

Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Werkzeug für die mittel- und langfristige Infrastrukturplanung

A. Oetting^{a,1} und N. Nießen^{b,2}

^a Deutsche Bahn, DB Netz AG
Theodor-Heuss-Allee 7, 60486 Frankfurt, Deutschland

^b Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str.1, 52056 Aachen

Kurzfassung: Der Vortrag stellt das F&E-Vorhaben der Deutschen Bahn AG zur Entwicklung eines Tool-Pakets für die mittel- und langfristige Infrastrukturplanung vor. Fahrplanunabhängig werden die Fahrplan- und Betriebsqualität für Strecken, Gesamtfahrstraßenknoten, Bahnhofsgleise und Zugbildungsanlagen integriert im Gesamtnetz stochastisch ermittelt. Ergebniskenngrößen des Modells sind die Leistungsfähigkeit, die Beförderungsgeschwindigkeit, die Fahrplan- und Betriebsqualität, Netzwirkungen und Nachfragereaktionen. Die Bewertung von Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen erfolgt aus der Sicht des Eisenbahninfrastrukturunternehmens, des Gesamtsystems Bahn sowie aus volkswirtschaftlicher Sicht.

Schlagworte: Eisenbahn, Netz, Eisenbahnbetriebswissenschaft, wirtschaftliche Bewertung, Verspätungen, Warteschlange

¹E-mail: Andreas.Oetting@bahn.de

²Korrespondierender Autor. E-mail: niessen@via.rwth-aachen.de,
URL: www.via.rwth-aachen.de

1 Einleitung

Die Infrastrukturplanung der Eisenbahn erfordert mittel- und langfristige Netzkonzepte. Diese werden sowohl auf politischer Ebene als auch bei den Eisenbahn(infrastruktur)unternehmen entwickelt. Ein Netzkonzept entsteht durch die Kombination von Einzelmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung ihrer positiven und negativen Synergieeffekte und umfasst in der Regel Maßnahmen des Neu-, Um- und evtl. Rückbaus von Infrastruktur sowie Regelungen zur Infrastrukturnutzung.

Wegen der mit baulichen Veränderungen von Infrastruktur verbundenen hohen Kosten sowie der langen Nutzungsdauer von Infrastruktur ist eine gründliche Entscheidungsvorbereitung auf der Basis einer quantitativen Analyse erforderlich.

Mit den am Markt verfügbaren Tools lassen sich wesentliche Fragen der netzweiten Infrastrukturplanung nicht beantworten. Das von DB Netz in Eigenregie entwickelte Tool PIN wurde aufgrund der Erfahrungen in der Anwendung und mit dem Ziel, eine einheitliche Toolwelt im gesamten DB-Konzern zu nutzen, aufgegeben. Daher hat sich die Deutsche Bahn im Jahre 2002 zur Entwicklung eines geeigneten Tool-Pakets entschlossen. Dazu wurden zunächst die Anforderungen an das Tool-Paket formuliert (vgl. Kapitel 2), anhand derer die Eignung verfügbarer Tools geprüft (vgl. Kapitel 3) und unter anderem aufgrund dieser Gegenüberstellung die Algorithmen für das neue Tool-Paket festgelegt (vgl. Kapitel 4). Derzeit befindet sich das Tool-Paket in der Realisierung.

2 Anforderungen an das Werkzeug

Für die strategische Netzplanung wird ein Tool-Paket benötigt, das die folgenden Anforderungen erfüllt:

