

Benchmark von Qualitätsmaßstäben für Kapazitätsermittlungen

Bär, Matthias¹, Lenze, Wiebke², Eisold, Jan¹, Nießen, Nils²

¹Institut für Bahnsysteme und Öffentlichen Verkehr, TU Dresden ²Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen

Zusammenfassung

„Qualität“ ist ein in gängiger und vielfach verwendeter Begriff. Es wird der Frage nachgegangen, was Qualität im Eisenbahnwesen genau bedeutet und wie sie mit den eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren der Analytik und Simulation bestimmt werden kann.

Keywords: Eisenbahnbetrieb, Simulation, Analytik, Kapazität, Qualitätsmaßstab

1 Ausgangslage

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) dienen dem Ziel, Eisenbahnbetriebsanlagen leistungsorientiert zu bemessen und wirtschaftlich zu betreiben. Die dabei zu ermittelnde Fahrwegkapazität hängt nicht allein von den Eigenschaften der Infrastruktur ab, sondern vor allem auch von der Art ihrer Nutzung (definiert v. a. durch die Struktur des Betriebsprogrammes) sowie von der zu erzielenden Qualität der Betriebsführung.

Die DIN EN ISO 9000 [1] definiert Qualität als die „Fähigkeit, Kunden zufrieden zu stellen sowie durch die beabsichtigte und unbeabsichtigte Auswirkung auf relevante interessierte Parteien“. Im Öffentlichen Verkehr sind die Endkunden Fahrgäste oder Verladeder; die interessierten Parteien umfassen darüber hinaus Aufgabenträger, Verkehrsunternehmen, Infrastrukturbetreiber, Politik und Gesellschaft. Im Individualverkehr sind die individuellen Fahrzeugnutzer mit den Kunden vergleichbar. Die verschiedenen beteiligten Gruppen stellen eine Reihe zum Teil auch widersprüchlicher Forderungen an einen qualitativ hochwertigen Betrieb.

Für EBWU enthält die Richtlinie 405 der DB Netz AG [2] eine Reihe von Qualitätskenngrößen, wobei nur ein geringer Teil davon mit validierten Qualitätsmaßstäben untersetzt und daher i.d.R. als Kriterium für die Bewertung herangezogen wird. Dies betrifft die Summe planmäßiger bzw. außerplanmäßiger Wartezeiten vor Strecken bzw. Teilfahrstraßenknoten und die daraus ableitbaren Warteschlangenlängen sowie die Wartewahrscheinlichkeit vor Gleisgruppen. Diese Kenngrößen, ermittelbar vor allem mittels analytischer Verfahren, beziehen sich somit jeweils auf einzelne Netzelemente, deren Kapazität - zunächst losgelöst vom übrigen Netz - damit gut beurteilbar ist. Aussagen über die Qualität der Betriebsabwicklung über gesamte Zugläufe und Reiseketten, wie sie vor allem im Interesse von Verkehrsunternehmen und Endkunden liegen, sind damit nicht direkt möglich. Diesen Interessen etwas näher kommt das Kriterium Verspätungszuwachs, für deren „vorläufige Orientierungswerte“ allerdings keine genauen Bezugsräume angegeben werden. Dieses Kriterium ist eher mit simulativen Methoden ermittelbar. Außerdem wird, wie auch ähnlich im UIC-Merkblatt 406 [3] der verkettete Belegungsgrad als Qualitätskriterium geführt, obgleich er keine Qualität an sich beschreibt, sondern nur eine relevante Basisgröße für die erzielbare Betriebsqualität darstellt.

Da sich die etablierten Verfahren für EBWU insbesondere auch dadurch unterscheiden, ob und mit welchen Ansätzen und Kenngrößen sie den Qualitätsaspekt berücksichtigen, sind Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren oft nicht direkt miteinander vergleichbar. In einem gemeinsamen Projekt der RWTH Aachen und der TU Dresden für die DB Netz AG sollen daher allgemeingültige Qualitätskriterien für EBWU vorgeschlagen und mit Ansätzen der Analytik und der Simulation ermittel- und vergleichbare Qualitätskenngrößen abgeleitet werden. Während einer ersten Projektstufe wurde eine umfangreiche Recherche hinsichtlich Qualitätskriterien, -kenngrößen und -maßstäben bei Kapazitätsbetrachtungen im Verkehr durchgeführt.

