

# Netzweite Betriebssimulation auf mikroskopischer Datenbasis mit OnTime und LUKS

Während Betriebssimulationen häufig nur für kleine Infrastrukturbereiche auf mikroskopischer Ebene durchgeführt werden, um einzelne infrastrukturelle und betriebliche Maßnahmen zu bewerten, wird der netzweite Einfluss durch diese Art der Simulation nicht überprüft. Folgender Artikel stellt das Zusammenspiel des mikroskopischen Planungstools LUKS mit dem Simulationstool OnTime dar, welches netzweite Betriebssimulationen auf mikroskopischer Datenbasis innerhalb weniger Stunden Berechnungszeit ermöglicht.



## 1. Ausgangslage

Die Prüfung der Betriebsqualität zukünftiger Fahrplankonzepte und Infrastrukturausbauten ist wie bei allen komplexen Systemen zuverlässig nur mit einer Simulation des Betriebsgeschehens möglich. Der Nachteil der Simulation – das ist keine Besonderheit der Bahn – ist der große Aufwand zur Erstellung eines Simulationsmodells. Aus diesem Grund wird bei vielen Bahnen sogar darauf verzichtet, Betriebssimulationen überhaupt durchzuführen, oder diese werden nur für lokale Änderungen oder Teilnetze durchgeführt.

Während die Gesamtnetz Betrachtung mit all ihren Wechselwirkungen beispielsweise bei den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) seit Jahren Standard ist, bleibt es eine Herausforderung, die Datenbasis insbesondere für größere Netze wie in Deutschland oder auch für die Variantenvielfalt in der Langfristplanung schnell und in der nötigen Qualität bereitzustellen.

Um diesen Konflikt zwischen Vollständigkeit der Netzsimulation und Erstellungsaufwand zu lösen, sind Fortschritte in den Arbeitsprozessen der Datenaufbereitung nötig.

Dieser Artikel beschreibt die Erweiterungen in den etablierten Verfahren OnTime und LUKS (Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken), um netzweite Daten auf mikroskopischer Basis für eine Gesamtnetzsimulation verfügbar zu machen. Ferner wird ein Anwendungsfall aus der jüngeren Vergangenheit genauer

beleuchtet, um mögliche Anwendungsgebiete von OnTime aufzuzeigen.

## 2. OnTime

OnTime dient zur Prognose der Betriebsqualität und der Erhaltung sowie Verbesserung der Pünktlichkeit im gesamten Planungsspektrum von Jahresfahrplänen bis zur strategischen Langfristplanung. Dabei bietet das Verfahren immer die Möglichkeit, die Auswirkungen von betrieblichen und infrastrukturellen Maßnahmen auf das Gesamtnetz zu bestimmen und auf Basis einer Kalibrierung mit Ist-Daten eine genaue Abschätzung der zu erwartenden Betriebsqualität zu liefern. Verschiedenste Maßnahmen können dadurch jeweils einzeln oder in Kombination, aber immer einheitlich in ihrer Pünktlichkeitswirkung im Gesamtnetz bewertet und verglichen werden. Eine solche Analyse ist besonders bei strategischen Planungen von großem Nutzen. Daher bewertet OnTime beispielsweise bei den Planungen des Strategischen Entwicklungsprogramms Bahninfrastruktur (STEP) in der Schweiz die Fahrplanstabilität, um die hohe Qualität auch bei künftigen Angebotsausweitungen zu erhalten. Nach Begutachtung durch das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich ist OnTime als Bewertungstool der STEP-Planungen durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) anerkannt.

OnTime ist eine deutsch-schweizerische Gemeinschaftsentwicklung von VIA Con-



**Philipp Scherer**

Projektingenieur bei VIA Consulting & Development GmbH / quattron management consulting GmbH

p.scherer@via-con.de



**Jonathan Hecht**

Softwareentwickler bei VIA Consulting & Development GmbH / quattron management consulting GmbH