- (a) Aufgrund der Langfristigkeit der Planungen und der Langlebigkeit der Infrastruktur darf die Konzeption des Netzes nicht für einen bestimmten, aufgrund der Ungewissheiten bei der Prognose ohnehin wenig realistischen Fahrplan erfolgen sondern muss anhand eines fahrplanunabhängigen Verfahrens, das alle möglichen Fahrpläne berücksichtigt, abgebildet werden.
- (b) Mögliche Maßnahmen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der o. a. Bereiche (Neu-, Um-, Rückbau, Nutzungsregelungen), sondern auch in Bezug auf ihre Wirkungen. Beispielsweise kann eine Neubaumaßnahme angestrebt werden, um die Leistungsfähigkeit im betrachteten Korridor zu erhöhen, die Reisezeit zu verkürzen oder die Fahrplan- und Betriebsqualität zu verbessern. Meist beeinflusst eine Maßnahme die genannten Kenngrößen in unterschiedlichem Maße. Das Tool-Paket muss folglich Maßnahmen unterschiedlichster Art anhand eines einheitlichen Maßstabs bewerten und vergleichbare Ergebnisse liefern.
- (c) Dazu ist es erforderlich, mindestens die genannten vier Kenngrößen Leistungsfähigkeit, Reisezeit, Fahrplan- und Betriebsqualität zu berechnen.
- (d) Wegen der o. a. Synergieeffekte müssen die Auswirkungen von Veränderungen an einer Stelle im Netz auf das gesamte Netz ermittelt werden (Netzwirkungen).

- (e) Dazu bedarf es der automatischen Identifikation und Auflösung von Engpässen durch Umleitung von Zügen, ihre zeitliche Verschiebung oder durch Geschwindigkeitsharmonisierung.
- (f) Da sich die Leistungsfähigkeiten von Strecken, Knoten (Personenbahnhöfe) und Zugbildungsanlagen gegenseitig beeinflussen, ist die integrierte Abbildung mit konsistenten Algorithmen erforderlich.
- (g) Die Maßnahmen zur Engpassauflösung wie auch Veränderungen in der Fahrplan- und der Betriebsqualität wirken sich auf die Nachfrage aus, deren Reaktion folglich auslastungsabhängig ermittelt werden muss.
- (h) Abschließend gilt es, die Auswirkungen auf das wirtschaftliche Ergebnis des Eisenbahninfrastrukturunternehmens, des Gesamtsystems Bahn oder auf den volkswirtschaftlichen Nutzen zu ermitteln.
- (i) Die im Tool-Paket verwendeten Algorithmen und Daten sollten kompatibel zu den bei der Deutschen Bahn bereits vorhandenen eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren für die kurz- und mittelfristige Bemessung von Netzelementen sein.
- (j) Ein Berechnungslauf sollte nicht länger als eine Stunde dauern.

Aufgrund dieser Anforderungen sind in dem Tool-Paket die in Abbildung 1 genannten fünf Berechnungsschritte zu realisieren.

Die Infrastrukturabbildung muss zur Simulation der Netzwirkungen das gesamte deutsche Netz umfassen und im Hinblick auf die angestrebte Rechenzeit und den mittel- bis langfristigen Untersuchungshorizont abstrahiert (makroskopisch) erfolgen. Ferner sind die Züge grob abzubilden.

Auf dieser Grundlage gilt es, auslastungsabhängig die Fahrplan- und Betriebsqualität sowie die Leistungsfähigkeit zu berechnen (Schritt 2). Die Beförderungszeiten sollen zur Sicherung der Konsistenz im Planungsprozess aus bestehenden Tools, insbesondere RUT/FAKTUS übernommen werden.

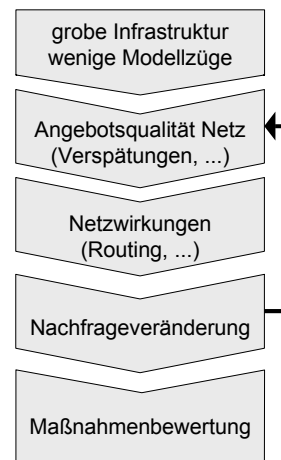


Abbildung 1: erforderliche Berechnungsschritte bei der netzweiten Infrastrukturplanung

Anhand der so berechneten Angebotsqualität des Eisenbahninfrastrukturunternehmens sind als nächste Schritte die Engpässe zu identifizieren, aufzulösen – z. B. anhand von Umleitungen – (Schritt 3) und die Nachfragereaktionen auf die Angebotsqualität und die Umleitungen zu ermitteln. Durch die Reaktion der Nachfrage (Schritt 4) verändern sich die Zugzahlen im Netz und dadurch die Auslastung der Netzelemente. Die veränderte Auslastung führt zu einer anderen Angebotsqualität (Schritt 2), die wiederum die Netzwirkungen und die Nachfrage beeinflusst. Dadurch entsteht eine Iterationsschleife, die durch die Konvergenz des Verfahrens zu einem Gleichgewicht führt. Die innerhalb der Iterationsschleife verwendeten Algorithmen müssen sich wegen ihres häufigen Aufrufs durch eine kurze Rechenzeit auszeichnen. Abschließend muss die Bewertung der simulierten Maßnahme z. B. aus verkehrlicher, volkswirtschaftlicher oder betriebswirtschaftlicher Sicht erfolgen (Schritt 5).