2 Empfehlungen und Vorgaben aus Regularien

Dem Thema Qualität im Verkehr widmen sich neben der bereits genannten DIN EN ISO 9000 weitere europäische Normen. Mit Fokus auf den Öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) ist dies z.B. DIN EN 13816 [4]. Im Dienstleistungs-Qualitätskreis (vgl. Abbildung 1) wird die Dualität zwischen Dienstleistungsanbieter und Kunden verdeutlicht.

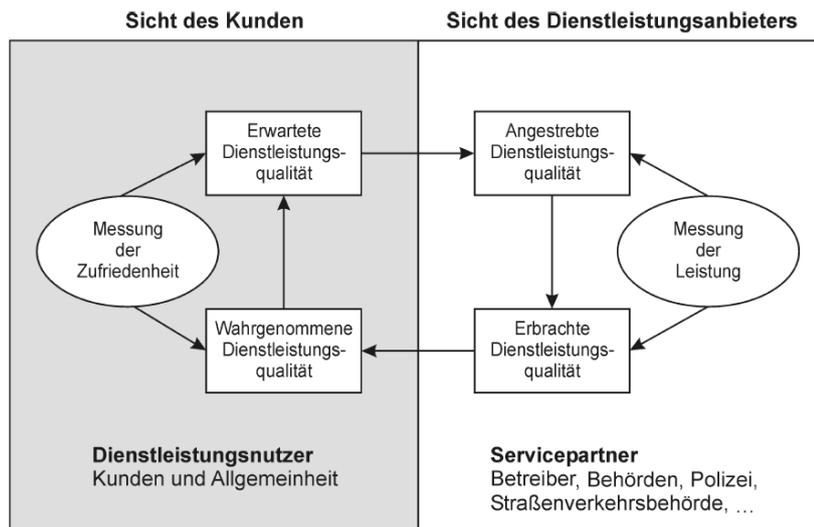


Abbildung 1: Dienstleistungs-Qualitätskreis aus [4]

Bei der erwarteten Dienstleistungsqualität handelt es sich um die Qualität, die explizit oder implizit vom Kunden erwartet wird. Die angestrebte Dienstleistungsqualität strebt der Anbieter an zu erbringen. Dabei spielen neben den Erwartungen der Kunden auch „externe und interne Zwänge“ sowie „finanzielle und technische Möglichkeiten“ eine Rolle. Innerhalb von acht Kategorien an Qualitätskriterien werden in der Norm die Verfügbarkeit (Raum, Zeit, Häufigkeit) sowie Zeitaspekte der Planung und Durchführung der Reise (Reisezeit, Pünktlichkeit, Regelmäßigkeit) genannt.

In Deutschland als Branchenstandards des ÖPNV anerkannt, nehmen eine Reihe von FGSV-Empfehlungen (z.B. [5], [6] und [7]) sowie VDV-Schriften (z.B. [8]) ebenfalls Bezug auf Qualitätsaspekte. In [5] werden kurze Reisezeiten und Übergangszeiten im Fahrplan als auch ihre Verlässlichkeit als wichtige Kriterien genannt. [6] und [7] machen, bezogen auf den ÖPNV, konkrete Vorgaben in einem 6-stufigen System zum Reisezeitverhältnis ÖPNV/MIV, zu Verspätungen sowie zu Wartezeiten bei Anschlüssen. In [7] werden aber auch Vorgaben für die angestrebten Beförderungsgeschwindigkeiten¹² im überregionalen Eisenbahnverkehr aufgestellt (vgl. Tabelle 1).

Im UIC-Merkblatt 405 [9] wird die sogenannte Plankapazität mit einem „gewünschten Qualitätsgrad“ verbunden, die Betriebsqualität sei dabei an der Pünktlichkeit der Züge zu messen. UIC-Merkblatt 406 [3] bindet die Betriebsqualität nur mittelbar durch die Belegungsrate und Vorgaben zu deren zulässiger Höhe ein.

