Innovative Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft

Der Eisenbahnbetriebswissenschaft kommt eine bedeutende Rolle zu, um eine effiziente, pünktliche Betriebsabwicklung zu gewährleisten und eine vorausschauende Kapazitätsplanung zu ermöglichen. Dazu werden bisherige Verfahren und innovative Ansätze weiterentwickelt.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Universitätsprofessor am Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Leiter des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen (VIA)
niessen@via.rwth-aachen.de

1. Einleitung

Die Eisenbahn stellt als spurgeführtes System besondere Herausforderungen an die Betriebsabwicklung. Der Betrieb wird im Vorfeld in Form eines Fahrplans geplant. Im Rahmen dieser Fahrplanung werden mögliche Konflikte zwischen einzelnen Trassenwünschen detektiert und gelöst. Das Eisenbahnnetz weist jedoch Strecken und zunehmend auch Knoten auf, die so stark nachgefragt werden, dass unter Umständen nicht alle nachgefragten Zugfahrten realisiert werden können. Zur Beseitigung derartiger Engpässe des Netzes sind neben betrieblichen Maßnahmen oftmals langfristige Ausbau- oder Neubaumaßnahmen notwendig.

Der Eisenbahnbetriebswissenschaft kommt eine bedeutende Rolle zu, um robuste Fahrpläne zu erstellen, einen möglichst pünktlichen Betrieb zu gewährleisten und eine vorausschauende Kapazitätsplanung zu ermöglichen. Die unterschiedlichen Methoden der Eisenbahnbetriebswissenschaft erstrecken sich somit über die gesamte Wertschöpfungskette der Eisenbahn – von der langfristigen Netz- und Kapazitätsplanung über die mittelfristige Fahrplanerstellung bis hin zur kurzfristigen Betriebsabwicklung.

Im Rahmen der Kapazitätsplanung wird beispielsweise aufgezeigt, ob Netzbereiche aufgrund der prognostizierten Verkehrsbelastung auszubauen oder zu ertüchtigen sind. Neben derartigen Kapazitätsengpässen lassen sich gleichzeitig auch Kapazitätsreserven detektieren, welche dann zielführend genutzt werden können. Des Weiteren lassen sich mit Hilfe der Methoden der Eisenbahnbetriebswissenschaft verschiedene Ausbauszenarien auf ihre betriebliche Wirkung und ihren Nutzen hin untersuchen, um die geeignetste Ausbauvariante zu finden.

Die Erstellung des Netzfahrplans erfolgt mit einem Vorlauf von etwa einem Jahr und ist der mittelfristigen Planung zuzuordnen. Die Fahrplanerstellung erfolgt unter Anwendung unterstützender Software-Werkzeuge, mit Hilfe derer die Fahr- und Belegungszeiten der Zugfahrten berechnet werden. Den eigentlichen Konstruktionsprozess und die Sicherstellung eines konfliktfreien Fahrplans übernimmt heutzutage ein Bearbeiter, der sogenannte Fahrplankonstrukteur. Ein gut konstruierter Fahrplan mit entsprechend dimensionierten und allokierten Reservezeiten stellt dabei eine notwendige Voraussetzung für eine stabile Betriebsabwicklung dar.

Die Überwachung und Steuerung der Betriebsabwicklung obliegt dem Disponenten. Betriebliche Konflikte zwischen zwei Zugfahrten treten auf, wenn absehbar ist, dass diese zeitgleich den identischen Infrastrukturbereich belegen oder vorgesehene Anschlüsse nicht erreicht werden. Spezielle Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft unterstützen den Disponenten bei der Erkennung solcher Konflikte und unterbreiten diesem gegebenenfalls Vorschläge für mögliche Konfliktlösungen. Die Disposition erfolgt dabei ad hoc und ist somit dem kurzfristigen Planungshorizont der Eisenbahnbetriebswissenschaft zuzuordnen.

