „praktische Kapazität“ bezeichnet und für Dimensionierungsaufgaben herangezogen.

### 2.1 Einflussgrößen auf die Kapazität

Die Kapazität lässt sich sowohl für Eisenbahnstrecken als auch Eisenbahnknoten ermitteln. Die auf der jeweiligen Infrastruktur fahrbare Anzahl an Zugfahrten wird dabei durch deren Ausbauzustand (z. B. die zulässige Geschwindigkeit und die vorhandene Leit- und Sicherungstechnik) beeinflusst. Die Kapazität der Eisenbahninfrastruktur ist jedoch nicht alleinig von der zugrundeliegenden Infrastruktur abhängig, sondern auch von einer Reihe weiterer Eigenschaften (siehe Abbildung 2).

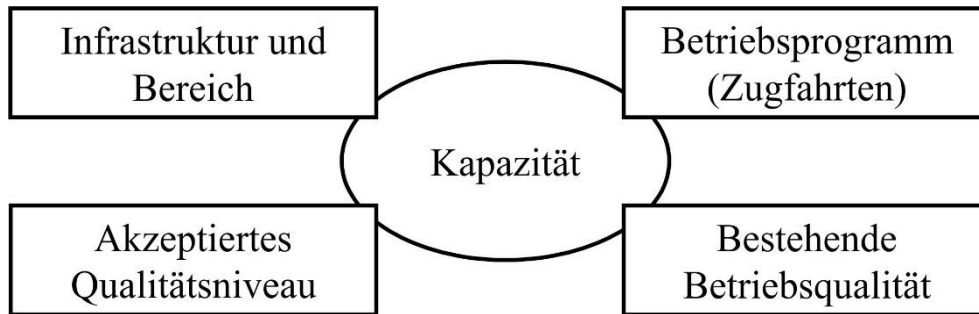


Abbildung 2: Einflussgrößen auf die Kapazität

Prinzipiell sind bei der Ermittlung der Kapazität folgende Parameter von Relevanz:

- ein Infrastrukturbereich und seine Eigenschaften,
- der Untersuchungszeitraum,
- die unterschiedlichen Zugfahrten mit ihren Charakteristika (Betriebsprogramm),
- das unterstellte Qualitätsniveau,
- die Betriebsqualität.

Der Begriff „Kapazität“ lässt sich somit wie folgt definieren:

Die Kapazität eines Infrastrukturbereiches ist die Anzahl an Zugfahrten, welche auf diesem bei gegebenem Zugmix innerhalb einer Zeitspanne unter Einhaltung einer definierten Betriebsqualität abgewickelt werden kann.

## 2.2 Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Grundlagen zur ökonomischen Planung

Der Kapazitätsverbrauch einer einzelnen Zugfahrt wird durch die Inanspruchnahme der Infrastruktur durch eben diese Zugfahrt beschrieben. Hierzu kann das sogenannte Sperrzeitenmodell verwendet werden, welches die Zeit ermittelt, während der ein Infrastrukturelement durch eine Zugfahrt belegt ist, also jene Zeitanteile, wo die Infrastruktur exklusiv für die Zugfahrt reserviert wird. Die betriebliche Belegung eines durch zwei Hauptsignale abgegrenzten Blockabschnitts durch eine Zugfahrt dauert dabei länger als der eigentliche physikalische Vorgang der Belegung (Abbildung 3). Berücksichtigt werden zusätzlich die Fahrstraßenbildezeit, die Sichtzeit sowie die Annäherungsfahrzeit (Zeit für die Fahrt zwischen den Vor- und Hauptsignalen) bevor die Zugspitze das Blocksignal erreicht. Nach Passieren des nächsten Blocksignals sind noch die Räumfahrzeit sowie die Fahrstraßenauflösezeit hinzuzufügen, bevor der zuvor befahrene Blockabschnitt freigegeben werden kann. Die Summe der genannten Zeitelemente wird als Sperrzeit bezeichnet und zeigt den Kapazitätsverbrauch einer Zugfahrt an.

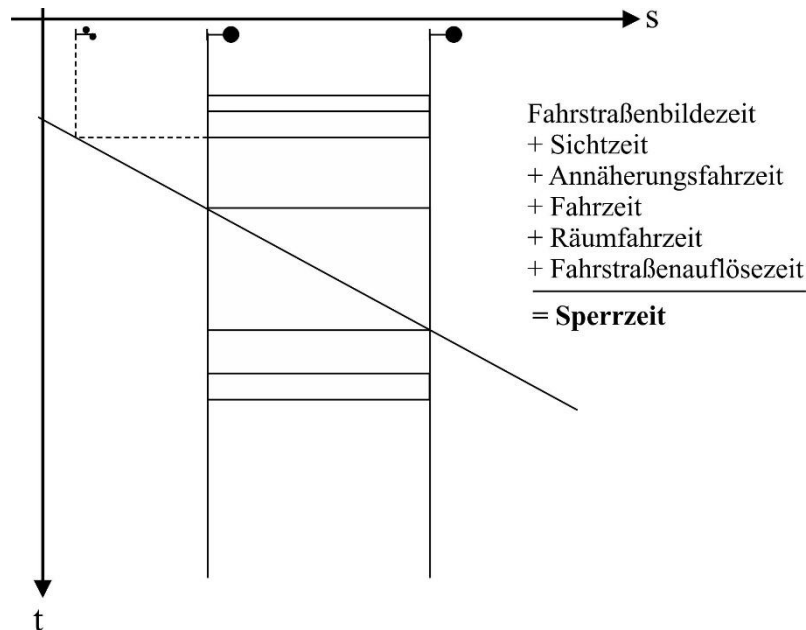


Abbildung 3: Zeit-Weg-Diagramm mit Elementen der Sperrzeit

Die Sperrzeitentreppe eines Zuges ergibt sich anschließend aus der Aneinanderreihung der Sperrzeitenblöcke der jeweiligen Infrastrukturelemente eines Streckenabschnitts. Um fundierte Aussagen über die Kapazität treffen zu können, ist ein Sperrzeitenmodell zur Beschreibung des Kapazitätsverbrauchs der einzelnen Zugfahrten unumgänglich. Dieses setzt wiederum die Anwendung eines mikroskopischen Infrastrukturmodells voraus. Das Sperrzeitenmodell wurde schon 1959 durch Happel (1959) beschrieben und ist auch im internationalen UIC Code 406 (2004) als Grundlage zur Beschreibung des Kapazitätsverbrauchs vorgesehen.

