

Nutzenbewertung von TMS / ATO und weiterer Innovationen mittels Simulationsverfahren

Innovationsprogramme europäischer Eisenbahnen streben die Einführung von (teil-) automatischem Betrieb und einer stärker automatisierten Disposition an. Um diese Digitalisierungsmittel möglichst zielgerichtet einzusetzen, ist eine Nutzenbewertung im Vorfeld notwendig. Hierzu eignen sich insbesondere vergleichende Simulationsverfahren.



1. Einleitung

Unter dem Oberbegriff der „Digitalisierung“ werden die Innovation und Erneuerung/Einführung der Systemkomponenten Stellwerke nebst Feldelementen, der Zugsicherung, der Telekommunikationsanlagen, des teilautomatischen Betriebs (ATO, Automatic Train Operation) sowie der Disposition durch Traffic Management System (TMS) zusammengefasst. Bild 1 skizziert fünf Architekturen, welche in Betrieb, im Roll-out oder Zielbild von Innovationsprogrammen europäischer Eisenbahnen sind. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Innovation die Rolle des TMS wesentlicher wird.

Aus dem Gesamtpaket erwartet werden eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit, eine Verbesserung der Interoperabilität, eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und Energieeffizienz, eine Senkung der Betriebskosten durch Reduktion der Feldelemente und die Gewährleistung der Demografiefestigkeit. Zunehmend setzt sich die Erkenntnis durch, dass Digitalisierung nicht als Einführung isolierter Technologien verstanden werden darf, sondern im hochkomplexen System Bahn komponentenübergreifend umgesetzt werden muss, um angestrebte Verbesserungen zu erreichen [1].

Um Mittel möglichst zielgerichtet einzusetzen, ist eine Nutzenbewertung im Vorfeld notwendig. Zwei (zusammenhän-



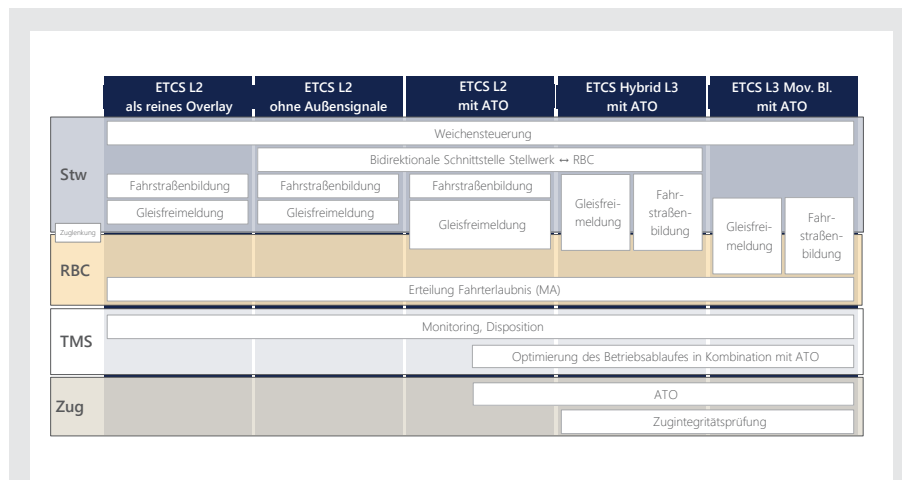
Dr. rer. nat. Frederic Weymann
IT-Architekt bei VIA Consulting & Development GmbH, Aachen
f.weymann@via-con.de



M.Sc. Eike Hennig
Senior-Ingenieur bei quattron management Consulting GmbH
VIA Consulting & Development GmbH, Aachen
Eike.hennig@quattron.com



Dr.-Ing. Thorsten Bükler
Geschäftsführer bei quattron management Consulting GmbH
VIA Consulting & Development GmbH, Aachen
Thorsten.bueker@quattron.com



1: Architekturen in Betrieb, im Roll-out oder im Zielbild von Innovationsprogrammen europäischer Eisenbahnen