2. Herausforderungen an das System Bahn

In den letzten Jahren hat die Bedeutung des Systems Bahn deutlich zugenommen. Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele ist sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr ein signifikanter Modal Shift vom Straßen- zum Schienenverkehr vorgesehen. So sieht die Bundesregierung bis 2030 für den Schienenpersonenverkehr eine Verdopplung der Fahrgastzahlen und für den Schienengüterverkehr einen Anstieg auf einen Modal Split-Anteil von 25 % vor [1]. Die politischen Bestrebungen lassen sich unter anderem auch an gestiegenen finanziellen Mitteln (beispielsweise LuFV, GVFG) festmachen. Wenngleich die Fahrgastzahlen aufgrund der Covid-19-Pandemie deutlich zurückgegangen sind, wird für die nächsten Jahre von einem verstärkten Wachstum ausgegangen. Im Masterplan Schienenverkehr des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur werden als maßgebliche Handlungsfelder die Sicherstellung eines pünktlichen Betriebs und die Schaffung von neuen Kapazitäten aufgeführt. Hierbei kommt der Eisenbahnbetriebswissenschaft eine bedeutsame Rolle zu.

Die Eisenbahnbetriebswissenschaft weist eine lange Historie auf und hat sich über die Zeit stetig weiterentwickelt.

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

Wurden die entwickelten Verfahren und Berechnungen zunächst händisch ausgeführt, so konnten ab den 90er-Jahren durch den Einzug der Computertechnik neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Unter den aktuellen Schlagworten „Digitalisierung", „BigData" und „Künstliche Intelligenz" erfolgt sowohl die Entwicklung innovativer, neuer Ansätze als auch die Weiterentwicklung bestehender Verfahren. Diese Entwicklungen in der Eisenbahnbetriebswissenschaft unterstützen bei der Bewältigung des angestrebten Wachstums und den Herausforderungen an das System Bahn. Im Folgenden werden exemplarische Anwendungsfelder und Verfahren für die lang-, mittel- sowie kurzfristige Planung aufgezeigt.

1: Ausschnitt Netzkarte einer deutschlandweiten Kapazitätsberechnung

3. Langfristige Kapazitätsberechnung zur Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur

Zur Dimensionierung der Eisenbahninfrastruktur kommen sowohl Simulationsverfahren als auch analytische Verfahren der Warteschlangentheorie zum Einsatz. Während sich Simulationen insbesondere für Fahrplanrobustheitsprüfungen eignen, kommt die Analytik im Rahmen von Fahrwegkapazitätsbetrachtungen zum Einsatz. Simulationen benötigen als Grundlage einen (prognostizierten) Fahrplan, in welchem die betrieblichen Rahmenbedingungen abgebildet sind. Als Resultat stellen sich insbesondere die Verspätungen bzw. Pünktlichkeitswerte der untersuchten Zugfahrten ein. Aufgrund der fortschreitenden Rechentechnik sind heute bereits Simulationen von großen Teilnetzen möglich [2].

Analytische Verfahren können sowohl für Strecken als auch für Knoten eingesetzt werden und zeichnen sich durch kurze Rechenzeiten aus. Eingangsgrößen stellen die sogenannten Mindestzugfolgezeiten – kürzeste Zeitspanne, in welcher sich zwei Zugfahrten auf einem Überholungsabschnitt behinderungsfrei folgen können – sowie das geplante Betriebsprogramm dar. Als Ergebnis wird die Leistungsfähigkeit des betrachteten Infrastrukturbereichs als zulässige Zuganzahl bei vorgegebener Qualität ausgegeben. Zur Bewertung der prognostizierten Betriebsqualität werden gemäß derzeitigem Stand der Technik die resultierenden Wartezeiten herangezogen [3].

Während analytische eisenbahnbetriebliche Untersuchungen in der Vergangenheit händisch von den Bearbeitern durchgeführt wurden, steht heutzutage ein industrielles Vorgehen zur deutschlandweiten Berechnung bei der DB Netz AG zur Verfügung [4]. So werden die benötigten Eingangsdaten wie Infrastruktur und Zugfahrten automatisiert über Schnittstellen in das Programm LUKS-N eingelesen und dort plausibilisiert sowie aufbereitet. Anschließend erfolgt „über Nacht" eine deutschlandweite Kapazitätsberechnung aller Strecken. Als Ergebnisse werden die vorhandenen Kapazitäten und nach einem Abgleich mit der prognostizierten Belastung auch überlastete Bereiche und Restkapazitäten ermittelt. Die Ergebnisse können, wie in Bild 1 dargestellt, grafisch aufbereitet und anhand von Netzkarten visualisiert werden.