j.hecht@via-con.de



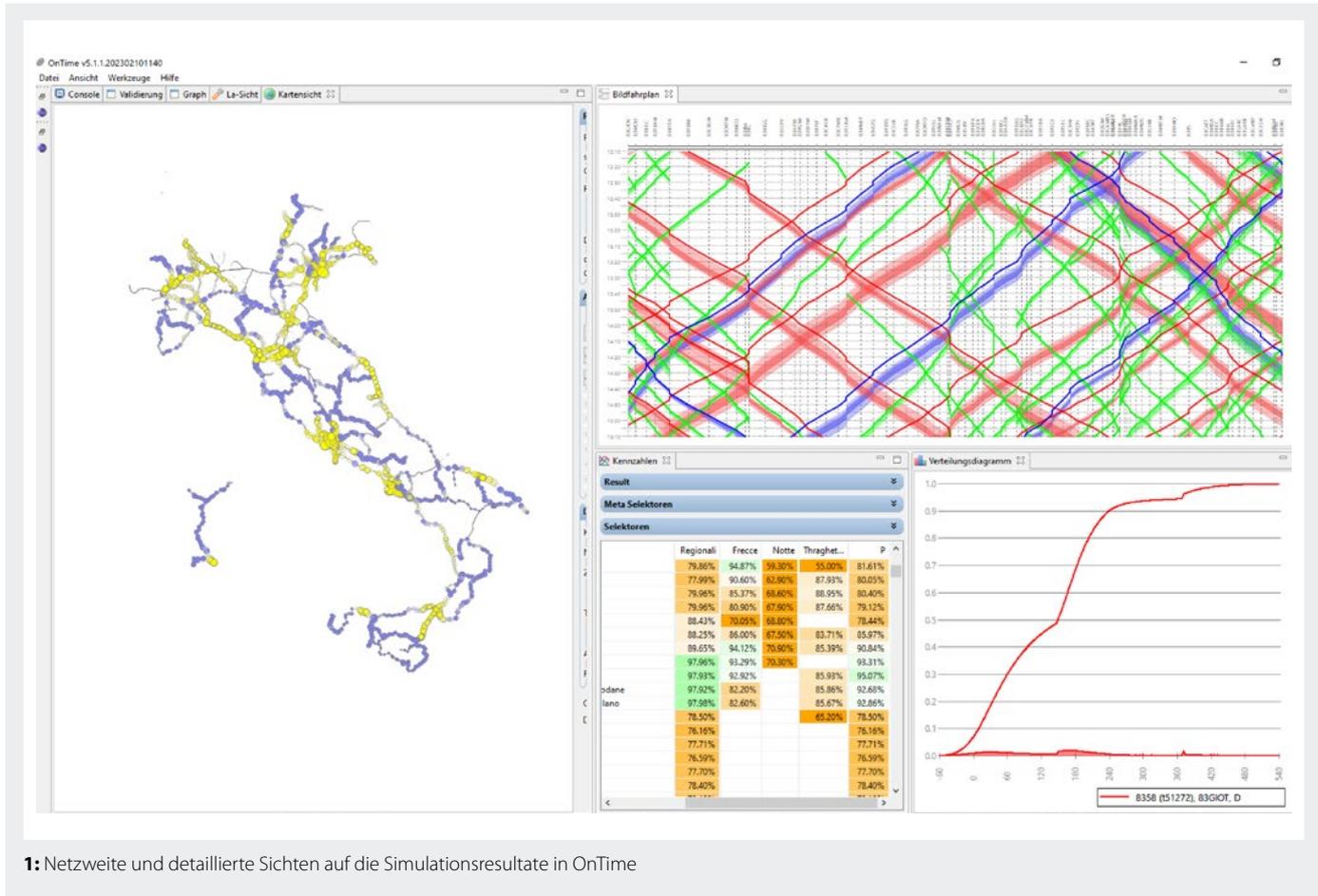
**Burkhard Franke**

Partner trafIT solutions gmbh  
franke@trafit.ch



**Dan Burkolter**

Partner trafIT solutions gmbh  
burkolter@trafit.ch



1: Netzweite und detaillierte Sichten auf die Simulationsresultate in OnTime

sulting & Development, Aachen, und traIT solutions, Zürich, ursprünglich im Auftrag von SBB und Infrabel, um bestehende Simulationsanwendungen zu ergänzen. Die wichtigsten Neuerungen sind dabei:

- Die schnelle Gesamtnetzsimulation
- Die direkte Modellierung von Urverspätungen und Fortpflanzung der Verspätungen durch Verteilungsfunktionen