Die Fahrplan- und Betriebsqualität beeinflussen sowohl die Routenwahl als auch die Nachfragereaktion. Sie bestimmen unter anderem auf diese Weise die Kosten und Erlöse/Nutzen und haben daher wesentlichen Einfluss auf die Bewertung der Maßnahme. Die Fahrplan- und die Betriebsqualität bilden daher die Basis für das gesamte Tool-Paket.

Zur Einschätzung der Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen sowie zur sachgerechten Interpretation der Tool-Ergebnisse legt die Deutsche Bahn großen Wert auf den Aufbau von tool-bezogenem know-how. Die fachliche Federführung bei der Weiterentwicklung liegt daher bei der Deutschen Bahn, eine wissenschaftliche Begleitung erfolgt durch das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen und die Professur für Bahnverkehr, öffentlichen Stadt- und Regionalverkehr der TU Dresden.

3 Existierende eisenbahnbetriebswissenschaftliche Tools

In diesem Kapitel werden die am Markt verfügbaren eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Tools den in Kapitel 2 formulierten Anforderungen gegenübergestellt. Diese Tools lassen sich differenzieren nach solchen, die

- eine sehr detaillierte Modellierung von Netzelementen oder Teilnetzen und des Verkehrsablaufs auf der Basis einer mikroskopischen Infrastrukturabbildung ermöglichen (vgl. Kapitel 3.1) und solchen,
- die netzweite Untersuchungen auf der Grundlage einer makroskopischen Infrastrukturabbildung erlauben (vgl. Kapitel 3.2).

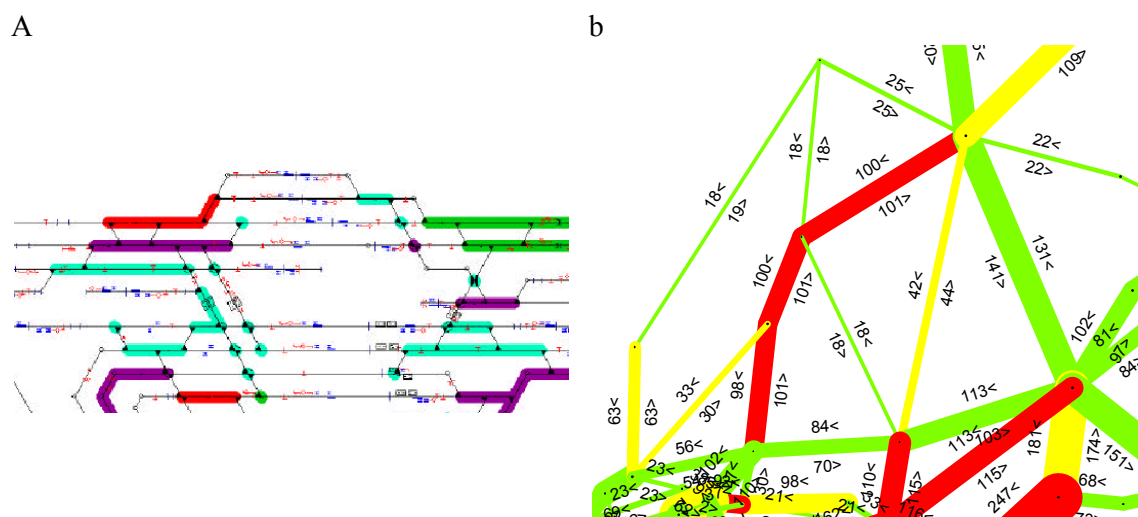


Abbildung 2: Mikroskopische (a) und makroskopische (b) Infrastrukturabbildung (Beispiele)

3.1 Tools für Netzelemente und Teilnetze

Die verwendete mikroskopische Infrastrukturabbildung enthält üblicherweise unter anderem die Signalstandorte, die Lage der Zugschlussstellen und Halteplätze. Auf dieser Basis werden Kenngrößen zur Beschreibung der Angebotsqualität des Eisenbahninfrastrukturunternehmens (Schritt 2 in Abbildung 1) ermittelt.