¹² In [7] als Fahrgeschwindigkeiten bezeichnet, im Text wird erläutert, dass diese auch „die notwendigen Wartezeiten an Haltestellen“ berücksichtigen.

Tabelle 1: angestrebte Beförderungsgeschwindigkeiten im Bahnpersonenverkehr [7]

Kategoriengruppe		Kategorie		Standard-entfernungsbereich [km]	angestrebte Fahrgeschwindigkeiten [km/h]
FB	Fernverkehrsbahn	FB 0	kontinentaler Schienenpersonenfernverkehr	200 – 500	160 – 250
		FB I	großräumiger Schienenpersonenfernverkehr	60 – 300	120 – 160
NB	Nahverkehrsbahn außerhalb bebauter Gebiete	NB I	großräumiger Schienenpersonennahverkehr	40 – 200	50 – 110
		NB II	überregionaler Schienenpersonennahverkehr	10 – 70	40 – 100
		NB III	regionaler Schienenpersonennahverkehr	5 – 35	35 – 100

Auch in den umfangreichen Handbüchern des nordamerikanischen Transportation Research Board ([10] und [11]) findet sich zwar die generelle Aussage zur Berücksichtigung einer Servicequalität, die Aussagen zum konkreten Zusammenhang zur Kapazität bleiben aber eher vage. In [10] werden für Schnellbahnen 15 bis 25 s Pufferzeiten empfohlen. In [11] wird eine Vielzahl an Qualitätskriterien beschrieben, für die jeweils 5 bis 6 Qualitätsstufen definiert werden, u. a. auch die Gesamtreisezeit Quelle-Senke einschließlich eines Reisezeitverhältnisses ÖV/MIV sowie die Pünktlichkeitsrate (bis 5 Minuten Verspätung werden als pünktlich gewertet).

3 Blick über den Tellerrand – andere Verkehrsträger

Die wohl umfassendsten Dokumente zur Kapazitätsplanung bei Landverkehrsmitteln stellen das Highway Capacity Manual (HCM) [12] und sein deutsches Gegenstück, das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [13], dar. Beiden ist eigen, dass verschiedene Qualitätskriterien jeweils in 6 Qualitätsstufen des Verkehrs (HCM: Level of Service) eingeordnet werden. Es wird unterschieden nach Qualitätskriterien für eher kleine Netzelemente wie Knoten und dazwischen liegende Strecken sowie großräumiger für Netzabschnitte und Verbindungen (i.S. Fahrverbindung). Für Letztere gilt als Qualitätskriterium im HBS der sogenannte Fahrtgeschwindigkeitsindex als Quotient zwischen erwarteter und angestrebter mittlerer PKW-Fahrtgeschwindigkeit, wobei die angestrebten Werte in [7] definiert wurden. Die Netzelemente werden vor allem über mittelbar die Qualität beeinflussende Kenngrößen wie Auslastungsgrad und Verkehrsdichte bewertet, aber auch Wartezeiten, vor allem vor Knoten, spielen eine Rolle. In der letzten Auflage wurden die reinen Mittelwertansätze im HCM um Betrachtungen der Zuverlässigkeit des Erreichens bestimmter Kennwerte ergänzt, z.B. durch Betrachtungen von Verteilungen und Perzentilwerten unter Beachtung schwankender Eingangsgrößen. Die Bemessung im Straßenverkehr erfolgt dabei i.d.R. nach der hinsichtlich Belastung n-ten Stunde im Jahr, wobei die 30. bzw. 50. Stunde üblich sind [14].

Auch im Luftverkehr sind Kapazitätsplanungen mit Qualitätsanforderungen verknüpft. Bei der Terminalplanung spielen der Platzbedarf pro Passagier und die Wartezeit eine

Rolle, seit 2014 gibt es auch hier ein Qualitätsstufenkonzept in 4 Stufen von „under-provided“ bis „over-design“ [15]. Bei der Kapazitätsbeurteilung im Flugverkehr spielen v. a. die Prozesse der kurzfristigen Zuweisung von Slots und ihre Verspätung eine Rolle [16].

