

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung von CBTC-Systemen

A railway operations study of CBTC systems

Thorsten Bükler | Lars Schnieder | Madeleine van Hövell | Daniel Meurer

Der Verkehrsbedarf in den Ballungsräumen nimmt zu. Gleichzeitig stellen die Betreiber hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und die Qualität der Betriebsabwicklung. Mit Communications-Based Train Control Systemen (CBTC) besteht die Möglichkeit, diesen Zielen einen großen Schritt näher zu kommen. Gleichzeitig wird die Grundlage für eine zukünftige höher automatisierte Betriebsführung gelegt. Eine beispielhafte eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung zeigt den positiven Einfluss leistungsfähiger Zugbeeinflussungssysteme auf einen leistungsfähigen und qualitätsgerechten Nahverkehr.

1 Grundlagen

Für das eisenbahnbetriebswissenschaftlich zu betrachtende Netz müssen zur Durchführung der Betrachtungen verschiedene Daten erfasst werden. Grundlage sind im Wesentlichen [3]:

Infrastrukturdaten: Die Infrastruktur wird mittels eines Grafikeditors entworfen und verwaltet. Hierbei werden die wesentlichen Merkmale als Knoten-Kanten-Modell abgebildet. Es handelt sich hierbei um knotenbewertete Graphen [1]. An jeder Stelle, an der sich ein Attribut der Infrastruktur ändert, wird ein Knoten gesetzt. Die benötigten Daten umfassen:

- Daten zur Gleistopologie wie Weichen, Kreuzungen und Gleisenden
- Daten zur Sicherungslogik wie Fahrstraßen, Signale, Spezifika der eingesetzten Zugsicherungssysteme, Lage und Länge von Gleisfreimeldeabschnitten und technische Reaktionszeiten (Umlaufzeiten von Weichen, Fahrstraßenbildezeiten und weitere Details wie beispielsweise eine Teilauflösung von Fahrstraßen)
- Vorgaben für die zulässige und mögliche Fahrweise der Fahrzeuge wie das Gradientenprofil (Neigungen und Gefälle) sowie zulässige Geschwindigkeiten
- Betriebsbeeinflussende Daten wie Haltepositionen und Nutzlängen der Bahnsteige
- Referenz- und Messpunkte

Fahrplan- und Betriebsdaten: Für ein realistisches Bild des Betriebs werden verschiedene Informationen in das Werkzeug eingegeben:

- Daten des Sollfahrplans: Die Daten umfassen die Grunddaten des Sollfahrplans von den Einbruchstellen des Zuges in den betrachteten Netzausschnitt. Parameter sind hierbei:
 - Haltezeiten: Es werden Verkehrshaltezeiten, d. h. dem Fahrgastwechsel dienende Haltestellenaufenthalte (minimale Haltezeiten und Sollhaltezeiten, korrespondierende Haltezeitreserven) abgebildet. Darüber hinaus werden auch Be-

The demand for transport in metropolitan areas is increasing. At the same time, operators are also placing high demands on both capacity and the quality of operations. Communications-Based Train Control systems (CBTC) offer the possibility of coming a big step closer to achieving these goals. At the same time, the foundations are also being laid for a higher grade of train automation in the future. A railway operations study has shown the positive influence high-performance automatic train control systems can have on public transport with a high capacity and level of service.

1 The fundamentals of railway operations studies

In order for a network to be considered in railroad operations studies, various data must first be collected for analysis. The basic data is essential [3]:

Infrastructure data: the infrastructure is designed and managed using a graphics editor. The essential features are mapped as a node-edge model. (This also involves node-valued graphs [1].) A node is set at each point where an infrastructure attribute changes.

The required data includes:

- track topology data, such as switches, crossings and track ends
- train protection system data, such as routes, signals, the specifics of the used train protection systems, the location and length of the track vacancy detection sections, and the technical response times (switch turnaround times, route formation times, and other details such as the partial release of routes)
- the specifications of the permissible and possible vehicle driving modes, such as the gradient profile (inclines and declines) and permissible speeds
- data that influences operations, such as stopping positions and platform working lengths
- reference and measurement points

Timetable and operating data: various pieces of information are entered into the simulation model to achieve a realistic representation of the operations:

- Target Timetable data: the data includes the target timetable's basic data from the train's break-in points into the network section under consideration. The parameters include:
 - the stopping times: including the dwell times at stations, i.e. stops used for passenger exchange (the minimum and target dwell times and the corresponding dwell time reserves) are recorded. In addition, operating stopping times are also mapped. These are not directly used for passenger exchange. Examples include periods of time that have to

triebshaltezeiten abgebildet. Diese dienen nicht unmittelbar dem Fahrgastwechsel. Ein Beispiel sind zu berücksichtigende Zeitanteile für das Kehren von Fahrzeugen an den Endhaltestellen (Wendezüge), das Kuppeln und Trennen von Zügen (Flügelzugkonzepte) sowie die Abwicklung geplanter Rangierfahrten.

- Fahrzeiten mit Abfahrts- und Ankunftszeiten, Sollfahrzeiten und (Regel-)Zuschlägen auf die Fahrzeit zur Kompensation möglicher Störungen im Betriebsablauf
- Weitere Zeitanteile, welche zur Beschreibung von Umstiegen von Fahrgästen erforderlich werden.
- Daten des Istbetriebsgeschehens: Um das reale Betriebsgeschehen abzubilden, werden einbrechende Züge mit einer Verspätung beaufschlagt. Die wird repräsentiert durch eine Verspätungsfunktion und sollte einer möglichst realen Verspätungsverteilung an dieser Stelle entsprechen. Über ihren Laufweg können darüber hinaus Primärverspätungen (verlängerte technische Fahrzeit, verlängerte Haltezeit) induziert werden, welche ebenfalls durch Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Zusätzlich sollten auch für die Haltestellen im betrachteten Netzausschnitt Verspätungsverteilungen vorliegen, damit diese später mit den Simulationsergebnissen verglichen werden können.

Fahrzeugdaten: Für die Fahrzeuge werden die technischen Daten aller auftretenden Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen verwaltet. Konkret betrifft dies von den Fahrzeugherstellern vorgegebene (und im CBTC-Fahrzeugrechner projektierte) garantierte Bremsverzögerungen sowie das üblicherweise im Betrieb realisierte Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge, Laufwiderstandsdaten sowie die Zuglänge.