Hingegen lassen sich keine großräumigen Umleitungen als Maßnahme zur Engpassauflösung und keine Nachfragereaktionen auf Veränderungen der Beförderungszeit, der Fahrplan- oder der Betriebsqualität berechnen. Auch eine Bewertung auf monetärer Basis erfolgt nicht. Die hier beschriebenen Tools decken somit lediglich die ersten beiden der insgesamt erforderlichen fünf Berechnungsschritte (vgl. Abbildung 1) ab. Außerdem ist eine netzweite Simulation auf der Basis einer mikroskopischen Infrastrukturabbildung wegen der Komplexität, des Datenbank- und des Rechenaufwands nicht möglich. Folglich eignen sie sich nicht als Werkzeug für die netzweite mittel- und langfristige Infrastrukturplanung.

Für die Berechnung der Angebotsqualität (Schritt 2 in Abbildung 1) verwenden die sogenannten analytischen Tools (STRELE, ANKE, GLEISE etc.) jedoch Algorithmen, die die in Kapitel 2 formulierten Anforderungen nach Fahrplanunabhängigkeit und kurzer Rechenzeit erfüllen und sich somit für eine Nutzung in dem Tool-Paket für die Netzplanung eignen. Andere Tools (RailSys, SABINE, STRESI etc.) nutzen Simulationsalgorithmen, die aufgrund hoher Rechenzeiten nicht für die Netzplanung in Frage kommen.

3.2 Netztools

Die wenigen verfügbaren Netztools (NEMO, CAPRES, WiZug etc.) arbeiten mit Ausnahme von WiZug entweder auf der Basis eines einzigen Fahrplans, der für die unterstellte Infrastruktur optimiert ist, oder sie ermöglichen keine Berechnung der Fahrplan- und Betriebsqualität. Die Ermittlung der Angebotsqualität ist jedoch, wie in Kapitel 2 dargestellt, die Grundlage für die Berechnung der verkehrlichen, nachfrageseitigen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer Maßnahme und muss fahrplanunabhängig erfolgen.

Die Analyse der Funktionalitäten von WiZug [1, 3] ergab, dass dieses Tool wesentliche Anforderungen aus Kapitel 2 erfüllt und die Umsetzung der anderen Anforderungen ermöglicht. Die Deutsche Bahn hat sich deshalb gegen eine sehr aufwändige vollständige Neuentwicklung und für die Schaffung eines Tool-Pakets auf der Basis von WiZug entschlossen.

4 Algorithmen für das Werkzeug

In diesem Kapitel werden die Algorithmen für das zu schaffende Tool-Paket, die die Anforderungen aus Kapitel 2 erfüllen, vorgestellt. Die wesentlichen Veränderungen finden bei der Ermittlung der Angebotsqualität (Schritt 2 in Abbildung 1), die die Grundlage für alle weiteren Schritte ist, statt. WiZug, das ursprünglich als Umlegungsmodell konzipiert war, wird dadurch zu einem eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Tool weiterentwickelt.

Aus den bestehenden eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Tools sind – soweit möglich – Algorithmen für die Berechnung der Qualität zu übernehmen. Für einen wesentlichen Teil der zu lösenden Probleme – z. B. die Abbildung des Leistungsverhaltens in Knoten – existieren noch keine geeigneten Algorithmen, so dass Forschungsbedarf besteht. Im Folgenden werden die verwendeten Algorithmen beschrieben.