4. Mittelfristige Fahrplanung

Das Ziel der Fahrplanerstellung ist ein hochwertiger, konfliktfreier Fahrplan mit ausreichenden Puffer- und Reservezeiten, die auch bei aufkommenden Verspätungen einen robusten Betriebsablauf ermöglichen. Es zeigt sich, dass bei hochbelasteten Strecken das alleinige Einhalten der nach Richtlinie 402 [5] definierten Konstruktionsregeln und Mindestpufferzeiten nicht immer ausreichend ist, da die Anzahl der auf diese Weise planbaren Zugfahrten die vorhandene Leistungsfähigkeit übersteigt. Hier werden zukünftig fahrplanscharfe analytische Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft helfen, die zulässige Zuganzahl bereits im Prozess der Fahrplanerstellung so zu limitieren, dass sich später eine marktgerechte Qualität einstellen wird [6]. Darüber hinaus kann mit Hilfe der Eisenbahnbetriebswissenschaft die optimale Allokation von Fahr- und Haltezeitzuschlägen ermittelt werden [7].

Die Einführung des Deutschland-Taktes hat unmittelbare Auswirkungen auf den Prozess der Fahrplanerstellung, da nahezu das gesamte Personenverkehrsangebot vertaktet ist. Auch Güterzüge sollen in Form von sogenannten Systemtrassen in den Takt eingebunden werden. Dazu werden die unterschiedlichen Güterzüge geclustert und systematisiert. Im Rahmen des Projekts „Digitale Kapazitätssteigerung" der DB Netz AG wird der Fahrplanerstellungsprozess automatisiert und an den Systemtrassen ausgerichtet [8]. Es wurden hierfür Algorithmen entwickelt, die neben dem vorgegebenen Grundgerüst für den Personenverkehr die entsprechenden Systemtrassen für den Güterverkehr erstellen. Hierdurch soll die Kapazität besser ausgenutzt werden, die mittlere Beförderungs-

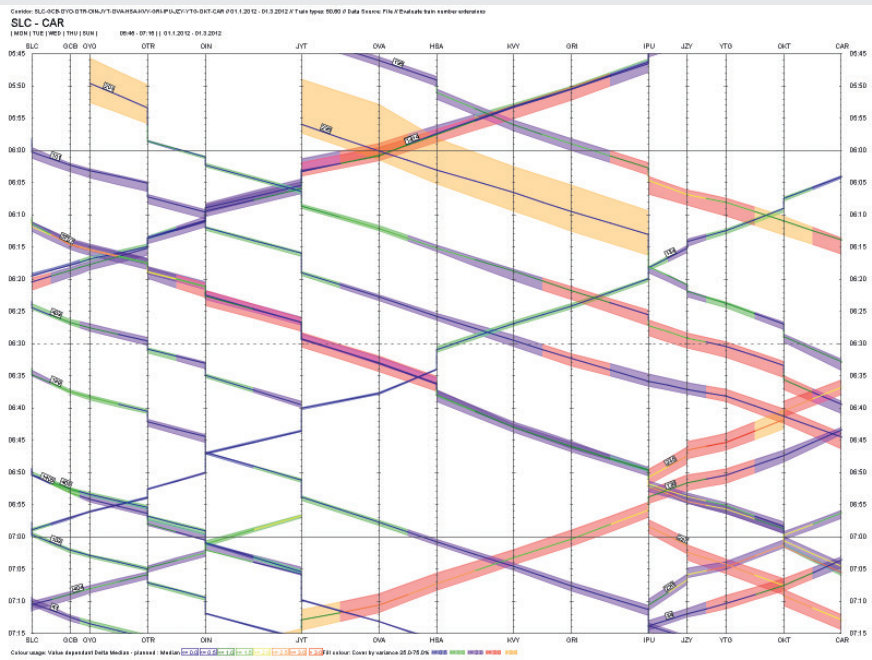
Für einen pünktlichen Bahnbetrieb ist eine effiziente Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung elementare Grundvoraussetzung.

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

2: Click&Ride-App der DB Netz AG Quelle: Deutsche Bahn AG

zeit der Güterzüge sinken und der Bearbeitungsaufwand reduziert werden.