4 Benchmark Qualitätsbetrachtungen bei EBWU

Es wurden etwa 30 wissenschaftliche Studien und 40 weitere Fachbeiträge analysiert, die sich direkt oder indirekt mit grundsätzlichen Fragen zu EBWU beschäftigen. Während ein Teil der Quellen, meist bezogen auf [3], die Qualität nur durch die mittelbaren Kenngrößen Belegungsgrad, Auslastungsgrad oder Verkehrsdichte, einbezog, bekennt sich die überwiegende Mehrzahl an Quellen mehr oder minder dezidiert zu Qualitätskenngrößen, die sich meist auf die zeitliche Abwicklung des Betriebes beziehen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Beispiele für zeitbezogene Qualitätskenngrößen

Planmäßige / realisierte Beförderungszeit; Beförderungszeitquotienten
Beförderungsgeschwindigkeit
Luftliniengeschwindigkeit (Beförderungszeit je Luftlinienentfernung)
Planmäßige / realisierte Reisezeit; Reisezeitquotienten
Streuung der Reisezeiten im Betrieb
Planmäßige / außerplanmäßige / realisierte Wartezeiten
Verspätung, Verspätungsveränderung
Verspätungskoeffizient (Verhältnis Ausgangs- zu Eingangsverspätung)
Folgeverspätung
Pünktlichkeit (oft unterschiedlich oder gar nicht genau definiert)
Pünktlichkeitsgrad

Wie bereits in Abschnitt 2 ausgeführt, sollte v. a. die vom Kunden wahrgenommene Qualität einen Schwerpunkt bilden, das bedeutet, zeitbezogene Kenngrößen auf die gesamte Reise- und Transportkette zu beziehen. Dies ist bei EBWU jedoch oft nicht praktikabel, müssten die Untersuchungen doch stets mit umfangreichen Nachfragemodellen verknüpft werden. Erfahrungen dazu beschreibt [17].

Daher werden die zeitbezogenen Kenngrößen i.d.R. auf begrenzte Netzelemente bzw. –abschnitte bezogen und die Wirkungen auf die Reise- und Transportketten dann höchstens mit Kenngrößen zur Anschlusssicherheit, wie Wahrscheinlichkeit gehaltener Anschlüsse, abgebildet. Solche Kenngrößen bereitstellen zu können geht einher mit der Notwendigkeit nicht nur Erwartungswerte zeitbezogener Kenngrößen, sondern Angaben zur

Verlässlichkeit ihrer Einhaltung, wie Perzentilwerte bzw. mindestens Standardabweichungen zu ermitteln [18]. Validierte Maßstäbe für zeitliche Qualitätskenngrößen liegen aber nahezu nicht vor; Ausnahmen in [2] wurden in Abschnitt 1 aufgeführt. Nur vereinzelt werden pragmatisch Schwellwerte genannt, in [19] z.B. die Begrenzung der mittleren Verspätung verspäteter Züge auf die mittlere Pufferzeit.

In einer Reihe von Quellen wird daher versucht, Qualitätskenngrößen in Ansätze einer Monetarisierung zu integrieren, z.B. [20], [21], [22], [23], [24]. Einer umfassenden Anwendung bei EBWU stehen einerseits erhebliche Probleme bei der Ermittlung und Zusage von Kosten und Erlösen entgegen, andererseits aber auch die Frage, ob eine rein monetäre Sicht auf die Qualität des Eisenbahnbetriebes überhaupt zielführend ist.

Daher beschreiten einige Quellen den Weg, ausgehend von Kosten- und Erlösbetrachtungen betrieblich und verkehrlich orientierte Ersatzmodelle zu entwickeln. Zu nennen wären die Ermittlung eines optimalen Leistungsbereichs zwischen minimaler Empfindlichkeit der Wartezeit und maximaler Beförderungsenergie nach [25] sowie die Transportimpulsdifferenz nach [26]. Zu Problemen und Möglichkeiten der praktischen Umsetzung des erstgenannten Ansatzes existieren mittlerweile eine Reihe von Untersuchungen der Universität Stuttgart (z.B. [27]).

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Qualitätsanforderungen wird in einigen Studien versucht, dies durch kombinierte Kenngrößen abzubilden, z.B. mittels einer Streckendurchsatzleistung in [28] bzw. eines Railway Performance Index und eines Quality of Service in [29]. Für derartige Kenngrößen ist das Finden von Qualitätsmaßstäben allerdings noch problematischer.