Gemäß der Anforderung (c) und (f) sind die Reisezeit, die Leistungsfähigkeit, die Fahrplan- und die Betriebsqualität für Strecken, Knoten und Zugbildungsanlagen zu berechnen. Die Beförderungszeit lässt sich wie erwähnt aus anderen Systemen, insbesondere RUT/FAKTUS, entnehmen. Die Leistungsfähigkeit ergibt sich unter Verwendung der Formel zur Berechnung der Betriebsqualität und einem zu Grunde gelegten Qualitätsmaßstab. Folglich sind die Fahrplan- und die Betriebsqualität für Strecken, Knoten und Zugbildungsanlagen fahrplanunabhängig (Anforderung (a)) und kompatibel zu den vorhandenen Tools zu ermitteln.

Die fahrplanunabhängige Berechnung erfolgt üblicherweise analytisch (vgl. Kapitel 3.1) mit Hilfe der Warteschlangentheorie. Die Warteschlangentheorie beschreibt das Verhalten von Forderungen an einem oder mehreren Bedienungskanälen, wobei das Zusammentreffen von Forderungen zu Stauerscheinungen (Wartezeiten) führen kann. In den am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelten Warteschlangenansätzen wird zur Berechnung der Wartezeiten die sog. Mindestzugfolgezeit z_{ij} als Parameter für die Bedienungszeit verwendet [6, 8]. Die Verwendung eines mindestzugfolgezeitenbasierten Warteschlangenansatzes birgt u. a. den Vorteil, dass bei Verwendung eines makroskopischen Modells mit Hilfe der Matrix der Mindestzugfolgezeiten sämtliche mikroskopischen Infrastrukturparameter "eindampft" wiedergegeben werden. Dies gilt insbesondere für den Streckenstandard, das Geschwindigkeitsband, das Neigungs- und Tunnelband, aber auch für das Signal-, das Zugsicherungs- und das Abstandhaltungssystem. Die Matrix der Mindestzugfolgezeiten kann mit Hilfe einiger weniger Eckdaten recht gut geschätzt werden.

Um das Warteschlangenmodell anzuwenden, werden Netzelemente oder Teile daraus als Bedienungssysteme beschrieben. Es lässt sich grundsätzlich zwischen ein- und mehrkanaligen Bedienungssystemen unterscheiden. Bei einkanaliger Bedienung können mehrere Elemente (Züge) nur nacheinander „abgefertigt“ werden, bei mehrkanaliger Bedienung ist die Behandlung mehrerer Elemente gleichzeitig möglich. Die analytischen Algorithmen zeichnen sich durch eine kurze Rechenzeit (Anforderung (j)) aus. Soweit vorhanden, werden Algorithmen aus den Tools für Netzelemente und Teilnetze (Anforderung (i)) verwendet.

Strecken

Ein- und zweigleisige Strecken lassen sich als einkanalige Bedienungssysteme modellieren, da immer nur ein Zug (je Richtung) in die Strecke einfahren kann. Im Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit, die angestrebte Rechenzeit und die übliche Streuung im Forderungsstrom lassen sich für die Berechnung der Fahrplan-/ der Betriebsqualität die bekannten Formeln von Wakob/Schwanhäußer [5, 7] nutzen.

Knoten

Bei Knoten ist eine Trennung nach Gleisgruppe und Fahrstraßenknoten erforderlich. Die Gleisgruppe als mehrkanaliges Bedienungssystem lässt sich mit dem Algorithmus von Hertel [2] abbilden.

Fahrstraßenknoten können als Konglomerat einkanaliger Bedienungssysteme modelliert werden. Für die Berechnung der einzelnen Bedienungssysteme, der sogenannten Teilfahrstraßenknoten, lassen sich z. B. die gleichen Algorithmen wie für Strecken verwenden. Zur Ermittlung der Angebotsqualität im Fahrstraßenknoten insgesamt wäre eine Zusammenfassung der einzelnen Bedienungssysteme unter besonderer Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten (Verkettung) erforderlich. Zur Ermittlung des Verkettungsgrades existiert bisher lediglich eine grobe Abschätzung nach Schwanhäüßer/Potthoff [4, 6]. Da der Einfluss der Knoten auf die Leistungsfähigkeit des Netzes hoch ist und die Verkettung auch für die Modellierung aufeinanderfolgender Strecken eine große Rolle spielt, ist die zuverlässige Abbildung der Verkettung für die Netzmodellierung von großer Relevanz. Am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen wird daher im Auftrag der Deutschen Bahn AG ein entsprechendes Forschungs- und Entwicklungsprojekt durchgeführt.