2 Betriebliches Szenario (Topologie der Kehranlage)

Das der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchung zugrunde liegende betriebliche Szenario ist ein Stadtbahnsystem. Hierbei brechen die Stadtbahnfahrzeuge von einer Strecke im öffentlichen Straßenraum (besonderer Bahnkörper nach BOStrab) in einen Tunnelabschnitt ein. Der Betrieb des Fahrens auf Sicht ist gekennzeichnet durch vielfältige Störeinflüsse – insbesondere an Lichtsignalanlagen geregelten Verkehrsknoten. Trotz einer weitreichenden Priorisierung des öffentlichen Personennahverkehrs kommt es durch Wechselwirkungen mit dem Straßenverkehr zu Verspätungen. Diese wirken als Einbruchsverspätungen (s. o.) in der Tunnelstrecke. Beim Eintritt in den Tunnelbereich erfolgt ein Wechsel vom „Fahren auf Sicht“ in ein „Fahren auf Zugsicherung“. Am Ende des Tunnelabschnittes befindet sich eine Wendeanlage. Hier wird die Ausrüstung der Tunnelstrecke mit einem CBTC betrachtet. Damit besteht die Möglichkeit, Kapazitätsreserven durch den Übergang vom Fahren im festen Raumabstand in kürzere Blöcke oder sogar in den „Moving Block“ zu erschließen. Wird die zusätzliche Kapazität nicht für zusätzliche Leistungen genutzt, verringern die höheren Pufferzeiten die Übertragung von (Einbruchs-)verspätungen auf andere Leistungen und steigern die erzielbare Betriebsqualität. Ebenso denkbar – hier aber nicht betrachtet – ist, die zusätzliche Kapazität zur Mehrung des Angebots bei Erhalt der Betriebsqualität zu nutzen.

Gleichfalls ist die Kehr- und Wendestrategie ein Ansatzpunkt für weitere Optimierungen [4]. Bei halb automatisch betriebenen Strecken kann eine fahrerlose Kehrfahrt betrieblich sinnvoll sein, da sie die technischen Wendezeiten verkürzt. Außerdem erhöht die fahrerlose Kehre den Komfort für den Fahrer (beispielsweise durch Witterungsschutz). Der Ablauf der fahrerlosen Kehrfahrt im

be considered for turning vehicles around at terminal stations, as well as coupling and separating trains and the performance of any planned shunting movements.

- Train running times with departure and arrival times, target running times and (standard) allowances to the running time in order to compensate for any possible disruptions in the operating sequence
- Any additional time components that are required to describe passenger transfers.
- Data on the existing operating situation: a delay is applied to breaking-in trains in order to depict the real operating situation. This is represented by a delay function and should correspond to a delay distribution that is as real as possible at this point. Furthermore, primary delays (an extended technical travel time, extended stopping time) that are also described by distribution functions can occur during the train's run through the network. In addition, delay distributions should also be available for the stops within the considered network section so that they can subsequently be compared with the simulation results.

Vehicle data: the technical data from all possible vehicles and vehicle combinations is managed for the vehicles. This specifically concerns the braking curves guaranteed by the vehicle manufacturers (which are configured in the CBTC onboard unit), the acceleration behaviour of the vehicles usually realised in operations, the running resistance data and the train length.

2 The operating scenario (the topology of the reversing facility)

The operating scenario that the railway operations study in this article is based on is a light rail system. There, the light rail vehicles break into a tunnel section from a line in the public road space. The „driving on sight“ operations are characterised by a variety of disruptive influences, especially at intersections controlled by traffic light controllers. Despite extensive prioritisation of the local public transport, interactions with road traffic cause delays. These have an impact as break-in delays (see above) in the tunnel section. There is a transition from „driving on sight“ to „driving on train protection“ upon entering the tunnel section. There is a reversing facility at the end of the tunnel section.

The installation of a CBTC in the tunnel section is under consideration here. This would make it possible to tap capacity reserves by transitioning from driving in fixed block train spacing to shorter train intervals or even to „moving block“ train operations. If the additional capacity is not used for additional train runs, the higher buffer times can reduce the transfer of (break-in) delays to other train runs and increase the achievable quality of the service. Equally conceivable, but not considered here, is the use of the additional capacity to add more train runs per hour while maintaining an equal quality of service.

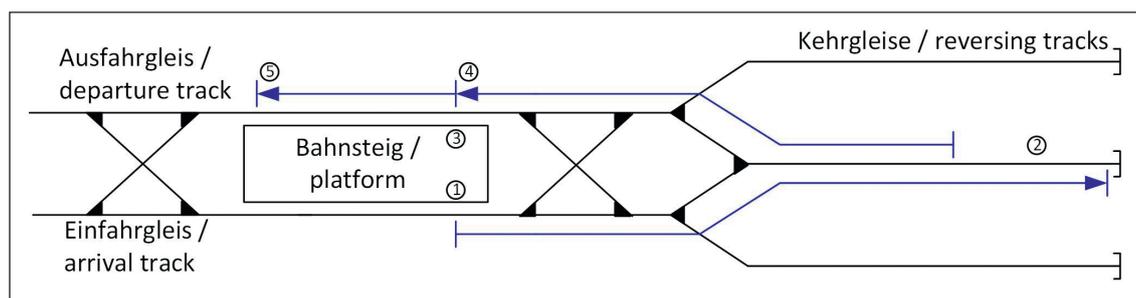
Likewise, the reversing and turning strategy is a starting point for further optimisation [4]. On semi-automated lines, driverless reversal can make sense from an operating point of view, because it reduces technical turning times. In addition, driverless reversal increases driver comfort (for example, by providing protection from the weather). The driverless reversal sequence in semi-automatic train operations is shown below for an operation with platform screen doors [5]. The driver leaves the vehicle during the described train reversal procedure. If the driver leaves the vehicle on entry and another driver takes the vehicle

Bild 1: Schematischer Ablauf einer Kehrfahrt

Fig. 1: Schematic sequence of a train reversal

Quelle / Source: eigene

Darstellung / own illustration



halbautomatischen Betrieb ist nachfolgend für einen Haltestellenbetrieb mit Bahnsteigtüren dargestellt [5]. Im geschilderten Ablauf verlässt der Fahrer bei der Kehrfahrt das Fahrzeug. Steigt der Fahrer bei Einfahrt aus und übernimmt ein anderer Fahrer das Fahrzeug bei Ausfahrt aus der Kehranlage, müsste dieser Ablauf (vgl. Bild 1) entsprechend modifiziert werden:

- Aus der Zuglenkung heraus wird die Sicherung des Fahrweges aus der Station in die Kehranlage angestoßen.
- Nach erfolgreicher Sicherung des Fahrweges erhält der Fahrer auf der Führerstandsanzeige eine Anforderung zum Start der fahrerlosen Kehrfahrt.
- Der Fahrer verlässt das Fahrzeug.
- Der Fahrer erteilt einen Abfahrtraum für den Zug zur Einfahrt in die Kehranlage durch Betätigung beispielsweise eines Schüsselschalters am Bahnsteigende (Ziffer 1). Durch den baulichen Abschluss mit Bahnsteigtüren muss nicht mit Hindernissen in der Kehranlage gerechnet werden.
- Das Fahrzeug fährt selbsttätig in die Kehranlage ein und kommt im gewünschten Gleis zum Stillstand.
- Der Zug rüstet automatisch den führenden Führerstand ab und rüstet den Führerstand auf der anderen Fahrzeugseite für die Fahrt aus der Kehranlage auf (Ziffer 2).
- Von der Zuglenkung wird die Einstellung des Fahrweges für die Ausfahrt aus der Kehranlage und die Einfahrt in die Station beim Stellwerk angestoßen und von diesem technisch gesichert.
- Die Streckeneinrichtung erteilt nach erfolgreicher Fahrwegesicherung einen Abfahrtraum für den Zug zur Ausfahrt aus der Kehranlage in das Stationsgleis (Ziffer 3). Das Fahrzeug verlässt die Kehranlage (Ziffer 4) und fährt selbsttätig bis zum Haltepunkt am Bahnsteigende des Stationsgleises (Ziffer 5). Durch den baulichen Abschluss mit Bahnsteigtüren muss nicht mit Hindernissen in der Kehranlage und im Stationsgleis gerechnet werden.
- Der Fahrer steigt durch eine Tür in den Führerstand ein und erteilt für die Zug- bzw. Bahnsteigtüren eine Türfreigabe. Er überwacht den Fahrgastwechsel. Ist der Fahrgastwechsel erfolgreich abgeschlossen, startet er die Zugfahrt zur nächsten Station.

3 Systemtechnische Umsetzung eines CBTC-Systems

Grundlage des angestrebten betrieblichen Szenarios ist die Umsetzung eines CBTC-Systems. Dieses automatische Zugbeeinflussungssystem, wie auch andere, besteht aus fahrzeug- und streckenseitigen Komponenten. Die grundlegende Architektur ist in Bild 2 dargestellt:

- Automatic Train Control (ATC): Dieser Begriff bezeichnet das technische System, welches einer automatisierten Betriebsführung dient, also sowohl eine sichere Fahrweise der Fahrzeuge erzwingt, als auch den Betrieb steuert. Ein ATC umfasst zwin-

over upon exiting the reversing track, this sequence (cf. fig. 1) would have to be modified accordingly:

- the automatic train control system triggers route protection for the track from the station to the reversing track.
- the driver receives a request on the driver's cab display to start the driverless reversal operation, once the route from the station to the reversing facility has been successfully protected.
- the driver leaves the vehicle.
- the driver issues a departure order for the train to enter the reversing facility by actuating, for example, a key switch at the end of the platform (number 1 in fig. 1). The platform screen doors mean that no obstacles are to be expected in the reversing facility.
- the vehicle enters the reversing facility automatically and comes to a halt on the desired track.
- the train automatically disengages the leading driver's cab and activates the cab at the other end of the vehicle for the journey out of the reversing facility (number 2 in fig. 1).
- the automatic train control system triggers the route setting for the exit from the reversing facility and the entry into the station at the interlocking. The interlocking provides the technical protection of the track by setting a proper route.
- once the track has been successfully protected, the trackside equipment issues a departure order for the train to leave the reversing facility and enter the station track (number 3 in fig. 1). The vehicle leaves the reversing facility (number 4 in fig. 1) and automatically runs to the stopping point at the end of the station platform (number 5 in fig. 1). Due to the available platform screen doors, there are no obstacles to be expected in either the reversing facility or on the station track.
- the driver enters the driver's cab through a door and issues a door release command for the train and platform screen doors. The driver monitors the passenger exchange. Once the passenger exchange has been completed successfully, the driver starts the train journey to the next station.

3 The technical implementation of a CBTC system

The basis of the intended operating scenario involves the implementation of a CBTC system. This automatic train control system, as well as others, consists of on-board and trackside components. The basic architecture is shown in fig. 2:

- Automatic Train Control (ATC): this term refers to the technical system that controls automatic train operations, i.e. both enforces a safe driving style in the vehicles and controls their operations. An ATC necessarily includes Automatic Train Protection (ATP) and, depending on the level of automation, may also include additional functional modules such as Automatic Train Operation (ATO) and / or Automat-

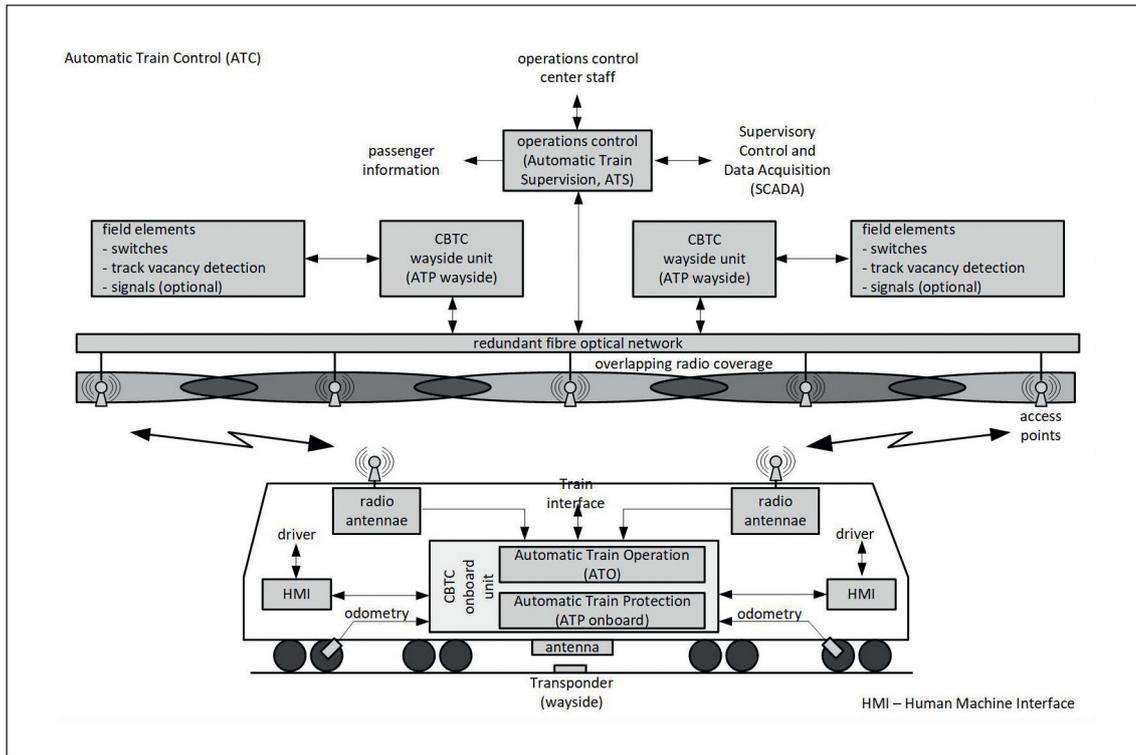


Bild 2: Grobe Systemarchitektur von CBTC-Systemen
 Fig. 2: System architecture of CBTC systems Quelle / Source: [5]