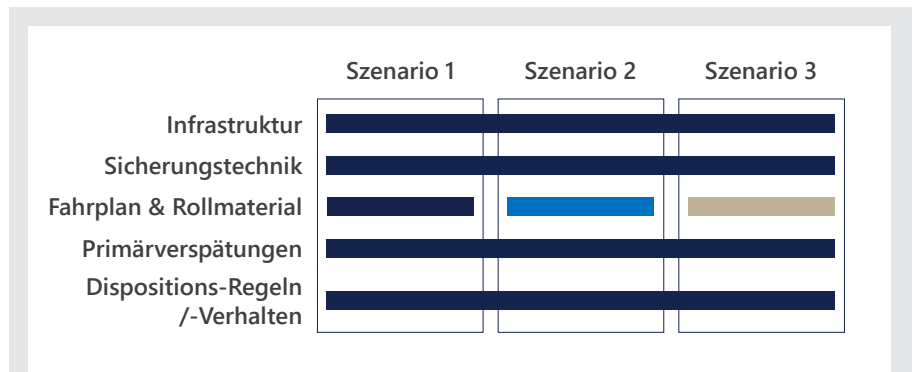
gende) Dimensionen des Nutzens sind die Leistungsfähigkeit der Bahnanlage sowie Betriebsqualität. In der Vergangenheit waren die betrieblichen Effekte, welche sich aus veränderter Blockteilung im Wechselspiel mit Führerraumsignalisierung (z. B. ETCS) ergeben, Gegenstand zahlreicher Studien. Zunehmend wurden dabei auch Nutzenbeiträge durch ATO bewertet, wengleich ATO dabei „nur“ zu einer Verkürzung der Vorbelegung sowie einer ggf. strafferen Fahrdynamik genutzt wurde.

Zum Nutzenbeitrag eines TMS liegen bislang nur wenige Kenntnisse vor [2, 3]. Zur Unterstützung der Innovationsprogramme besteht also die Notwendigkeit, Verfahren zur Quantifizierung der betrieblichen Effekte aus einem TMS, ggf. gekoppelt an die Nutzung von ATO, bereitzustellen.

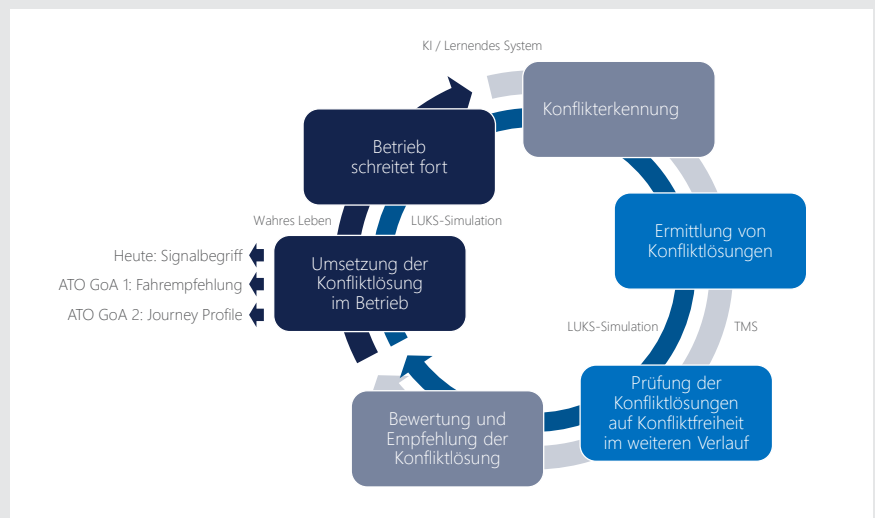
2. Technologiebewertung mit simulativen Verfahren

Betriebssimulationen sind ein gängiges Mittel, um das zu erwartende Zusammenspiel von Infrastruktur (inklusive Leit- und Sicherungstechnik), Fahrplan und Störungen zu bewerten und Aussagen zur Betriebsqualität abzuleiten. In der Regel werden hierfür vergleichende Simulationen durchgeführt, die sich jeweils durch die Veränderung eines Parameters unterscheiden. In der Vergangenheit wurden so beispielweise verschiedene Fahrplanvarianten miteinander verglichen, wie Bild 2 verdeutlicht.