Die Durchführung von zwei Zugfahrten kann nur dann realisiert werden, wenn es zu keiner Überschneidung der Sperrzeitenblöcke dieser beiden Zugfahrten kommt, da ansonsten die Infrastruktur von beiden Zügen zur gleichen Zeit belegt wäre. Jede Überlagerung von Sperrzeitenblöcken stellt somit einen Konflikt dar, den es zu lösen gilt. Der zeitlich geringste Abstand, in dem sich zwei Züge konfliktfrei folgen können, wird als Mindestzugfolgezeit  $z_{ij}$  bezeichnet. Die Mindestzugfolgezeit  $z_{ij}$  entspricht also der Zeit, nach der ein Zug  $j$  einem Zug  $i$  folgen kann, ohne dass der Zug  $j$  eine Behinderung erfährt (z. B. stützen müsste). Abbildung 4 skizziert die Mindestzugfolgezeit zwischen einem langsamen Zug und einem nachfolgenden schnelleren Zug.

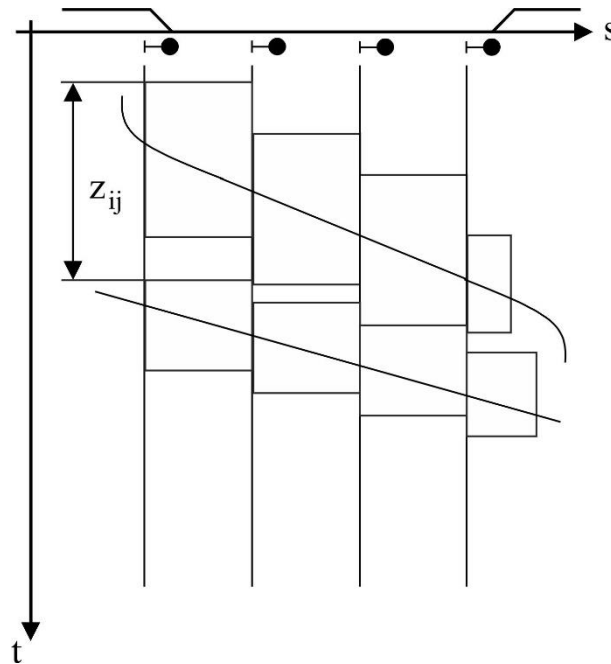


Abbildung 4: Mindestzugfolgezeit

Mindestzugfolgezeiten beziehen sich dabei immer auf den gemeinsamen Laufweg eines Zugpaars und werden für Überholungsabschnitte bestimmt. Ein Überholungsabschnitt wird durch die Bahnhöfe begrenzt, in denen ein Reihenfolgewechsel der beiden Züge statthaft und möglich ist. Anschließend wird für jeden Zugfolgefall die maßgebende Mindestzugfolgezeit bestimmt, welche sich als Maximum der Mindestzugfolgezeiten dieses Zugfolgefalls über alle vom jeweiligen Zugpaar befahrenen Überholungsabschnitte innerhalb eines Streckenabschnitts ergibt.

Die ermittelten Mindestzugfolgezeiten über alle möglichen Zugfolgefälle werden in Form einer Matrix dargestellt. Um die Größe einer solchen Matrix überschaubar zu halten, werden Züge mit ähnlichen fahrdynamischen und verkehrlichen Eigenschaften zu sogenannten Modellzügen zusammengefasst.

Die Kapazität der Eisenbahninfrastruktur wird durch verschiedenartigste Einflüsse beeinflusst. So sind bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen unterschiedliche betriebliche Anforderungen, Dispositionsstrategien, Geschwindigkeiten, Blocklängen, Zugbeeinflussungssysteme sowie Signalanlagen zu berücksichtigen. Durch die Verwendung der Sperrzeitentheorie und der Mindestzugfolgezeiten werden derartige Einflüsse detailliert berücksichtigt.

In der praktischen Fahrplangestaltung werden zwischen den Sperrzeitentreppen zweier Züge Pufferzeiten ( $t_p$ ) eingeplant, um die Wahrscheinlichkeit einer Verspätungsübertragung von einer Zugfahrt auf die nächste Zugfahrt zu verringern (siehe Abbildung 5). Auf diese Weise können zwar keine Verspätungen einer Zugfahrt abgebaut werden, es gelingt jedoch, die Verspätungsübertragung zwischen verschiedenen Zügen zu dämpfen.

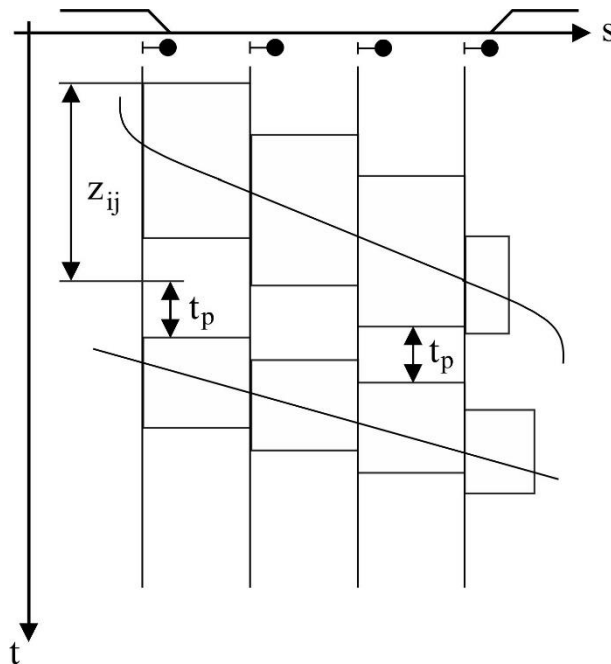


Abbildung 5: Pufferzeit

Zur (wirtschaftlichen) Dimensionierung der Infrastruktur werden die auslastungsabhängigen Wartezeiten herangezogen. Bei sehr geringen Zugzahlen ist die Infrastruktur unterausgelastet, es entstehen entsprechend niedrige Wartezeiten; bei einer hohen Auslastung steigen aufgrund von vermehrten Stauerscheinungen die Wartezeiten stark an, was zu einem Rückgang der Nachfrage führen kann. Ziel ist es daher die Wartezeiten auf ein akzeptiertes Maß (Qualitätsniveau) festzulegen.