Die Gesamtnetzsimulation ermöglicht die vollständige Berücksichtigung aller Züge und Wechselwirkungen eines Fahrplans. Das übliche Freischneiden eines Teilnetzes ist nicht erforderlich und dadurch werden Einflüsse und Rückkopplungen aus ansonsten ignorierten Netzteilen sichtbar. Eine solche Gesamtnetzsimulation war lange Zeit nur möglich, indem das Netz vereinfacht abgebildet wurde. Mit verbesserter Rechenmethodik und der im Folgekapitel beschriebenen Datenaufbereitung ist nun eine Gesamtnetzsimulation auf mikroskopischer Datenbasis möglich. Eine Visualisierung der Ergebnisse und Ansichten ist beispielhaft in Bild 1 gegeben.

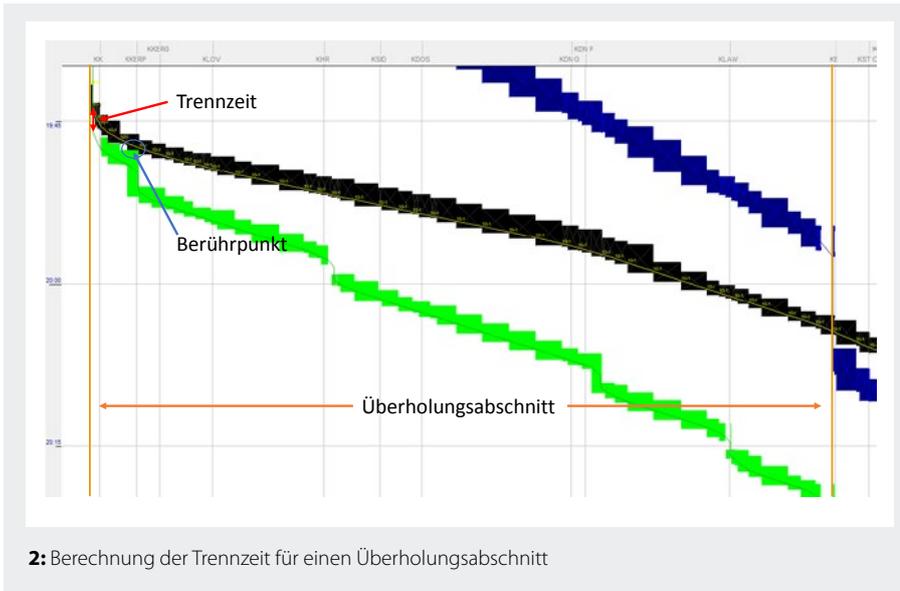
Der zweite Aspekt ist die nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich vollständige Überprüfung eines Bahnnetzes. Damit ist nicht (nur) eine komplette Simulation eines Betriebstages gemeint, sondern die Modellierung beispielsweise einer ganzen Fahrplanperiode. Um regionale und jahreszeitlich unterschiedliche Störungsniveaus einer Fahrplanperiode vollständig abbilden zu können, werden die Urverspätungen in OnTime entsprechend ihrer Häufigkeit als Verteilungsfunktionen modelliert.

**2.1. Methodische Vorteile**

Gegenüber einem Monte-Carlo-Ansatz, bei dem Einzelverspätungen in deterministischen Simulationen genutzt und Kennwerte aus mehreren Simulationsläufen aggregiert werden, hat die direkte Manipulation von Verspätungsverteilungsfunktionen praktische Vorteile:

- Nutzung gleicher Kennzahlen in Simulation und Empirie
- Einfache Bestimmung der Kundenpünktlichkeit