Neben der Bewertung von Fahrplan- oder Infrastrukturvarianten können Betriebssimulationen auch genutzt werden, um den Nutzen der Einführung neuer Technologien zu bewerten. Soll z.B. der Effekt einer ETCS-Umsetzung bewertet werden, sind mindestens zwei Szenarien zu bilden. Ein Szenario stellt den Referenzfall (heutiges Zugsicherungssystem) dar, während das zweite Szenario die ETCS-Zielimplementierung darstellt. Weitere Szenarien mit anderen ETCS-Systemeigenschaften (unterschiedliche Systemzeiten oder Wegmessfehler, Blockteilungen etc.) können zusätzlich gebildet werden. Damit die resultierenden Effekte eindeutig zuzuordnen sind, sollten die übrigen Eingangsdaten (Fahrplan, Infrastrukturtopologie, Störungen etc.) möglichst identisch bleiben. Zur Bestimmung der Effekte werden darauf aufbauend Mehrfachsimulationen mit unterschiedlichen Störungen (Monte-Carlo-Ansatz) für alle Szenarien durchgeführt.



2: Beispiel von Simulationsszenarien zum Vergleich dreier unterschiedlicher Fahrplanvarianten



3: Realer Betriebsablauf mit TMS und modellhafte Abbildung in der LUKS-Simulation

Durch Auswertung der Mehrfachsimulationen können Kennzahlen (z.B. mittlere Folgeverspätungen) für alle Szenarien ermittelt werden. Bei der Auswertung der Simulationsläufe ist auf eine korrekte Aggregation und Schnittmengenbildung der Simulationsläufe zu achten [4]. Diese Vorgehensweise beugt der falschen Deutung der Ergebnisse vor. Durch eine geschickte Anpassung der jeweiligen Eingangsparameter lassen sich durch simulative Verfahren viele verschiedene Technologien bewerten. So könnten z. B. die kapazitiven Einflüsse der Digitalen automatischen Kupplung (DAK) untersucht werden, indem in einem Szenario viele Güterzüge in Bremsstellung P und mit verringerter Bremsaufbauzeit fahren. In tiefergehenden Analysen wäre es z.B. möglich, zusätzlich die Reduktion der

Mindesthaltezeit durch ein gleichzeitiges Befüllen der Bremszylinder über die gesamte Zuglänge abzubilden.

3. Genutztes Simulationsverfahren

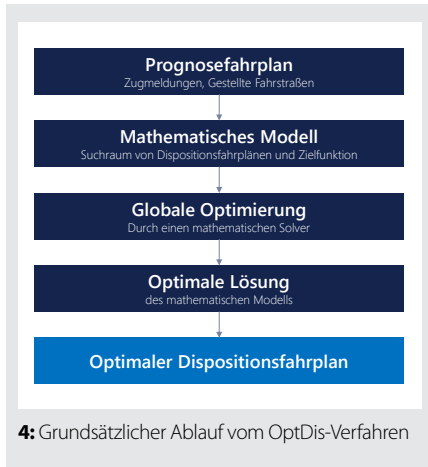
Zur Quantifizierung der Effekte eines TMS wird ein bestehendes Simulationsverfahren angepasst. Ausgangssituation und Zielbild werden nachstehend beschrieben.

3.1. Disposition mittels TMS

Nach Einführung eines modernen TMS erfolgt die Disposition im Grundsatz entsprechend dem in Bild 3 gezeigten Zyklus [5]. Anhand von Statusmeldungen aus Zuglaufmeldung und (idealerweise) Fahrzeug wird eine Prognose für einen definierten Zeithorizont erstellt und nach dispositiv zu lösenden Konflikten durchsucht. Diese können unter anderem Belegungs- und Anschlusskonflikte sein. Für erkannte Konflikte werden von einem Konfliktlösungsalgorithmus mög-

Betriebssimulationen sind ein gängiges Mittel, um das zu erwartende Zusammenspiel von Infrastruktur (inklusive Leit- und Sicherungstechnik), Fahrplan und Störungen zu bewerten und Aussagen zur Betriebsqualität abzuleiten.





liche Maßnahmen ermittelt, validiert und wird ihre zukünftige Wirkung auf den weiteren Betriebsverlauf geprüft.

Auf Basis der ermittelten Angaben werden die Konfliktlösungen bewertet und je nach Automatisierungsgrad entweder einem menschlichen Disponenten vorgeschlagen, oder es wird die bestbewertete Lösung direkt umgesetzt. Auch bei der Umsetzung spielt der Automatisierungsgrad eine entscheidende Rolle. In der gegenwärtigen Situation können dispositive Entscheidungen bezüglich des Geschwindigkeitsprofils hauptsächlich per Signalbegriffe oder fernmündlich an die Triebfahrzeugführer übermittelt werden, was einen dispositiven Einsatz stark einschränkt. In einem GoA 1-System (Grade of Automation, GoA) können Entscheidungen zumindest in Form von Fahrempfehlung übertragen werden. Ab GoA 2 sind Fahrzeuge in der Lage, detaillierte Entscheidungen z.B. in Form von dynamischen Journey Profiles zu empfangen, diese in Geschwindigkeitsprofile zu konvertieren und abzufahren.