Als Qualitätsmaßstab dient dabei die Summe der Wartezeiten, welche gemäß Richtlinie 405 der DB Netz AG in die planmäßigen und die außerplanmäßigen Wartezeit (Folgeverspätungen) aufgeteilt werden. Planmäßige Wartezeiten beziehen sich auf den Prozess der Fahrplannerstellung und entstehen im Rahmen der Fahrplankonstruktion, wenn Zugtrassen nicht in der vom Eisenbahnverkehrsunternehmen bestellten Wunschlage eingeplant, sondern aufgrund von Nutzungskonflikten angepasst werden müssen. Im Gegensatz dazu ent-

stehen außerplanmäßige Wartezeiten während der Betriebsabwicklung aufgrund von Verspätungen, wenn Anschluss- oder Zugfolgekonflikte auftreten.

Kommt es zu derartigen Belegungskonflikten im Rahmen der Fahrplanerstellung oder Betriebsabwicklung, d. h. die Sperrzeitentreppen der beiden Trassen überlagern sich, ist eine Konfliktlösung erforderlich. Eine Möglichkeit zur Lösung eines Belegungskonfliktes ist das Verschieben einer der beiden Trassen. In diesem Fall bleiben die Eigenschaften der Trassen unverändert, eine der beiden Trassen aber wird in ihrer zeitlichen Lage soweit verschoben, bis beide Trassen behinderungsfrei verkehren können. Eine Alternative stellt das sogenannte Biegen dar. Hierbei wird die Geschwindigkeit einer Trasse derart verändert (verringert), dass sich die beiden Trassen nicht mehr überschneiden. Neben diesen beiden Varianten der Konfliktlösung stellt die Wahl eines alternativen Laufwegs eine weitere Lösungsmöglichkeit dar. Bei allen Konfliktlösungsmöglichkeiten können Wartezeiten für mindestens eine Zugfahrt entstehen.

Die auslastungsabhängigen Qualitätskenngrößen (planmäßige bzw. außerplanmäßige Wartezeit) können fahrplanabhängig bzw. fahrplanunabhängig berechnet werden. Bei der fahrplanabhängigen Betrachtung werden ein konkreter Fahrplan bzw. konkrete Trassenlagen untersucht. Bei der fahrplanunabhängigen Ermittlung der auslastungsabhängigen Qualitätskenngrößen werden hingegen nur grobe Angaben über Zugzahlen und den Zugmix berücksichtigt. Die konkrete zeitliche Verteilung der Fahrlagen im Untersuchungszeitraum ist bei der fahrplanunabhängigen Betrachtung unbekannt.

Die Summe der planmäßigen Wartezeiten  $t_{w,plm}$  wird mit dem Verfahren nach Wakob (1985) und die Summe der außerplanmäßigen Wartezeiten  $t_{w,apl m}$  mit Hilfe der STRELE-Formel nach Schwanhäüßer (1974) ermittelt. Die berechneten Wartezeiten werden anschließend zulässigen Werten gegenübergestellt, welche in der Richtlinie 405 der DB Netz AG für den planmäßigen und außerplanmäßigen Fall wie folgt hinterlegt sind.

$$\text{zul} \sum t_{w,plm} = 0,480 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{RZ}} \cdot t_U$$

$$\text{zul} \sum t_{w,apl m} = 0,260 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{RZ}} \cdot t_U$$

mit  $t_U$ : Untersuchungszeitraum  
 $p_{RZ}$ : Anteil Reisezüge

Bei Verwendung der zulässigen Wartezeiten lässt sich schließlich die optimale Zuganzahl ermitteln, bei welcher diese Wartezeiten auftreten würden. Dieser Wert wird für die Betriebsabwicklung als Nennleistung (Betriebskapazität) bezeichnet und stellt eine wichtige Größe für die Dimensionierung der Anlagen dar. Es ist natürlich auch statthaft, eine höhere oder niedrigere Zuganzahl abzufahren, jedoch würden dann auch entsprechend mehr bzw.



weniger Wartezeiten entstehen und es bestünde die Gefahr, dass die Anlage unter- bzw. überdimensioniert ist.

Die in der Richtlinie verwendeten Werte der zulässigen Wartezeiten basieren auf Expertenbefragungen von Fahrdienstleitern und Disponenten, welche für unterschiedliche Strecken ihre Einschätzungen zur optimalen Zuganzahl, Betriebsqualität und der daraus resultierenden Kapazität gegeben haben<sup>1</sup>.

Weitere wissenschaftliche Untersuchungen (u.a. Jochim, 1999; Schwanhäüßer, 2009; Dickbrok, 2012) versuchen neben der Betrachtung der Wartezeiten stärker die Kosten- und Erlöse der Eisenbahnunternehmen mit einzubeziehen. Bei diesen Ansätzen ist die optimale Auslastung (Nennleistung) einer Strecke diejenige Zugzahl, mit der sich ein maximaler Gewinn für das Gesamtsystem erzielen lässt. Bei den Kosten treten dabei neben den Grundkosten weitere zeit- und wegeabhängige Kostenarten auf. Je nach Anzahl der auf einer Strecke verkehrenden Züge umschließen die Erlös- und Kostenfunktionen einen linsenförmigen Bereich, innerhalb dessen ein Gewinn erzielt wird (siehe Abbildung 6). Hierbei werden die Erlöse und Kosten sowohl von Eisenbahninfrastrukturunternehmen als auch von Eisenbahnverkehrsunternehmen berücksichtigt.