Eine Schwierigkeit der Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft ist die Übertragbarkeit dort genutzter Kennzahlen auf empirische Messungen. Wie in [1] beschrieben, unterscheiden sich analytische Verfahren und Simulationen in ihren Ansätzen und Aussagen und beide nutzen andere Kennzahlen als Auswertungen der Betriebsdaten. Eine direkte Ableitung der Qualitätsaussagen zu Fahrplankonzepten oder Infrastrukturmaßnahmen aus bahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren auf eine zu erwartende Betriebsqualität gemäß üblicher Qualitätskennzahlen (Pünktlichkeit, ...) ist dadurch kaum möglich. Mit der Möglichkeit, ganze Netze zu berechnen und einen durchschnittlichen Betriebstag bzw. eine Fahrplanperiode in einer Rechnung zu reproduzieren, kann die Pünktlichkeit (oder andere Kennzahlen) eines Fahrplans prognostiziert werden. Dies erleichtert auch die Kalibration eines Simulationsmodells. So nutzte die SBB beispielsweise die aus Betriebsdaten ermittelten Primärverspätungen, um das OnTime-Modell zu verifizieren und als Ausgangspunkt für eine feinere Kalibrierung [2].



Die Qualitätsbeurteilung aus Kundensicht stellt eine zusätzliche Herausforderung für Simulationen dar: Eine Zugverspätung von wenigen Minuten kann ein Ärgernis sein, oder - im Falle eines verpassten Anschlusses - eine Kundenverspätung von einer weiteren Stunde oder mehr bedeuten. So sind erhoffte Nachfrageeffekte aus Integralen Taktfahrplänen insbesondere dann fraglich, wenn die Betriebsqualität nicht den Anforderungen gerecht werden kann. Entsprechende kritische Überlegungen sind beispielsweise in [3] aufgeführt.

Eine praktische Bestimmung der Kundenpünktlichkeit konnte in einem Projekt mit SBB im Jahr 2016 durch die Kopplung von OnTime und des SBB-Nachfragemodells SIMBA realisiert werden [4]. Die Simulation mit Verspätungsverteilungen und der Bestimmung von Anreicherungsstellen stellt die für eine Nachfragemodellierung benötigten Daten netzweit bereit. Die Kombination ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung von Fahrplan- und Infrastrukturmaßnahmen.

## 2.2. Anforderungen an Umsysteme

OnTime ist als Erweiterung eines Planungssystems konzipiert und verfügt daher nicht über eine eigenständige Infrastrukturmodellierung oder Fahrzeitrechnung. Dies ist vom Erstkunden und Entwicklungspartner SBB mit dem Argument gewünscht worden, dass man «nicht noch einen Fahrzeitrechner» neben den beiden Tools zur Fahrplanentwicklung und einem Simulati-

onstool für kleinräumige Untersuchungen pflegen wolle.

Infolgedessen bezieht OnTime die Informationen über Mindestfahr- und Haltezeiten sowie über Trennzeiten aus anderen Systemen. Diese Datenbereitstellung ist insbesondere für die Langfristplanung immer mit großem Aufwand verbunden. Hier sind durch Nutzung aus LUKS bereitgestellter Daten erhebliche Erleichterungen erreicht worden.

## 3. LUKS

Die Lücke eines fehlenden mikroskopischen Infrastrukturmodells sowie einer meter- und sekundengenauen Fahr- und Belegungszeitrechnung kann durch die Software LUKS, welche unter anderem für verschiedene Arten von eisenbahnbetriebwissenschaftlichen Untersuchungen (EBWU) eingesetzt wird, geschlossen werden. LUKS bietet auch eine Simulation des Betriebsgeschehens an, die im Vergleich zu OnTime nicht stochastisch, sondern infrastrukturzentriert, mikroskopisch und deterministisch agiert.

Mikroskopische Infrastruktur- und detaillierte Fahrplandaten können in LUKS entweder in Editoren manuell erfasst oder durch zahlreiche Schnittstellen, wie railML<sup>1)</sup> oder in Form von XML-ISS/XML-KSS bei der DB Netz AG, aus Bestandsdaten importiert werden. Liegen diese Daten vor, berechnet LUKS gemäß R 405.0103<sup>2)</sup> für die

1) <https://www.railml.org/en/>

2) Richtlinie Fahrwegkapazität der DB Netz AG

modellierten Züge eine mikroskopische Fahrzeitrechnung und darauf aufbauend Belegungszeiten für alle Elemente auf dem Laufweg eines Zuges. Diese Fahr- und Belegungszeiten dienen als Baustein für nachgelagerte Module oder Exporte zu Drittsystemen wie etwa OnTime.