Der Betrieb schreitet unter den angepassten Rahmenbedingungen fort, bis erneut Konflikte erkannt werden, wodurch sich der Kreis schließt. Beim Einsatz von KI- oder anderen lernenden Systemen können die getroffenen Lösungen nachträglich anhand der tatsächlich erreichten Betriebsqualität bewertet werden und kann damit die Lösungsfindung iterativ verbessert werden.

3.2. Simulation in LUKS

Die LUKS-Simulation (Leistungs-Untersuchungen Knoten und Strecken, LUKS) bildet seit jeher durch eine enge Koppelung von einem zeitsynchronen Umgebungssimulator und einer vorausschauenden Konfliktlösung die Betriebsituationen mit einem automatisierten TMS ab, wie aus Bild 3 ersichtlich [6].

Das Umgebungsmodul stellt den Teil des Eisenbahnbetriebs außerhalb des TMS dar: Zugfahrten verkehren zeitgleich entsprechend einer Modelluhr durch das virtuelle Eisenbahnnetz, virtuelle Leit- und Sicherungssysteme überwachen die Züge und erzwingen bei ungelösten Belegungskonflikten außerplanmäßige Bremsvorgänge. Externe Störungen wie verspätete Ankünfte im Simulationsraum, ungeplante Haltverlängerungen oder Anlagenausfälle können eingespielt werden und führen dadurch zu einem Dispositionsbedarf.

Das Konfliktlösungsmodul überwacht die aktuellen Betriebsituationen kontinuierlich und startet bei Konflikten in einem frei definierbaren Zeithorizont die Suche nach Konfliktlösungen und deren Umsetzung. Hier stehen zwei grundsätzliche Strategien zur Verfügung: Im Zwei-Zug-Modell werden lokal optimale Lösungen mit Änderungen an den betroffenen Zugfahrten betrachtet. Der innovative OptDis-Ansatz verwendet dagegen mathematische Opti-

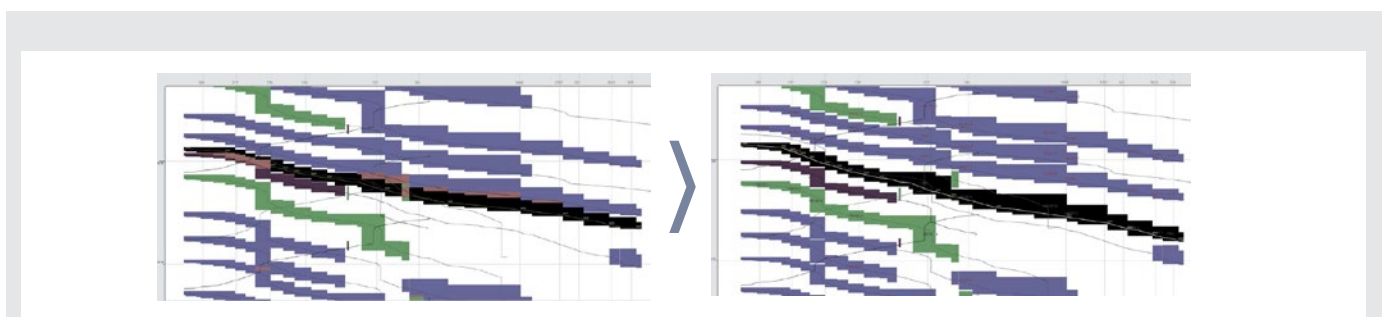
mierungsverfahren zur globalen Disposition aller Züge im Zeithorizont.

3.3. Konfliktlösung mit Zwei-Zug-Modell

Im Zwei-Zug-Modell werden die Belegungskonflikte zwischen zwei Zügen iterativ gelöst. Für jeden Konflikt werden die üblichen Dispositionsoptionen wie Veränderungen an Fahrwegen, Haltezeiten oder Geschwindigkeitsprofile betrachtet, und es wird jeweils die für die Situation lokal optimale Lösung umgesetzt. Jede Option verändert dabei den Fahrtverlauf von einer oder beiden Zugfahrten. Nach der Analyse der Konfliktsituation werden alle betrieblich sinnvollen Optionen auf Machbarkeit überprüft, bewertet, und es wird die Lösung mit der besten Bewertung gemäß den gewählten Zielen umgesetzt. Die Auswahl der betrachteten Dispositionsoptionen kann an die Fähigkeiten des simulierten Systems angepasst werden. Z.B. kann die Nutzung vom Biegen verboten oder einschränkt werden, falls keine geeignete Kommunikation mit dem Triebfahrzeugführer möglich ist.