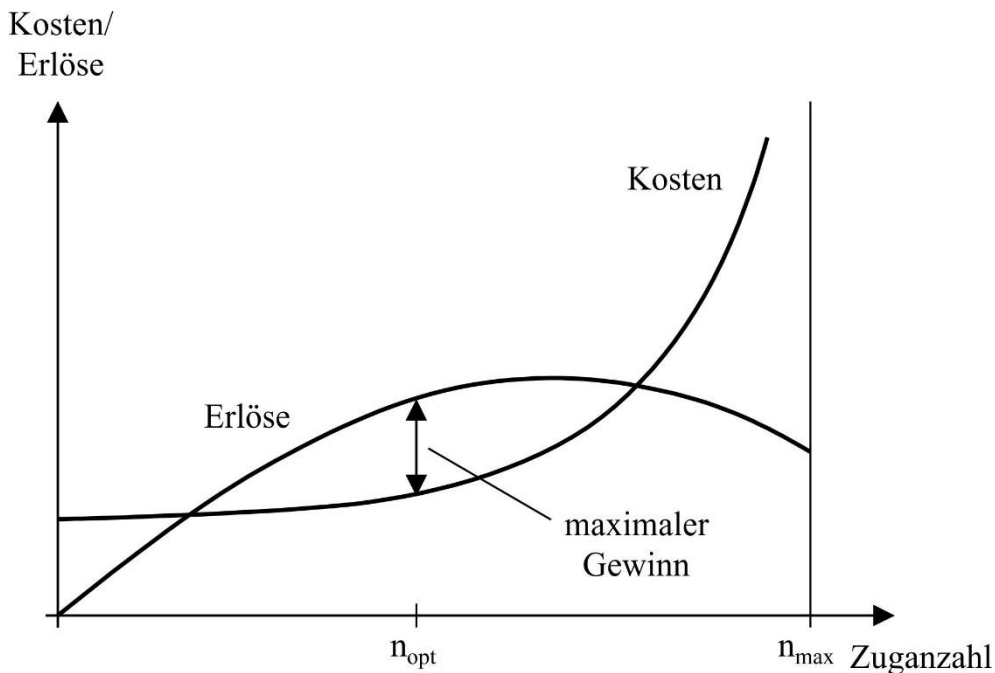


Abbildung 6: Zusammenhang Auslastung und Gewinnmaximum

<sup>1</sup> Delphi-Befragung von Experten des Betriebsleitstellendienstes (Prof. Schwanhäüßer, 1982)

Die Erlöse der Eisenbahnverkehrsunternehmen sind von der Nachfrage der Endkunden nach der angebotenen Verkehrsleistung abhängig. Bei der Nachfragewirkung wiederum sind neben dem Verkehrsträger Eisenbahn zwingend auch alternative Reisemittel – wie der motorisierte Individualverkehr oder der Fernbus – mit zu berücksichtigen, da diese gegenseitig am Verkehrsmarkt konkurrieren. Die Anwendung des Verfahrens der „Gewinnlinse“ zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Zuganzahl setzt eine Vielzahl an Eingangsdaten in Bezug auf die Kosten- und Erlösfunktion voraus, die in der Regel nicht unmittelbar vorliegen und nur sehr aufwendig ermittelt werden können. Daher kommt das zuvor vorgestellte Verfahren der zulässigen Wartezeiten als Qualitätsmaßstab heutzutage weiterhin bei Kapazitätsbemessungsfragen zur Anwendung.

### 3. Verfahren zur Kapazitätsberechnungen

Zur Ermittlung der Kapazität von Schienenwegen existieren verschiedene Verfahren, bei welchen die Sperrzeitentheorie Anwendung findet. Diese Verfahren können dabei in folgende Klassen eingeteilt werden:

- Konstruktive Methode,
- Verkettung nach UIC Code 406,
- Simulation und
- Analytische Berechnung.

Einige Aufgaben sind nur mit bestimmten Methoden zu lösen, so dass hier die Auswahl des Verfahrens eindeutig ist. Für viele Aufgabenstellungen bieten sich jedoch mehrere Verfahren an, so dass hier weitere Auswahlkriterien berücksichtigt werden müssen. Diese umfassen u. a. den vorhandenen Detaillierungsgrad des Betriebsprogramms, die Komplexität der Aufgabenstellung und den zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeitraum für die durchzuführende Untersuchung.

#### 3.1 Konstruktive Methode

Die konstruktive Methode beruht auf Zeitverbräuchen von Zugfahrten und den sich daraus ergebenden Sperrzeiten. Die zwischen den einzelnen Sperrzeitentreppen auftretenden Konflikte sind während des Prozesses der Fahrplanerstellung zu lösen, um einen konfliktfreien Fahrplan zu generieren. Die Betrachtung basiert auf einem konkreten Fahrplan mit seinen Zugfahrten. Neben den Zugzahlen enthält das Betriebsprogramm zusätzlich Informationen zu gewünschten Vertaktungen sowie Anschluss- und Umlaufbedingungen. Es wird der Kapazitätsverbrauch dieses konkreten Fahrplans bestimmt, so dass die ermittelten Ergebnisse nur für die festgelegten, eng eingegrenzten Randbedingungen gelten (vgl. Brünger, 2000; Uhlmann, Mutschink, 2004).

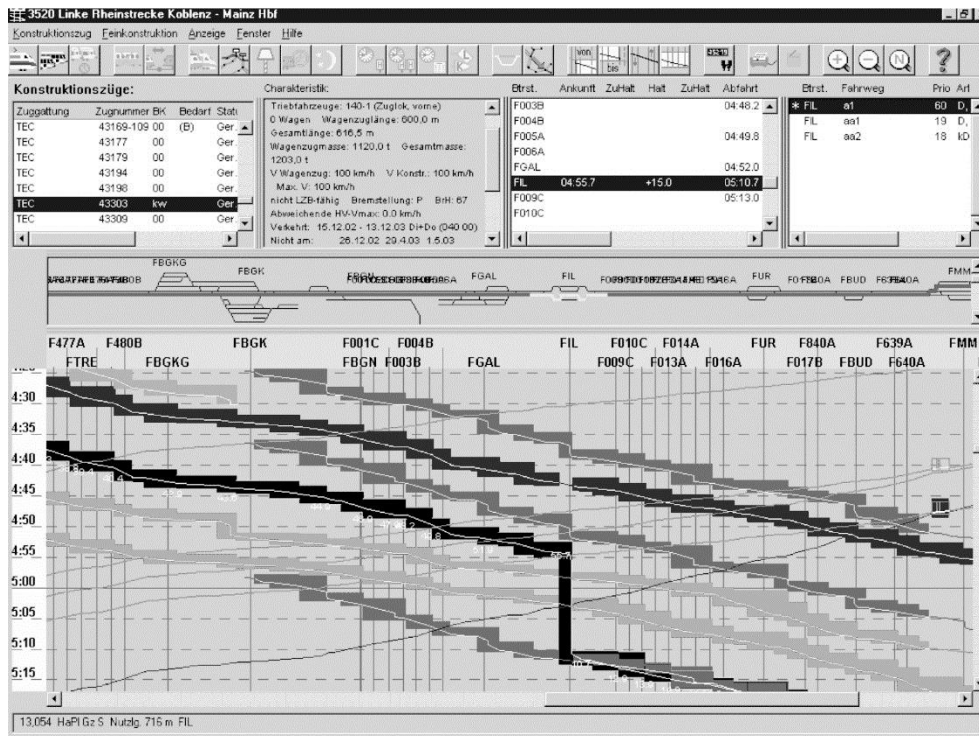


Abbildung 7: Konstruktive Methode. Quelle: Brünger und Kröger (2003).