Zugbildungsanlagen

Sowohl Rangierbahnhöfe als auch die schienenseitige Anbindung von KV-Terminals lassen sich in mehrkanalige und dazwischen liegende einkanalige Bedienungssysteme untergliedern. Als mehrkanalige Systeme werden Einfahr-, Richtungs-, Ausfahrgruppen und die Ladegleise in KV-Terminals wie Gleisgruppen in Knoten abgebildet. Insbesondere der Ablaufberg lässt sich (außer bei Doppelablauf) als einkanaliges Bedienungssystem beschreiben.

Anhand der auf diese Weise berechneten Angebotsqualitäten für Strecken, Knoten und Zugbildungsanlagen sind die Netzwirkungen zu ermitteln (Anforderung (d)), die Engpässe zu identifizieren und aufzulösen (Anforderung (e)) sowie daraus die Nachfragereaktionen (Anforderung (g)) auslastungsabhängig zu bestimmen. Das bestehende WiZug enthält diese Berechnungsschritte weitgehend und anforderungskonform, so dass nur zu einzelnen Problemen Forschungsbedarf besteht.

Gemäß Anforderung (b) muss die Bewertung von Maßnahmen unterschiedlichster Art anhand eines einheitlichen Maßstabs erfolgen. Dieser Maßstab, der verkehrlicher, volkswirtschaftlicher oder betriebswirtschaftlicher Art sein kann (Anforderung (h)), wird im Berechnungsschritt 5 ermittelt. Dafür steht in MOSES das Tool „FlexiBel“ zur Verfügung, in dem lediglich die gewünschte Methode zu implementieren ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das in Entwicklung befindliche Tool-Paket ermöglicht die Berechnung der Fahrplan- und der Betriebsqualität konsistent zu den für die kurz- und mittelfristige Bemessung von Netzelementen verwendeten Tools. Durch die Abbildung von Strecken, Knoten und Zugbildungsanlagen lassen sich die gegenseitigen Abhängigkeiten modellieren und alle Netzelemente integriert dimensionieren.

Die Betrachtung ganzer Netze ermöglicht zudem die Ermittlung der Netzwirkungen von Maßnahmen. Durch die Bestimmung der Nachfragereaktion werden die Wirkungen von Qualitätsverbesserungen auch auf die Erlöse bestimmt und so eine umfassende Maßnahmenbewertung möglich. Aufgrund der Verwendung nur *eines* Bewertungsmaßstabs und mehrerer Kenngrößen zur Beschreibung der Angebotsqualität erfolgt eine einheitliche und konsistente Bewertung unterschiedlichster Maßnahmen.

6 Literatur

- [1] BUTZ, B.: Angebotsoptimierung mit MOSES. – In: Der Nahverkehr 5/2002, 54-58.
- [2] FISCHER, K.; HERTEL, G.: Bedienungsprozesse im Transportwesen. – Transpress Berlin (1990).
- [3] GRESSER, K.; KONANZ, W.; HONERLA, L.: Optimierung des Streckennetzes der Deutschen Bundesbahn, Teil 1.3 Ableitung der Belastungs-Fahrzeit-Funktion. – Untersuchungsbericht zum Forschungsvorhaben FE 60163/87 des BMV, Freiburg (1988).
- [4] POTTHOFF, G.: Verkehrsströmungslehre, Bd. 1: Zugfolge auf Strecken und Bahnhöfen – Transpress Berlin (1962).
- [5] SCHWANHÄÜBER, W.: Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn. – Veröffentlichungen des Verkehrswiss. Instituts der RWTH Aachen, Heft 20 (1974).
- [6] SCHWANHÄÜBER, W.: Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes. – In: AET 33 (1978), 7–18.
- [7] WAKOB, H.: Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte der Leistungsfähigkeit und der Anlagenbelastung. – Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 36 (1985).
- [8] WENDLER, E.: Analytische Berechnung der planmäßigen Wartezeiten bei asynchroner Fahrplankonstruktion. – Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 55 (1999).