gend Automatic Train Protection (ATP) und kann in Abhängigkeit der Automatisierungsgrade zusätzliche Funktionsbausteine wie Automatic Train Operation (ATO) und /oder Automatic Train Supervision (ATS) umfassen [6]. In Bild 2 wird dieser umfassende Begriff durch die äußere Box im Schaubild dargestellt.

- Automatic Train Protection (ATP): Teilsystem des ATC-Gesamtsystems, welches den signaltechnisch sicheren Schutz vor Kollisionen, Entgleisungen und anderen Gefährdungen sicherstellt. Wesentliche Funktionen sind hierbei die Sicherung der Fahrwege, die Ortung der Fahrzeuge sowie die Abstandsregelung. Anteile dieses Funktionskomplexes befinden sich sowohl an der Infrastruktur (ATP wayside) als auch auf dem Fahrzeug (ATP onboard). Basiert die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Strecke auf drahtloser Kommunikation (Funk), spricht man in der Regel von einem CBTC.
- Automatic Train Operation (ATO): Teilsystem des ATC-Gesamtsystems, welches üblicherweise vom Fahrer ausgeführte Tätigkeiten übernimmt (unter anderem Geschwindigkeitsregelung, Zielbremsung im Haltestellenbereich und Türsteuerung in den Stationsbereichen). Für eine optimale Betriebsabwicklung empfängt dieses fahrzeugseitige Teilsystem streckenseitige Vorgaben aus dem Teilsystem ATS [6].
- Automatic Train Supervision (ATS): Teilsystem des ATC-Gesamtsystems, welches die Züge überwacht und gegebenenfalls Vorgaben an die ATO-Komponente gibt, sodass der Fahrplan eingehalten wird. Im Falle schwerwiegender Störungen im Betriebsablauf wird die optimale Dispositionsstrategie ermittelt und durch Vorgabe angepasster Führungsgrößen an die Fahrzeuge im Betrieb umgesetzt [6].

Die technische Abwicklung einer fahrerlosen Kehrfahrt setzt das reibungslose Zusammenwirken der einzelnen Systemkomponenten im Systemkontext voraus. Da in diesem Beitrag die betrieblichen Aspekte im Vordergrund stehen, sollen die – auch herstellereinspezifisch stark unterschiedlichen – technischen Implementierungsdetails hier nicht näher ausgeführt werden.

ic Train Supervision (ATS) [6]. This comprehensive concept is represented by the outer box in the diagram in fig. 2.

- Automatic Train Protection (ATP): a subsystem of the overall ATC system that ensures safe protection against collisions, derailments and other hazards. The main functions here involve protecting routes, locating vehicles, and controlling the distances between them. Parts of this functional complex are located both on the infrastructure (ATP trackside) and on the vehicle (ATP onboard). If data transmission between the vehicle and the track is based on wireless communication (radio), this is usually referred to as CBTC.
- Automatic Train Operation (ATO): a subsystem of the overall ATC system that usually assumes the activities performed by the driver (including speed control, target braking in station areas and door control in station areas). This on-board subsystem receives trackside instructions from the ATS subsystem to ensure optimal operations [6].
- Automatic Train Supervision (ATS): a subsystem of the overall ATC system that monitors the trains and, if necessary, gives the ATO component instructions so that the timetable is adhered to. In the event of any serious disruptions in the operating process, an optimal dispatching strategy is determined and implemented by prescribing adapted control variables for the vehicles in operation [6].

The technical execution of a driverless reversal requires smooth interaction between the individual system components in the system context. Given that this article focuses on the operating aspects, the details of the technical implementation (which also vary greatly between the systems solutions of different manufacturers) will not be discussed here in detail.

4 Operating effects

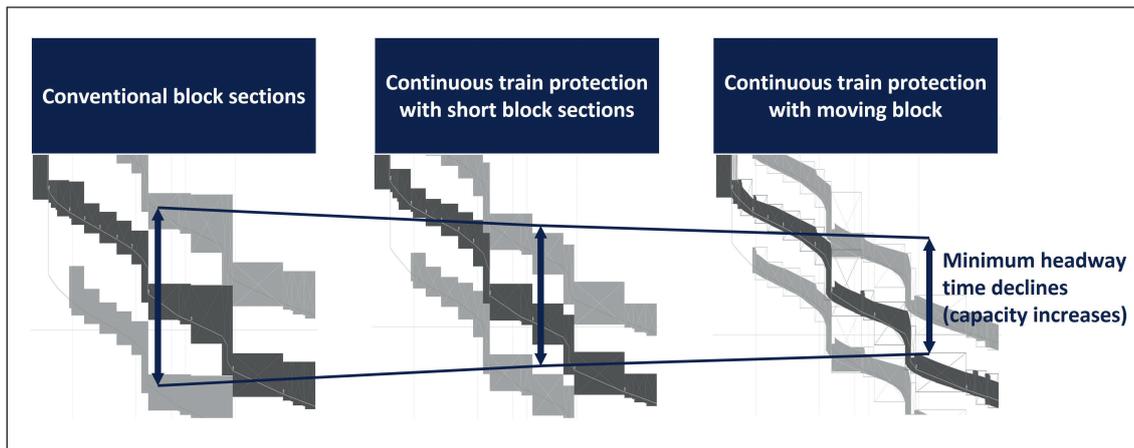
In order to quantify the operating effects, a comparison has been made between scenarios with and without CBTC, while look-

Bild 3: Mindestzugfolgezeiten (MZFZ)

Fig. 3: Minimum headway times (MHT)

Quelle / Source: eigene

Darstellung / own illustration



4 Betrieblichen Effekte

Zur Quantifizierung der betrieblichen Effekte wird ein Vergleich zwischen einem Szenario mit und ohne CBTC durchgeführt, wobei zwei Kenngrößen betrachtet werden: Die Mindestzugfolgezeit (MZFZ) und die Betriebsqualität. Die MZFZ entspricht der technisch minimal möglichen Zugfolgezeit, welche mittels Sperrzeiten ermittelt werden kann und direkte Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit (als Kapazität bei angestrebtem Qualitätsniveau) hat. Die Betriebsqualität kann unter anderem durch Pünktlichkeitswahrscheinlichkeiten und mittlere Verspätungswerte ausgedrückt werden, welche sich durch eine Betriebssimulation ergeben.

