



Abb. 4: Der CTMS-Prototyp reagiert selbstständig auf einen gemeldeten Störfall (die rot markierten Gleise wurden gesperrt); links der ursprünglich auf Basis von EVU-Anfragen erzeugte Plan; rechts der im Betrieb abgeänderte Plan

sowie an das betroffene EVU zur Information gesendet. Dabei wurde eine Gesamtverspätung von ca. 4 Minuten gegenüber dem ursprünglichen Plan erzielt.

Die Pläne werden von einem oder mehreren Optimierungsmodulen erstellt, aus deren Lösungen automatisch die am besten geeignete ausgewählt wird. In den jeweiligen Optimierungsmodulen kommen verschiedene Technologien zum Einsatz. Die fortschrittlichste und leistungsfähigste der eingesetzten Technologien ist „Deep Reinforcement Learning“ (bestärkendes Lernen), ein Teilgebiet der KI. Parallel werden mathematische Optimierung aus dem Bereich des Operations Research (OR) sowie hybride Varianten eingesetzt, bei denen Elemente aus OR und KI kombiniert werden. Sämtliche Optimierungsarten werden von DB Netz entwickelt, mit Unterstützung industrieller und akademischer Partner, darunter seit Ende 2019 InstaDeep Ltd, ein Unternehmen, das führend bei der Entwicklung von KI-basierten Entscheidungsfindungssystemen ist.

Die hochkomplexen Optimierungsprobleme des CTMS sind mit klassischen mathematischen Methoden allein nicht annähernd schnell genug zu lösen, zumindest nicht bei einer größeren Zahl von Zügen auf größeren Netzen. Daher wurden bei DSD von Beginn an neueste Methoden der KI erprobt, auf das Bahnsystem übertragen und kontinuierlich weiterentwickelt. Mit den aktuellen KI-Modellen auf Basis des Deep Reinforcement Learning wird ein lediglich linearer Anstieg des Rechenaufwandes mit der Größe des Optimierungsproblems gemessen. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die Ska-

lierbarkeit des Systems auf das Gesamtnetz. Bei konventionellen Methoden steigt der Rechenaufwand polynomial oder gar exponentiell an. Bereits bei einer Problemgröße von 35 Zügen haben die OR-Optimierer im CTMS-Prototypen mehr als die zehnfache Rechenzeit der KI-Optimierer. Mit der weiteren Skalierung vervielfacht sich der Zeitnachteil klassischer Optimierung.

Der Weg zum betrieblichen Einsatz des CTMS

Mit dem aktuellen CTMS-Prototypen hat DSD einen bedeutenden Schritt in Richtung automatisierter Planung und Betriebssteuerung gemacht. Am Beispiel eines kleinen Netzausschnitts werden grundlegende Funktionen des CTMS in mikroskopischer Simulation demonstriert. Die laufende Erweiterung des Prototyps durch DSD zielt sowohl auf erweiterte Funktionalität (inklusive der Abbildung von DSTW/ETCS-Sicherungslogiken) als auch auf größere Realitätsnähe der Fahrphysik (inklusive der Berücksichtigung von Steigungen/Gefälle und Wettereinflüssen).

Der erste betriebliche Einsatz des CTMS ist im Digitalen Knoten Stuttgart (DKS) geplant [5]. Dort soll das CTMS ab 2029 zunächst die erweiterte Stammstrecke der S-Bahn via ATO GoA 2 auf der Grundlage eines DSTW und mit ETCS Level 2 ohne Signale steuern. Anschließend wird der Steuerbereich des CTMS sukzessive ausgeweitet. Dabei kommen Regionalverkehr und Fernverkehr hinzu und zum Teil auch Güterverkehr. Parallel zum Ausbau von DSTW kann der CTMS-gesteuerte Bereich auf den gesamten DKS ausgedehnt werden.

Bereits zum Fahrplanwechsel 2025/2026 sollen für das CTMS benötigte Schnittstellen, u.a. zu ATO und dem Produktionsplansystem der Betriebszentrale, implementiert werden. Über diese wird ein „Übersetzer“ die ATO mit statischen Journey Profiles versorgen, bis das CTMS in Betrieb genommen wird. ■

QUELLEN

- [1] Biembacher, I.; Hundertmark, A.; Marsch, P.; Fiack, A.; Grell, A.; Spiegel, D.; Heimes, M.; Laux, T.: Blick in die Zukunft der Eisenbahn – Grundlagen des digitalen Bahnsystems, EK 2023, S. 116-142 (https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/2022_12_Blick%20in%20die%20Zukunft%20der%20Eisenbahn%20E2%80%93%20Grundlagen%20des%20digitalen%20Bahnsystems.pdf, 08.08.2023 um 09:15)
- [2] Schröder, J.; Gonçalves Alpoim, C.; Dickgiesser, B.; Talg, M.: Digitale S-Bahn Hamburg, El 10/2021, S. 44-47 (https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/44_47_EI_DSH_Schroeder_etal.pdf, 08.08.2023 um 09:15)
- [3] Hauswald, C.; Spiegel, D.; Kreyenberg, D.; Fiack, A.: Digitale Schiene Deutschland testet im Projekt Sensor4Rail erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb, Deine Bahn 4/2022, S. 36-43 (https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/deine-bahn_Sensors4Rail_2022-04.pdf, 08.08.2023 um 09:15)
- [4] Skowron, F.; Treydel, R.: Blöcke waren gestern – Chancen einer zugzentrischen LST, El 11/2022, S. 34-37 (https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/34_39_Skowron_Treydel_neu.pdf, 08.08.2023 um 09:20)
- [5] Beyer, M.; Blateau, V.; Bitzer, F.; Dietrich, F.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Richter, R.; Rudolph, C.; Vogel, T.: Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität, El 1/2023, S. 8-12 (<https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/202301%20Der%20Eisenbahningenieur%20DKS-Sachstand.pdf>, 08.08.2023 um 09:20)



Dr. Michael Küpper

Systementwicklung
Echtzeit-Verkehrsmanagementsystem
DB Netz AG, Berlin
michael.m.kuepper@deutschebahn.com