## 3.1. Exportformat und Berechnung der Trennzeiten

LUKS bereitet die erfassten oder importierten Daten für OnTime auf, indem die Originaltrassen der Fahrplandaten und zugehörige mikroskopische Fahrzeiten zu einem LUKS-eigenen Format kombiniert werden, welches vor allem jede Betriebsstelle einer Zugfahrt mit entsprechenden An- und Abfahrtszeiten anreichert. Somit stehen OnTime und LUKS die gleichen fahrplanrelevanten Informationen zur Verfügung, um die zusätzlich berechneten Trennzeiten von LUKS gleichermaßen interpretieren zu können.

Es werden vier Arten von Trennzeiten berechnet und exportiert:

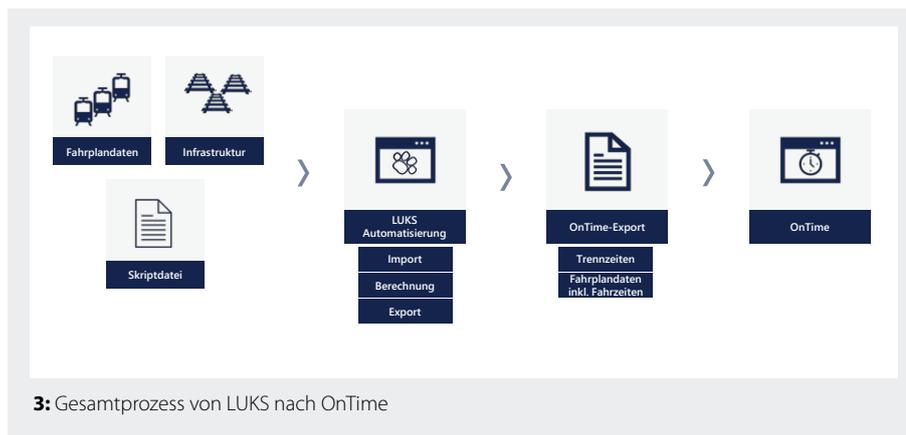
- Trennzeit zwischen zwei benachbarten Betriebsstellen
- Trennzeiten für Konflikte in Bahnhöfen
- Trennzeiten für Konflikte in Abzweigbetriebsstellen
- Trennzeit auf Überholungsabschnitten (eine Zugfolge zwischen zwei Überholungsmöglichkeiten).

Letztere wird im Folgenden kurz erläutert. Für die Berechnung der Trennzeiten modifiziert LUKS die Originaltrassen anfänglich wie folgt:

- Haltezeiten werden auf Mindesthaltezeiten eingekürzt
- Betriebshalte werden entfernt
- Biegezugschläge werden gelöscht.

Anschließend werden im resultierenden Fahrplan potenzielle Belegungskonflikte zwischen den modifizierten Trassen ermittelt. Zwei Trassen haben einen potenziellen Belegungskonflikt, wenn diese zeitlich aufeinanderfolgend die gleiche mikroskopische Infrastruktur belegen. Existiert ein solcher Konflikt, werden die zwei Trassen in einem Überholungsabschnitt so weit zusammengeschoben, bis diese sich berühren, um dann an den maßgebenden Sperrzeitenblöcken die Trennzeit abzulesen (vgl. Bild 2).

Das Exportformat gruppiert danach die berechneten Trennzeiten anhand der Zug-



klasse und des zugrunde liegenden Überholungsabschnittes, welches schließlich als Eingabe für OnTime dient.

### 3.2. Netzweite Automatisierung des Prozesses

Für netzweite Simulationen erwartet OnTime folglich von LUKS ebenfalls netzweite Exportdaten. Um diese mit geringem manuellem Aufwand bereitzustellen, können die vorher beschriebenen Schritte in LUKS in Form einer Skriptdatei automatisiert durchgeführt werden. Erforderlich sind lediglich zueinander passfähige mikroskopische Infrastruktur- und Fahrplandaten. Der Import dieser Dateien, die Berechnung der Fahr- und Belegungszeiten sowie der Exportdateien für OnTime erfolgt automatisch in einem Schritt. Der Gesamtprozess skizziert sich wie in Bild 3 dargestellt.

Nach Durchlauf des Gesamtprozesses verfügt OnTime über die zuvor fehlenden vollständigen mikroskopischen Infrastrukturdaten und Fahrzeitangaben und ermöglicht dadurch weitere Anwendungsfälle.