4.1 Mindestzugfolgezeiten

Die Sperrzeit beschreibt die exklusive Belegung eines Infrastrukturelements (z. B. Blockabschnitte, Weichen) durch eine Zugfahrt. Wie in Bild 3 dargestellt, kann die MZFZ ermittelt werden, indem Sperrzeiten von aufeinanderfolgenden Zugfahrten so nah wie möglich aneinandergeschoben werden. Die MZFZ stellt den kürzesten Zeitabstand dar, in welchem die Zugfahrten unbehindert folgen können. Dieses Prinzip ist sowohl für die Strecke, insbesondere aber auch für Knotenbereiche tauglich.

ing at two parameters: the minimum headway time (MHT) and the operating quality. The MHT corresponds to the technically minimum possible headway time, which can be determined by means of blocking times and has a direct impact on performance (as capacity at the targeted quality of service). The operating quality can be expressed by, amongst other things, the punctuality probabilities and average delay values that result from the simulated operations.

4.1 Minimum headway times

The blocking time describes the exclusive occupancy of an infrastructure element (e.g. block sections, switches) by a train movement. As shown in fig. 3, the MHT can be determined by moving the blocking times of successive train runs as close to each other as possible. The MHT represents the shortest time interval, within which train runs can follow each other unimpeded. This principle is suitable for tracks, but especially for junction areas.

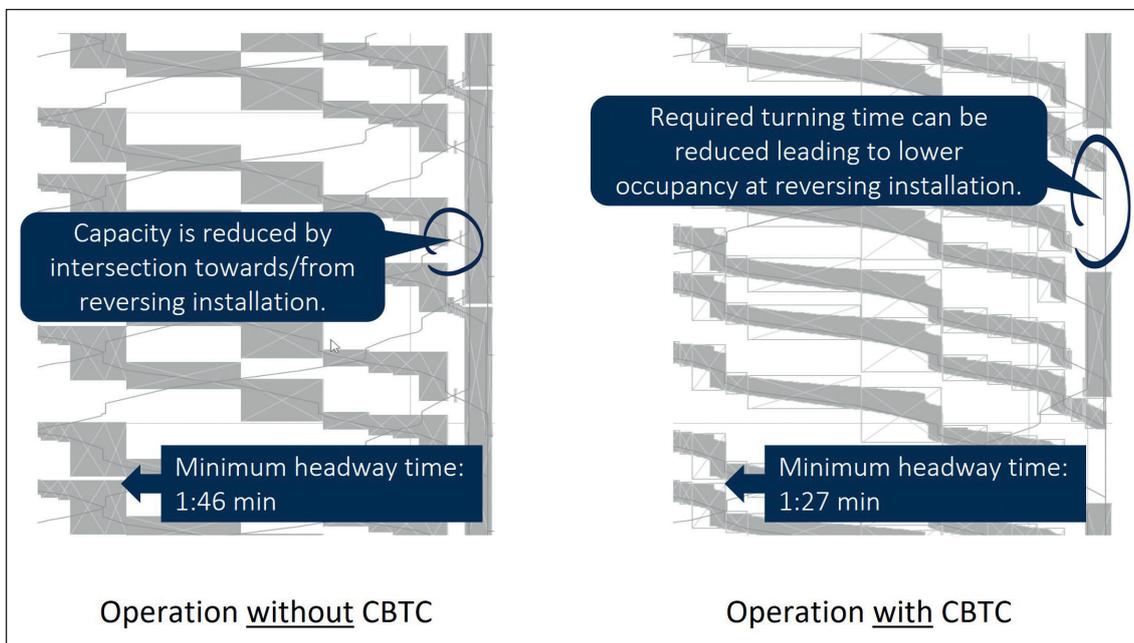
In a CBTC system, trains can run in a moving block train spacing, which minimises the train intervals. The update of the blocking time theory, as presented for example in [2], also allows the precise description of the capacity requirements for

Bild 4: Vergleich der MZFZ bei Betrieb ohne/mit CBTC

Fig. 4: Comparison of MHT for operation without / with CBTC

Quelle / Source: eigene

Darstellung / own illustration



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für quattron management consulting GmbH /
 VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

	Betrieb ohne CBTC	Betrieb mit CBTC
Blockteilung	Konventionell	Hochleistungsblock mit Blockabschnittslängen von 50 – 100 m
ATP System	Punkt förmige Zugbeeinflussung	Kontinuierliche Zugbeeinflussung (CBTC)
Untersuchungsraum		
Strecke / Fahrzeit	ungefähr 5 km sowie ungefähr 12 min	
Anzahl Halte- / Betriebsstellen	9	
Höchstgeschwindigkeit	70 km/h	
Fahrzeit- / Haltezeitreserven	Keine, außer in Wendeanlage	
Anzahl Züge pro Stunde pro Richtung	24	
Durchschnittlich geplante Wendezeit	3 min	
Wenderegime	konventionell (ohne Bahnsteigtüren)	Betrieb mit Bahnsteigtüren
Mindestwendezeit	1,82 min	0,33 min
Verspätungswerte		
<i>Verspätungen beim Einbruch:</i>		
Verspätungswahrscheinlichkeit	25 %	
Mittlere Verspätung bei Verspätung	2,00 min	
<i>Verspätungen in Halten:</i>		
Verspätungswahrscheinlichkeit	15 %	
Mittlere Verspätung bei Verspätung	0,25 min	

Tab. 1: Rahmenbedingungen

	Operations without CBTC	Operations with CBTC
Block separation	Conventional	High-performance block with block section lengths of 50 - 100 m
ATP System	Intermittent train control system	Continuous bidirectional train control system (CBTC)
Area of study		
Route / Travel time	approximately 5 km and 12 min	
Number of stops	9	
Maximum speed	70 kph	
Travel time / stop time reserves	None, except for at the reversing facility	
Number of trains per hour per direction	24	
Average planned reversal time	3 min	
Turning regime	Conventional (without platform screen doors)	Operations with platform screen doors
Minimum time for reversal	1.82 min	0.33 min
Delay values		
<i>Break-in delays:</i>		
Delay probability	25 %	
Average delay in case of delay	2.00 min	
<i>Delays at stations</i>		
Delay probability	15 %	
Average delay in case of delay	0.25 min	