Wie bereits mehrfach angedeutet, spielt eine dezidierte Betrachtung von Schwellwerten oder eine Definition von Qualitätsstufen ähnlich dem HCM [12] bzw. dem HBS [13] in Studien zu EBWU kaum eine Rolle. Aus Erfahrungen abgeleitete Schwellwerte gibt es für die mittelbare Qualitätskenngröße Belegungsgrad in [3] sowie für einige Kenngrößen für Warteprozesse mit Schwerpunkt Summe außerplanmäßiger Wartezeit in [2], wobei aus Letzterem ein 3- bzw. 4-stufiger Ansatz abgeleitet wird. In [30] wird eine Modifikation dieses Ansatzes für Engpassbetrachtungen empfohlen. Einige Untersuchungen (z.B. [31] und [32]) unterscheiden, wie auch [2], verschiedene Leistungsbegriffe, bei denen dann Qualitätsmerkmale in unterschiedlichem Grad Berücksichtigung finden. Einige Untersuchungen, z.B. [33], differenzieren die Qualitätsbetrachtungen zur Kapazität zunächst nach unterschiedlichen Interessengruppen.

5 Vergleich der Verfahren Analytik und Simulation

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) stellen die Grundlage für verschiedene Entscheidungen in Bezug auf die Entwicklung der Schieneninfrastruktur dar. Dies betrifft sowohl den Neu- und Umbau von Infrastruktur als auch die Auswirkungen veränderter Nachfrage- und Betriebskonzepte auf die Leistungsfähigkeit. Hierzu werden neben der konstruktiven Methode vor allem analytische und simulative Methoden angewandt [34]. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Verfahren für EBWU ist deren Art der Abbildung der Betriebsprogramme. Dies reicht von detaillierten Fahrplänen (fahrplanabhängige Verfahren) bis hin zu grob strukturierten Betriebsprogrammen mit Modellzügen einschließlich deren Anteil und ggf. Reihenfolge im Betriebsprogramm (fahrplanunabhängige Verfahren). Mit fahrplanunabhängigen Verfahren können Kapazitätsuntersuchungen in sehr frühen Planungsphasen erfolgen, in denen noch keine Erkenntnisse über den oder die zukünftig konkret zu erwartenden Fahrpläne vorliegen, sie sind aber auch zur Untersuchung der Infrastruktur bei zukünftig wechselnden Fahrplänen gut geeignet. Fahrplanabhängige Verfahren haben ihre Stärke bei Kapazitätsuntersuchungen, für die ein langfristig geltender Fahrplan unterstellt werden kann sowie für die Beurteilung der zu erwartenden Betriebsqualität bei der Umsetzung aktueller Fahrpläne (sogenannte Fahrplanrobustheitsprüfung).

Die typischen analytischen Verfahren basieren auf einer Abbildung des untersuchten Netzausschnittes als Bedienungsmodell und sind daher praktisch auf begrenzte Netzelemente wie Teilstrecken, Teilfahrstraßenknoten und Gleisgruppen beschränkt. Die Zugfolge im Zulauf (planmäßig oder im Betrieb mit Verspätungen) sowie die Mindestzugfolge im untersuchten Netzelement werden als Ankunfts- und Bedienprozesse durch Zufallsverteilungen abgebildet. Als Ergebnisse werden typische Kenngrößen für Stauprozesse vor Bedienungsknoten berechnet. Dafür existieren Formeln, die mittels wahrscheinlichkeits- bzw. bedienungstheoretischer Methoden als exakte Lösungen oder Näherungen abgeleitet wurden. Somit lässt sich für die untersuchten Netzelemente ein Bezug zwischen Zuganzahl und einer oder mehrerer Qualitätskenngrößen wie planmäßige bzw. außerplanmäßige Wartezeit bzw. Warteschlangenlänge oder Wartewahrscheinlichkeit ableiten. Da für diese Kenngrößen validierte Qualitätsmaßstäbe vorliegen [2], kann die jeweils für das untersuchte Netzelement optimale Zuganzahl, die sogenannte „Nennleistung“, bestimmt werden [35]. Die Ergebnisse gelten nicht für einen konkreten Fahrplan, sondern als Erwartungswert für die Menge aller unter den gegebenen Struktureigenschaften möglichen Fahrpläne. Sie sind damit nicht direkt mit Ergebnissen fahrplanbasierter Simulationen vergleichbar. Ein Vorteil der analytischen Ansätze besteht darin, dass die im untersuchten Netzelement verursachten Staueffekte, egal wo betroffene Züge in der Realität warten würden, diesem Netzelement direkt zugeordnet werden, also ein direkter Infrastrukturbezug hergestellt wird. Die ermittelten außerplanmäßigen Wartezeiten sind