Wesentliche Anwendungsgebiete der konstruktiven Methode:

- Konstruktion von konfliktfreien Fahrplänen als Grundlage für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen
- Fahrplanerstellungprozess für den Jahresfahrplan
- Bemessung von Infrastruktur für fest definierte verkehrliche Anforderungen
- Optimierung von Fahrwegen in Fahrstraßenknoten und der Belegung einer Gleisgruppe im Prozess der Fahrplanerstellung
- Ermittlung zusätzlich möglicher (unterjähriger) Fahrplantrassen

Vorteile der konstruktiven Methode:

- realitätsnahe Abbildung eines konkreten Fahrplans
- Berücksichtigung von Anschluss- und Umlaufrestriktionen möglich

Nachteile der konstruktiven Methode:

- hoher Aufwand für Bearbeitung, Datenpflege und -kontrolle
- konkreter Fahrplan als Eingangsgröße notwendig
- Ergebnisse nur für konkreten Fahrplan gültig
- keine unmittelbaren Aussagen über die zu erwartende Betriebsqualität

### 3.2 Verkettung nach UIC Code 406

Die Verkettung nach UIC Code 406 basiert auf der Bestimmung des Kapazitätsverbrauchs von komprimierten („verketteten“) Sperrzeitentrep-pen. Hierzu werden die Sperrzeitentrep-pen der einzelnen Zugfahrten so eng wie möglich aneinandergeschoben (Pufferzeit gleich null) und die Gesamtbelegung des zusammengeschobenen Trassegefüges ermittelt. Der Grad der Auslastung – der sogenannte „verkettete Belegungsgrad“ – ergibt sich dann aus dem Verhältnis dieser „verketteten“ Gesamtbelegung  $t_{vk}$  zum Untersuchungszeitraum  $t_U$ . Der UIC Code 406 kann sowohl auf Basis eines Fahrplans als auch fahrplanunabhängig angewendet werden. Abbildung 8 zeigt beispielhaft einen Ausgangsfahrplan (links) und das Ergebnis der Verkettung (rechts).

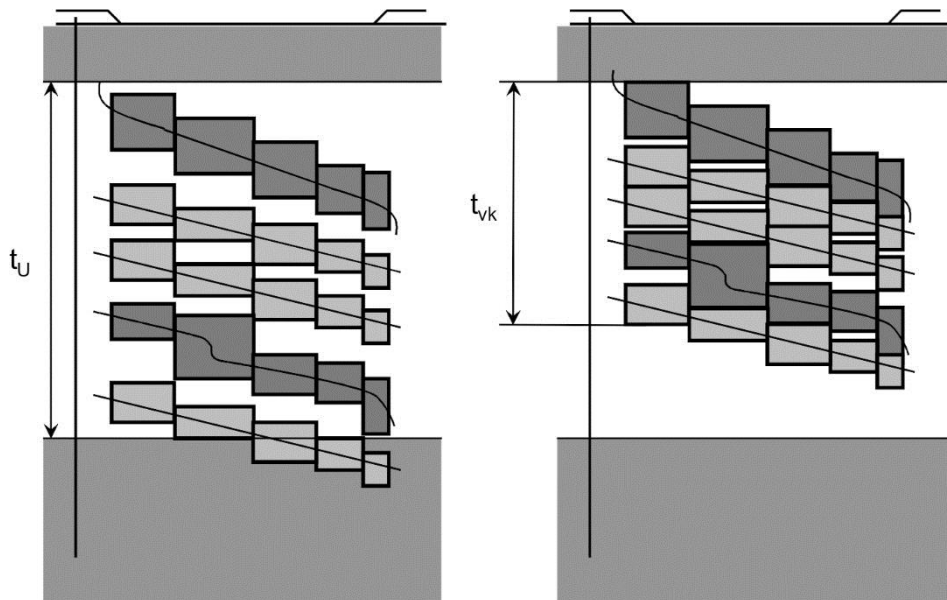


Abbildung 8: Verkettung eines Fahrplans nach UIC Code 406

Bei dieser Berechnungsmethode zum Kapazitätsverbrauch hängt die optimale Zugzahl einzig von den durchschnittlichen Mindestzugfolgezeiten (sowie bei fahrplanabhängiger Anwendung von der Reihenfolge der Züge) ab. Verspätungen oder unterschiedliche Zug-prioritäten werden nicht berücksichtigt. Für die Berechnung des Kapazitätsverbrauchs ist es notwendig, über die minimale, verkettete Belegungszeit hinaus Zeitreserven für die Fahr-planstabilisierung (Pufferzeiten) sowie Unterhaltung anzusetzen (vgl. Kuckelberg, Nießen, Wendler, 2010).