Beim Zwei-Zug-Modell werden nicht am Konflikt beteiligte Drittzüge indirekt betrachtet. Sie werden zwar nicht manipuliert, aber in die Lösungsbewertung einbezogen. Löst eine Option am Konfliktort nur die Konflikte zwischen den beiden Zügen, aber nicht mit Hoch- oder Gleichrangzügen, führt dies zu einer Abwertung. Durch die Konfliktlösung verursachte Folgekonflikte mit Nachrangzügen sind dagegen uneingeschränkt erlaubt und werden iterativ gelöst.

Auf diese Weise werden schrittweise alle Konflikte jeweils lokal optimal gelöst, bis ein konfliktfreier Dispositionsplan vorliegt. Es erfolgt allerdings keine kombinatorische Optimierung der Maßnahmen für unterschiedliche Konflikte.



5: Beispielhafter Prognosefahrplan vor und nach der Verarbeitung durch OptDis

3.4. Konfliktlösung mit OptDis

Das OptDis-Verfahren löst sich von der Zwei-Zug-Sicht zur Bestimmung einer global optimalen Disposition aller Zugfahrten im betrachteten Zeithorizont [7]. Der grundsätzliche Ablauf des Verfahrens wird in Bild 4 dargestellt.

Basis des Verfahrens ist der aktuelle Prognosefahrplan, welcher anhand von Meldungen des Umgebungssimulators erstellt wird und in der Regel ungelöste Belegungskonflikte erhält. Das Verfahren kann allerdings auch für eine konfliktfreie Prognose aufgerufen werden, um Pufferzeiten und Fahrzeitreserven optimal neu zu verteilen.

Der Prognosefahrplan wird in ein mathematisches Optimierungsmodell in Form eines gemischt-ganzzahligen Programms überführt, welches bereits in zahlreichen Domänen erfolgreich zur Verbesserung der Entscheidungsfindung eingesetzt wird [8]. Das Modell beschreibt den Lösungsraum aller betrieblich sinnvollen Dispositionsfahrpläne mithilfe einer Menge von Rand-

bedingungen. Alle Zugfahrten müssen noch realisierbare Laufwege durch das Netz nehmen, es müssen dazu Zugpositionen, die in Stellwerken verfügbaren Fahrstraßen und bereits gestellte Fahrstraßen beachtet werden. Die vom Fahrplan vorgegebene Haltepolitik muss eingehalten werden, Verkehrshalte und betrieblich notwendige Halte müssen mit der vorgesehenen Mindesthaltzeit durchgeführt werden. Rein dispositive Halte und Trassenmanagementhalte können dagegen bei Bedarf entfernt oder neu eingefügt werden. Für den gewählten Laufweg müssen realistische Fahrzeiten vorgesehen werden unter Beachtung aller fahrdynamischer und sicherungstechnischer Vorgaben. Aus den sich so ergebenden real fahrbaren Zeit-Weg-Linien leitet das mathematische Modell Sperrzeitentreppen ab, um die Konfliktfreiheit des Fahrplans exakt zu modellieren. Es kommen keine vorberechneten Mindestzugfolgezeiten oder andere Vereinfachungen zum Einsatz. Enthält der Fahrplan Umläufe oder Anschlussverbindungen, werden diese ebenfalls mitdisponiert. Ana-

log zum Zwei-Zug-Modell kann mithilfe zusätzlicher Randbedingungen die Auswahl der betrachteten Dispositionsoptionen an die Fähigkeiten des simulierten Systems angepasst werden.

Nach Erstellung des Modells durchsucht ein mathematischer Solver den Lösungsraum nach einem global optimalen Dispositionsfahrplan in Bezug auf eine vorgegebene Bewertungsfunktion. Die optimale Lösung wird im abschließenden Schritt zurück in das LUKS-Datenmodell übertragen, sodass anschließend ein optimaler Dispositionsfahrplan im Simulationssystem vorliegt, welcher vom Umgebungssimulator umgesetzt werden kann.