aber nicht rückwirkungsfrei auf andere Netzelemente als Verspätungszuwachs des Netzelements interpretierbar, so dass eine zugbezogene Betrachtung der Verspätungsentwicklung im Netz auf dieser Basis nicht möglich ist.

Ein kürzlich für die DB Netz AG entwickeltes analytisches Verfahren [36] zur Ermittlung außerplanmäßiger Wartezeiten auf Teilstrecken, das mit einem vorgegebenen Fahrplan arbeitet, basiert ebenfalls auf wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen. Ein definierter Anteil an Zügen erhält eine exponentialverteilte Einbruchsverspätung. Allerdings wird auch hier, wie bei der bekannten „STRELE-Formel“, der Betrieb auf der Teilstrecke modelltechnisch auf einen Überholungsabschnitt reduziert. Auf Basis eines noch zu validierenden Qualitätsmaßstabes soll mit dem Verfahren eine optimale Anzahl belegbarer Güterzug-Systemtrassen bestimmt werden.

Simulationsuntersuchungen bilden die Realität mit ihren dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell ab, Eisenbahnbetriebssimulationssysteme haben dabei im Vergleich zu analytischen Methoden i.d.R. den Anspruch sehr hoher Detailliertheit der Abbildung. Mit Hilfe moderner Rechentechnik können heutzutage auch größere Teilnetze betrachtet werden. Auf der Infrastruktur, meist abgebildet mittels Grafenmodellen, kann die Fahrt von Zügen mit derselben Präzision wie bei der kommerziellen Fahrplanung abgebildet werden. Im Mittelpunkt stehen Simulationsuntersuchungen auf Basis eines festen Fahrplanes. Die Züge erhalten an definierten Punkten bzw. Abschnitten Einbruchs- bzw. Urverspätungen nach vorgegebenen Zufallsverteilungen. Durch vielfachen Durchlauf der Simulation werden zufällige Realisationen dieser Verteilungen erzeugt. Das automatische Erkennen und Lösen von auftretenden Konflikten, in der Praxis immer noch weitgehend manuell erfolgend, ist dabei eine große Herausforderung und in der Art des Umsetzens auch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal unterschiedlicher Systeme. Wie in der Praxis kann man die Qualität des Betriebsablaufs in der Simulation auf Basis entsprechender Messungen und Auswertungen von Betriebsdaten statistisch auswerten. Dazu dienen insbesondere der Soll-Ist-Abgleich an definierten Fahrzeitmesspunkten und daraus ermittelte Ist-Verspätungen der Züge. Auf dieser Grundlage sind zug- und abschnittsbezogene Verspätungsveränderungen berechenbar [37]. Eine ursachenbezogene Zuschreibung von Verspätungszuwachs auf einzelne Infrastrukturabschnitte ist dagegen nicht direkt möglich, wirken doch in einem Abschnitt verursachte Stauprozesse oft rückwärtig als Verzögerung der Fahrt in vorgelegenen Abschnitten. Dazu kommen die Überlagerung von Ur- und Folgeverspätungen sowie möglicher Verspätungsabbau. Für die Verspätungsveränderung, insbesondere den Verspätungszuwachs als Qualitätskenngröße existieren daher bisher auch keine belastbaren Maßstäbe. Auch sind die Aussagen mit den Ergebnissen analytischer, selbst fahrplanbasierter, Untersuchungen nicht direkt vergleichbar. Die Bestimmung eines der Nennleistung vergleichbaren Wertes einer optimalen Belastung stößt bei fahrplanabhängigen Untersuchungen wie der Simulation auf

das nicht einfach lösbare Problem der Fahrplanverdichtung bzw. –ausdünnung [27]. Somit eignen sich die simulativen Verfahren daher gut zur Bewertung der Fahrplanstabilität des Ausgangsfahrplans, jedoch weniger gut hinsichtlich der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Infrastruktur.