Die gemäß UIC Code 406 empfohlenen Belegungsgrade sind abhängig von dem Streckentyp und dem betrachteten Zeitraum (Spitzenstunde oder Tageszeitraum) und sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 1: Grenzwerte Belegungsgrad gemäß UIC Code 406**

Streckentyp	Spitzenstunde	Tageszeitraum
S-Bahn-Strecke	85 %	70 %
Hochgeschwindigkeitsstrecke	75 %	60 %
Mischverkehrsstrecke	75 %	60 %

Wesentliche Anwendungsgebiete der Verkettung nach UIC Code 406:

- Ermittlung des Kapazitätsverbrauchs rahmenvertraglich gebundener Trassen bei der DB Netz AG
- Ermittlung des Kapazitätsverbrauchs von Eisenbahnstrecken

Vorteile der Verkettung nach UIC Code 406:

- transparente Vorgehensweise

Nachteile der Verkettung nach UIC Code 406:

- kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und zu erwartender Betriebsqualität
- detaillierte Informationen über Zugfahrten (Laufwege) erforderlich
- starke Abhängigkeit von der Güte der Fahrplandaten

### 3.3 Simulation der Betriebsabwicklung

Die Simulation eignet sich besonders zur Analyse komplexer Anlagen, für die die betrieblichen Anforderungen relativ detailliert bekannt sind. Ziel ist es, den durch Verspätungen gestörten Betrieb mit Hilfe eines Modells abzubilden (vgl. Kuckelberg, Janecek, Nießen, 2013). Wie bei der konstruktiven Methode stellt auch bei der Simulationsmethode ein konkreter Fahrplan mit seinen Zugfahrten die Grundlage der Betrachtung dar. Über einen Zufallsgenerator werden Verspätungen und Verfrühungen in Form von Einbruchs- und Urverspätungen in den zugrundeliegenden Fahrplan eingespielt. Dies führt zu Konflikten im Betriebsablauf, welche dann im Rahmen der Simulation gelöst werden müssen. Als Resultat werden dann für jeden Simulationslauf für jede Zugfahrt die sich einstellenden Wartezeiten ausgewiesen (vgl. Fechner, 2014).

Die ermittelten Ergebnisse gelten nur unter den unterstellten, eng eingegrenzten Randbedingungen. Simulationsmethoden erfordern einen hohen Detaillierungsgrad in den Infrastruktur- und Betriebsprogrammdateien, so dass der Zeitaufwand für die Datenmodellierung relativ hoch ist. Die Anzahl der Simulationsläufe ist so groß zu wählen, dass sich stabile Ergebnisse einstellen.

Wesentliche Anwendungsgebiete der Simulation der Betriebsabwicklung:

- Vergleich verschiedener Fahrplanvarianten
- Untersuchungen, bei denen das Betriebsprogramm mit zahlreichen Randbedingungen bereits bekannt ist
- Fahrplanrobustheitsanalysen
- Ermittlung von Verspätungsschwerpunkten im Betrieb und Engpasserscheinungen

Vorteile der Simulation:

- Untersuchung eines konkreten Fahrplans im Betriebsablauf
- Abbildung spezieller Infrastruktur- und Betriebsprogrammeigenschaften
- Berücksichtigung von Fahrwegalternativen, Anschluss- sowie Umlaufbedingungen

Nachteile der Simulation der Betriebsabwicklung:

- (konfliktfreier) Fahrplan als Ausgangssituation erforderlich
- Ergebnisse nur für den konkreten Fahrplan gültig
- netzweite Simulation nicht möglich
- Durchführung von (Mehrfach-) Simulationen ist sehr zeitintensiv
- Allgemeingültigkeit für mehrere Fahrpläne nur mit sehr hohem Aufwand
- keine direkte Ermittlung von Kapazitätskenngrößen möglich
- Störungsparameter (Urverspätungen) als Eingangsgröße erforderlich

### 3.4 Analytische Berechnung

Analytische Modelle basieren auf der sogenannten Warteschlangentheorie. Sie wurden für die Bemessung von Strecken sowie von Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen entwickelt und stellen seit vielen Jahren den Stand der Technik im Rahmen der Infrastrukturplanung und -dimensionierung dar. Als Qualitätskriterium zur Bewertung der Infrastruktur dienen die maximal zulässigen Wartezeiten, welche (aus wirtschaftlicher Sicht) vertretbar sind und einen wirtschaftlich optimalen Betrieb ermöglichen. Aus der geforderten (zufriedenstellenden) Betriebsqualität ergibt sich schließlich eine zulässige Zuganzahl.

Das analytische Vorgehen basiert auf den Mindestzugfolgezeiten und kann sowohl fahrplanabhängig als auch fahrplanunabhängig angewendet werden. Es setzt damit nicht zwingend die Kenntnis eines exakten Fahrplans voraus, sondern hierzu genügen allgemeine Angaben über das Betriebsprogramm (Anzahl Zugfahrten je Modellzug und je Zeiteinheit).

Neben der Betrachtung des Betriebsgeschehens kann mit dem analytischen Verfahren auch die Prozessebene der Fahrplanerstellung modelliert werden. Hierbei wird berechnet, mit welcher Güte die Nachfrage nach Trassen durch die Eisenbahninfrastrukturunternehmen auf der gegebenen Infrastruktur befriedigt werden kann (vgl. Janecek, Kuckelberg, Nießen, 2012; Nießen, Schaer, 2012).

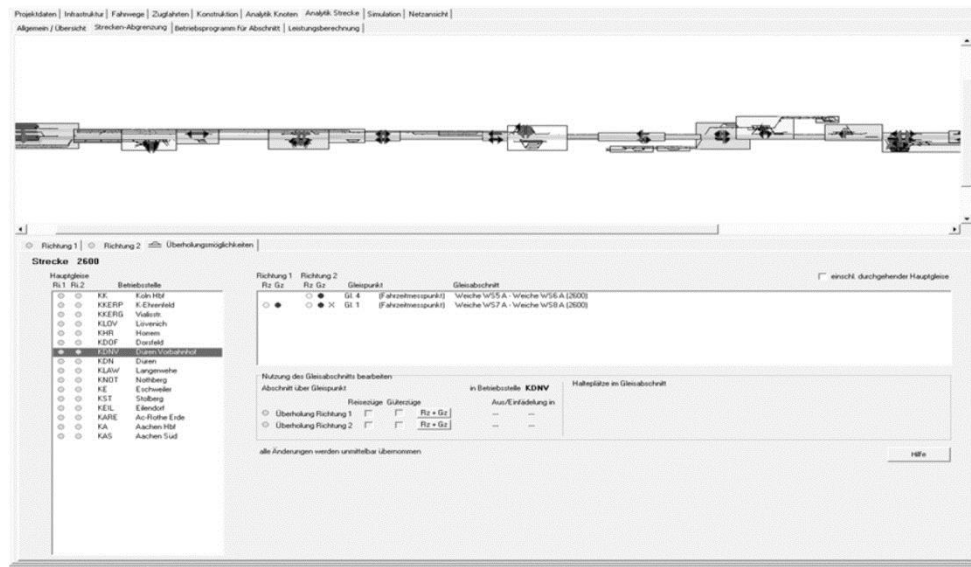


Abbildung 9: Analytische Berechnung

Wesentliche Anwendungsgebiete der analytischen Berechnung:

- Leistungsuntersuchung von Netzelementen (Strecken, Fahrstraßenknoten, Teilfahrstraßenknoten, Gleisgruppen) mit Qualitätsbezug bei noch nicht explizit festgelegten Fahrplänen
- Identifikation von Engpässen
- Ermittlung der Qualität und Restkapazität bei Knotenuntersuchungen
- Bemessung und Vergleich von Infrastrukturvarianten und Betriebsprogrammen

Vorteile der analytischen Berechnung:

- kurze Rechenzeiten
- kein konkreter Fahrplan, sondern nur Angaben über das Betriebsprogramm, erforderlich
- geringer Bearbeitungsaufwand bei der Abbildung des Betriebsprogramms
- direkte Ermittlung der Kenngrößen „Kapazität“ für die Prozesse der Fahrplanerstellung und Betriebsdurchführung
- allgemeingültige Aussage für eine Vielzahl von möglichen Fahrplanvarianten

Nachteile der analytischen Berechnung:

- optimale Nutzung von alternativen Fahrwegen nicht abbildbar
- keine Berücksichtigung von betrieblichen Randbedingungen (z. B. Anschlüsse oder Umläufen)

#### 4. Anwendungsfelder im Rahmen verkehrspolitischer Fragestellungen

In Deutschland werden für unterschiedliche Aufgabenstellungen im Rahmen verkehrspolitischer Fragestellungen verschiedene Verfahren zur Kapazitätsermittlung von Schienenwegen eingesetzt. Im Folgenden werden kurz wesentliche Anwendungsfelder und die dabei verwendeten Methoden beschrieben.

##### Bundesverkehrswegeplanung

Da sich die politischen und verkehrlichen Randbedingungen häufig ändern, ist eine stetige Überprüfung und Weiterentwicklung der im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung eingesetzten Werkzeuge erforderlich. Eine große Herausforderung für die Zukunft stellt die Weiterentwicklung der Kriterien zur Priorisierung von Investitionen in der Verkehrsinfrastruktur dar. So sind sowohl die geeigneten Projekte auszuwählen als auch die Reihenfolge ihrer Realisierung festzulegen. Im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung erfolgt die Ermittlung der Kapazität unter Anwendung der analytischen Methode auf Basis einer makroskopischen Infrastruktur. Ein wesentliches Kriterium für die Anwendung der analytischen Methode stellt hierbei die Verwendung effizienter Berechnungsformeln zur Ermittlung der Kapazität und der resultierenden Wartezeiten im Rahmen der wirtschaftlichen Zugführung dar (vgl. Breimeier, Konanz, 1994).

##### Abgabe und Stilllegung von Eisenbahninfrastruktureinrichtungen

Gemäß § 11 AEG hat ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen eine mehr als geringfügige Verringerung der Kapazität einer Strecke bei der zuständigen Aufsichtsbehörde (Eisenbahn-Bundesamt) zu beantragen. Ein Verfahren nach § 11 AEG ist dann erforderlich, wenn der Verringerung der Kapazität aufgrund von Rückbaumaßnahmen mehr als geringfügig ist. Der Nachweis erfolgt unter Anwendung der analytischen Methode auf einer mikroskopischen Infrastruktur. Es werden dabei sowohl die Kapazitäten für Strecken als auch diejenigen für Knoten berechnet.

##### Überlastete Schienenwege

Gemäß § 16 EIBV hat das Eisenbahninfrastrukturunternehmen bei der Vorlage überlasteter Schienenwege dies der zuständigen Aufsichts- und Regulierungsbehörde mitzuteilen. Dies gilt auch für Schienenwege, die in naher Zukunft überlastet sein werden. Wurden Schienenwege durch das Eisenbahninfrastrukturunternehmen für überlastet erklärt, so hat dieses eine Kapazitätsanalyse durchzuführen. Ziel einer solchen Kapazitätsanalyse ist die Erarbeitung von Maßnahmen zur Umleitung und zeitlichen Verlagerung von Verkehren sowie zur Erhöhung der Kapazität. Hierzu werden sowohl die analytische als auch die konstruktive Methode eingesetzt. Die Kapazitätsermittlung erfolgt dabei auf einer mikroskopischen Infrastruktur.



### Ermittlung rahmenvertraglich gebundener Schienenwegkapazität

Gemäß § 13 EIBV ist ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen berechtigt, Rahmenverträge über die Benutzung von Schienenwegkapazität zu schließen, die eine Laufzeit von mehr als einer Netzfahrplanperiode aufweisen. Zu beachten ist jedoch, dass die gemäß Rahmenverträgen gebundenen Zugtrassen 75 % der Schienenwegkapazität eines Schienenweges pro Stunde nicht überschreiten. Zur Ermittlung rahmenvertraglich gebundener Schienenwegkapazität wird eine gegenüber dem UIC Code 406 weiterentwickelte Methode der Verkettung mit konstruiertem Fahrplan auf mikroskopischer Infrastruktur eingesetzt (vgl. Wendler, Gröger, Nießen, 2012; Kuckelberg, Gröger, Wendler, 2011).

### Interne Infrastrukturplanungen der Eisenbahninfrastrukturunternehmen

Darüber hinaus kommen im Rahmen der internen Infrastrukturplanungen der einzelnen Eisenbahninfrastrukturunternehmen verschiedene Methoden zur Anwendung. In der Regel sind dies analytische Berechnungen und Simulationen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für Kapazitätsermittlungen im Rahmen verkehrspolitischer Fragestellungen häufig analytische Berechnungen zur Anwendung kommen. Analytische Verfahren zur Kapazitätsermittlung von Eisenbahninfrastruktur wurden am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelt und werden aktuell z. B. von der DB Netz AG und dem Eisenbahn-Bundesamt mit Hilfe der Standardsoftware LUKS<sup>®</sup> (Leistungsfähigkeitsermittlung von Strecken und Knoten) angewendet.