Tab. 1: The general conditions

In einem CBTC-System kann der Zug im wandernden Raumabstand (Moving Block) fahren, wodurch die Zugfolgeabstände minimiert sind. Die Fortschreibung der Sperrzeitentheorie, wie sie beispielsweise in [2] dargestellt ist, erlaubt, auch den Kapazitätsbedarf von CBTC-Anwendungen präzise zu beschreiben. In Bild 3 ist beispielhaft zu sehen, dass die MZfZ durch kürzere Blockabschnitte im maßgeblichen Bereich (hier der Halt) reduziert werden kann. Im Folgenden werden zwei Szenarien eines Stadtbahnsystems einander gegenübergestellt: im Betrieb ohne und mit CBTC. Während das Szenario ohne CBTC einen konventionellen Betrieb beschreibt, bezieht sich das Szenario mit CBTC auf reduzierte MZfZ sowie eine automatische Kehrfahrt mit Bahnsteigtüren (wie in Kapitel 2 erläutert). Die geplante Wendezeit ist abhängig vom Fahrplan und von der Umlaufgestaltung und beträgt durchschnittlich drei Minuten. Der Fahrplan inklusive der Abfahrtszeiten je Betriebsstelle ist für beide Szenarien identisch. Während die Mindestwendezeit für den Betrieb ohne CBTC bei beinahe zwei Minuten liegt, wird eine unter Ausnutzung der automatischen Kehre auf 20 Sekunden verkürzte

CBTC applications. Fig. 3 shows an example of how the MHT can be reduced by shorter block sections in the relevant area (in this case the stop).

Two light rail system scenarios have been compared in the following: operations with and without CBTC. While the scenario without CBTC describes conventional operations, the scenario with CBTC refers to reduced MHT as well as automatic reversal with platform screen doors (as explained in section 2). The planned time for the reversal operations depends on the timetable and the planning of the train rotations during the day; on average, it takes three minutes. The timetable, including the departure times for each operating station, is identical for both scenarios. While the minimum reversal time without CBTC is almost two minutes, a reduced minimum reversal time of 20 seconds is assumed for operations with CBTC by taking advantage of automatic reversal. Fig. 4 provides an example of what the blocking time staircases look like in the scenarios for operations with and without CBTC.

Bild 5: Verspätungs-verlauf in Fahrtrichtung Wendeanlage bei Betrieb ohne / mit CBTC

Fig. 5: Delay progression in the direction of travel to the reversing installation during operation without / with CBTC

Quelle / Source: eigene Darstellung / own illustration

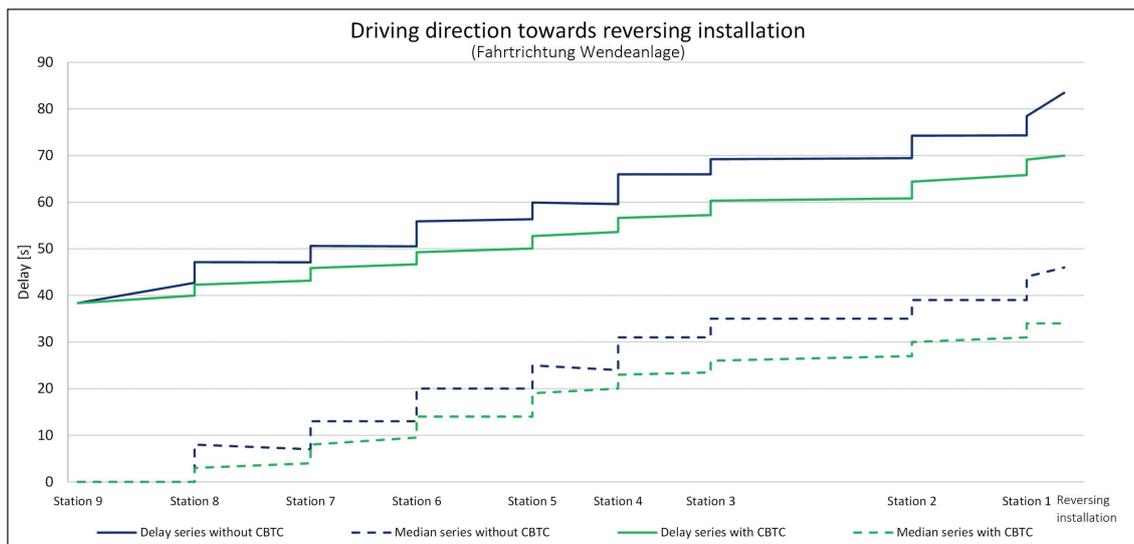
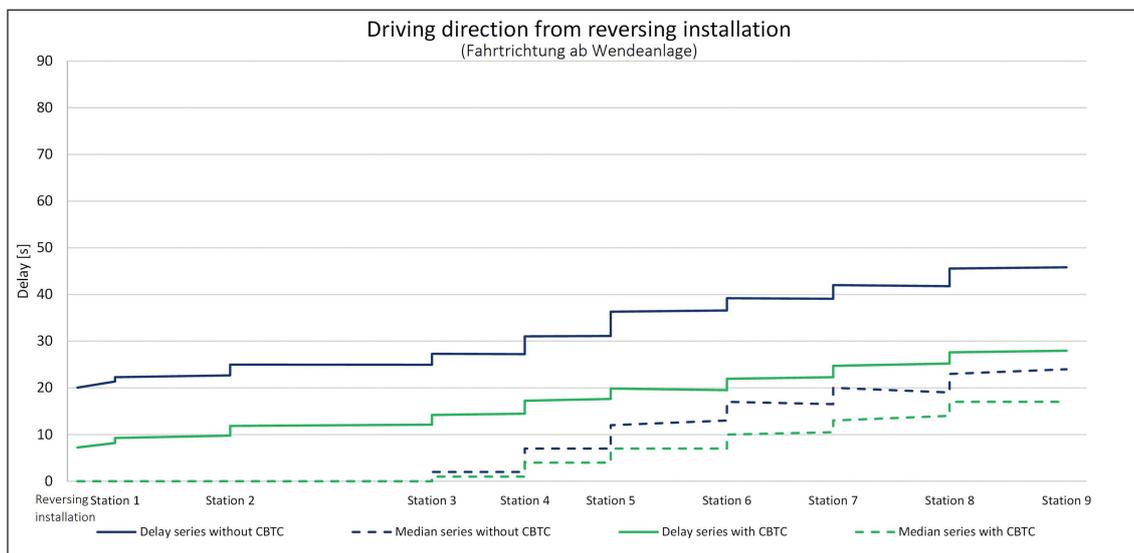


Bild 6: Verspätungs-verlauf in Fahrtrichtung ab Wendeanlage bei Betrieb ohne / mit CBTC

Fig. 6: Delay progression in the direction of travel from the reversing installation during operation without / with CBTC

Quelle / Source: eigene Darstellung / own illustration



Mindestwendezeit für den Betrieb mit CBTC angenommen. Bild 4 stellt beispielhaft dar, wie die Sperrzeitentreppen bei Betrieb ohne und mit CBTC in den Szenarien aussehen.