Anstelle von lokalen Einzelentscheidungen im Zwei-Zug-Modell wird beim OptDis-Verfahren der Dispositionsfahrplan gesamtartig bewertet, wodurch eine aus Sicht aller Zugfahrten global optimale Lösung gesucht wird. Dank der Möglichkeit zur gleichzeitigen Manipulation von allen Zugfahrten können außerdem bei Bedarf Kapazitäten geschaffen und zur Verbesserung der Konfliktlösung genutzt werden, wie in Bild 5 zu

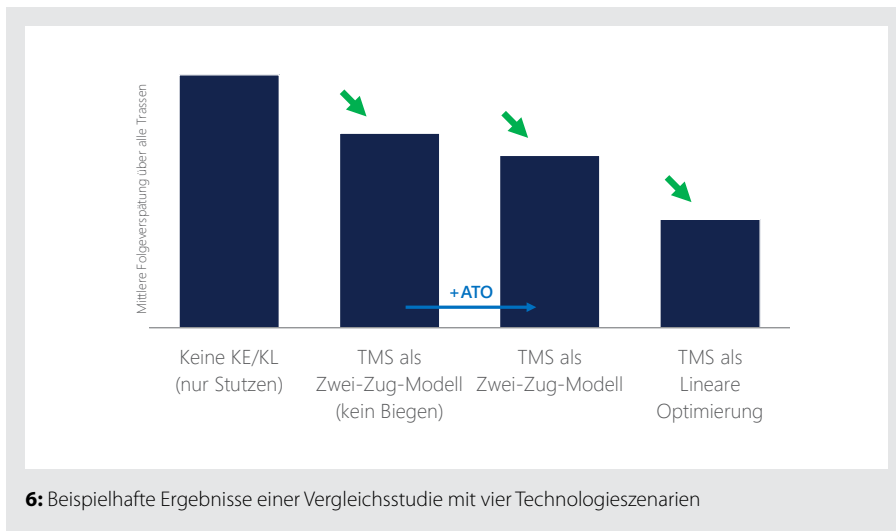
Mit uns können Sie nicht nur rechnen ...

Sie können auch auf uns zählen!

Alle reden von Digitalisierung – wir setzen sie um.
Zur Fahrplankonzeption, Fahrplanerstellung und Fahrplanmodifikation entwickeln wir anspruchsvolle, innovative Simulationssoftware sowie Tools für die Disposition und Trassenplanung für Eisenbahnunternehmen.
Wir setzen dabei auf langfristige Kundenbeziehungen – **denn erfolgreich sind wir nur gemeinsam.**

BVU
Beratergruppe
Verkehr + Umwelt

www.bvu.de



sehen ist. Auch ein verbesserter Einsatz von Pufferzeiten und Fahrzeitreserven bei allen Zugfahrten ist möglich.

4. Vergleichende Simulationsstudien

Unter Verwendung der in den Abschnitten 2 und 3 erläuterten Grundlagen können in LUKS die Effekte eines TMS (sowie ggf. ATO) auf die Betriebsqualität untersucht werden. Messgröße der Auswirkungen können beispielsweise die auftretenden Folgeverspätungen sein.

Im dargestellten Beispiel werden dieselben Infrastrukturen, Fahrpläne und Störungsszenarien jeweils mit vier unterschiedlichen Konfliktlösungsansätzen simuliert. Bei der genutzten Infrastruktur handelt es sich um eine ca. 80 km lange deutsche Mischverkehrsstrecke mit zwei größeren Randbahnhöfen. Die einfachste Variante verzichtet vollständig auf eine vorausschauende und großräumige Disposition, alle Konflikte werden kurzfristig und lokal per Stutzen durch das Sicherungssystem gelöst. In der zweiten Variante kommt das Zwei-Zug-Modell zum Einsatz, allerdings sind Anpassungen an Geschwindigkeitsprofile stark eingeschränkt, weil diese nicht effektiv auf die Fahrzeuge übertragen werden können. Dies entspricht im Wesentlichen der heutigen Situation. Die dritte Variante führt ATO und die Möglichkeit zur exakten Vorgabe/Steuerung von Geschwindigkeitsprofilen ein. Zum Einsatz kommt unverändert das Zwei-Zug-Modell. Die finale Variante führt OptDis als Konfliktlöser ein und erlaubt damit eine Betriebssimulation nach Einführung eines modernen TMS.