## 5. Schlussfolgerungen

Die Kapazität der Eisenbahninfrastruktur steht im Rahmen verkehrspolitischer Fragestellungen oftmals im Fokus. Bereits heutzutage sind viele Strecken und Knoten des Deutschen Eisenbahnnetzes stark ausgelastet und stoßen an ihre Kapazitätsgrenzen. Zur Bewältigung des prognostizierten Verkehrswachstums auf der Schiene ist der Neu- und Ausbau der Eisenbahninfrastruktur zwingend erforderlich, jedoch sehr kostenintensiv. Die prognostizierte Verkehrsnachfrage und die vorhandene bzw. zukünftige Kapazität der Eisenbahninfrastruktur sind dabei die wesentlichen Messgrößen zur Priorisierung von Maßnahmen.

Mit Hilfe eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden gelingt es, die zur Verfügung stehenden Kapazitäten zu ermitteln, vorhandene Engpässe zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zu deren Beseitigung zu bewerten. Für Kapazitätsermittlungen kommen überwiegend analytische Berechnungen zur Anwendung, da es innerhalb kurzer Rechenzeit gelingt, einen direkten Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Betriebsqualität herzustellen. Die Verfahren verwenden dabei als Qualitätsmaßstab die zulässige Summe der Wartezeiten.

Zukünftig sollten bei Infrastrukturmaßnahmen neben den Wartezeiten als Maßstab zur Kapazitätsermittlung auch verstärkt wirtschaftliche Kriterien in Bezug auf die zu erwartenden

den Kosten und Erlöse Berücksichtigung finden. Hierbei ist dann auch die Konkurrenzsituation der verschiedenen Verkehrsträger am Verkehrsmarkt mit einzubeziehen. Eine Herausforderung stellt dabei die Verfügbarkeit der benötigten Eingangsdaten auf der Kosten- und Erlösseite dar. Gelänge es im Rahmen weiterer Forschungen verallgemeinerte, gültige Kernaussagen in Bezug auf diese Daten zu formulieren, so könnten demnächst noch spezifischere Aussagen zur Kapazität der Eisenbahninfrastruktur getroffen werden und Neu- und Ausbauprojekte feingliedriger priorisiert werden.

### Abstract

The capacity of railway infrastructure often is in focus of transport policy issues. Already now a lot of lines and nodes are highly occupied. In order to handle the increasing traffic demand on rails, new and extended railway infrastructure is mandatory. The predicted traffic demands as well as the existing and prospective capacity of railway infrastructure are essential indicators for prioritising infrastructure projects.

By using methods of railway operations, it is possible to calculate the available capacities, to identify existing bottlenecks and to evaluate measures to eliminate them. Mainly analytic calculation is used for capacity assessment, as it is possible to establish a relation between the utilisation of infrastructure and the quality of operation. The permitted waiting time is used as quality measure in this context.

In the future economic criteria related to the expected costs and revenues should be taken into account next to the waiting times. However, currently the availability of needed input data is insufficient. If further research allows generalized, valid statements concerning this data, it would be possible to make more specific statements regarding the capacity of railway infrastructure. Therefore these results could lead to more delicate prioritised infrastructure projects. Furthermore the competitive situation between the different transport carriers at the transport market should be considered as well.

### Quellen

- Breimeier, R. und Konanz, W. (1994), Die Wirtschaftliche Zugführung als Instrument der langfristigen Infrastrukturplanung, *Schriftenreihe der DVWG, Reihe B, Band 178*, S. 168–185.
- Brünger, O. und Kröger, Th. (2003), Fahrplantrassen managen und Fahrplanerstellung simulieren, *Tagungsband der 19. Verkehrswissenschaftlichen Tage Dresden*, 22./23.09.2003.
- Brünger, O. (2000), Fahrplanfeinkonstruktion mit Rechnerunterstützung – Grundlagen, Meilensteine und Visionen, *Informationstechnik bei den Bahnen, Edition ETR*, S. 148–154.

DB Netz AG, *Richtlinie 405 – Fahrwegkapazität*.

Dickenbrok, B. (2012), *Wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen zur Anpassung der Streckenleistungsfähigkeit auf Grundlage einer integrierten Systembeurteilung* – Dissertation am Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen.

Fechner, C. (2014), Fahrplanrobustheitsprüfung zur Beratung von Aufgabenträgern, *Deine Bahn*, 42 11, S. 44–48.

Happel, O. (1959), Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 8 2, S. 79–90.

Janecek, D., Kuckelberg, A. und Nießen, N. (2012), Kapazitätsermittlung von Eisenbahnknoten und Strecken, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 61 10, S. 30–36.

Jochim, H. (1999), *Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb* – Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 54.

Kuckelberg, A., Gröger, Th. und Wendler, E. (2011), A UIC-compliant, practically relevant capacity-consumption evaluation algorithm, *Proc. of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Rome, 16.-18.02.2011.

Kuckelberg, A., Janecek, D. und Nießen, N. (2013), Grundlagen zur Simulation der Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 62 7+8, S. 50–55.

Kuckelberg, A., Nießen, N. und Wendler, E. (2010), Experiences with infrastructure capacity evaluation following UIC 406, *Proc. of the 18th International Symposium EURO-Žel 2010*, Žilina, 26./27.05.2010, part 1, pp. 83–90.

Nießen, N. und Schaer, T. (2012), Dimensionierung der Infrastruktur – Betriebswissenschaftliches Know-How für den Bahnbetrieb, *Deine Bahn*, 40 5, S. 42–45.

Schwanhäüßer, W. (1974), *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn* – Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 20.

Schwanhäüßer, W. (2009), Wirtschaftlich und betrieblich optimale Zugzahlen auf Eisenbahnstrecken, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 58 9, S. 488–495.

---

Uhlmann, M. und Mutschink, K. (2004), Bemessung komplexer Eisenbahninfrastruktur – Die konstruktive Methode, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 53 (2004) 7+8, S. 506–514.

UIC (Hrsg.) (2004), *Capacity. UIC Code 406*, 1. Auflage.

Wakob, H. (1985), *Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte der Leistungsfähigkeit und der Anlagenbelastung* – Veröffentlichung des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen.

Wendler, E., Gröger, Th. und Nießen, N. (2012), Kapazitätsverbrauch rahmenvertraglich gebundener Zugfahrten, *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, 61 1+2, S. 15–21.