Die MZfZ kann durch CBTC um 18 % reduziert werden, wobei die Belegungszeit in den Halten maßgebend bleibt. Beim CBTC-Szenario wird die Geschwindigkeit bei Zufahrt auf das Ende der Fahrterlaubnis sowie bei Zufahrt auf einen Geschwindigkeitswechsel überwacht. Dadurch verlängert sich die technische Fahrzeit um mehr als 4 %, zugleich wird die Sicherheit wesentlich gesteigert. In Bezug auf die Kapazität der Gesamtanlage erweist sich nicht die Zugfolge auf der Strecke, sondern die Kreuzungsnotwendigkeit in der dreigleisigen Wendeanlage als limitierender Faktor. Zwar kann die Wendedauer durch eine fahrerlose Kehrfahrt reduziert werden, dennoch beschränken Fahrtenausschlüsse die maximale Zugzahl.

4.2 Betriebsqualität

In Tab. 1 sind die Rahmenbedingungen der beiden simulierten Szenarien aufgelistet.

Im Sinne des Monte-Carlo-Verfahrens wird je Szenario eine ausreichende Menge von Simulationsläufen durchgeführt, sodass hieraus statistisch belastbare Kennzahlen resultieren. Jeder Simulationslauf erhält als Input eine Liste zufällig generierter primä-

The MHT can be reduced by 18 % with CBTC, whereby the occupancy time at the stops remains the limiting factor. In the CBTC scenario, the speed is monitored during the approach to the end of the movement authority as well as when approaching a speed change (limit of authority). This increases the technical travel time by more than 4 %, while at the same time significantly improving safety. In terms of the capacity of the overall system, it is not the train sequence on the line that proves to be the limiting factor, but rather the need for crossings at the three-track reversing facility. Although the turnaround time can be reduced using a driverless reversing system, route conflicts still limit the maximum number of trains.

4.2 Quality of service

Tab. 1 lists the general conditions of the two simulated scenarios. In terms of the Monte Carlo method, a sufficiently large number of simulation runs have been executed for each scenario so that statistically robust key figures result. Each simulation run receives a list of randomly generated primary delay data that is both train and depot specific and results from the delay values described in tab. 1.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für quattron management consulting GmbH / VIA Consulting & Development GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Kennwerte der Betriebsqualität	Betrieb ohne CBTC	Betrieb mit CBTC
3-Minuten-Pünktlichkeit	93,5 %	95,4 %
Mittlere Ankunftsverspätung	46,2 s	36,0 s

Tab. 2: Simulationsergebnisse

Quality of service parameters	Operations without CBTC	Operations with CBTC
3-minute punctuality	93.5%	95.4%
Average arrival delay	46.2 s	36.0 s

Tab. 2: The simulation results

rer Verspätungsdaten, welche zug- und betriebsstellenspezifisch sind und sich aus den in der Tab. 1 beschriebenen Verspätungswerten ergeben.

Die Betriebsqualität kann mittels der in Tab. 2 betrachteten Kennwerte sowie durch die in Bild 5 und 6 dargestellten Verspätungsverläufe beschrieben werden. Die 3-Minuten-Pünktlichkeit beschreibt, wie häufig ein Zug weniger als drei Minuten zu spät einen Messquerschnitt erreicht. Die mittlere Ankunftsverspätung beschreibt die durchschnittliche Ankunftsverspätung eines Zuges über alle Halte. Die beiden Kennwerte sind Durchschnittswerte über alle Simulationsläufe und über alle Zugfahrten.

In Tab. 2 ist zu sehen, dass das Szenario mit CBTC hinsichtlich der beiden Kennwerte besser abschneidet als dasjenige ohne CBTC. Dies wird auch mittels der Verspätungsverläufe je Fahrtrichtung in Bild 5 und 6 bestätigt. In beiden Fahrtrichtungen wird stets mehr Verspätung aufgebaut, da keine Haltezeit- oder Fahrzeitreserven vorliegen. Mit CBTC ist der Verspätungszuwachs jedoch weniger stark als ohne CBTC aufgrund der verkürzten Blockabschnitte und der sich daraus ergebenden geringeren Sekundärverspätungen. Die Ergebnisse zeigen für die beiden verschiedenen Fahrtrichtungen einen gravierenden Unterschied auf. Die Ankunftsverspätung in der Wendeanlage (Bild 5) ist sehr viel höher als die Abfahrtsverspätung in der Wendeanlage (Bild 6). Dies liegt daran, dass viel Verspätung in der Wendeanlage abgebaut werden kann. Während in Richtung Wendeanlage nur die verkürzten Blockabschnitte des CBTC-Szenarios als Betriebsqualitätsgewinn genutzt werden können, stellt die verkürzte minimale Wendezeit durch die automatische Kehrfahrt für die Gegenrichtung einen zusätzlichen positiven Effekt dar. Ein Vergleich der Abfahrtsverspätung in Halt 9 (Richtung Wendeanlage) und der Ankunftsverspätung in Halt 9 (Richtung ab Wendeanlage) zeigt, dass insgesamt mit CBTC sogar Verspätung abgebaut wird. Ohne CBTC hingegen ist, trotz Verspätungsabbau in der Wendeanlage, ein Verspätungszuwachs festzustellen. Die verlängerten Fahrzeiten, welche sich aufgrund von konservativeren Bremskurvenscharen mit CBTC ergeben, können auf jeden Fall durch den Kapazitätsgewinn mittels der verkürzten Blockabschnitte und der verkürzten Wendezeit überkompensiert werden.

5 Schlussfolgerung

Das in diesem Beitrag diskutierte Beispiel zeigt, dass die Automatisierung des städtischen Nahverkehrs einen Beitrag zu einer robusten Betriebsabwicklung leisten kann. Der Übergang zu einem Fahren im wandernden Raumabstand hilft, Einbruchsverspätungen abzubauen. Weiterhin können durch entfallende Zeitanteile der Kehrfahrten (Wechsel des Führerstandes durch den Fahrer) weitere Pünktlichkeitsgewinne realisiert werden.