6 Fazit und Ausblick

Als Fazit lässt sich ein sehr differenziertes Bild hinsichtlich Qualitätskriterien und –kenngrößen für EBWU konstatieren. Dabei liegt der Schwerpunkt auf zeitbezogenen Kenngrößen, wobei es nur wenige Kenngrößen mit validierten Qualitätsmaßstäben gibt. Verschiedene Empfehlungen, auch aus entsprechenden Normen, legen einen Fokus auf kundenwirksame Zeitelemente, insbesondere Kenngrößen, die die Verlässlichkeit der Reisekette abbilden, nahe. In EBWU liegt der Fokus aber eher auf betrieblich orientierten Kenngrößen, die sich auf einzelne Netzelemente oder Abschnitte beziehen. Hinsichtlich ermittelbarer Kenngrößen unterscheiden sich zudem noch analytische und simulative Verfahren, deren Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind.

Auf Basis der vorgenommenen Analyse des Sachstandes hinsichtlich Qualitätsmaßstäben bei EBWU sind als nächster Schritt Varianten für geeignete Qualitätskenngrößen herauszuarbeiten und ihre Eignung anhand von Beispielrechnungen mit verschiedenen analytischen und simulativen Verfahren vergleichend zu prüfen.

1 Literaturverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*, 2015.
- [2] DB Netz AG, *Richtlinie 405: Fahrwegkapazität*, 2008.
- [3] Internationaler Eisenbahnverband UIC, *Merkblatt 406: Kapazität, 2. Ausgabe*, 2013.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 13816: Transport - Logistik und Dienstleistungen. Öffentlicher Personenverkehr. Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität*, 2002.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV e.V., Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, *Empfehlungen für einen verlässlichen öffentlichen Verkehr*, 2017.
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV e.V., *Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs*, 2010.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV e.V., Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, *RIN Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*, 2008.
- [8] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV, *Kundenorientierte Qualitätskriterien - VDV-Mitteilungen Nr. 7012*, 2001.
- [9] Internationaler Eisenbahnverband UIC, *Merblatt 405: Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit der Eisenbahnbetriebsanlagen und der Betriebsqualität*, 1996.
- [10] Transportation Research Board, *TRCP-Report 13 „Rail Transit Capacity“*, 1996.
- [11] Transportation Research Board, *TRCP-Report 165: Transit Capacity and Quality of Service Manual, Third Edition*, 2013.
- [12] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual, 6th Edition*, 2016.
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV e.v., *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*, Köln, 2015.

- [14] J. Geistefeldt, S. Hohmann und A. Estel, *Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen. Bericht V293 der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST*, 2018.
- [15] International Air Transport Association IATA, *Airport Development Reference Manual. 11th Edition*, 2019.
- [16] EUROCONTROL, *Capacity assessment and planning guidance document*, 2013.
- [17] A. Landex, *Methods to estimate railway capacity and passenger delays. Dissertation. TU of Denmark Lyngby*, 2008.
- [18] Significance, Goudappel Coffeng, Nea, *Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung. Projekt-Schlussbericht für das BMVBS*, 2012.
- [19] K.-D. Völz und W. Kretschmer, *Untersuchung von Fahrstraßenknoten und Ermittlung einer Belastungsgrenze. In: Eisenbahntechnische Rundschau ETR*, 1978, Heft 1+2, S. 45-48.
- [20] H. Jochim, *Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb. Dissertation. RWTH Aachen*, 1999.
- [21] S. Hietzschold, *Konzeption und Umsetzung eines Instrumentariums zur Ermittlung der spezifischen Kosten von Eisenbahnunternehmen in Abhängigkeit von der Betriebsleistung. Dissertation. TU Dresden*, 2017.
- [22] W. Schwanhäüßer, *Wirtschaftlich und betrieblich optimale Zugzahlen auf Eisenbahnstrecken. In: Eisenbahntechnische Rundschau ETR*, 2009, Heft 9.
- [23] A. König und K. Axhausen, *Bewertung der Verlässlichkeit: Neue Schweizer Ergebnisse. In: Internationales Verkehrswesen*, 2005, Heft 10, S. 424-429.
- [24] A. Lindfeldt, *Railway capacity analysis. Dissertation. KTH Royal Institute of Technology Stockholm*, 2015.
- [25] G. Hertel, *Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit auf Eisenbahnstrecken. In: Eisenbahntechnische Rundschau*, 1992, Heft 12, S. 665-671.
- [26] A. Oetting, *Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken. Dissertation. RWTH Aachen*, 2005.