### 4. Anwendungsfall: Netzweiter Rollout von ETCS Level 2

Sowohl in der Vergangenheit als auch aktuell werden Pünktlichkeitsrechnungen in OnTime für eine Vielzahl an Fragestellungen insbesondere in der Schweiz und in Deutschland durchgeführt, sofern ein nennenswerter netzweiter Einfluss zu erwarten ist. Im Rahmen der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) ist beispielsweise die Digitalisierung der Leit- und Sicherungstechnik ein wesentlicher Kernaspekt, der zu erhöhter Netzkapazität beziehungsweise einer höheren Pünktlichkeit im Gesamtnetz führen soll. Dies beinhaltet unter anderem den netzweiten

Rollout von ETCS Level 2 ohne Signale (ETCS L2oS). Dazu wurden verschiedene Szenarien zunächst auf ihre netzweite Wirkung hin geprüft. In Tabelle 1 sind diese Szenarien hinsichtlich ihrer Ausgestaltung aufgeführt. Als Vergleich dient dabei der aktuell vorliegende Status quo gemäß Außensignalisierung (PZB/LZB) und eingesetzt Stellwerke.

Um netzweite Berechnungen durchzuführen, müssen der Fahrplan sowie die Trennzeiten zwischen einzelnen Zügen für die gesamte Infrastruktur zur Verfügung stehen. Während der Fahrplan in allen Ausprägungen der gleiche ist, unterscheiden sich die Trennzeiten je nach Ausprägung teils deutlich. Um diese zu bestimmen, ist eine mikroskopische Modellierung der Infrastruktur notwendig. Diese ist für den Status quo des Gesamtnetzes verfügbar, jedoch erfordern die verschiedenen ETCS L2oS-Ausprägungen eine aufwendige Anpassung der mikroskopischen Infrastruktur. Entsprechend wird folgende Heuristik angewendet, um die Trennzeiten für alle Ausprägungen anzunähern:

- Für mehrere, repräsentative Infrastrukturbereiche mit unterschiedlichem Zugmix wird für die verschiedenen Aus-

prägungen von ETCS L2oS ein mikroskopisches Infrastrukturmodell aufgesetzt. Anschließend werden für alle über die Infrastruktur verkehrenden Züge die Trennzeiten bestimmt und exportiert.

- Auf Grundlage der exportierten Zeiten sowie Auftretenshäufigkeit der verschiedenen Zugfolgefälle im Fahrplan wird eine Berechnungsvorschrift (so genannte „Übertragungsfunktionen“) abgeleitet, wie sich die Trennzeiten vom Status quo hin zu den einzelnen ETCS L2oS-Ausprägungen verändern.
- Mittels der Übertragungsfunktionen werden netzweit alle Trennzeiten des Status quo in solche der verschiedenen ETCS L2oS-Ausprägungen überführt, sodass diese neben dem Fahrplan als Eingangsdaten für die Pünktlichkeitsberechnung des Gesamtnetzes dienen.

Nach der Durchführung der netzweiten Pünktlichkeitsberechnung für alle Ausprägungen ergeben sich auf Basis der 6-Minuten-Pünktlichkeit folgende Änderungen zum Status quo:

- Bei der Ausprägung „1:1“ reduziert sich die Gesamtnetzpünktlichkeit um 1,3 %.
- Unter der Ausprägung „Optimiert“ kann eine leichte Erhöhung der Gesamtnetzpünktlichkeit um 1,5 % festgestellt werden.
- Bei der Ausprägung „DSD-Zielbild“ ist mit einer deutlichen Erhöhung der Pünktlichkeit um 4,2 % zu rechnen.