Bereits seit 2019 können unterjährige Trassen des Schienengüterverkehrs über die App Click&Ride bei der DB Netz AG gebucht werden (Bild 2), [9]. Die fortschreitende Digitalisierung und die entwickelten innovativen Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft erlauben es, Güterverkehrskunden ein kurzfristiges Angebot vollautomatisiert zu unterbreiten. Der Anwender stellt seine Anfrage, welche Start- und Zielbahnhof sowie wesentliche Eigenschaften der Zugfahrt enthält, und erhält innerhalb weniger Minuten ein Trassenangebot inkl. des anfallenden Trassenentgelts, welches er annehmen oder ablehnen kann. Da im Güterverkehr eine Vielzahl von Trassenanmeldungen unterjährig erfolgt, vereinfacht die Click&Ride-App das Verfahren wesentlich für alle Beteiligten.



3: Grafischer Fahrplan aus OpenTimeTable (OTT)

5. Kurzfristige Betriebsabwicklung

In der täglichen Betriebsabwicklung treten aufgrund vielfältiger Ereignisse Abweichungen vom Sollfahrplan auf. Die Aufgabe der Disposition ist die schnellstmögliche Wiederherstellung des geplanten Zustands sowie die Aufrechterhaltung eines flüssigen Betriebs. Hierzu können beispielsweise Reihenfolgewechsel oder eine abweichende Gleiszuordnung der Züge durchgeführt werden. Während diese Entscheidungen heutzutage durch den Disponenten auf Basis seiner Erfahrungen getroffen werden, werden zukünftig automatisierte Algorithmen die Dispositionsentscheidungen übernehmen und automatisch umsetzen [10]. Bei der Entscheidungsfindung sind kurze Rechenzeiten von wenigen Sekunden notwendig, da der Betrieb in der Zwischenzeit weiter voranschreitet. Die heutige Rechentechnik ist in der Lage, das hierzu erforderliche Antwortzeitverhalten bereitzustellen. Ein wesentlicher Vorteil der computergestützten Disposition liegt in der ganzheitlichen Betrachtung der aktuellen Betriebslage. Während der Disponent in der Regel nur die beiden bei der Konfliktlösung involvierten Zugfahrten betrachtet, kann ein Algorithmus sämtliche im Untersuchungsbereich verkehrenden Zugfahrten auswerten. Anhand einer Zielfunktion, die beispielsweise eine Minimierung der Verspätungsminuten gewichtet nach Zugart vornimmt, wird ein globales Optimum gefunden. Somit ergibt sich hierdurch ein wesentlicher Stellhebel für einen pünktlicheren Eisenbahnbetrieb mit geringeren Folgeverspätungen.

Ergänzend können im Rahmen der Disposition auch Fahrempfehlungen für eine energiesparende Fahrweise gegeben werden [11]. Diese Empfehlungen kommen heute schon zur Anwendung und werden dem Triebfahrzeugführer beispielsweise über mobile Endgeräte angezeigt [12]. Werden Züge zukünftig automatisiert und ggf. ohne Triebfahrzeugführer gesteuert, lassen sich die energiesparenden Geschwindigkeitsprofile unmittelbar abfahren.

Im Rahmen der Betriebsabwicklung fallen jeden Tag Prozessdaten an, welche die geplanten und tatsächlichen Ankunfts-,

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

Abfahrts- und Durchfahrtszeiten von Zugfahrten enthalten. Bereits seit vielen Jahren werden diese Daten bei Eisenbahninfrastrukturunternehmen insbesondere zur Pünktlichkeitsauswertung herangezogen. Auch hier ermöglicht die zunehmende Digitalisierung eine kontinuierliche Aufbereitung und Analyse der realen Betriebsdaten und somit ein breiteres Anwendungsspektrum.

Mit der Software OpenTimeTable lassen sich beispielsweise vorhandene Betriebsdaten für ausgewählte Strecken oder Knoten und unterschiedliche Betrachtungszeiträume auswerten und grafisch aufbereiten (Bild 3), [13]. Auf diese Weise gelingt es dem Bearbeiter, Engpässe, Verspätungsursachen und Planungsfehler zu detektieren und darauf aufbauend geeignete Maßnahmen zu deren Behebung abzuleiten.