Kapazitätsoptimierung ist aber stets systemisch zu denken. So haben auch Fahrzeugeigenschaften (Anzahl und Breite der Türen, Innenraumgestaltung) oder die bauliche Ausprägung der Sta-

The quality of service can be described using the characteristic values considered in tab. 2 and the delay curves shown in fig. 5 and 6. The 3-minute punctuality describes how often a train reaches a measurement point less than three minutes late. The average arrival delay describes the average arrival delay of a train over all the stops. Both characteristic values are average values over all the simulation runs and over all the train runs.

Tab. 2 shows that the CBTC scenario performs better than the one without CBTC from the point of view of both characteristic values. This is also confirmed by the delay curves per direction of travel in fig. 5 and 6. Delays increase in both directions of travel, because no time reserves exist. However, the delay increase is less grave with CBTC than without it due to the shorter block sections leading to lower secondary delays. The results show a serious difference between the two different directions of travel. The arrival delay at the reversing facility (fig. 5) is much higher than the departure delay from the reversing facility (fig. 6). This is due to the fact that most of the delay can be reduced in the turning area. While only the shortened block sections of the CBTC scenario in the direction of the reversing facility can be exploited to achieve a gain in the quality of service, the reduced minimum train reversal time due to the automatic reversal operations represents an additional positive effect for the opposite direction of travel. A comparison of the departure delay at station 9 (travelling towards the reversing facility) and the arrival delay at station 9 (travelling from reversing facility) shows that even the total delay can be reduced with CBTC. Without CBTC, however, the total delay increases even with delay reduction at the reversing facility. The longer travel times resulting from more conservative braking curves with CBTC can in any case be more than compensated for by the capacity gained due to the shortened block sections and the reduced train reversal times at the reversing facility.

5 Conclusion

The example discussed in this article shows that the automation of urban transit can contribute to robust operations. The transition to train separation in moving block is helping to reduce break-in delays. Furthermore, additional punctuality gains can be realised by eliminating the time share of changing the driver's cab by the driver.

However, capacity optimisation always has to be thought of within the context of the entire public transport system. Vehicle characteristics (the numbers and width of the doors, interior design) or the structural design of the stations also influence stopping times, which in turn affect both punctuality and capacity. Platform width or the arrangement of the entrances and exits influence the passenger changeover time, which can often be decisive, as in this example. Platform screen doors can have a dis-

tionen einen Einfluss auf die Haltezeiten, welche wiederum sowohl Pünktlichkeit als auch Kapazität beeinflussen. Bahnsteigbreite oder Anordnung der Ein- und Ausgänge beeinflussen die Fahrgastwechselzeit, welche wie in diesem Beispiel oftmals maßgeblich ist. Mit Bahnsteigtüren lässt sich eine disziplinierende Wirkung erzielen, es kann aber auch das Gegenteil auftreten, wenn Türstörungen und -blockierungen zu verlängerten Haltezeiten führen. Hier gilt es durch entsprechende Fahrgastinformation, auch über die Auslastung der Wagen, positiv einzuwirken.

Es gilt zu prüfen, ob mit der vorhandenen baulichen Ausprägung der Kehranlage eine weitere Ausweitung der Kapazität (Anzahl Züge pro Fahrtrichtung und Stunde) der Strecke realisiert werden kann. Ansonsten sind hier weitergehende Optimierungen der Kehrstrategie (bspw. alternierende Kurz- und Langkehre) denkbar. Hierfür können mit den Simulationswerkzeugen genaue Aussagen getroffen werden. ■

disciplinary effect, but the opposite can also occur, if door disruptions and blockages lead to longer stopping times. In this case, it is important to ensure a positive effect by providing appropriate passenger information, including information about the capacity utilisation of the vehicles.

It is necessary to check whether the capacity (number of trains per direction and hour) of the line can be further expanded with the existing structural design of the reversing facility. Otherwise, further optimisation of the reversing strategy (e.g., alternating short and long reverses) is also conceivable. Precise statements can be made for this using the simulation tools. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Becker, M.; Büker, T.; Hennig, E.; Felix, K.: Sound evaluation of simulation results. In: RailNorrköping 2019 – 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA), Norrköping, 2019, S. 99-115
- [2] Büker, Th.; Graffagnino, Th.; Hennig, E.; Kuckelberg, A.: Enhancement of Blocking-time theory to represent future interlocking architectures. In: Proc. Of the 8th International Conference on Railway Operations Modeling and Analysis, Norrköping, 17.-20.6.2019
- [3] Ostermann, N.; Schlögel, A.; Oster, M; Messauer, C.: Anwendungen der Betriebssimulation, Elektrotech Informationstech (e&i) (122), 4/2005, S. 124-130
- [4] Klein, R.: Die Möglichkeit der fahrerlosen Kehrfahrt bei der Münchner U-Bahn, SIGNAL+DRAHT (101), 10/2009, S. 16-17
- [5] Schnieder, L.: Communications-Based Train Control (CBTC), 2. Auflage, Springer (Berlin) 2021
- [6] IEEE 1474.1-1999, IEEE standard for Communications-Based Train Control (CBTC) performance and functional requirements, IEEE, New York 1999

AUTOREN | AUTHORS

Dr.-Ing. Thorsten Büker

Geschäftsführer / CEO
 quattron management consulting GmbH/
 VIA Consulting & Development GmbH
 Anschrift / Address: Römerstraße 50, D-52064 Aachen
 E-Mail: th.bueker@via-con.de

PD Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder

Geschäftsführer / CEO
 ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH
 Anschrift / Address: Am Alten Bahnhof 16, D-38122 Braunschweig
 E-Mail: Lars.Schnieder@ese.de

Madeleine van Hövell, M. Sc.

Ingenieurin / Engineer
 quattron management consulting GmbH/
 VIA Consulting & Development GmbH
 Anschrift / Address: Römerstraße 50, D-52064 Aachen
 E-Mail: m.vanhoevell@via-con.de

Daniel Meurer, M. Sc.

Ingenieur / Engineer
 quattron management consulting GmbH/
 VIA Consulting & Development GmbH
 Anschrift / Address: Römerstraße 50, D-52064 Aachen
 E-Mail: d.meurer@via-con.de



PSItraffic: bereit für CBTC/ATO
**Zukunftslösung für den
 effizienten und sicheren
 Schienenverkehr**

www.psitranscom.de

PSI

Software für die Mobilität von morgen