Die Ergebnisse entsprechen qualitativ Bild 6. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die mittlere Folgeverspätung wird durch die Einführung des Zwei-Zug-Modells deutlich reduziert (u. a. durch dispositive Gleiswechsel).
- Die Möglichkeit, angepasste Geschwindigkeiten mit der Hilfe von ATO zu disponieren, führt zu einer geringfügigen zusätzlichen Reduktion der mittleren Folgeverspätung.
- Ein TMS, welches immer alle Züge gleichzeitig berücksichtigt (lineare Optimierung), führt noch einmal zu einer deutlichen Reduktion der mittleren Folgeverspätungen gegenüber der dritten Variante.

Bereits das Ergebnis dieser kleinen Simulationsstudie zeigt, dass die Effekte unterschiedlicher Dispositionsansätze mit simulativen Verfahren nachweisbar sind. Die Größe der erzielbaren Effekte hängt von der betrachteten Kombination aus Infrastruktur, Fahrplan, Störungsgeschehen und Dispositionsregime ab. Beiträge eines TMS können umso höher sein, je mehr Freiheitsgrade zur Konfliktlösung bestehen.

5. Fazit

Die Nachbildung der Umgebung (tatsächlicher Bahnbetrieb), der bidirektionalen Kommunikation zwischen Umgebung und Dispositionslogik sowie der eigentlichen Dispositionslogik in einem Simulationsverfahren ist, wie zuvor gezeigt, möglich. Dies erlaubt es, die Spezifikation sowie Entwick-

lung von TMS im Rahmen der Innovationsprogramme zu unterstützen.

Die wesentliche nächste Herausforderung unter technischen Gesichtspunkten ist die präzisere Abbildung der ATO-Fahrzeuggeräte (ATO-OB). Zu deren Interpretation der Vorgaben aus Segment Profile und Journey Profile sind bislang zahlreiche Annahmen zu machen. Unter methodischen Aspekten ist zu erwarten, die Veränderung der Betriebsqualität in eine Veränderung von Leistungsfähigkeit zu übertragen und dabei den Randbedingungen aus fahrplanabhängiger / fahrplanunabhängiger Betrachtung gerecht zu werden.

Literatur

[1] Becker, M.; Büker, Th.: „Digitalisierung im Gesamtsystem Bahn denken“. In: ZEVraill (144) 10/2020, S. 379-385.
 [2] Heller, S.; Schaefer, Th.: „DisKon – Disposition und Konfliktlösungsmanagement der DB AG“. In: EI – Der Eisenbahningenieur (55) 9/2004, S. 102-122.
 [3] Lüthi, M.: „Improving the efficiency of heavily used railway networks through integrated real-time rescheduling“. Dissertation an ETH Zürich (2009).
 [4] Becker, M.; Büker, Th.; Hennig, E.; Kogel, F.: „Sound evaluation of simulation results“. In: Proc. Of the 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Norrköping, 17.-20.6.2019.
 [5] Blöcher, H.; Büker, Th.; Meurer, D.; Wickmann, A.: „Effizienzsteigerung durch Traffic Management Systeme und Lösungsschritte für die TMS-Implementierung im Bahnsektor“. In: ETR-Eisenbahntechnische Rundschau (70) 10/2021, S. 28-34.
 [6] Janecek, D.; Weymann, F.; Schaefer, T.: LUKS – Integriertes Werkzeug zur Leistungsuntersuchung von Eisenbahnknoten und -strecken. In: ETR-Eisenbahntechnische Rundschau (59) 1+2/2010, S. 25–32.
 [7] Weymann, F.; Nießen, N.: Unterstützung der Fahrplanfeinkonstruktion mit Optimierungsverfahren. In: ETR-Eisenbahntechnische Rundschau (64) 3/2015, S. 16–19.
 [8] Nemhauser, G. L.; Wolsey, L. A.: Integer and combinatorial optimization. Wiley New York, NY (1999).

Summary

Benefit assessment of TMS/ATO and other innovations by means of simulation methods

Comparative simulation methods are particularly suitable for evaluating the benefits of innovative technologies such as (partially) automatic driving by means of ATO and dispatching by means of a TMS. Those methods combine a configurable, virtual railway environment with different dispatching logics such as a two-train model or a procedure based on mathematical optimisation approaches. The results support the specification and development of technologies within the framework of innovation programmes.