- [27] C. Schmidt, *Beitrag zur experimentellen Bestimmung der Wartezeitfunktion bei Leistungsuntersuchungen im spurgeführten Verkehr*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2009.
- [28] T. Muthmann, *Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung*. Dissertation. TU Darmstadt, 2004.
- [29] F. Auer, *Best Practice Fahrweginstandhaltung: Band 1: Infrastrukturmanagement*. PCM Media House, 2017.
- [30] U. Martin, Y. Cui, F. Hantsch, Z. Chu und X. Li, *Knotenkapazität – Bewertungsverfahren für das mikroskopische Leistungsverhalten und die Engpasserkennung im spurgeführten Verkehr (RePlan)*. *Neues Verkehrswissenschaftliches Journal NVJ* Nr. 8, VWI Stuttgart, 2014.
- [31] M. Ossberger, *Leistungsfähigkeit von zweigleisigen Eisenbahnstrecken*. Dissertation. TU Wien, 2000.
- [32] G. Anderhub, R. Dorbritz und U. Weidmann, *Leistungsfähigkeitsbestimmung öffentlicher Verkehrssysteme*. *ETH Zürich, Schriftenreihe des IVT* Nr. 139, 2008.
- [33] J. P. Frank, *Methodik zur Effizienzbeurteilung der Kapazitätsnutzung und –entwicklung von Bahnnetzen*. Dissertation. ETH Zürich, 2013.
- [34] N. Nießen und T. Schaer, *Betriebswissenschaftliches Know-How für den Bahnbetrieb : Dimensionierung der Infrastruktur*. In: *Deine Bahn*, 2012, Heft 5, S. 42–45.
- [35] D. Janecek, A. Kuckelberg und N. Nießen, *Kapazitätsermittlung von Eisenbahnknoten und- strecken*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau ETR*, 2012, Heft 10, S. 30–36.
- [36] I. Gast und U. Steinborn, *Vermarktungskapazität - wieviel Qualität verträgt der Markt?* In: *Deine Bahn*, 2018, Heft 8, S. 44-51.
- [37] A. Kuckelberg, D. Janecek und N. Nießen, *Grundlagen zur Simulation der Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau ETR*, 2013, Heft 7+8, S. 50–55 .

Autoren



Bär, Matthias

Matthias Bär studierte Verkehrsingenieurwesen an der Hochschule für Verkehrswesen (HfV) Dresden, an der er 1982 auch promovierte und 1987 habilitierte. Bis 1989 war er bei der Deutschen Reichsbahn tätig. Seitdem wirkt er mit dem Arbeitsschwerpunkt Eisenbahnbetriebswissenschaften in der Lehre und Forschung an der heutigen Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr der TU Dresden.



Lenze, Wiebke

Wiebke Lenze, M. Sc. ist seit 2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. Ihr wesentliches Forschungsgebiet stellt die Eisenbahnbetriebswissenschaft dar. Das Studium des Bauingenieurwesens mit der Vertiefungsrichtung Verkehrswesen absolvierte sie an der RWTH Aachen und an der NTNU in Norwegen.



Eisold, Jan

Jan Eisold ist seit Abschluss seines Studiums des Verkehrsingenieurwesens an der TU Dresden als Diplomingenieur im Jahr 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr der TU Dresden tätig. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in den Bereichen Schienengüterverkehr und Eisenbahnbetriebswissenschaften.



Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon in Hannover und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.