Entsprechend lässt sich die Aussage ableiten, dass ein reiner 1:1 Ersatz von Signalen unter ETCS L2oS nicht zu einer Verbesserung der Betriebsqualität führt, sondern dass zumindest geringfügige Anpassungen am Blocklayout mitsamt ETCS-spezifischer Optimierungen (bspw. die Projektion der Geschwindigkeitsschwellen ans Element) dafür notwendig sind. Detailliertere Informationen zum Thema DSD und den dort

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen ETCS L2oS-Ausprägungen

|                         | ETCS L2 «1:1»  | ETCS L2 «Optimiert»   | ETCS L2  |
|-------------------------|--|---|--|
| Blockteilung            | Analog zu PZB/LZB  | Gezielte Blockverdichtung führt zu circa 10% -15% mehr Blöcken  | Blockverdichtung analog zum DSD-Zielbild führt zu mehr als doppelt so vielen Blöcken |
| Geschwindigkeitswechsel | Findet am vorherigen Signal/Blockkennzeichen statt                                   | Werden elementscharf projiziert                                 | Werden elementscharf projiziert  |
| Systemzeiten            | Leichter Anstieg der Zeiten aufgrund des zusätzlichen Zeitbedarfs durch RBC und Funk | Reduzierte Zeiten aufgrund neuer, leistungsfähigerer Stellwerke | Reduzierte Zeiten aufgrund neuer, leistungsfähigerer Stellwerke                      |

durchgeführten Untersuchungen können aus [5] entnommen werden.

## 5. Zusammenfassung

Mittels OnTime lassen sich Pünktlichkeitsprognosen für Netze der Größe Deutschlands in etwas mehr als einer Stunde berechnen. Dies ermöglicht schnelle und netzweit einheitliche Bewertungen von Infrastruktur- und -ausbauten und betrieblichen Maßnahmen. Durch die Datenversorgung aus LUKS können solche Analysen auf mikroskopischer Datenbasis erfolgen; die Automatisierung des Prozesses der Datenaufbereitung reduziert den dafür erforderlichen Aufwand erheblich.

Dank diesen Prozessoptimierungen können hochwertige Betriebsqualitätsausagen auch für langfristige Zielnetzplanungen anstelle aufwendiger, mikroskopischer Betriebssimulationen auf Grundlage des Monte-Carlo-Ansatzes getroffen werden.

So können, je nach Qualität der Eingangsdaten, verlässliche Aussagen getroffen werden, wo die Infrastruktur ausgebaut werden muss, um die Zielnetzverkehre zuverlässig abwickeln zu können beziehungsweise wo die Zielnetzplanungen zu ambitioniert sind, um eine gewünschte Betriebsqualität aufrecht zu erhalten. •

### Literatur

- [1] M. Bär, W. Lenze, J. Eisold und N. Nießen, Benchmark von Qualitätsmaßstäben für Kapazitätsermittlungen, in Proceedings of the 2nd International Railway Symposium, Aachen, 2019.
- [2] H. Labermeier, On the Dynamic of Primary and Secondary Delay, in Proceedings of IAROR, Kopenhagen, 2013.
- [3] F. Stoll, B. Kogel und N. Niessen, Pünktlichkeit in Integralen Taktfahrplänen – Auswirkungen auf Anschlussbeziehungen, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, pp. 26-30, 12/2021.

[4] B. Franke, J. Lieberherr und L. Kaeslin, Kombinierte betriebliche und verkehrliche Bewertung von Bahn-Angeboten, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, pp. 26-29, 7-8/2018.

[5] P. Bührsch, T. Bükler, S. Schotten und S. Hardel, Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr, EIK - Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2022.

### Summary

#### Networkwide operational simulation on a microscopic data basis with OnTime and LUKS

With the help of OnTime and LUKS, operational simulations for large overall networks such as Germany, can be carried out based on microscopic data basis within a few hours. This allows, among other things, the effect of a networkwide roll-out of a new LST to be estimated or reliable statements to be made for future target network plannings regarding operational quality - both global and locally.



Foto: Deutsche Bahn AG/Wolfgang Klee

Hybrid

# 23. Internationaler SIGNAL+DRAHT-Kongress

## 23<sup>rd</sup> International SIGNAL+DRAHT Congress

09. – 10. November 2023 / 09<sup>th</sup> – 10<sup>th</sup> November 2023  
Maritim Hotel, Fulda / DVV Webinar-Center



**JETZT ANMELDEN!**

Anmeldung und weitere Informationen unter:  
Registration and further information at:  
[www.eurailpress.de/sdk2023](http://www.eurailpress.de/sdk2023)

Offizielle Kongresspublikation  
Official congress-publication



Unterstützt von  
Supported by



Medienpartner  
Media partner