Ein aktuelles Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit der automatischen Identifikation netzweiter Kapazitätsengpässe. Hierzu erfolgt eine umfangreiche Analyse und Auswertung realer Betriebsprozessdaten vergangener Fahrplanperioden. Ziel ist dabei u. a. mit Hilfe einer Musterkennung systematische, statistisch erfassbare Wechselwirkungen zu erkennen, um kritische Bereiche und Engpässe des Netzes zu detektieren. Zukünftig soll es dann möglich sein, automatisiert Schwachstellen bei der Betriebsabwicklung, die einerseits durch eine unzureichende Infrastruktur und andererseits durch einen schlecht konstruierten Fahrplan begründet sein können, zu bestimmen und geeignete Maßnahmen zu deren Behebung einzuleiten.

6. Fazit

Eine verbesserte Rechenleistung und die mit einer zunehmenden Digitalisierung einhergehenden Möglichkeiten zur Analyse großer Datenmengen ermöglichen innovative Ansätze im Bereich der Eisenbahnbetriebswissenschaft. Neben Verkehrsingenieuren ist eine Vielzahl weiterer Fachdisziplinen, insbesondere aus den Bereichen der Mathematik und Informatik, bei der Entwicklung und Anwendung neuer Algorithmen involviert.

Die Eisenbahnbetriebswissenschaft stellt einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der verkehrsspezifischen Klimaziele und der angestrebten Verkehrswende dar. Mit ihrer Hilfe lassen sich netzweit Kapazitäten ermitteln und Engpässe detektieren. Für einen pünktlichen Bahnbetrieb ist eine effiziente Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung elementare Grundvoraussetzung. Eisenbahnbetriebliche Anwendungen werden immer mehr an Bedeutung und Gewicht gewinnen. ●

Literatur

[1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Masterplan Schienenverkehr. Juni 2020.
[2] Radtke, A.: Infrastructure Modelling. In: I. A. Hansen, J. Pachl. (Hrsg.): Railway timetabling & operations, 2. Auflage 2014. Eurailpress, Hamburg
[3] DB Netz AG: Richtlinie Fahrwegkapazität. Ril 405, 2009.
[4] Pfeifer, A., Kogel, B., Nießen, N., Kurby, S., Steinborn, U.: Zielgerichtete Infrastrukturdimensionierung durch eine netzweite Ermittlung der Kapazität. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 10, 2018
[5] DB Netz AG: Richtlinie Trassenmanagement. Ril 402, 2009.
[6] Gast, I, Steinborn, U.: Vermarktungskapazität – wie viel Qualität verträgt der Markt? In: Deine Bahn Heft 8, 2018
[7] Weiß, R., Nachtigall, K., Martin, U., Oetting, A.: Bewertung einer effizienten marktgeeigneten Trassenbelegung im spurgeführten Verkehr. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau Heft 1+2, 2018
[8] Pöhle, D.: Digitalisierung Fahrplan im „neXt Lab". ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 4, 2018
[9] Pöhle, D.: Stand und Ausblick zur Digitalisierung im Fahrplan und Kapazitätsmanagement. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau Heft 10, 2020
[10] Weymann, F, Nießen, N.: Verbesserung der Disposition des Eisenbahnbetriebs durch innovative Optimierungsverfahren. ZEV Rail Heft 3, 2015
[11] Graffagnino, T., Schäfer, R., Tuchschmid, M., Weibel, M.: Energy Savings with Enhanced Static Timetable Information for Train Drivers. In: Proceedings 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping (Schweden), 2019.
[12] Stoll, F., Nießen, N., Nelles, J., Brandl, C.: Digitale Technologien zur Unterstützung von Triebfahrzeugführern. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 10, 2019
[13] Graffagnino, T.: Ensuring timetable stability with train traffic data. In: Computers in Railways XIII, 2012

Summary

Innovative methods in railway management science

Innovative methods in railway management science are an important control lever for capacity increases and punctual operation. Thus, railway management science plays an essential role in achieving the transport targets and the envisaged transport turnaround. Using these methods, bottlenecks can be detected nationwide, robust and efficient timetables can be established and delays in the operational process can be minimized.

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